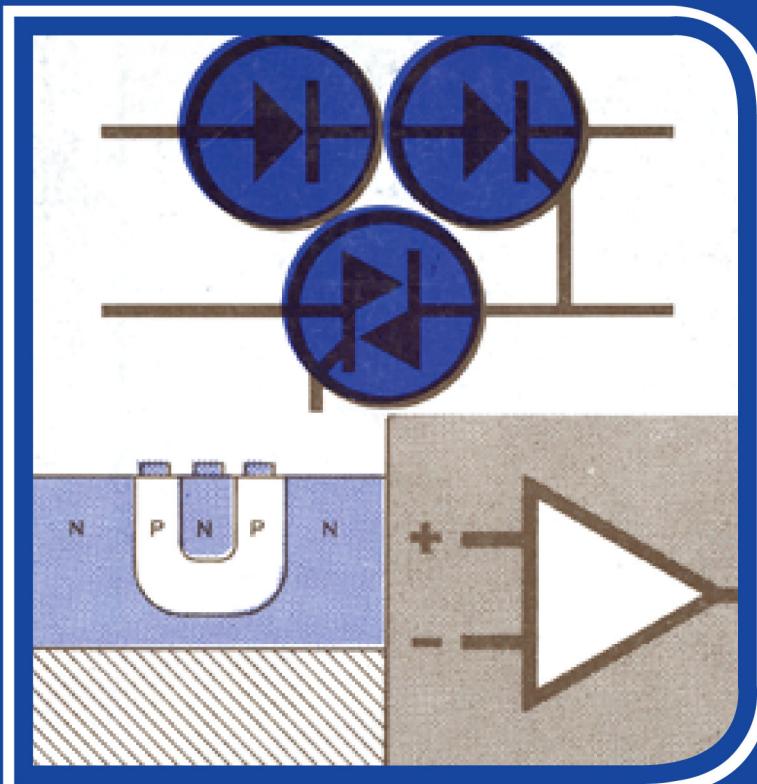




# ΓΕΝΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ

Εμμανουήλ Γ. Τσαγάκη

ΔΡ. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ





1954

ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ  
ΧΡΥΣΟΥΝ ΜΕΤΑΛΛΙΟΝ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ

Ο Ευγένιος Ευγενίδης, ο ιδρυτής και χορηγός του «Ιδρύματος Ευγενίδου», πολύ νωρίς προέβλεψε και σχημάτισε την πεποίθηση ότι η άρτια κατάρτιση των τεχνικών μας, σε συνδυασμό με την εθνική αγωγή, θα ήταν αναγκαίος και αποφασιστικός παράγων για την πρόοδο του Έθνους μας.

Την πεποίθησή του αυτή ο Ευγενίδης εκδήλωσε με τη γενναιόφρονα πράξη ευεργεσίας, να κληροδοτήσει σεβαστό ποσό για τη σύσταση Ιδρύματος, που θα είχε ως σκοπό να συμβάλλει στην τεχνική εκπαίδευση των νέων της Ελλάδας.

Έτσι, το Φεβρουάριο του 1956 συστήθηκε το «Ίδρυμα Ευγενίδου», του οποίου τη διοίκηση ανέλαβε η αδελφή του Μαρ. Σίμου, σύμφωνα με την επιθυμία του διαθέτη. Το έργο του Ιδρύματος συνεχίζει από το 1981 ο κ. Νικόλαος Βερνίκος - Ευγενίδης.

Από το 1956 έως σήμερα η συμβολή του Ιδρύματος στην τεχνική εκπαίδευση πραγματοποιείται με διάφορες δραστηριότητες. Όμως απ' αυτές η σημαντικότερη, που κρίθηκε από την αρχή ως πρώτης ανάγκης, είναι η έκδοση βιβλίων για τους μαθητές των Τεχνικών και Επαγγελματικών Σχολών και Λυκείων.

Μέχρι σήμερα, με τη συνεργασία με τα Υπουργεία Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων και Εμπορικής Ναυτιλίας, εκδόθηκαν εκατοντάδες τόμοι βιβλίων, που έχουν διατεθεί σε πολλά εκατομμύρια αντίτυπα. Τα βιβλία αυτά κάλυπταν ή καλύπτουν ανάγκες των Κατωτέρων και Μέσων Τεχνικών Σχολών του Υπ. Παιδείας, των Σχολών του Οργανισμού Απασχολήσεως Εργατικού Δυναμικού (ΟΑΕΔ), των Τεχνικών και Επαγγελματικών Λυκείων, των Τεχνικών Επαγγελματικών Σχολών και των Δημοσίων Σχολών Εμπορικού Ναυτικού.

Μοναδική φροντίδα του Ιδρύματος σ' αυτή την εκδοτική του προσπάθεια ήταν και είναι η συγγραφή και έκδοση βιβλίων ποιότητας, από όποιη δχι μόνον επιστημονική, παιδαγωγική και γλωσσική, αλλά και ως προς την εμφάνιση, ώστε το βιβλίο να αγαπηθεί από τους μαθητές.

Για την επιστημονική και παιδαγωγική αρτιότητα των βιβλίων τα κείμενα υποβάλλονται σε πολλές επεξεργασίες και βελτιώνονται πριν από κάθε νέα έκδοση συμπληρούμενα καταλλήλως.

Ιδιαίτερη σημασία απέδωσε το Ίδρυμα από την αρχή στη γλωσσική διατύπωση των βιβλίων, γιατί πιστεύει ότι και τα τεχνικά βιβλία, όταν είναι γραμμένα σε γλώσσα σωστή και ομοιόμορφη αλλά και κατάλληλη για τη στάθμη των μαθητών, μπορούν να συμβάλλουν στη γλωσσική κατάρτιση των μαθητών.

Έτσι, με απόφαση που ίσχυσε ήδη από το 1956, όλα τα βιβλία της Βιβλιοθήκης του Τεχνίτη, δηλαδή τα βιβλία για τις τότε Κατώτερες Τεχνικές Σχολές, όπως αργότερα και για τις Σχολές του ΟΑΕΔ, ήταν γραμμένα σε γλώσσα δημοτική, με βάση τη γραμματική του Τριανταφυλλίδη, ενώ όλα τα άλλα βιβλία ήταν γραμμένα στην απλή καθαρεύουσα. Σήμερα ακολουθείται η γραμματική που διδάσκεται στα σχολεία της δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης. Η γλωσσική επεξεργασία των βιβλίων ανατίθε-



ται σε φιλολόγους του Ιδρύματος και έτσι εξασφαλίζεται η ενιαία σύνταξη και ορολογία κάθε κατηγορίας βιβλίων.

Η ποιότητα του χαρτιού, το είδος των τυπογραφικών στοιχείων, τα σωστά σχήματα, η καλαίσθητη σελιδοποίηση, το εξώφυλλο και το μέγεθος του βιβλίου, περιλαμβάνονται και αυτά στις φροντίδες του Ιδρύματος και συμβάλλουν στη σωστή «λειτουργικότητα» των βιβλίων.

Το Ίδρυμα θεώρησε ότι είναι υποχρέωσή του, σύμφωνα με το πνεύμα του ιδρυτή του, να θέση στη διάθεση του Κράτους όλη αυτή την πείρα του των 20 ετών, αναλαμβάνοντας το 1978 και την έκδοση των βιβλίων για τις νέες Τεχνικές Επαγγελματικές Σχολές και τα Τεχνικά και Επαγγελματικά Λύκεια, σύμφωνα πάντοτε με τα εγκεκριμένα Αναλυτικά Προγράμματα του Π.Ι. και του ΥΠΕΠΘ.

#### ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΚΔΟΣΕΩΝ ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ

Μιχαήλ Αγγελόπουλος, ομ. καθηγητής ΕΜΠ, Πρόεδρος.

Αλέξανδρος Σταυρόπουλος, ομ. καθηγητής Πανεπιστημίου Πειραιώς, Αντιπρόεδρος.

Ιωάννης Τεγόπουλος, καθηγητής ΕΜΠ.

Σταμάτης Παλαιοκρασάς, Ηλεκτρολόγος Μηχανικός, Σύμβουλος Παιδαγωγικού Ινστιτούτου.

Χρήστος Σιγάλας, Δ/ντής Σπ. Δευτ. Εκπαιδεύσεως ΥΠΕΠΘ.

Σύμβουλος εκδόσεων του Ιδρύματος Κ. Α. Μανάφης, καθηγ. Φιλ. Σχολής Παν/μίου Αθηνών.

Γραμματέας της Επιτροπής, Γεώργιος Ανδρεάκος.

#### Διατελέσαντα μέλη ή σύμβουλοι της Επιτροπής

Γεώργιος Κακριδής (1955-1959) Καθηγητής ΕΜΠ, Άγγελος Καλογεράς (1957-1970) Καθηγητής ΕΜΠ, Δημήτριος Νιάνιας (1957-1965) Καθηγητής ΕΜΠ, Μιχαήλ Σπετσιέρης (1956-1959), Νικόλαος Βασιώτης (1960-1967), Θεόδωρος Κουζέλης (1968-1976) Μηχ. Ηλ. ΕΜΠ, Παναγιώτης Χατζηιωάννου (1977-1982) Μηχ. Ηλ. ΕΜΠ, Αλέξανδρος Ι. Παππάς (1955-1983) Καθηγητής ΕΜΠ, Χρυσόστομος Καβουνίδης (1955-1984) Μηχ. Ηλ. ΕΜΠ, Γεώργιος Ρούσσος (1970-1987) Χημ.-Μηχ. ΕΜΠ, Δρ. Θεοδόσιος Παπαθεοδοσίου (1982-1984) Δ/ντής Σπουδών Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσεως ΥΠΕΠΘ, Ιγνάτιος Χατζηευστρατίου (1985-1988) Μηχανολόγος, Δ/ντής Σπουδών Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσεως ΥΠΕΠΘ, Γεώργιος Σταμάτιος (1988-1990) Ηλεκτρολόγος ΕΜΠ, Δ/ντής Σπουδών Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσεως ΥΠΕΠΘ, Σωτ. Γκλαβάς (1989-1993), Φιλόλογος, Δ/ντής Σπουδών Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσεως ΥΠΕΠΘ.





1954

# ΓΕΝΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ

ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ Γ. ΤΣΑΓΑΚΗ  
ΔΡΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ-ΦΥΣΙΚΟΥ

ΑΘΗΝΑ

**Α' ΕΚΔΟΣΗ 1982**

**Β' ΕΚΔΟΣΗ 1985**



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το βιβλίο αυτό των Τεχνικών και Επαγγελματικών Λυκείων περιέχει την ύλη των Γενικών Ηλεκτρονικών και απευθύνεται στους μαθητές της Β' τάξεως όπως αυτή καθορίσθηκε από το πρόγραμμα του Υπουργείου Παιδείας.

Έχοντας υπόψη ότι το περιεχόμενο του βιβλίου θα αποτελέσει την πρώτη ειδική επαφή των μαθητών με τα Ηλεκτρονικά, καταβλήθηκε προσπάθεια ώστε τα θέματα που διαπραγματεύεται να δοθούν σε δρόμο το δυνατότερη μορφή, χωρίς να παραμεληθεί η ακρίβεια που επιβάλλει η επιστημονική δεοντολογία.

Οι ραγδαίες εξελίξεις στα Ηλεκτρονικά και οι απαιτήσεις σε βάθος και πλάτος της ηλεκτρονικής πρακτικής, όπως είναι ευνόητο, κάνουν σήμερα μια τέτοια προσπάθεια όχι και τόσο εύκολη.

Είναι όμως γνωστό ότι η εξειδίκευση στα ηλεκτρονικά απαιτεί πολλές ειδικές βασικές γνώσεις, που ίσως, λόγω χρόνου, να μην έχουν αποκτηθεί ακόμα από τους μαθητές. Γι' αυτό ίσως υπάρχει κάποια δυσκολία στην κατανόηση ορισμένων θεμάτων του βιβλίου. Πιστεύω όμως ότι οι διδάσκοντες και είναι σε θέση και θα σπεύσουν να βοηθήσουν, ώστε να ξεπεραστεί η δυσκολία.

Ο σύγχρονος ηλεκτρονικός τεχνικός έχει οπωσδήποτε ανάγκη από κάποιο γερό θεωρητικό υπόβαθρο. Γι' αυτό καταβλήθηκε προσπάθεια να περιληφθεί στην ανάπτυξη των θεμάτων αρκετή θεωρία μαζί με τις πρακτικές εφαρμογές. Δόθηκε επίσης σημασία στη φυσική λειτουργία των διαφόρων ηλεκτρονικών διατάξεων.

Στο βιβλίο έγινε αναφορά και σε ορισμένα θέματα παλιότερης τεχνικής, όπως π.χ. λυχνίες κενού κλπ. γιατί η τεχνική αυτή δεν έχει ακόμα λείψει τελείως από τις διατάξεις που πρόκειται να απασχολήσουν τους μελλοντικούς ηλεκτρονικούς.

Επίσης καταβλήθηκε προσπάθεια να δοθεί στο μαθητή κάποια ιδέα των πολύ προσφάτων εξελίξεων στα Ηλεκτρονικά, που σήμερα οδηγούν σε αποφασιστικές τεχνικοοικονομικές αλλαγές με απροσδιόριστες γενικές συνέπειες.

Επιθυμώ και από τη θέση αυτή να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον καθηγητή του Πανεπιστημίου Αθηνών κ. Γεώργιο Φιλοκύπρου, ο οποίος είχε την εποπτεία της συγγραφής του βιβλίου και ο οποίος μου συμπαραστάθηκε στην προσπάθεια αυτή.

Επίσης τις θερμές ευχαριστίες μου στο προσωπικό του Τμήματος Εκδόσεων του Ιδρύματος Ευγενίδου για την αμέριστη βοήθειά του στην δράση της έκδοσης του βιβλίου.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα Ηλεκτρονικά έχουν τις ρίζες τους στην Ηλεκτρονική Φυσική. Δηλαδή στη Φυσική που ασχολείται με τη δυναμική του ηλεκτρονίου, με την Ηλεκτρονική Οπτική και γενικότερα με θέματα που έχουν σχέση με την αλληλεπίδραση του ηλεκτρονίου με την ύλη, με ηλεκτρομαγνητικά πεδία και με την αγωγιμότητα στα μέταλλα ή τους ημιαγωγούς.

Για πολλά χρόνια τα Ηλεκτρονικά θεωρούνταν ότι είχαν ως κύριο αντικείμενο τη μελέτη των φαινομένων της αγωγιμότητας στο κενό, στα αέρια ή τα στερεά, αλλά και τη μελέτη και τη χρήση των διατάξεων που βασίζονται στα φαινόμενα αυτά.

Σήμερα για τα Ηλεκτρονικά υπάρχει μια πλατύτερη αντίληψη. Τα Ηλεκτρονικά θεωρούνται ως *το σύνολο των τεχνικών μεθόδων που χρησιμοποιούν τις μεταβολές ηλεκτρικών μεγεθών για τη σύλληψη, διαβίβαση και εκμετάλλευση μιας πληροφορίας*.

Οι μεταβολές αυτές των ηλεκτρικών μεγεθών εκφράζονται συνήθως με τον όρο **σήμα**.

Με κατάλληλο τρόπο μεταβολής των ηλεκτρικών μεγεθών, με κατάλληλα δηλαδή **σήματα**, μπορούμε να πάρομε ή να διαβιβάσομε μια πληροφορία.

Έτσι π.χ. σ' ένα μεγάφωνο, αν διαβιβάσομε άπολυτα σταθερό ρεύμα, δε θα έχομε κανέναν ήχο. Με κατάλληλες όμως μεταβολές του ρεύματος μπορούμε να παραγάγομε ομιλία, μουσική, ήχο μορσικού αλφαριθμητικού κλπ.

Με κατάλληλη επίσης μεταβολή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου ανάμεσα στην κεραία ενός πομπού και ενός δέκτη, μπορούμε από ένα πομπό να δώσουμε **σήματα**, συνεπώς και πληροφορίες σ' ένα δέκτη.

Η λειτουργία των ηλεκτρονικών υπολογιστών βασίζεται στην αρχή ότι αριθμοί μπορεί να αντιστοιχούν σε ηλεκτρονικά **σήματα**. Με το συνδυασμό τέτοιων σημάτων μέσα στον ηλεκτρονικό υπολογιστή πραγματοποιούνται αριθμητικές πράξεις ή άλλες λογικές λειτουργίες σε χρόνους φανταστικά μικρότερους από όσο θα μπορούσε να τις πραγματοποίησει ο άνθρωπος.

Τα Ηλεκτρονικά, με τη γρήγορη ανάπτυξή τους τα τελευταία χρόνια, έχουν πια μπει σε κάθε τομέα της ανθρώπινης δραστηριότητας. Οι ηλεκτρονικές συσκευές πληθαίνουν μέρα με την ημέρα στα εργοστάσια, στις κατοικίες, στα νοσοκομεία, στα γραφεία.

Ο ηλεκτρονικός αυτοματισμός έχει απλοποιήσει και επιταχύνει πολλές εργασίες που παλιότερα απαιτούσαν πολύ περισσότερους ανθρώπους και πολύ μεγαλύτερο χρόνο.

Η ραδιοπλοήγηση κάνει ευκολότερη και ασφαλέστερη την κίνηση πλοίων και αεροπλάνων. Είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες για τις κατακτήσεις στο διάστημα.

Ηλεκτρονικές συσκευές βοηθούν στην έρευνα του μικροκόσμου για τον καθορισμό των βασικών συστατικών της ύλης.

Η Ιατρική, χάρη στις ηλεκτρονικές συσκευές, έχει σημειώσει σε πολλές περιπτώσεις άλματα. Καρδιογράφοι, ηλεκτρονικά πιεσόμετρα, συσκευές για εφαρμογές ραδιοϊστορόπων και πλήθος από όργανα καθημερινής ιατρικής χρήσεως είναι σήμερα σχεδόν όλα ηλεκτρονικά.

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο έχει δώσει σημαντική ώθηση στη βιολογική έρευνα αλλά και στην έρευνα π.χ. του εσωτερικού των υλικών από μέταλλα, της δομής διαφόρων χημικών ενώσεων κ.ά.

Σημαντικό ρόλο παίζουν επίσης τα Ηλεκτρονικά στην ανάπτυξη και κυρίως στη διάδοση στο ευρύτερο κοινό, των καλών τεχνών. Η Μουσική π.χ. χάρη στα ηλεκτρονικά μέσα κατακτά το ενδιαφέρον όλο και περισσότερων ανθρώπων.

Γενικά οι εφαρμογές των Ηλεκτρονικών βοηθούν σημαντικά στην οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη μιας χώρας.

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

### ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΥΛΗΣ --ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

#### 1.1 Στοιχεία για τη δομή της ύλης.

Από τον 5ο π.Χ. αιώνα οι Ίωνες φιλόσοφοι και κυρίως ο Λεύκιππος και ο Δημόκριτος είχαν δεχθεί πως η ύλη δεν είναι συνεχής, αλλά αποτελείται από μικρά σωματίδια που δεν είναι δυνατό να διαιρεθούν περισσότερο. Τα σωματίδια αυτά τα ονόμασαν **άτομα**.

Την ασυνέχεια της ύλης επιβεβαίωσαν κατόπιν πλήθος από παρατηρήσεις και πειράματα, καθώς και θεωρητικές μελέτες.

Η ύλη σε πρώτη προσέγγιση αποτελείται από ηλεκτρόνια, πρωτόνια και νετρόνια. Στην πραγματικότητα έχουν βρεθεί ως τώρα στη φύση περισσότερα από 100 διαφορετικά στοιχειώδη σωμάτια με ποικίλες προελεύσεις (κοσμική ακτινοβολία, πυρηνικές αντιδράσεις κλπ.). Εδώ θα περιορισθούμε στη βασική συγκρότηση της ύλης. Θα θεωρούμε δηλαδή ότι η ύλη αποτελείται από άτομα. Τα άτομα αυτά σε πολλές περιπτώσεις ενώνονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν τα **μόρια**.

**Μόρια.** Τα μόρια είναι συγκροτήματα δύο ή περισσοτέρων ατόμων, εκτός φυσικά από τα μόρια ορισμένων στοιχείων (π.χ. των μετάλλων σε κατάσταση ατμών) που αποτελούνται από ένα μόνο άτομο. Αν τα άτομα που συγκροτούν τα μόρια είναι όμοια μεταξύ τους, έχομε **μόριο στοιχείου**, αν δεν είναι όμοια έχομε **μόριο χημικής ενώσεως**.

Γενικά τα μόρια είναι τα μικρότερα σωματίδια της ύλης που μπορούν να υπάρχουν σε ελεύθερη κατάσταση διατηρώντας τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του υλικού από το οποίο προήλθαν. Η σύσταση, άλλωστε, και οι ιδιότητες ενός σώματος έχουν ως βάση το μόριό του.

**Άτομα.** Για τη σύσταση και τη δομή του ατόμου έχουν προταθεί κατά καιρούς διάφορα πρότυπα (μοντέλλα) που αναφέρονται κυρίως στη θέση, την ενέργεια, την ορμή και τη στροφορμή των σωματίδιων που συγκροτούν το άτομο. Έτσι έχουμε τα πρότυπα του Thomson, του Rutherford, του Bohr, του Sommerfeld και του Schrödinger. Παρακάτω θεωρούμε ότι το άτομο είναι ένα σταθερό σύστημα από στοιχειώδη σωμάτια με ένα θετικά φορτισμένο κέντρο, τον πυρήνα, γύρω από τον οποίο, περιφέρονται τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια. Το σύνολο στις βασικές συνθήκες, είναι ηλεκτρικά ουδέτερο. Το θετικό δηλαδή φορτίο που εκδηλώνει ο πυρήνας είναι ίσο με το συνολικό αρνητικό φορτίο που έχουν τα ηλεκτρόνια.

**Ηλεκτρόνιο.** Το ηλεκτρόνιο είναι σωμάτιο με μάζα και αρνητικό φορτίο. Η μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου είναι  $9,11 \times 10^{-31}$  kg και το φορτίο του απόλυτα ίσο με

$1,6 \times 10^{-19}$  Cb (Coulomb). Το φορτίο αυτό συμβολίζεται συνήθως με το λατινικό χαρακτήρα e. Η μάζα ηρεμίας και το φορτίο του ηλεκτρονίου είναι τα ίδια για όλα τα ηλεκτρόνια, ανεξάρτητα από το στόμο που ανήκουν ή από το οποίο προέρχονται.

Μια ποσότητα που ενδιαφέρει πολλές φορές την Ηλεκτρονική είναι και ο λόγος του φορτίου του ηλεκτρονίου προς τη μάζα του, θ/μ. Στην ηρεμία ο λόγος αυτός είναι  $1,759 \times 10^{11}$  Cb/kg. Άλλα ενδιαφέροντα σωμάτια είναι: το πρωτόνιο, σωμάτιο με θετικό φορτίο (σο απόλυτα με το φορτίο του ηλεκτρονίου αλλά με μάζα 1845 φορές μεγαλύτερη), και το νετρόνιο, σωμάτιο που δεν εκδηλώνει ηλεκτρικό φορτίο. Είναι ηλεκτρικά ουδέτερο. Η μάζα του είναι περίπου 1/3 με τη μάζα του πρωτονίου.

Τα ηλεκτρόνια, τα πρωτόνια και τα νετρόνια είναι τα βασικά συστατικά του ατόμου. Εκτός από αυτά, κατά τις πυρηνικές διασπάσεις, στην κοσμική ακτινοβολία και αλλού, εμφανίζονται και άλλα σωμάτια όπως π.χ. το ποζιτρόνιο (με φορτίο +θ και μάζα (ση με τη μάζα του ηλεκτρονίου) καθώς και διάφοροι τύποι μεσονίων.

### Η Θεωρία του Bohr.

Από τις διάφορες θεωρίες για τη δομή του ατόμου, η θεωρία του Bohr βοηθά περισσότερο στη στοιχειώδη κατανόηση ορισμένων φαινομένων στην Ηλεκτρονική. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή τα ηλεκτρόνια ενός ατόμου περιφέρονται γύρω από τον πυρήνα σε ορισμένες επιτρεπόμενες κυκλικές τροχιές που καθορίζονται από την πρώτη συνθήκη του Bohr: **Η στροφορμή m.u.r του ηλεκτρονίου που κινείται γύρω από τον πυρήνα είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της ποσότητας h/2π.** Δηλαδή:

$$m.u.r = n \frac{h}{2\pi} \quad (1.1.1)$$

όπου: m. η μάζα του ηλεκτρονίου,

r η απόστασή του από τον πυρήνα,

u η ταχύτητα που έχει το ηλεκτρόνιο πάνω στην τροχιά του,

h η σταθερά του Planck και

ή ένας ακέραιος αριθμός που αντιστοιχεί στην τάξη της επιτρεπόμενης τροχιάς ( $n = 1,2,3...$ ) και λέγεται **κύριος κβαντικός αριθμός**.

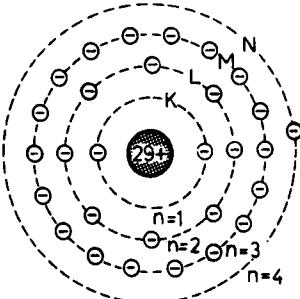
Η ολική ενέργεια ( $E_{ολ}$ ) που έχει το ηλεκτρόνιο, όταν κινείται σε μια τροχιά, είναι το άθροισμα της κινητικής του ενέργειας λόγω της ταχύτητάς του και της δυναμικής του ενέργειας λόγω της έλξεώς του από τον πυρήνα.

Σε κάθε τιμή του π αντιστοιχεί και διαφορετική τιμή της ολικής ενέργειας του ηλεκτρονίου. Οι διάφορες αυτές τιμές της ολικής ενέργειας λέγονται και **στάθμες ενέργειας**.

Η ολική ενέργεια είναι τόσο πιο μεγάλη όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός n.

Στο σχήμα 1.1α φαίνεται η παράσταση ενός ατόμου χαλκού σύμφωνα με όσα έχουν εκτεθεί παραπάνω.

Με τη δεύτερη συνθήκη του Bohr δέχεται ότι: **η κίνηση των ηλεκτρονίων στις τροχιές που καθορίζονται από την πρώτη συνθήκη δε συνοδεύεται από εκπομπή ακτινοβολίας. Ακτινοβολία εκπέμπεται μόνον όταν το ηλεκτρόνιο μεταπίπτει από μια τροχιά σε άλλη με μικρότερη ενέργεια.**



**Σχ. 1.1α.**  
Παράσταση ατόμου χαλκού σύμφωνα με τη θεωρία  
του Bohr.

### 1.1.1 Διέγερση και ιονισμός του ατόμου.

#### α) Διέγερση.

Όταν όλα τα ηλεκτρόνια ενός ατόμου βρίσκονται στις επιτρεπόμενες τροχιές που η ενέργειά τους είναι η ελάχιστη, δεν μπορούν να πέσουν σε χαμηλότερες στάθμες ενέργειας. Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι το ατόμο βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση και τα ηλεκτρόνια κινούνται στις θεμελιώδεις τροχιές.

Αν ένα ατόμο που βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση πάρει ενέργεια απ' έξω (από σύγκρουση π.χ. με κινούμενο σωμάτιο ή με απορρόφηση ακτινοβολίας), είναι δυνατό ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια του να μεταπηδήσουν από τη θεμελιώδη τροχιά σε τροχιά με μεγαλύτερη ολική ενέργεια. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **διέγερση του ατόμου**. Το ηλεκτρόνιο που μεταπηδήσε στην τροχιά μεγαλύτερης ενέργειας, μένει σ' αυτή πολύ μικρό χρονικό διάστημα ( $10^{-8}$  ως  $10^{-9}$  sec) και κατόπιν επανέρχεται ή μ' ένα άλμα ή με διαδοχικά άλματα από τροχιά σε τροχιά στη θεμελιώδη τροχιά.

Η ενέργεια που παίρνει το ηλεκτρόνιο για να μεταπηδήσει από τη θεμελιώδη τροχιά με ολική ενέργεια  $E_{\text{αρχ}}$  σε τροχιά με μεγαλύτερη ολική ενέργεια  $E_{\text{τελ}}$ , λέγεται **ενέργεια διέγέρσεως** και είναι ίση με  $E_{\text{τελ}} - E_{\text{αρχ}}$ .

Η ενέργεια αυτή αποδίδεται κατά την αποδιέγερση, την επάνοδο δηλαδή του ηλεκτρονίου στη θεμελιώδη τροχιά, με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και μάλιστα κατά στοιχειώδη ποσά, που ονομάζονται **φωτόνια**. Κάθε φωτόνιο έχει ενέργεια  $E$  πού είναι:

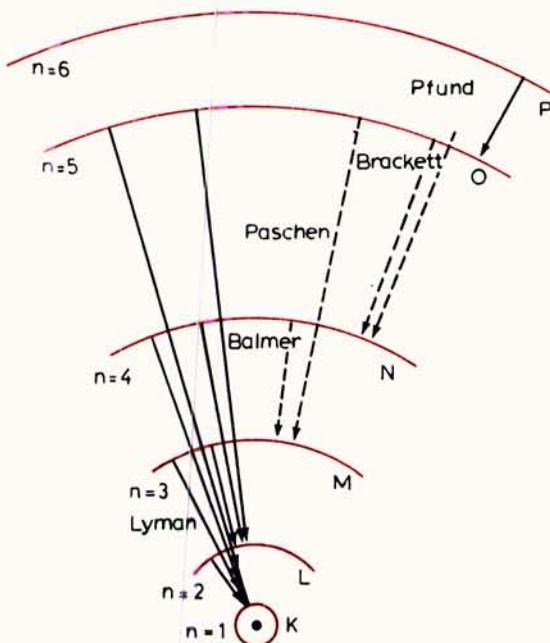
$$E = hf \quad (1.1.2)$$

όπου:  $h$  είναι η σταθερά δράσεως του Planck ( $h = 6,626 \times 10^{-34}$  Joule . sec) και  $f$  η συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας.

Έτσι κατά την αποδιέγερση θα έχομε εκπομπή φωτονίων που η ενέργεια του καθενός θα είναι;

$$E_{\text{τελ}} - E_{\text{αρχ}} = hf \quad (1.1.3)$$

εφόσον βέβαια το ηλεκτρόνιο μεταπέσει απευθείας από την τελική τροχιά στην αρχική.



Σχ. 1.1β.

Εκπεμπόμενες ακτινοβολίες κατά την πτώση ηλεκτρονίων από τροχιές, με διάφορες ενέργειακές στάθμες, σ' ένα άτομο υδρογόνου.

Στο σχήμα 1.1β φαίνεται το είδος των εκπεμπομένων ακτινοβολιών κατά την πτώση ηλεκτρονίων από διάφορες στάθμες (από τροχιές με διάφορες ενέργειες σε ένα άτομο υδρογόνου). Κατά την πτώση των ηλεκτρονίων από μια στάθμη σε άλλες με μικρότερο π εκπέμπεται ένα φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που έχει διάφορα τρήματα. Η σειρά Lyman που ανήκει στην περιοχή της υπεριώδους ακτινοβολίας, η σειρά Balmer που ανήκει στην περιοχή του οπτικού φάσματος, η σειρά Paschen στο υπέρυθρο και η σειρά Brackett πέρα από το υπέρυθρο.

Τα φωτόνια κινούνται με την ταχύτητα  $C$  του φωτός, για την οποία, όπως είναι γνωστό, ισχύει η σχέση  $C = \lambda \cdot f$ , όπου  $\lambda$  το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και  $f$  η συχνότητά της.

Όταν υπάρχει φωτόνιο, αυτό κινείται με την ταχύτητα του φωτός. Όταν το φωτόνιο πάψει να κινείται με την ταχύτητα του φωτός, παύει και να υπάρχει.

### Παράδειγμα.

Σωμάτιο προσπίπτει με μεγάλη ταχύτητα σε άτομο υδρογόνου που βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση με συνέπεια το ηλεκτρόνιο του ατόμου να μεταπηδήσει από την τροχιά με  $n = 1$  στην τροχιά με  $n = 2$ . Η διαφορά ενέργειας ανάμεσα στις δύο τροχιές είναι  $10,18 \text{ eV}$ . Ποιο θα είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται κατά την άποδιέγερση;

### **Αύση.**

Η ενέργεια που εκπέμπεται θα είναι:

$$E_{\text{τελ}} - E_{\text{αρχ}} = hf \quad (1)$$

Έπειτα δι:

$$f = \frac{E_{\text{τελ}} - E_{\text{αρχ}}}{h} \quad (2)$$

Επειδή όμως η ταχύτητα του φωτός  $C = \lambda \cdot f$ , όπου  $\lambda$  το μήκος κύματος.

Θά είναι:

$$f = \frac{C}{\lambda} \quad (3)$$

και από την (2):

$$\lambda = \frac{Ch}{E_{\text{τελ}} - E_{\text{αρχ}}} \quad (4)$$

Στην περίπτωσή μας:

$$E_{\text{τελ}} - E_{\text{αρχ}} = 10,18 \text{ eV} = 10,18 \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

Επίσης είναι γνωστά:  $C = 3 \times 10^8 \text{ m/sec}$  και  $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ Joule \cdot sec}$   
Αντικαθιστώντας στην (4), βρίσκομε:

$$\lambda = 1,22 \times 10^{-7} \text{ m}$$

που είναι μήκος κύματος υπεριώδους ακτινοβολίας.

### **Β) Ιονισμός.**

Αν η ενέργεια που δίνεται σε ηλεκτρόνιο ενός ατόμου ή μορίου στο οποίο ανήκει το άτομο, είναι σχετικά μεγάλη, είναι δυνατό το ηλεκτρόνιο να απομακρυνθεί τόσο από τον πυρήνα, ώστε να φύγει τελείως από την έλξη του, δηλαδή το ηλεκτρόνιο φεύγει από το άτομο στο οποίο ανήκε. Το φαινόμενο λέγεται ιονισμός και το άτομο (ή μόριο) από το οποίο έφυγε το ηλεκτρόνιο **ιόν**. Η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για τον ιονισμό ενός ατόμου λέγεται **ενέργεια ή έργο ιονισμού**. Το άτομο που έχασε το ηλεκτρόνιο έμεινε θετικά φορτισμένο. Είναι δηλαδή τώρα ένα **θετικό ιόν**.

Η ενέργεια ιονισμού μπορεί να προέρχεται:

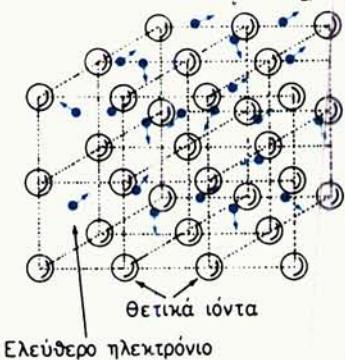
- Από σύγκρουση με μόρια ή άτομα που κινούνται ταχέως ή και με φορτισμένα σωμάτια (ηλεκτρόνια, σωμάτια α κλπ.). Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι έχουμε ιονισμό κρούσεως.
- Από απορρόφηση φωτονίων (υπεριώδους ακτινοβολίας, ακτινοβολίας Röntgen, ακτινοβολίας γ κλπ.)

Είναι δυνατόν καμιά φορά, το άτομο (ή μόριο) αντί να δώσει ηλεκτρόνιο, να προσλάβει ηλεκτρόνιο. Τότε σχηματίζεται **αρνητικό ιόν**.

## 1.2 Ηλεκτρονική θεωρία των μετάλλων.

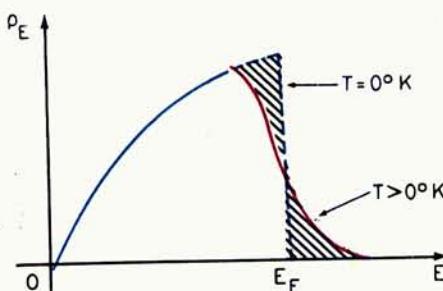
Τα άτομα στα μέταλλα, όταν αυτά βρίσκονται στη στερεή κατάσταση, ανήκουν σε κρυσταλλικό πλέγμα με κανονική ομοιόμορφη δομή.

Η ελεκτρική δύναμη του πυρήνα για τα εξώτατα ηλεκτρόνια των ατόμων στο εσωτερικό των μετάλλων, είναι μικρότερη από αυτή που θα ήταν αν κάθε άτομο ήταν μόνο του χωρίς την επίδραση των διπλανών του. Για το λόγο αυτό πολλά από τα εξώτατα ηλεκτρόνια έχουν αποσπασθεί από το άτομο που ανήκαν αρχικά και κινούνται ελεύθερα, μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα. Τα ηλεκτρόνια αυτά τα λέμε **ελεύθερα ηλεκτρόνια**. Έτσι στο εσωτερικό του μετάλλου υπάρχουν τα ίόντα, από τα άτομα που έχασαν ηλεκτρόνια και που έχουν ορισμένες θέσεις μέσα στο μέταλλο, και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που κινούνται ανάμεσα στα ίόντα αυτά σχεδόν ανεμόδιστα (σχ. 1.2α). Το σύνολο πάντως είναι ηλεκτρικά ουδέτερο.



Σχ. 1.2α.

Απεικόνιση ιόντων και ελευθέρων ηλεκτρονίων μέσα στο μέταλλο.



Σχ. 1.2β.

Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια ακόμη και στο απόλυτο μηδέν βρίσκονται σε κίνηση. Οι ταχύτητές τους στο απόλυτο μηδέν μπορεί να έχουν τιμές από 0 μέχρι μια μέγιστη  $v_F$  που λέγεται ταχύτητα Fermi. Κατά συνέπεια στο απόλυτο μηδέν οι τιμές της κινητικής ενέργειας των ελευθέρων ηλεκτρονίων θα είναι μεταξύ 0 και μιας μέγιστης  $E_F$  που ονομάζεται ενέργεια Fermi.

Αν θερμάνουμε το μέταλλο, μερικά ηλεκτρόνια θα αποκτήσουν ενέργειες μεγαλύτερες από την ενέργεια Fermi. Αν ονομάσομε  $\rho_E$  την πυκνότητα των ηλεκτρονίων σε μια ενέργειακή περιοχή ανάμεσα στις τιμές  $E$  και  $E + dE$ , η μεταβολή της  $\rho_E$  μπορεί να αποδοθεί από τις καμπύλες του σχήματος 1.2β.

Από τις καμπύλες αυτές φαίνεται ότι όταν αυξηθεί η θερμοκρασία μερικά από τα ηλεκτρόνια αποκτούν ενέργειες μεγαλύτερες από την ενέργεια Fermi.

Η ενέργεια Fermi διαφέρει από μέταλλο σε μέταλλο και εξαρτάται από το πλήθος των ελευθέρων ηλεκτρονίων στη μονάδα του δύκου.

Πολλά από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των μετάλλων, όπως π.χ. η μεγάλη θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, η μεταλλική λάμψη, η ανακλαστικότητα του φωτός κ.α. οφείλονται στην ύπαρξη των ελευθέρων ηλεκτρονίων.

**1.3 Ασκήσεις.**

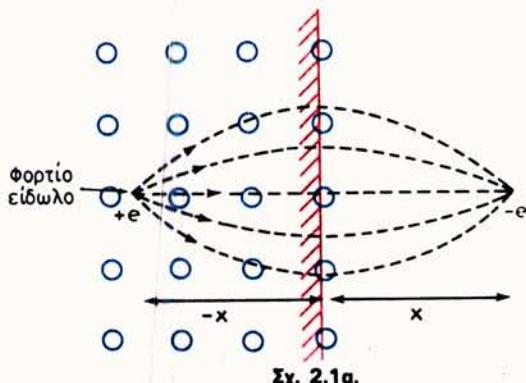
1. Ποια είναι η συχνότητα φωτονίου που έχει μήκος κύματος  $12,4 \text{ \AA}$ ;
  2. Ποιο είναι το μήκος κύματος φωτονίου που η ενέργειά του είναι  $15 \text{ eV}$ ;
  3. Ηλεκτρόνιο με κινητική ενέργεια  $1 \text{ MeV}$ , σταματά με σύγκρουση και παράγεται φωτόνιο. Να βρεθεί το μήκος κύματος του φωτονίου που παράγεται.
  4. Ραδιοφωνικός σταθμός λειτουργεί σε συχνότητα  $103,7 \text{ MHz}$  με ισχύ  $200 \text{ kW}$ . Πόσα φωτόνια εκπέμπει στο δευτερόλεπτο;
  5. Η διαφορά ένέργειας ηλεκτρονίου από την τροχιά με  $n = 2$  στην τροχιά με  $n = 5$  στό άτομο του υδρογόνου σύμφωνα με το πρότυπο του Bohr είναι  $2,86 \text{ eV}$ . Ποιο θα είναι το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που θα εκπέμπεται όταν ηλεκτρόνια πέφτουν από την τροχιά με  $n = 5$  στην τροχιά με  $n = 2$ ;
-

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

### ΕΚΠΟΜΠΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ

#### 2.1 Γενικά.

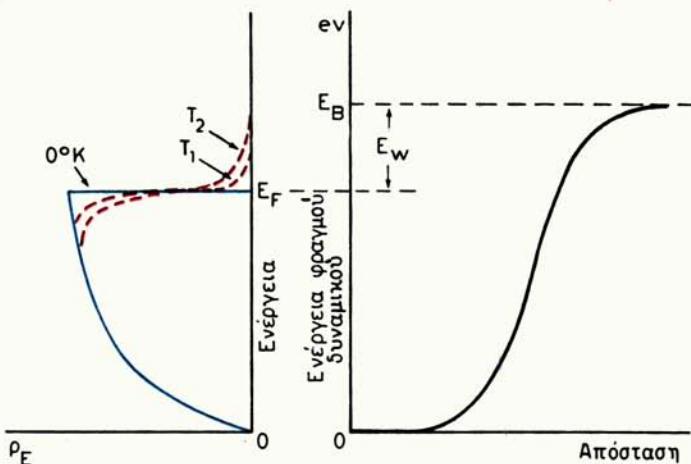
Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια μέσα στα μέταλλα θεωρούμε, κατά μεγάλη προσέγγιση, ότι κινούνται σ' έναν ισοδυναμικό χώρο. Μπορούμε δηλαδή να θεωρήσουμε ότι η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται στο ελεύθερο ηλεκτρόνιο από το περιβάλλον του, στο εσωτερικό του μετάλλου, είναι μηδέν. Όταν δημος το ελεύθερο ηλεκτρόνιο βρεθεί κοντά στην επιφάνεια του μετάλλου, τότε υπάρχει μια δύναμη που το έλκει προς το εσωτερικό του και το εμποδίζει να βγει από το μέταλλο. Αν το ηλεκτρόνιο βγει έξω από το μέταλλο, τότε το μέταλλο μένει θετικά φορτισμένο. Απέναντι από το ηλεκτρόνιο μέσα στο μέταλλο, εμφανίζεται ένα θετικό φορτίο εξ επαγγής, απόλυτα ίσο προς το φορτίο του ηλεκτρονίου. Το φορτίο αυτό λέγεται **φορτίο είδωλο** (σχ. 2.1α). Ανάμεσα στο ηλεκτρόνιο και στο φορτίο είδωλο δη-



Σχ. 2.1α.

Παιράσταση της δημιουργίας **φορτίου είδωλου** κατά την απομάκρυνση ενός ηλεκτρονίου από την επιφάνεια του μετάλλου.

μιουργείται ηλεκτρικό πεδίο που τείνει να επαναφέρει το ηλεκτρόνιο στο εσωτερικό του μετάλλου. Δημιουργείται έτσι ένας **φραγμός δυναμικού** για τα ηλεκτρόνια που θέλουν να εγκαταλείψουν το μέταλλο. Όσα ηλεκτρόνια αποκτήσουν αρκετή ενέργεια για να υπερπηδήσουν αυτό το φραγμό, εγκαταλείπουν τελείως το μέταλλο. Στο σχήμα 2.1β φαίνεται παραστατικά η μεταβολή του φραγμού σε συνάρτηση με την απόσταση από την επιφάνεια του μετάλλου.



Σχ. 2.1β.

Παράσταση μεταβολής του ενέργειακού φραγμού σε συνάρτηση με την απόσταση από την επιφάνεια του μετάλλου και σε συσχετισμό του με την ενέργεια Fermi.

## 2.2 Έργο εξόδου.

Χαρακτηριστικό μέγεθος ενός υλικού είναι το **έργο εξόδου** του. Το έργο εξόδου ( $E_w$ ) είναι το ελάχιστο ποσό ενέργειας που χρειάζεται για να αποσπασθεί ένα ηλεκτρόνιο που έχει τη μέγιστη κινητική ενέργεια  $E_F$  στο απόλυτο μηδέν. Το έργο αυτό είναι ίσο με τη διαφορά της ενέργειας Fermi ( $E_F$ ) από τη μέγιστη ενέργεια ( $E_B$ ) που απαιτείται για την υπερνίκηση του φραγμού δυναμικού (σχ. 2.1β). Έτσι έχουμε:

$$E_w = E_B - E_F$$

Όσο μεγαλύτερο είναι το έργο εξόδου ενός μετάλλου τόσο δυσκολότερα βγαίνουν ηλεκτρόνια από αυτό.

Στον πίνακα 2.1.1 δίνεται το έργο εξόδου διαφόρων υλικών. Για να αποσπασθούν ηλεκτρόνια από τα μέταλλα πρέπει να τους δοθεί το κατάλληλο ποσό ενέργειας (λίγα eV).

Η ενέργεια αυτή δίνεται:

- Με τη μορφή θερμότητας (αύξηση της θερμοκρασίας του μετάλλου). Στην περίπτωση αυτή έχομε τη **θερμιονική εκπομπή**.
- Με πρόσπτωση φωτονίων. Είναι η περίπτωση της **φωτοηλεκτρικής εκπομπής**.
- Με βομβαρδισμό της επιφάνειας του μετάλλου με πολύ γρήγορα ηλεκτρόνια (ή ιόντα), οπότε έχομε τη **δευτερογενή εκπομπή**.

Μπορεί επίσης να εμφανισθεί εκπομπή ηλεκτρονίων όταν στην επιφάνεια του μετάλλου επιδράσει ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο κατάλληλης πολικότητας. Αυτή είναι η **εκπομπή με ισχυρό πεδίο**.

Τα είδη αυτά των εκπομπών θα εξετάσουμε παρακάτω.

### 2.3 Θερμιονική εκπομπή.

Όταν θερμάνουμε αρκετά ένα μέταλλο, αυξάνεται τόσο η ένέργεια που έχουν μερικά από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του, ώστε κατορθώνουν να υπερνικήσουν το φραγμό δυναμικού και να εγκαταλείψουν το μέταλλο. Το φαινόμενο λέγεται θερμιονική εκπομπή. Είναι κάτι ανάλογο με την εξάτμιση ενός υγρού σε κατάλληλη θερμοκρασία.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1.1**  
**Πίνακας με χαρακτηριστικές σταθερές μερικών μετάλλων**

Μέταλλο	Σταθερά Richardson A Amp (cm <sup>2</sup> ).(°K) <sup>2</sup>	Έργο εξόδου E <sub>W</sub> eV	Σημείο τήξεως °K
Άνθρακας	60,2	4,00	3773
Ασβέστιο	60,2	2,24	1083
Βολφράμιο	60,2	4,52	3643
Θόριο	60,2	3,35	2118
Καίσιο	162,0	1,81	299
Λευκόχρυσος	60,2	5,08	2028
Μολυβδαίνιο	60,2	4,44	2893
Νικέλιο	60,2	2,77	1725
Ταντάλιο	60,2	4,07	3123

**Σημείωση:**

Πολλές φορές η τιμή του A δίνεται ανά cm<sup>2</sup> αντί ανά m<sup>2</sup>.

Η κίνηση αυτή των ηλεκτρονίων προς τα έξω αποτελεί ένα ρεύμα που ονομάζεται ρεύμα θερμιονικής εκπομπής. Το ρεύμα αυτό ( $I_{th}$ ) δίνεται από τη σχέση των Richardson-Dushman, που ισχύει όταν η επιφάνεια που εκπέμπει δεν βρίσκεται κάτω από την επίδραση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου και είναι στο κενό:

$$I_{th} = A \cdot S \cdot T^2 \cdot e^{-E_w / KT} \quad \text{σχέση Richardson-Dushman}$$

όπου:  $I_{th}$  το ρεύμα θερμιονικής εκπομπής σε ampère (A),

$S$  το εμβαδό της επιφάνειας που εκπέμπει σε (m<sup>2</sup>),

$A$  μια σταθερά σε  $\frac{(A)}{(m^2).(°K^2)}$  (βλέπε πίνακα 2.1.1),

$T$  η άπολυτη θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin (°K),

$E_w$  το έργο εξόδου σε (eV),

$K$  η σταθερά Boltzmann σε (eV)/(°K),

Το e είναι η βάση των Νεπεριών λογαρίθμων και όπως είναι γνωστό  $e = 2,7182818$  περίπου.

Από τη σχέση Richardson-Dushman φαίνεται η εξάρτηση που έχει το ρεύμα θερμιονικής εκπομπής από τη θερμοκρασία. Πραγματικά, για το βολφράμιο, που έχει έργο εξόδου 4,5 eV, στους 2400°K ένα τα εκατό μεταβολή στην απόλυτη

Θερμοκρασία οδηγει σε 24% μεταβολή στο ρεύμα θερμιονικής εκπομπής. Φαίνεται επίσης ότι για να δημιουργήσουμε μεγάλο ρεύμα θερμιονικής εκπομπής, πρέπει να φέρουμε το μέταλλο σε υψηλή θερμοκρασία. Το ύψος σύμως της θερμοκρασίας εξαρτάται από το σημείο τήξεως ή εξαχνώσεως του μετάλλου, καθώς και από το έργο έξαγωγής του. Η σταθερά A στα πειράματα παρουσιάζει αποκλίσεις από τη θεωρητικά υπολογιζόμενη τιμή της. Οι τιμές που δίνονται στον πίνακα 2.1.1 είναι αυτές που χρησιμοποιούνται στην πράξη.

Για να έχουμε εύκολη σχετικά εκπομπή ηλεκτρονίων, χρησιμοποιούμε κατάλληλα μέταλλα. Σ' αυτά δίνομε τέτοια σχήματα, ώστε να γίνεται όσο το δυνατό μεγαλύτερη αξιοποίηση των ηλεκτρονίων που εκπέμπονται. Τα κατάλληλα αυτά μέταλλα, που πρέπει να έχουν χαμηλό έργο εξόδου, υψηλό σημείο τήξεως και μηχανική αντοχή, λέγονται **κάθοδοι**.

### **Εφαρμογή.**

Το βολφράμιο έχει έργο έξαγωγής 4,52 eV και σταθερά Richardson περίου  $60A \cdot (cm^{-2}) \cdot (^{\circ}K^{-2})$ . Να υπολογισθεί το ρεύμα θερμιονικής εκπομπής  $I_{th}$  καθόδου από βολφράμιο, που θα εκπέμπεται από 1  $cm^2$  της, όταν βρίσκεται σε θερμοκρασία  $2400^{\circ}K$ .

### **Λύση.**

Στη σχέση Richardson-Dushman:  $I_{th} = A \cdot S \cdot T^2 \cdot e^{-E_w/KT}$

Θα είναι:  $A = 60A \cdot (cm^{-2}) \cdot (^{\circ}K^{-2})$

$$S = 1 \text{ } cm^2$$

$$T = 2400^{\circ}K$$

$$E_w = 4,52 \text{ eV} = 4,52 \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$K = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J} \times (^{\circ}K^{-1}).$$

$$\text{Οπότε έχουμε: } I_{th} = 60 \times 1 \times (2400)^2 e^{-\frac{4,5 \times 1,6 \times 10^{-19}}{1,38 \times 10^{-23} \times 2400}} \approx 125 \text{ mA}$$

### **2.4 Φωτοηλεκτρική εκπομπή.**

Η εκπομπή ηλεκτρονίων από μια επιφάνεια, όταν σ' αυτήν προσπέσει φως ή άλλη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία κατάλληλου μήκους κύματος, δονομάζεται φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται ονομάζονται φωτοηλεκτρόνια. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται εύκολα αν λάβουμε υπόψη μας ότι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αποτελείται από ποσά ενέργειας  $hf$ , τα φωτόνια, όπου το  $f$  είναι η συχνότητα της ακτινοβολίας. Η συχνότητα αυτή δύναμε συνδέεται με το μήκος κύματος με τη σχέση:

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

όπου:  $c$  η ταχύτητα του φωτός και  $\lambda$  το μήκος κύματος.

Έτσι ως ενέργεια για την απόσπαση ηλεκτρονίων χρησιμοποιούμε την ενέργεια των φωτονίων. Ηλεκτρόνια είναι δυνατόν, απορροφώντας την ενέργεια των φωτονίων, να αποκτήσουν τόση δική τους ενέργεια ώστε να μπορούν να εγκαταλείψουν την επιφάνεια του υλικού στο οποίο ανήκουν. Αν η ενέργεια του φωτονίου

είναι αρκετά μεγάλη, το ηλεκτρόνιο όταν βγει από το μέταλλο θα έχει κινητική ενέργεια που δίνεται από τη φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein:

$$\frac{1}{2} m \cdot u^2 = h \cdot f - E_w \quad (2.2.1)$$

όπου:  $\frac{1}{2}mu^2$  η κινητική ενέργεια του φωτοηλεκτρονίου και  $E_w$  το έργο εξόδου.

Η φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein μας δίνει τη μέγιστη κινητική ενέργεια που μπορεί να έχει ένα φωτοηλεκτρόνιο όταν στην επιφάνεια προσπίπουν φωτόνια συχνότητας  $f$ .

Για την ίδια συχνότητα  $f$  μπορεί να έχομε και φωτοηλεκτρόνια με μικρότερη ενέργεια. Αυτό οφείλεται στο ότι τα ηλεκτρόνια αυτά ή είχαν ενέργειες μικρότερες από την ενέργεια Fermi ή έχασαν ενέργεια από **σύγκρουση** με ηλεκτρόνια ή ιόντα στο εσωτερικό του μετάλλου.

Αν σε μια επιφάνεια προσπίπτει μονοχρωματική ακτινοβολία, δηλαδή ακτινοβολία με φωτόνια της ίδιας συχνότητας, τότε:

- 1) Ο αριθμός των φωτοηλεκτρονίων που εκπέμπονται είναι ανάλογος του αριθμού των φωτονίων που προσπίπτουν στην επιφάνεια αυτή, δηλαδή ανάλογος της φωτεινής ροής.
- 2) Η ταχύτητα με την οποία βγαίνουν τα ηλεκτρόνια εξαρτάται από το μήκος κύματος (ή τη συχνότητα) της ακτινοβολίας που προσπίπτει.
- 3) Για να αποσπασθεί ένα ηλεκτρόνιο από τό υλικό, πρέπει η ενέργεια του φωτονίου να είναι μεγαλύτερη ή τουλάχιστο ίση με το έργο εξόδου  $E_w$ .

Δηλαδή:

$$hf \geq E_w \quad \text{δηλαδή} \quad f \geq \frac{E_w}{h} \quad \text{ή} \quad \lambda \leq \frac{h \cdot c}{E_w} \quad (2.2.2)$$

Η ισότητα  $hf_{op} = E_w$  καθορίζει μιαν **οριακή συχνότητα**:

$$f_{op} = \frac{E_w}{h}$$

κάτω από την οποία δεν είναι δυνατή η εξαγωγή ηλεκτρονίων. Στη συχνότητα αυτή αντιστοιχεί ένα οριακό μήκος κύματος:

$$\lambda_{op} = \frac{c}{f_{op}}$$

$$\text{οπότε} \quad \lambda_{op} = \frac{c \cdot h}{E_w} \quad (2.2.3)$$

Για μήκη κύματος μεγαλύτερα από  $\lambda_{op}$  δεν θα έχομε εξαγωγή φωτοηλεκτρονίων.

Τα σώματα που μπορούν να δώσουν εύκολα φωτοηλεκτρόνια ονομάζονται **φωτοκάθοδοι**.

### **Εφαρμογή.**

Φωτοκάθοδος έχει έργο εξόδου 2,08 eV. Ποιο είναι το οριακό μήκος κύματος γι' αυτήν;

## Λύση.

$$\lambda_{op} = \frac{h \cdot c}{E_w}$$

$$h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec} \quad c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad \text{και} \quad E_w = 2,08 \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{οπότε: } \lambda_{op} = \frac{6,62 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{2,08 \times 1,6 \times 10^{-19}} \frac{\text{J} \cdot \text{s} \cdot \text{m}}{\text{s} \cdot \text{J}} \Rightarrow \lambda_{op} = 5967 \text{ Å}$$

Για μεγαλύτερα μήκη κύματος δεν θα έχουμε φωτοηλεκτρόνια.

### 2.5 Δευτερογενής εκπομπή.

Όταν σέ μια επιφάνεια προσπίπτουν πολύ γρήγορα ηλεκτρόνια (ή ιόντα) είναι δυνατόν από την επιφάνεια αυτή να βγουν ηλεκτρόνια. Τα φαινόμενο λέγεται **δευτερογενής εκπομπή**. Τα ηλεκτρόνια που προσπίπτουν λέγονται πρωτογενή και αυτά που βγαίνουν **δευτερογενή**.

Ορίζομε ως λόγο δευτερογενούς εκπομπής δ το πηλίκο του αριθμού των δευτερογενών ηλεκτρονίων  $n_d$  πρός τον αριθμό των πρωτογενών ηλεκτρονίων  $n_p$  που προκάλεσαν αυτά τα δευτερογενή.

$$\delta = \frac{n_d}{n_p}$$

Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν τη δευτερογενή εκπομπή. Οι κυριότεροι είναι:

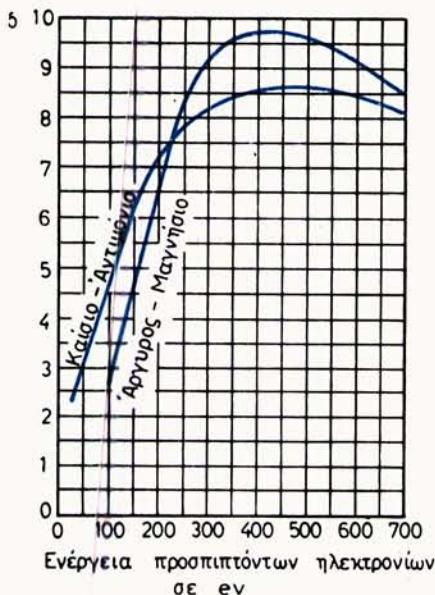
- Ο αριθμός των ηλεκτρονίων που προσπίπτουν.
- Η ενέργειά τους.
- Η γωνία με την οποία πέφτουν πάνω στην επιφάνεια.
- Το είδος και η φυσική κατάσταση της επιφάνειας πάνω στην οποία πέφτουν.

Για καθαρά μέταλλα ο λόγος δ έχει μέγιστες τιμές που κυμαίνονται ανάμεσα στο 1,5 και το 2.

Ο λόγος δ μπορεί να αυξηθεί σημαντικά με προσμίξεις αλκαλίων στη μεταλλική επιφάνεια. Μπορεί να φθάσει τότε σε τιμές 10 ή και 15. Οι καμπύλες στο σχήμα 2.5 δίνουν την εικόνα της μεταβολής του δ σε συνάρτηση με την ενέργεια των πρωτογενών ηλεκτρονίων, για επιφάνειες επιχρισμένες με καίσιο-αντιμόνιο ή με άργυρο-μαγνήσιο.

Είναι χαρακτηριστικό ότι από μια τιμή ενέργειας και πέρα η τιμή του λόγου δ μικραίνει. Αυτό οφείλεται στο ότι όταν αυξήσουμε την ενέργεια των ηλεκτρονίων που προσπίπτουν σ' ένα σώμα αυτά εισδύουν βαθύτερα στο εσωτερικό του σώματος, οπότε τα δευτερογενή ηλεκτρόνια συναντούν δυσκολίες για να φθάσουν στην επιφάνεια και μερικά δεν φθάνουν ποτέ.

Σε μερικές εφαρμογές η δευτερογενής εκπομπή είναι πολύ χρήσιμη (π.χ. φωτοηλεκτρονικός πολλαπλασιαστής). Συμβαίνει όμως πολλές φορές να είναι ενοχλητική, γιατί δημιουργεί ανωμαλίες στη λειτουργία ορισμένων διατάξεων, π.χ. Θόρυβος ηλεκτρονικών διατάξεων.



Σχ. 2.5.

Μεταβολή του λόγου δευτερογενούς εκπομπής δ σε συνάρτηση με την ενέργεια των πρωτογενών ηλεκτρονίων.

## 2.6 Εκπομπή με ισχυρό πεδίο.

Μια μεταλλική επιφάνεια, χωρίς να θερμαίνεται, μπορεί κάτω από την επίδραση ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου κατάλληλης πολικότητας να εκπέμψει ηλεκτρόνια. Το φαινόμενο αυτό είναι η εκπομπή με ισχυρό πεδίο. Το ισχυρό πεδίο υποβιβάζει το φραγμό δυναμικού  $E_B$  και έτσι μειώνει το έργο εξόδου και διευκολύνει τα ηλεκτρόνια να εγκαταλείπουν την επιφάνεια. Ο υποβιβασμός αυτός του φραγμού δυναμικού είναι γνωστό ως φαινόμενο Schottky. Έξοδο ηλεκτρονίων έχομε με πεδία ισχυρότερα (εντάσεως  $10^8$  ή  $10^9$  V/cm), από αυτά του φαινομένου Schottky.

Η πυκνότητα του ρεύματος σε μια τέτοια εκπομπή δίνεται από τη σχέση:

$$J = C \cdot E^2 e^{-D/E} \quad (2.3.2)$$

όπου:  $E$  είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου αμέσως έξω από την επιφάνεια,  
 $C$  και  $D$  είναι σταθερές χαρακτηριστικές του υλικού της επιφάνειας,  
( $\theta$  είναι η βάση των νεπερείων λογαρίθμων).

## 2.7 Ασκήσεις.

- Κάθοδος που έχει κυλινδρικό σχήμα με διάμετρο 1 mm και μήκος 1 cm, φέρεται σε θερμοκρασία 1000°K. Αν θεωρηθεί το φαινόμενο Schottky αμελητέο, υπολογίσετε το ρεύμα θερμιονικής εκπομπής, όταν ο κάθοδος είναι: α) Από βολφράμιο, β) από φθόριο. (Α βολφραμίου και φθορίου 60 A/cm<sup>2</sup> (°K)<sup>2</sup>, έργο εξόδου βολφραμίου 4,52 eV και φθορίου 3,35 eV).
- Κάθοδος έχει επιφάνεια εκπομπής 0,1 cm<sup>2</sup> και εκπέμπει ρεύμα 0,5 A όταν βρίσκεται σε θερμοκρασία 1400 °K. Όταν έλθει σε θερμοκρασία 1600 °K, εκπέμπει ρεύμα 1,9 A. Ποιο είναι το έργο εξόδου του υλικού της;

3. Μονοχρωματικό φως με μήκος κύματος  $6000 \text{ \AA}$  προσπίπτει σε επιφάνειες από μολυβδαίνιο, καισιο, και νικέλιο. Από ποια επιφάνεια θα βγουν ηλεκτρόνια με μεγαλύτερη ταχύτητα; Ποια θα είναι η ταχύτητα αυτή; Υποθέτομε ότι οι επιφάνειες βρίσκονται στη θερμοκρασία του απολύτου μηδενός.
4. Η μέγιστη ταχύτητα ενός ηλεκτρονίου μέσα σε μια κάθοδο βολφραμίου είναι  $1,77 \times 10^8 \text{ m/sec}$ . Πόσο πρέπει να αυξηθεί η ταχύτητά του για να μπορέσει το ηλεκτρόνιο αυτό να εγκαταλείψει το μέταλλο;
5. Να βρεθεί η ενέργεια και η ορμή φωτονίου που έχει συχνότητα  $10^8 \text{ Hz}$ .
6. Από ατμούς υδραργύρου άπορροφάται ένα φωτόνιο μήκους κύματος  $1400 \text{ \AA}$ , οπότε εκπέμπονται δύο άλλα φωτόνια. Αν το ένα από αυτά έχει μήκος κύματος  $1850 \text{ \AA}$ , ποιο θα είναι το μήκος κύματος του άλλου φωτονίου;
7. Ποιμπάς εργάζεται σε συχνότητα  $103,7 \text{ MHz}$  με ισχύ  $200 \text{ kW}$ . Πόσα φωτόνια εκπέμπει στο δευτερόλεπτο;
8. Η ενέργεια ιονισμού του υδραργύρου είναι  $10,4 \text{ eV}$ . Ποια πρέπει να είναι η ελάχιστη ενέργεια σε Joule ενός ηλεκτρονίου για να μπορέσει αυτό να ιονίσει ένα δύτομο υδραργύρου;
9. Με ποια ταχύτητα, πρέπει να διασχίσει ένα ηλεκτρόνιο το εσωτερικό μιας λάμπας ατμών νατρίου για να παραχθεί κίτρινο φως μήκους κύματος  $5893 \text{ \AA}$ ;
-

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

### ΒΛΗΤΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ

#### 3.1 Γενικά.

Εξετάζοντας όσα έχουν σχέση με τη βλητική του ηλεκτρονίου, θα θεωρήσουμε το ηλεκτρόνιο ως φορτισμένο σωμάτιο, με μάζα ηρεμίας  $m_0 = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$  και φορτίο  $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Cb}$ , αρνητικό.

Σύμφωνα με τη θεωρία της σχετικότητας όσο αυξάνει η ταχύτητα ενός σώματος, αυξάνει και η μάζα του. Η μάζα  $m$  του σώματος σε κάποια ταχύτητα  $u$ , δίνεται από τη σχέση:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}} \quad (3.1.1)$$

όπου:  $m_0$  η μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου και  
 $c$  η ταχύτητα του φωτός στο κενό.

Η μεταβολή της μάζας των ηλεκτρονίων είναι αμελητέα όταν αυτά κινούνται σε πεδία που επικρατούν διαφορές δυναμικού κάτω από 1000 V. Για να αποκτήσει ένα ηλεκτρόνιο ταχύτητα ίση με το 0,1 της ταχύτητας του φωτός, πρέπει να κινηθεί μεταξύ σημείων με διαφορά δυναμικού 2560 V.

#### 3.2 Κίνηση ηλεκτρονίου σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο.

##### 3.2.1 Κίνηση παράλληλη προς τις δυναμικές γραμμές.

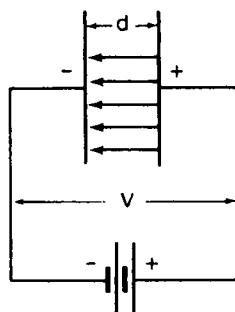
Ας θεωρήσουμε δύο επίπεδες και παράλληλες μεταλλικές πλάκες που απέχουν μεταξύ τους απόσταση  $d$  και που ανάμεσά τους επικρατεί σταθερή διαφορά δυναμικού V (σχ. 3.2a). Θεωρούμε επίσης ότι οι πλάκες βρίσκονται μέσα σε κενό χώρο. Στο εσωτερικό των πλακών το ηλεκτρικό πεδίο θα είναι ομογενές. Θεωρούμε επίσης την επίδραση της βαρύτητας αμελητέα σε σύγκριση με τις δυνάμεις που ασκεί τα πεδία. Η ένταση του ομογενούς αυτού ηλεκτρικού πεδίου θα έχει μέτρο:

$$E = \frac{V}{d} \quad (3.2.1)$$

(Θεωρούμε συμβατικά ως θετική φορά των δυναμικών γραμμών τη φορά από το + στο -).

Η δύναμη που θα ασκηθεί από το πεδίο πάνω σ' ένα ηλεκτρόνιο που θα βρεθεί μέσα σ' αυτό θα έχει μέτρο:

$$F = e \cdot E \quad (3.2.2)$$



Σχ. 3.2a.

Η δύναμη αυτή θα έχει τη διεύθυνση των δυναμικών γραμμών και, αν το ηλεκτρόνιο αφεθεί ελεύθερο και χωρίς αρχική ταχύτητα στην αρνητική πλάγια πλάκα, τότε θα κινηθεί από αυτή προς τη θετική πλάκα με ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση. Σύμφωνα και με τη σχέση (3.2.1) μπορεί να γραφεί:

$$F = e \frac{V}{d}$$

ή

$$F \cdot d = eV \quad (3.2.3)$$

Το γινόμενο όμως  $Fd$  είναι τό έργο που παρήγαγε η δύναμη κατά τη μετακίνηση του ηλεκτρονίου στην απόσταση  $d$ . Δηλαδή από την αρνητική πλάκα στη θετική. Το έργο αυτό ισούται με την κινητική ενέργεια που αποκτά το ηλεκτρόνιο, όταν ξεκινώντας χωρίς αρχική ταχύτητα και μέσα στο κενό, από την αρνητική πλάκα φθάνει στη θετική. Και θα είναι:

$$\frac{1}{2} mu^2 = eV \quad (3.2.4)$$

Η ενέργεια λοιπόν που θα αποκτήσει το ηλεκτρόνιο όταν κινηθεί μέσα σ' ένα ομογενές ηλεκτρικό πεδίο ανάμεσα σε δύο σημεία που μεταξύ τους επικρατεί διαφορά δυναμικού  $V$ , θα είναι:  $eV$ .

Επίσης, σύμφωνα με τη σχέση (3.2.4), η ταχύτητα που θα αποκτήσει το ηλεκτρόνιο θα είναι:

$$u = \sqrt{\frac{2eV}{m}} \quad (3.2.5)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ένα ηλεκτρόνιο που θα μείνει ελεύθερο να κινηθεί στο κενό χωρίς αρχική ταχύτητα ανάμεσα σε δύο σημεία που μεταξύ τους επικρατεί μια διαφορά δυναμικού  $1V$ , θα αποκτήσει κινητική ενέργεια:  $E = 1eV$ .

Το ποσό αυτό της ενέργειας ονομάζεται **ηλεκτρονικό βολτ** και χρησιμοποιείται ως μονάδα ενέργειας κυρίως στις περιπτώσεις σωματίων που κινούνται με μεγάλες ταχύτητες. Σ' αυτές τις περιπτώσεις είναι συνηθισμένη η χρήση και των πολλαπλασίων του:

$$1\text{MeV} = 10^6\text{eV} \quad \text{και} \quad 1\text{BeV} = 10^{12}\text{eV}$$

Εύκολα επίσης προκύπτει ότι:

$$1\text{eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Cb} \times 1\text{V} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

Από τη σχέση (3.2.5) υπολογίζεται επίσης ότι ένα ηλεκτρόνιο όταν κινηθεί με τις παραπάνω προϋποθέσεις ανάμεσα σε δύο σημεία που έχουν διαφορά δυναμικού 1V, θα αποκτήσει ταχύτητα:

$$u = 5,94 \times 10^5 \text{ m/sec}$$

Αν στη σχέση (3.2.3) θέσομε  $F = mg$ , όπου  $m$  η μάζα του ηλεκτρονίου και  $g$  η επιτάχυνση που του προσδίδει η δύναμη  $F$ , θα πάρομε:

$$m \cdot g \cdot d = eV$$

και

$$\gamma = \frac{eV}{m \cdot d} \quad (3.2.6)$$

ή

$$\gamma = \frac{e}{m} \cdot E \quad (3.2.7)$$

Από τις σχέσεις αυτές προκύπτει ότι με σταθερή τάση  $V$ , η επιτάχυνση που θα αποκτήσει το ηλεκτρόνιο θα είναι σταθερή. Η κίνηση δηλαδή θα είναι ομαλά επιταχυνόμενη. Οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν όταν θεωρηθεί αμελητέα η αύξηση της μάζας λόγω φαινομένων σχετικότητας. Τα μεγέθη μπαίνουν στις διάφορες σχέσεις με τα μέτρα τους.

### **Εφαρμογή.**

Αν ένα ηλεκτρόνιο κινηθεί στο εσωτερικό δύο επιπέδων και παραλλήλων πλακών που βρίσκονται στο κενό και μεταξύ τους επικρατεί μια σταθερή διαφορά δυναμικού 200 V, ποια θα είναι η ενέργεια και ποια η ταχύτητα που θα έχει όταν φθάσει στη θετική πλάκα έχοντας ξεκινήσει από την αρνητική χωρίς αρχική ταχύτητα;

### **Απάντηση.**

a) Η ενέργεια που θα έχει, θα είναι:

$$E = eV \rightarrow E = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Cb} \times 200 \text{ V} = 3,2 \times 10^{-17} \text{ Joule}$$

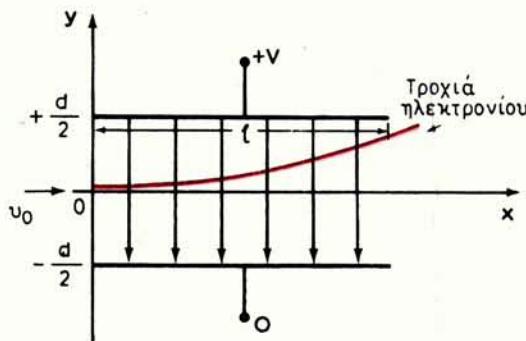
β) Η ταχύτητα που θα αποκτήσει, θα είναι:

$$u = \sqrt{\frac{2eV}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 3,2 \times 10^{-17} \text{ Joule}}{9 \times 10^{-31} \text{ kg}}} = 8,4 \times 10^8 \text{ m/sec}$$

### **3.2.2 Είσοδος του ηλεκτρονίου σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο κάθετα προς τις δυναμικές γραμμές με αρχική ταχύτητα $u_0$ .**

Έστω ότι ένα ηλεκτρόνιο εισέρχεται σ' ένα ομογενές ηλεκτρικό πεδίο κάθετα προς τις δυναμικές γραμμές του και με αρχική ταχύτητα  $u_0$  (σχ. 3.2β). Το πεδίο έχει δημιουργηθεί από την εφαρμογή μιας διαφοράς δυναμικού  $V$  μεταξύ δύο επιπέδων και παραλλήλων μεταλλικών πλακών που απέχουν μεταξύ τους απόσταση  $d$ . Αυτή είναι και η μόνη διαφορά δυναμικού που υπάρχει στο σύστημα. Θεωρούμε αμελητέα την ανομοιογένεια του πεδίου στα χείλη των πλακών.

Κατά τη διεύθυνση  $X$  δεν δρα το ηλεκτρικό πεδίο και συνεπώς η δύναμη που θα



Σχ. 3.2β.

ασκείται στο ηλεκτρόνιο κατά τη διεύθυνση X θα είναι μηδέν. Επομένως και η αντίστοιχη επιτάχυνση  $\gamma_x$  θα είναι μηδέν. Το μέτρο της δυνάμεως που θα ασκείται από το πεδίο κατά τη διεύθυνση Y, θα είναι:

$$F_y = e \frac{V}{d}$$

Η αντίστοιχη επιτάχυνση συνεπώς θα είναι:

$$\gamma_y = \frac{eV}{m.d} \quad (3.2.8)$$

Αφού όμως κατά τη διεύθυνση X η επιτάχυνση είναι μηδενική, η ταχύτητα θα είναι σταθερή και η κίνηση ισοταχής. Το διάστημα x που θα διανύσει το κινητό σε χρόνο t θα είναι:

$$x = u_0 t \quad (3.2.9)$$

Επίσης, αφού κατά τη διεύθυνση y υπάρχει σταθερή επιτάχυνση, η κίνηση θα είναι ομαλά επιταχυνόμενη και το διάστημα y που θα διανύσει το ηλεκτρόνιο κατά τη διεύθυνση αυτή σε χρόνο t, θα είναι:

$$y = \frac{eV}{2m.d} \cdot t^2 \quad (3.2.10)$$

(Η συνιστώσα της αρχικής ταχύτητας  $u_0$  κατά τη διεύθυνση y είναι μηδέν).

Απαλείφοντας το χρόνο από τις έξισώσεις (3.2.9) και (3.2.10), παίρνομε την εξίσωση της τροχιάς που διαγράφει το ηλεκτρόνιο κατά την κίνησή του στο χώρο ανάμεσα στις πλάκες. Η εξίσωση αυτή είναι:

$$y = \frac{eV}{2m.d.u_0^2} \cdot x^2 \quad (3.2.11)$$

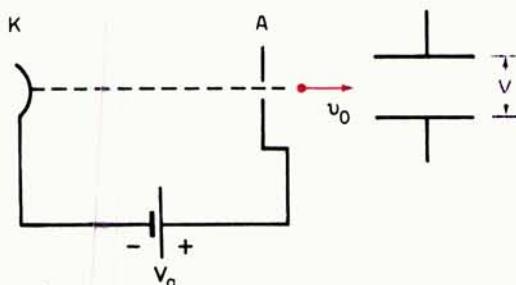
Η τροχιά αυτή είναι παραβολή.

Αν το μήκος των πλακών είναι l η κατακόρυφη μετατόπιση του ηλεκτρονίου κατά την έξοδό του από τις πλάκες θα είναι:

$$\gamma = \frac{eV}{2m.d.u_0^2} \cdot l^2 \quad (3.2.12)$$

Αν η τάση  $V$  υπερβεί μια κρίσιμη τιμή  $V_K$  η μετατόπιση γ θα υπερβεί την τιμή  $d/2$  πριν το ηλεκτρόνιο διανύσει το διάστημα  $l$ , με αποτέλεσμα να προσκρούσει στη θετική πλάκα.

Στην περίπτωση που το ηλεκτρόνιο συναντά τις δυναμικές γραμμές του πεδίου υπό γωνία, αναλύομε την αρχική ταχύτητα σε συνιστώσες  $u_{ox}$  και  $u_{oy}$  κατά τον άξονα  $X$  και  $Y$  αντίστοιχα και μελετούμε την κίνηση χωριστά. Η μετατόπιση θα είναι η συνισταμένη μετατόπιση.



Σχ. 3.2γ.  
Αρχή ηλεκτρονικού τηλεβόλου.

### 3.2.3 Αρχή ηλεκτρονικού τηλεβόλου.

Το ηλεκτρόνιο μπορεί να αποκτήσει την αρχική ταχύτητα με την οποία εισέρχεται στο χώρο των πλακών, με μια διάταξη που η αρχή της εικονίζεται στο σχήμα 3.2γ. Από μια κάθοδο  $K$  έχει βγει ένα ηλεκτρόνιο. Το ηλεκτρόνιο αυτό με την επίδραση του δυναμικού  $V_a$  που επικρατεί ανάμεσα στην κάθοδο  $K$  και την άνοδο  $A$ , επιταχύνεται. Η άνοδος είναι διαμόρφωμένη έτσι που το ηλεκτρόνιο να μην σταματά σ' αυτήν, αλλά να συνεχίζει το δρόμο του. Μετά την απομάκρυνσή του από την άνοδο, το ηλεκτρόνιο πρακτικά δεν υφίσταται την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου καθόδου-ανόδου και έτσι κινείται με σταθερή ταχύτητα. Αυτή η ταχύτητα είναι η αρχική ταχύτητα  $u_0$  με την οποία εισέρχεται στο χώρο των πλακών. Η διάταξη αυτή είναι η αρχή του **ηλεκτρονικού τηλεβόλου**.

Η ταχύτητα  $u_0$  που θ' αποκτήσει το ηλεκτρόνιο από το ηλεκτρονικό τηλεβόλο, αν ξεκινά από την κάθοδο  $K$  με αρχική ταχύτητα μηδέν, προκύπτει από τη σχέση (3.2.5) και είναι:

$$u_0 = \sqrt{\frac{2eV_a}{m}} \quad (3.2.13)$$

Αν αντικαταστήσουμε την τιμή  $u_0$  από τη σχέση (3.2.13) στη σχέση (3.2.11) θα πάρομε την εξισωση της τροχιάς σε συνάρτηση με το δυναμικό  $V_a$  έκτοξεύσεως του ηλεκτρονίου από το ηλεκτρονικό τηλεβόλο, που είναι:

$$\gamma = \frac{1}{4} - \frac{V}{V_a \cdot d} \cdot x^2 \quad (3.2.14)$$

Η σχέση επίσης (3.2.12) θα γραφεί:

$$\gamma = \frac{1}{4} - \frac{V}{V_a \cdot d} \cdot l^2 \quad (3.2.15)$$

Από τή σχέση αυτή φαίνεται ότι δύο μεγαλύτερη είναι η διαφορά δυναμικού  $V_0$  τόσο η απόκλιση κατά τον δίσονα  $Y$  είναι μικρότερη, όταν η διαφορά δυναμικού  $V$  ανάμεσα στις πλάκες είναι σταθερή. Εφαρμογή των παραπάνω θα συναντήσουμε στη μελέτη του καθοδικού σωλήνα.

### 3.3 Κίνηση ηλεκτρονίου σε σταθερό ομογενές μαγνητικό πεδίο.

Το μέτρο της δυνάμεως  $F$  που ασκεί ομογενές μαγνητικό πεδίο με μαγνητική επαγωγή  $B$ , σ' ένα ηλεκτρόνιο δίνεται από τη σχέση:

$$F = eB \cdot \eta\mu \quad (3.3.1)$$

όπου:  $e$  το φορτίο του ηλεκτρονίου,

$\mu$  το μέτρο της ταχύτητας με την οποία το ηλεκτρόνιο εισέρχεται στο μαγνητικό πεδίο,

$B$  το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής και

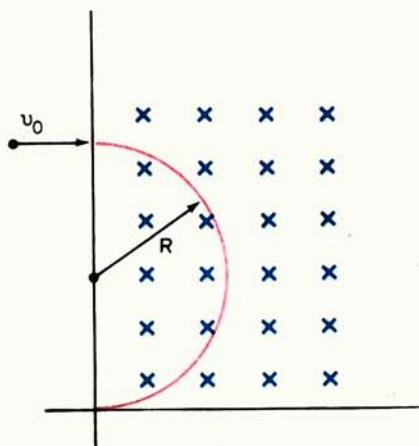
$\theta$  η γωνία που σχηματίζει το άνυστρα της ταχύτητας του ηλεκτρονίου με το άνυστρα της μαγνητικής επαγωγής.

Στη σχέση (3.3.1) το  $F$  μετρείται σε Newton, το  $\mu$  σε Coulomb, η  $e$  σε m/sec και η  $B$  σε Weber/m<sup>2</sup> (Tesla). Η διεύθυνση της δυνάμεως είναι κάθετη στο επίπεδο που περιέχει τα άνυστρα  $B$  και  $\mu$ .

Από τη σχέση 3.3.1 προκύπτει ότι το μαγνητικό πεδίο δεν ασκεί δύναμη σε ηλεκτρόνιο που δεν κινείται ( $\mu = 0$ ) ούτε και σε ηλεκτρόνιο που κινείται παράλληλα με τις δυναμικές γραμμές του πεδίου ( $\theta = 0$  ή  $180^\circ$  και άρα  $\eta\mu = 0$ ). Για να ασκηθεί δύναμη σε ηλεκτρόνιο που κινείται με ταχύτητα  $\mu$  θα πρέπει να είναι  $\theta \neq 0$  ή  $180^\circ$ . Παρακάτω θα εξετάσουμε αναλυτικότερα την κίνηση ηλεκτρονίου μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο.

#### 3.3.1 Είσοδος ηλεκτρονίου με αρχική ταχύτητα $u_0$ κάθετη προς τις δυναμικές γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου.

Θεωρούμε ότι το ηλεκτρόνιο εισέρχεται στο μαγνητικό πεδίο με αρχική ταχύτητα  $u_0$  κάθετη προς τις δυναμικές γραμμές του. Στο σχήμα 3.3a οι δυναμικές γραμμές είναι κάθετες στο επίπεδο της σελίδας και έχουν φορά από τον αναγνώστη προς τη σελίδα. Η δύναμη που θα ασκεί το πεδίο στο ηλεκτρόνιο θα είναι κά-



Σχ. 3.3a.

Κίνηση ηλεκτρονίου όταν εισέρχεται κάθετα στις γραμμές μαγνητικού πεδίου.

Θε στιγμή κάθετη τόσο προς τις δυναμικές γραμμές όσο και προς τη διεύθυνση της κινήσεως. Το μέτρο της σύμφωνα με τη σχέση (3.3.1) θα είναι:

$$F = eu_0 \cdot B \quad (3.3.2)$$

Η δύναμη αυτή επειδή είναι κάθετη διαρκώς στην ταχύτητα  $u_0$  είναι κεντρομόλος. Το ηλεκτρόνιο θα διαγράψει κυκλική τροχιά με σταθερό μέτρο γραμμικής ταχύτητας  $u_0$  και επιτάχυνση  $\frac{u_0^2}{R}$ , όπου  $R$  είναι η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς.

Έχομε λοιπόν:

$$F = m \frac{u_0^2}{R} = eu_0 \cdot B \quad (3.3.3)$$

Από τη σχέση (3.3.3) προκύπτει:

$$R = \frac{m \cdot u_0}{eB} \quad (3.3.4)$$

Από τη σχέση αυτή φαίνεται ότι για σταθερή ένταση του μαγνητικού πεδίου, η  $R$  είναι ανάλογη με την αρχική ταχύτητα  $u_0$  με την οποία εισέρχεται στο μαγνητικό πεδίο το ηλεκτρόνιο.

Η γωνιακή ταχύτητα θα είναι:

$$\omega = \frac{u_0}{R} = \frac{eB}{m} \quad (3.3.5)$$

Η περίοδος της κινήσεως του θα είναι:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi \cdot m}{eB} \quad (3.3.6)$$

Αν ο λόγος  $m/e$  μετρηθεί σε  $kg/c$ , και το  $B$  σε  $weber/m^2$  η σχέση (3.3.6) θα γραφεί:

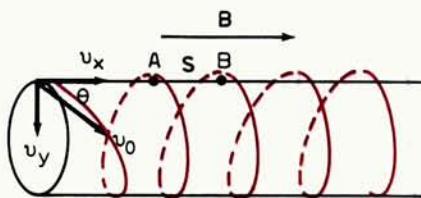
$$T = \frac{3,57 \times 10^{-11}}{B} \quad (3.3.7)$$

όπου: η περίοδος  $T$  θα είναι σε  $sec$ .

Από τις σχέσεις (3.3.5) και (3.3.6) φαίνεται ότι η γωνιακή ταχύτητα και η περίοδος της κινήσεως του ηλεκτρονίου είναι ανεξάρτητα από την αρχική ταχύτητα και την ακτίνα της κυκλικής τροχιάς. Αυτό σημαίνει πως ηλεκτρόνια που κινούνται με μεγαλύτερες ταχύτητες, είναι δυνατό να διαγράψουν τις τροχιές της μεγαλύτερης ακτίνας στον ίδιο χρόνο που ηλεκτρόνια που θα κινούνται με μικρότερες ταχύτητες θα διαγράψουν τις τροχιές μικρότερης ακτίνας. Το φαινόμενο αυτό αποτελεί τη βάση της λειτουργίας, π.χ. του κύκλοτρον ή των συστημάτων εστίασεως ηλεκτρονικής δέσμης με μαγνητικά πεδία κ.ά.

### 3.3.2 Είσοδος στο ομογενές μαγνητικό πεδίο με γωνία $\theta \neq 90^\circ$ .

Στην περίπτωση που το ηλεκτρόνιο εισέρχεται με γωνία  $\theta \neq 90^\circ$ , η ταχύτητά του μπορεί να αναλυθεί σε μια συνιστώσα  $u_x = u_0 \sin \theta$ , παράλληλη προς την  $B$



Σχ. 3.3β.

Κίνηση ηλεκτρονίου όταν εισέρχεται σε μαγνητικό πεδίο υπό γωνία Θ.

και μια άλλη  $u_y = u_0 \sin \theta$  (σχ. 3.3β). Κατά τη διεύθυνση της συνιστώσας  $u_x$  δεν ασκείται δύναμη στο ηλεκτρόνιο από το μαγνητικό πεδίο. Επομένως η  $u_x$  θα παραμείνει σταθερή και το ηλεκτρόνιο θα κινηθεί κατά τη διεύθυνση αυτή ίσοταχώς. Εξαιτίας της συνιστώσας  $u_y$  θα ασκηθεί στο ηλεκτρόνιο μια δύναμη Laplace που ενεργεί σαν κεντρομόλος και που θα το αναγκάσει να διαγράψει κυκλική τροχιά. Έτσι το ηλεκτρόνιο θα κάνει ταυτόχρονα δύο κινήσεις: μια ευθύγραμμη ομαλή και μια κυκλική. Αποτέλεσμα των δύο αυτών κινήσεων είναι να διαγράφει το ηλεκτρόνιο μια ελικοειδή τροχιά (σχ. 3.3α).

Το βήμα της έλικας  $S_{AB}$  δίνεται από τη σχέση:

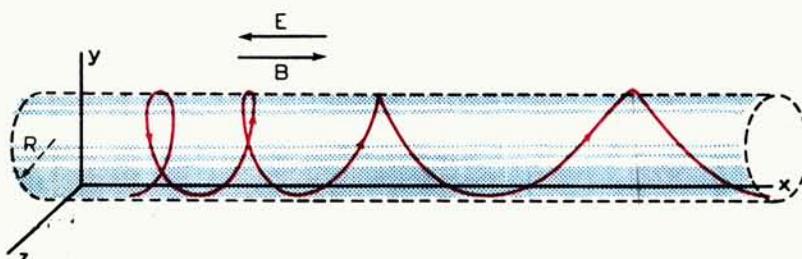
$$S_{AB} = \frac{u_0 \cdot 2\pi \cdot m}{eB} \text{ συνθ} \quad (3.3.8)$$

### 3.4 Κίνηση σε συνδυασμένα ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο, σταθερά.

#### 3.4.1 Ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο παράλληλα μεταξύ τους.

Όταν η αρχική ταχύτητα του ηλεκτρονίου είναι μηδέν ή είναι παράλληλη προς τη διεύθυνση των δυναμικών γραμμών, το μαγνητικό πεδίο δεν θα ασκεί δύναμη στο ηλεκτρόνιο. Δύναμη θα ασκεί μόνο το ηλεκτρικό πεδίο. Το ηλεκτρόνιο θα κινείται έτσι κατά τη διεύθυνση των δυναμικών γραμμών με σταθερή επιτάχυνση.

Αν το ηλεκτρόνιο εισέρχεται στο χώρο των πεδίων με αρχική ταχύτητα  $u_0$ , που σχηματίζει γωνία Θ με τις δυναμικές γραμμές, θα πρέπει να αναλύσουμε την ταχύτητα  $u_0$  σε συνιστώσες που να είναι η μια παράλληλη με τις δυναμικές γραμμές και η άλλη κάθετη (σχ. 3.4α). Αν στο σχήμα οι διευθύνσεις της μαγνητικής επαγωγής και της εντάσεως του ηλεκτρικού πεδίου είναι  $B$  και  $E$  αντίστοιχα, τότε κατά τη διεύθυνση  $x$  θα έχουμε ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση και παράλληλα με το επίπεδο για ομαλή κυκλική κίνηση. Η συνισταμένη κίνηση θα είναι έλικα με μεταβλητό βήμα.



Σχ. 3.4α.

Κίνηση ηλεκτρονίου σε παράλληλα μεταξύ τους μαγνητικό και ηλεκτρικό πεδίο.

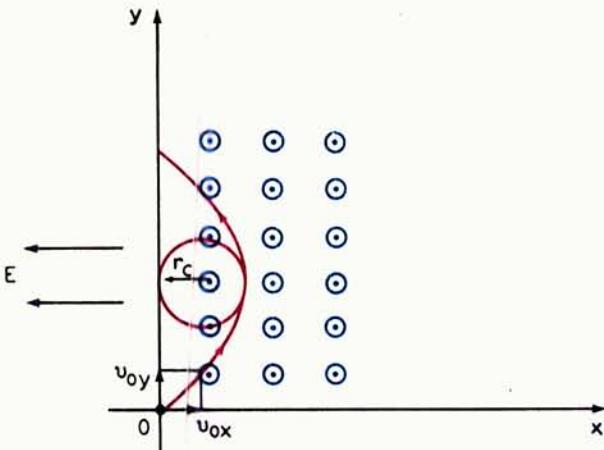
### 3.4.2 Ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο κάθετα μεταξύ τους.

Ας υποθέσουμε ότι το ηλεκτρόνιο εισέρχεται μέσα στο χώρο των πεδίων που είναι κάθετα μεταξύ τους όπως στο σχήμα 3.4β με μια συνιστώσα αρχικής ταχύτητας κατά τη διεύθυνση  $y, u_{oy}$ . Από την επίδραση των συνδυασμένων ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου θα προκύψει μια συνισταμένη κίνηση. Η τροχιά του ηλεκτρονίου θα είναι κυκλοειδής πάνω στο επίπεδο  $xy$  μέ εξισώσεις της μορφής:

$$x = r_c - r_a \text{ συνθ}$$

$$y = r_c \theta - r_a \eta \mu \theta$$

$$\text{όπου } r_c = \frac{mE}{B^2 \epsilon} \quad \text{καὶ} \quad r_a = r_c \left( 1 - \frac{B}{E} u_{oy} \right) \quad (3.4.1)$$



Σχ. 3.4β.

Κίνηση ηλεκτρονίου σε κάθετα μεταξύ τους μαγνητικό και ηλεκτρικό πεδίο.

Η τροχιά του ηλεκτρονίου εξαρτάται από την αρχική ταχύτητα και από τή σχέση μεταξύ των  $r_a$  και  $r_c$ . Την τροχιά μπορούμε να τη διαγράψουμε με τη βοήθεια ενός κύκλου ακτίνας  $r_c$  που θα βρίσκεται πάνω στον άξονα  $y$  (σχ. 3.4γ). Η τροχιά του ηλεκτρονίου θα είναι αυτή που θά διαγράφει ένα σημείο πάνω στην ακτίνα του κύκλου και που θα απέχει απόσταση  $r_a$  από το κέντρο.

Ανάλογα με τη σχέση μεταξύ των  $r_c$  και  $r_a$  και ανάλογα με την αρχική ταχύτητα, θα έχουμε κάθε φορά και διαφορετικό είδος τροχιάς. Έτσι θα έχουμε τις παρακάτω περιπτώσεις (σχ. 3.4γ).

— Αν  $u_{oy} = 0$ , θα είναι  $r_c = r_a$ , οπότε η τροχιά θα είναι κοινή κυκλοειδής της μορφής α.

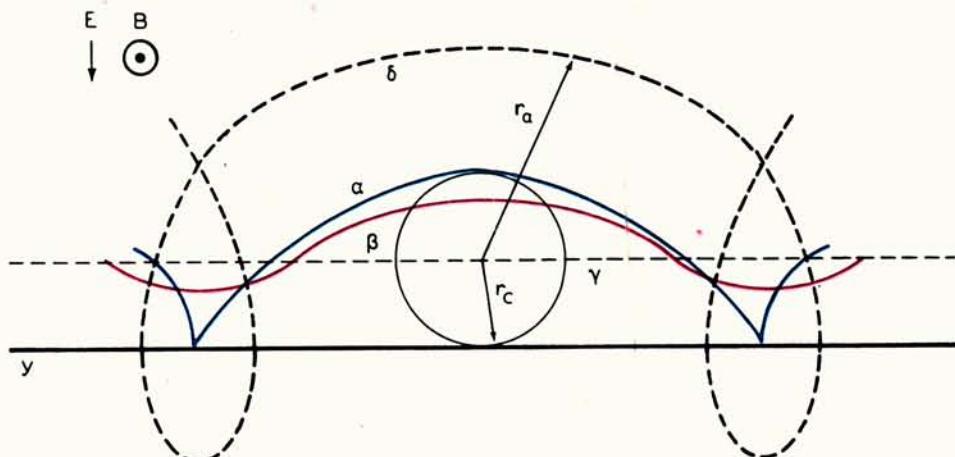
— Αν  $u_{oy} < \frac{E}{B}$  τότε  $r_c > r_a$  και η τροχιά είναι της μορφής β.

— Αν  $u_{oy} = \frac{E}{B}$  οπότε  $r_a = 0$  με τροχιά ευθεία γραμμή γ.

— Αν  $u_{oy} > \frac{E}{B}$  η τροχιά είναι της μορφής δ.

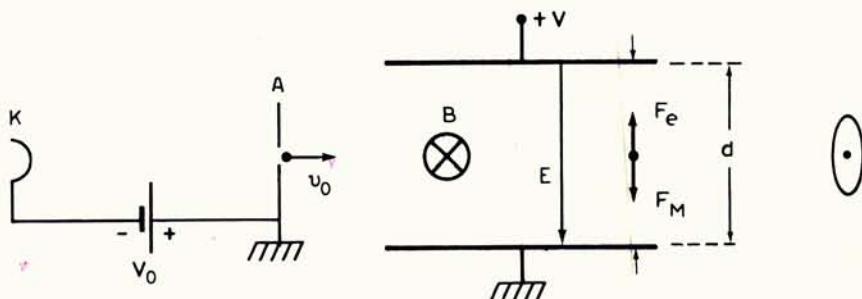
#### Εφαρμογή.

Για τη μέτρηση του λόγου  $\theta/\pi$  ενός ηλεκτρονίου χρησιμοποιούμε τη διάταξη του σχήματος 3.4δ. Από ένα ηλεκτρονικό τηλεβόλο που λειτουργεί με τάση  $V_o = 1000$  V, εκτοξεύεται ηλεκτρόνιο



Σχ. 3.4γ.

Τροχιά ηλεκτρονίου για διαφορετικές ταχύτητες  $u_0$  και διαφορετικούς λόγους  $\frac{B}{\epsilon}$



Σχ. 3.4δ.

μέσα σε δύο παράλληλες επίπεδες πλάκες, ανάμεσα στις οποίες επικρατούν, ένα ηλεκτρικό πεδίο πού δημιουργείται από μια διαφορά δυναμικού  $V = 500$  V και ένα μαγνητικό πεδίο επαγγής  $B = 2,7 \times 10^{-3}$  Wb/m<sup>2</sup> κάθετο προς το ηλεκτρικό και με τη φορά του σχήματος. Η απόσταση ανάμεσα στις πλάκες είναι  $d = 1$  cm. Το ηλεκτρόνιο εισέρχεται στο χώρο ανάμεσα στις πλάκες κάθετα στις δυναμικές γραμμές των πεδίων και εξέρχεται από τις πλάκες χωρίς να υποστεί καμιά εκτροπή. Ποιος είναι ο λόγος  $e/m$ ;

#### Απάντηση.

Η αρχική ταχύτητα  $u_0$  μέ την οποία θα εισέλθει το ηλεκτρόνιο στο χώρο ανάμεσα στις πλάκες θα είναι αυτή που θα έχει αποκτήσει από το ηλεκτρονικό τηλεβόλο. Σύμφωνα με τη σχέση (3.2.5) αυτή η αρχική ταχύτητα είναι:

$$u_0 = \sqrt{\frac{2eV_0}{m}} \quad (1)$$

Αφού το ηλεκτρόνιο δεν εκτρέπεται, οι δυνάμεις  $F_e$ , και  $F_m$  που ασκούν το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο θα είναι κατά μέτρο ίσες αλλά με αντίθετη φορά (σχ. 3.4δ).

Η δύναμη από το ηλεκτρικό πεδίο θα είναι κατά μέτρο:

$$F_e = eE \quad \text{αλλά} \quad E = \frac{V}{d}$$

Όπότε:  $F_e = e \frac{V}{d}$  (2)

Η δύναμη από το μαγνητικό πεδίο θα είναι κατά μέτρο:  $F_M = Beu_0$  που με βάση την (1) γίνεται:

$$F_M = Be \sqrt{\frac{2eV_0}{m}} \quad (3)$$

Εξισώνοντας τις (2) και (3) και λύνοντας ως προς  $e/m$ , παίρνομε:

$$\begin{aligned} e \frac{V}{d} &= Be \sqrt{\frac{2eV_0}{m}} \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{e}{m} &= \frac{V^2}{2V_0 \cdot d^2 \cdot B^2} \end{aligned} \quad (4)$$

Αντικαθιστώντας τα δεδομένα του προβλήματος, παίρνομε:

$$\frac{e}{m} = 1,78 \times 10^{11} \text{ Cb/kg}$$

### 3.5 Ασκήσεις.

- Πόση είναι η κινητική ενέργεια ηλεκτρονίου που κινείται με ταχύτητα ίση με τα 99,9% της ταχύτητας του φωτός;
- Ανάμεσα σε δύο επίπεδες παράλληλες πλάκες που απέχουν μεταξύ τους απόσταση 4 cm, υπάρχει διαφορά δυναμικού 200 V. Ένα ηλεκτρόνιο ξεκινά χωρίς αρχική ταχύτητα από την αρνητική πλάκα. Να βρεθεί η δύναμη που ασκείται στο ηλεκτρόνιο, ο χρόνος που χρειάζεται για να φθάσει στη θετική πλάκα καθώς και η ταχύτητα με την οποία θα φθάσει σ' αυτή.
- Ηλεκτρόνιο ξεκινά χωρίς αρχική ταχύτητα και επιταχύνεται από μια διαφορά δυναμικού 1000 V. Να υπολογισθεί η ταχύτητα του: α) Παραμελώντας τα φαινόμενα σχετικότητας, β) πάροντας υπόψη τα φαινόμενα αυτά. Να γίνουν οι ίδιοι υπολογισμοί για διαφορά δυναμικού 10<sup>6</sup> V.
- Να υπολογισθεί η ακτίνα της τροχιάς που θα διαγράψει ηλεκτρόνιο που εισέρχεται με κινητική ενέργεια 400 eV, κάθετα στις δυναμικές γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου επαγωγής 0,001 Wb/m<sup>2</sup>.
- Σε ομογενές μαγνητικό πεδίο με επαγωγή Wb/m<sup>2</sup> εισέρχεται κάθετα προς τις δυναμικές γραμμές ηλεκτρόνιο με αρχική ταχύτητα 30 m/sec. Ποιά θα είναι η γωνιακή ταχύτητα που θα αποκτήσει; Ποιά θα είναι η περίοδος και η ακτίνα περιφοράς του;
- Ηλεκτρόνιο που έχει επιταχυνθεί από διαφορά δυναμικού 1000 V εισέρχεται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο επαγωγής 0,01 Wb/m<sup>2</sup> με γωνία 5° προς τις δυναμικές γραμμές. Να βρεθεί το είδος και τα στοιχεία της τροχιάς του ηλεκτρονίου.
- Ηλεκτρόνιο που κινείται σε ευθεία γραμμή με ενέργεια 100 eV, εισέρχεται κάθετα προς τις δυναμικές γραμμές ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται από διαφορά δυναμικού 100 V ανάμεσα σε δύο επίπεδες και παράλληλες πλάκες μήκους 2 cm. Οι πλάκες απέχουν μεταξύ τους απόσταση 2 cm. Σε ποιά διεύθυνση και μόσχη επαγωγή πρέπει να εφαρμοσθεί ομογενές μαγνητικό πεδίο ανάμεσα στις πλάκες, έτσι που να μην υποστεί το ηλεκτρόνιο καμιά εκτροπή από την ευθύγραμμη πορεία του;

### 3.6 Αρχή εστιάσεως ηλεκτρονικής δέσμης.

Ο κλάδος των ηλεκτρονικών που μελετά το σχηματισμό και τη διαδρομή στις η-

λεκτρονικές δέσμες είναι η **Ηλεκτρονική Οπτική**. Η διαδρομή ηλεκτρονίων ή γενικότερα φορτισμένων σωματίων μέσα σε ηλεκτρικά ή μαγνητικά πεδία ή σε συνδυασμό τους, παρουσιάζει μεγάλες αναλογίες προς τη διαδρομή φωτεινών ακτίνων που περνούν μέσα από διάφορα οπτικά μέσα.

Με κατάλληλα πεδία μπορούμε π.χ. να σχηματίσουμε μια ηλεκτρονική δέσμη, να την εστιάσουμε ή και να προκαλέσουμε διάθλασή της, όπως και σε μια φωτεινή δέσμη με τη χρησιμοποίηση καταλλήλων οπτικών μέσων.

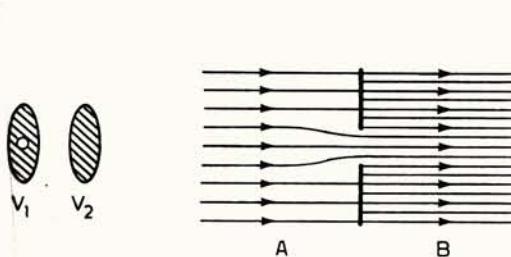
Η ανάλογη εφαρμογή των νόμων της κλασικής οπτικής στην ηλεκτρονική φυσική έχει οδηγήσει στην κατασκευή μιας σειράς από όργανα, όπως τα ηλεκτρονικά μικροσκόπια, οι σωλήνες τηλεοράσεως, οι επιταχυντές σωματίων μεγάλης ενέργειας, οι φασματογράφοι μαζών κ.α.

Η λειτουργία επίσης πολλών διατάξεων, όπως π.χ. σωλήνων ακτίνων X, ειδικών λυχνιών κλπ., βελτιώθηκε με την εφαρμογή των αρχών της Ηλεκτρονικής Οπτικής. Παρακάτω θα δούμε μερικές περιπτώσεις εστιάσεως ηλεκτρονικής δέσμης με τη βοήθεια ηλεκτρονικών **οπτικών** μέσων.

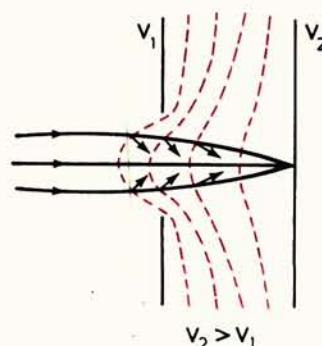
### 3.6.1 Ηλεκτροστατική εστίαση.

Παρακάτω περιγράφονται δύο συνηθισμένες απλές διατάξεις ηλεκτροστατικής εστιάσεως ηλεκτρονίων.

Στη μια, η άνοδος προς την οποία οδηγούνται τα ηλεκτρόνια έχει τη μορφή κυκλικού δίσκου με οπή στο κέντρο του. Στο σχήμα 3.6α φαίνεται το σύστημα και μια τομή του. Το ηλεκτρικό πεδίο είναι ισχυρότερο στην περιοχή Β από ό,τι στην Α (σχ. 3.6α). Οι δυναμικές γραμμές του Α συγκλίνουν στην περιοχή της οπής. Έτσι η τροχιά ενός ηλεκτρονίου που θα κινείται από το χώρο Α προς το χώρο Β στην περιοχή της οπής θα συγκλίνει προς το κέντρο του δίσκου. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 3.6β. Στο σχήμα φαίνεται η τομή των ισοδυναμικών επιφανειών που δίνει τις ισοδυναμικές γραμμές, τις γραμμές δηλαδή που αποτελούνται από σημεία με ίσα δυναμικά.



Σχ. 3.6α.



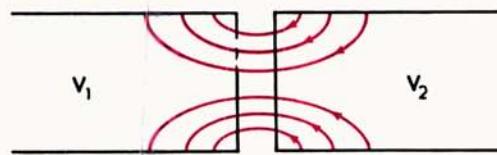
Σχ. 3.6β.

Τομή συστήματος εστιάσεως ηλεκτρονικής δέσμης με κυκλικό δίσκο. Οι διακοπόδεμένες γραμμές είναι οι ισοδυναμικές. Τα βέλη δείχνουν τις δυνάμεις που ασκούνται στα ηλεκτρόνια.

Φαίνονται επίσης και οι δυνάμεις που ασκούνται πάνω στα ηλεκτρόνια που ανήκουν σε τρεις διαφορετικές ηλεκτρονικές ακτίνες. Οι δυνάμεις αυτές είναι τέτοιες που τελικά οι ηλεκτρονικές ακτίνες εστιάζουν. Η διάταξη αυτή χαρακτηρίζεται ως ηλεκτροστατικός φακός.

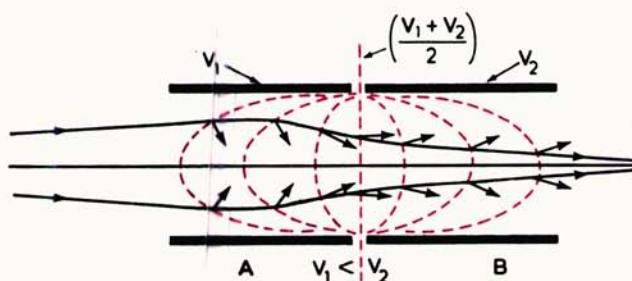
Στην άλλη διάταξη εστιάσεως χρησιμοποιείται σύστημα από δύο ομοαξονικούς κυλίνδρους που απέχουν μεταξύ τους μικρή απόσταση. Οι κύλινδροι μπορεί να έχουν ίσες ή άνισες διαμέτρους.

Ο ένας κύλινδρος φέρεται σε δυναμικό μεγαλύτερο από τον άλλο. Στην τομή ενός τέτοιου συστήματος, που φαίνεται στο σχήμα 3.6γ, φαίνονται οι δυναμικές γραμμές του πεδίου.



Σχ. 3.6γ.

Τομή συστήματος ηλεκτροστατικής εστιάσεως με δύο κυλίνδρους, όπου  $V_2 > V_1$ .



Σχ. 3.6δ.

Τομή συστήματος ηλεκτροστατικού φακού με ομοαξονικούς κυλίνδρους που βρίσκονται σε δυναμικά  $V_1$  και  $V_2$ .

Στο σχήμα 3.6δ φαίνονται οι ισοδυναμικές γραμμές και οι δυνάμεις που ασκούνται πάνω στα ηλεκτρόνια σε διάφορα σημεία τριών ηλεκτρονικών ακτίνων που εισέρχονται στο χώρο των δύο ομοαξονικών κυλίνδρων. Όπως φαίνεται στο σχήμα, μέσα στο σωλήνα Α οι δυνάμεις είναι τέτοιες, ώστε οι ηλεκτρονικές ακτίνες να συγκλίνουν προς τον άξονα του συστήματος.

Οι δυνάμεις που ασκούνται στο χώρο του σωλήνα Β, οδηγούν σε απόκλιση των ακτίνων. Επειδή όμως στο χώρο Β τα ηλεκτρόνια κινούνται με μεγαλύτερη ταχύτητα απ', ότι στο χώρο Α, η απόκλιση είναι μικρότερη από τη σύγκλιση, με τελικό αποτέλεσμα την εστίαση.

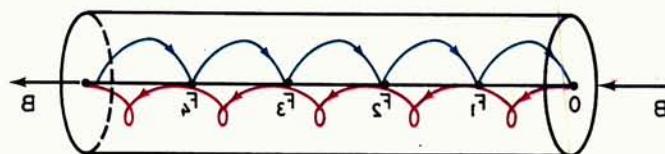
Το σύστημα αυτό είναι επίσης ένας ηλεκτροστατικός φακός. Η «εστιακή απόσταση» αυτού του φακού αλλάζει όταν αλλάζουν τα δυναμικά  $V_1$  και  $V_2$ .

Συνδυασμός φακού με επίπεδους δίσκους και φακού με κυλίνδρους χρησιμοποιείται π.χ. στο ηλεκτρονικό **τηλεβόλο** του καθοδικού σωλήνα που θα δούμε παρακάτω.

### 3.6.2 Μαγνητική εστίαση.

Όπως είδαμε στη σχετική παράγραφο, η περίοδος της κυκλικής τροχιάς που θα διαγράψει ηλεκτρόνιο που εισέρχεται σε σταθερό ομογενές μαγνητικό πεδίο με αρχική ταχύτητα  $u_0$ , κάθετη προς τις δυναμικές γραμμές του, είναι ανεξάρτητη από την αρχική ταχύτητα και την ακτίνα της τροχιάς (σχέση 3.3.6). Αν το ηλεκτρόνιο εισέρχεται με γωνία, τότε η συνιστώσα της αρχικής ταχύτητάς του κατά τη διεύθυνση των δυναμικών γραμμών είναι σταθερή. Η κίνησή του δηλαδή είναι ισοταχής.

Ας θεωρήσουμε έναν κύλινδρο μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο επαγωγής  $B$ , με τον άξονά του παράλληλο προς τις δυναμικές γραμμές του (σχ. 3.6ε).



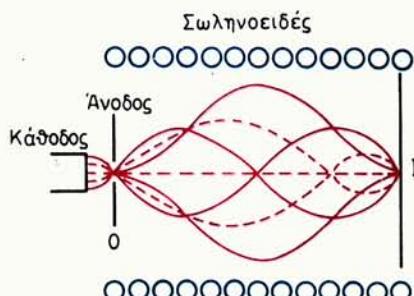
Σχ. 3.6ε.

Διαδοχικές εστίασεις ηλεκτρονίων που κινούνται με την ίδια συνιστώσα ταχύτητας κατά τη διεύθυνση των δυναμικών γραμμών.

Ηλεκτρόνιο που θα ξεκινήσει από το  $O$  με αρχική ταχύτητα  $u_0$  και με γωνία ως προς τη διεύθυνση των δυναμικών γραμμών θα διαγράψει έλικα. Η τροχιά του ηλεκτρονίου θα τέμνει τον άξονα του κυλίνδρου σε ίσες αποστάσεις, των οποίων το μέγεθος θα εξαρτάται από τη συνιστώσα της αρχικής ταχύτητας κατά τη διεύθυνση των δυναμικών γραμμών.

Άλλο τώρα ηλεκτρόνιο πού θα ξεκινήσει από το  $O$ , με διαφορετική από το προηγούμενο αρχική ταχύτητα, θα χρειασθεί και αυτό τον ίδιο χρόνο για να κάνει μια πλήρη περιστροφή και θα συναντά και αυτό τον άξονα του κυλίνδρου σε ίσα μεταξύ τους διαστήματα. Αν τα δύο ηλεκτρόνια αποκτήσουν την ίδια συνιστώσα ταχύτητας προς τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου, θα συναντούν τον άξονα σε ίδιες αποστάσεις ταυτόχρονα. Έτσι όλα τα ηλεκτρόνια που θα βγαίνουν από το  $O$  με την ίδια συνιστώσα ταχύτητας κατά τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου, θα συναντώνται σε διάφορα σημεία του άξονα του κυλίνδρου. Θα εστίαζουν δηλαδή στα σημεία αυτά. Το σύστημα αυτό είναι ένας μαγνητικός φακός.

Το μαγνητικό πεδίο στον παραπάνω κύλινδρο μπορεί να δημιουργηθεί αν τον περιβάλλομε με ένα σωληνοειδές (σχ. 3.6στ) που να διαρρέεται από σταθερό ρεύμα.

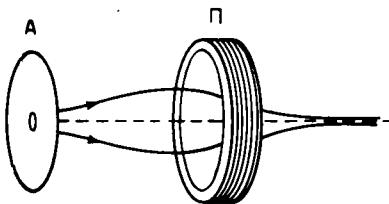


Σχ. 3.6στ.  
Διάταξη εστίασεως ηλεκτρονίων με τη βοήθεια σωληνοειδούς.

Στο σημείο Ο του κυλίνδρου υπάρχει το άνοιγμα μιας ανόδου με σταθερό δυναμικό. Τα ηλεκτρόνια που πέρνούν από το άνοιγμα της ανόδου σχηματίζουν μια αποκλίνουσα δέσμη. Αν οι ταχύτητες με τις οποίες μπαίνουν τα ηλεκτρόνια από το άνοιγμα μέσα στον κύλινδρο σχηματίζουν μικρές γωνίες με τις δυναμικές γραμμές του πεδίου, οι κάθετα προς τις δυναμικές γραμμές συνιστώσες τους θα είναι πολύ μικρές, ενώ οι συνιστώσες κατά τη διεύθυνση των δυναμικών γραμμών θα είναι κατά προσέγγιση ίσες, γιατί περίου ίσες είναι και οι ταχύτητες με τις οποίες φθάνουν στην άνοδο που έχει σταθερό δυναμικό. Τα ηλεκτρόνια έτσι θα εστιάζουν σε ίσα διαστήματα κατά μήκος του άξονα του κυλίνδρου όπως εύκολα προκύπτει από τη σχέση 3.3.8. Στη σχέση, όταν θ πολύ μικρό, το συνθ  $\approx 1$ , άρα  $S_{AB} = \text{σταθερό}$ , όταν το  $u_0$ , δηλαδή η ανοδική τάση  $V_a$  είναι σταθερή και το  $B$  σταθερό. Αν αλλάξουμε το ρεύμα που διαρρέει το σωληνοειδές θ' αλλάζει το  $B$  και έτσι θα αλλάξει και η απόσταση των σημείων εστιάσεως. Έτσι μπορούμε να εστιάσουμε τη δέσμη πάνω σε οθόνη τοποθετημένη σε ορισμένη απόσταση.

Η παραπάνω μέθοδος που φαίνεται αρχικά εύκολη παρουσιάζει δυσκολίες στην πράξη.

Απλούστερα μπορεί να γίνει εστίαση με ένα λεπτό πηνίο  $\Pi$ , τοποθετημένο κοντά στο άνοιγμα της ανόδου  $A$ , από το οποίο βγαίνουν τα ηλεκτρόνια (σχ. 3.6ζ). Το μαγνητικό πεδίο βέβαια στο λεπτό αυτό πηνίο δεν είναι ομογενές. Οι δυνάμεις δύμας που ασκούνται είναι τέτοιες, ώστε τα ηλεκτρόνια πάλι εστιάζουν σε κάποια απόσταση από το πηνίο.



Σχ. 3.6ζ.  
Εστίαση με τη βοήθεια λεπτού πηνίου.

Το σύστημα αυτό είναι ένα άλλο είδος μαγνητικού φακού. Πάλι η εστιακή απόσταση μπορεί να αλλάξει με την αλλαγή του ρεύματος στο πηνίο ή την αλλαγή της αποστάσεώς του από την άνοδο  $A$ .

Τους μαγνητικούς φακούς συναντάμε σε πολλές συσκευές, όπως τους σωλήνες τηλεοράσεως, τα ηλεκτρονικά μικροσκόπια και αλλού.

### 3.7 Καθοδικός σωλήνας.

Η βλητική των ηλεκτρονίων έχει μια πολύ ενδιαφέρουσα εφαρμογή στον καθοδικό σωλήνα, που αποτελεί βασικό στοιχείο για πάρα πολλές ηλεκτρονικές συσκευές οι οποίες χρησιμοποιούνται τόσο στην έρευνα όσο και στην εφαρμογή.

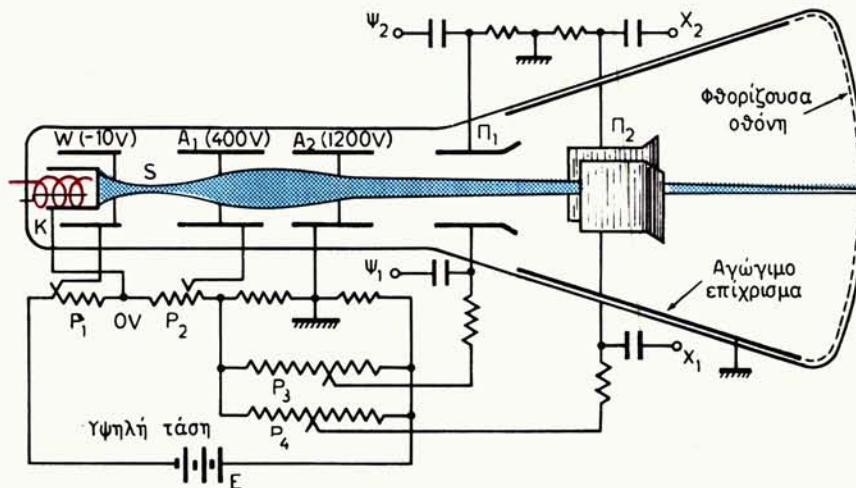
Η τηλεόραση, το radar, ο παλμογράφος και πλήθος από ηλεκτρονικά όργανα ελέγχου και μετρήσεων έχουν ως κύριο εξάρτημά τους τον καθοδικό σωλήνα.

Με τον καθοδικό σωλήνα μπορούμε να επιτύχουμε οπτική απεικόνιση ενός ηλεκτρικού σήματος προβάλλοντας σε μια κατάλληλα επιχρισμένη οθόνη το ίχνος μιας εστιασμένης δέσμης ηλεκτρονίων.

### 3.7.1 Καθοδικός σωλήνας ηλεκτροστατικής αποκλίσεως.

Στο σχήμα 3.7α φαίνεται ένας συνηθισμένος καθοδικός σωλήνας με ηλεκτροστατική εστίαση και απόκλιση.

Διακρίνομε την κάθοδο K που θερμαίνεται και εκπέμπει τα ηλεκτρόνια. Η κάθοδος περιβάλλεται από το ρυθμιστικό ηλεκτρόδιο W. Το ηλεκτρόδιο αυτό έχει μορφή κυλίνδρου με οπή προς την πλευρά της οθόνης.



Σχ. 3.7α.

Καθοδικός σωλήνας ηλεκτροστατικής εστίασεως και αποκλίσεως με ενδεικτικές τάσεις στα διάφορα ηλεκτρόδια.

Το ρυθμιστικό ηλεκτρόδιο έχει δυναμικό αρνητικότερο από το δυναμικό της καθόδου και με τη μεταβολή του δυναμικού του μπορούμε να ρυθμίζουμε τον αριθμό των ηλεκτρονίων που βγαίνουν από την κάθοδο για νά σχηματίσουν τη δέσμη. Η δέσμη αυτή περνά από την οπή και εστιάζει για πρώτη φορά έξω από το ηλεκτρόδιο που δρα και ως **συγκεντρωτικό φακός** σε συνδυασμό με την πρώτη άνοδο A<sub>1</sub>.

Ακολουθεί η πρώτη άνοδος A<sub>1</sub>, που έχει μορφή ομοαξονικού κυλίνδρου με τον κύλινδρο του ρυθμιστικού πλέγματος. Η άνοδος αυτή έχει σχετικά μεγάλο θετικό δυναμικό ως προς την κάθοδο και χρησιμεύει για την πρώτη επιτάχυνση των ηλεκτρονίων της δέσμης αλλά και για το σχηματισμό μαζί με τη δεύτερη άνοδο ενός άλλου συγκεντρωτικού φακαύ που προορίζεται να εστιάζει τη δέσμη πάνω στην οθόνη.

Η δεύτερη άνοδος A<sub>2</sub> είναι και αυτή ένας ομοαξονικός με τους προηγούμενους κύλινδρους που έχει ακόμη μεγαλύτερο θετικό δυναμικό από την πρώτη άνοδο, με την οποία σχηματίζει έναν άλλο συγκεντρωτικό φακό που τελικά εστιάζει και πάλι τη δέσμη. Με κατάλληλη ρύθμιση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δύο ανόδους A<sub>1</sub>A<sub>2</sub>, μπορούμε να εστιάσουμε τη δέσμη πάνω στην οθόνη, στην οποία σχηματίζεται έτσι μια φωτεινή κηλίδα.

Η κάθοδος, το ρυθμιστικό ηλεκτρόδιο, η πρώτη και η δεύτερη άνοδος, αποτελούν το **ηλεκτρονικό τηλεβόλο** του καθοδικού σωλήνα.

Μετά τό ηλεκτρονικό τηλεβόλο υπάρχουν τα πλακίδια κατακόρυφης και οριζόν-

τιας αποκλίσεως. Είναι δύο ζεύγη πλακιδίων, με ειδική μορφή, σε επίπεδα κάθετα μεταξύ τους. Το ένα ζεύγος  $P_2$ , χρησιμεύει για την οριζόντια απόκλιση της δέσμης και το άλλο ζεύγος  $P_1$ , για την κατακόρυφη. Για το σκοπό αυτό μπορούν να συνδεθούν σε αυτά εσωτερικά ή εξωτερικά κατάλληλες τάσεις.

Το σύνολο είναι κλεισμένο σε σωλήνα με κενό της τάξεως  $10^{-6}$  mmHg. Ο σωλήνας στο ύψος των πλακιδίων διευρύνεται και παίρνει κωνικό σχήμα που τερματίζεται με μια ελαφρά σφαιρική επιφάνεια, την οθόνη.

Στο σχήμα 3.7α φαίνονται επίσης τα βασικά κυκλώματα με τα οποία δίνονται οι κατάλληλες τάσεις στον καθοδικό σωλήνα, καθώς και η πορεία της ηλεκτρονικής δέσμης από την κάθοδο ως την οθόνη. Πάνω στα διάφορα ηλεκτρόδια σημειώνονται ενδεικτικές τάσεις που είναι της τάξεως μεγέθους των τάσεων που παίρνουν τα ηλεκτρόδια αυτά. Χαρακτηριστικό είναι πως οι συνδέσεις έχουν γίνει με τρόπο που το + της υψηλής τάσεως να είναι προσγειωμένο. Αυτό γίνεται κυρίως για την προστασία αυτού που χειρίζεται το σωλήνα.

Με το ποτενσιόμετρο  $P_1$ , μεταβάλλεται το δυναμικό του ρυθμιστικού ηλεκτροδίου με συνέπεια, όπως είπαμε, να μεταβάλλεται ο αριθμός των ηλεκτρονίων που βγαίνουν από την κάθοδο και φθάνουν στην οθόνη. Από τον αριθμό όμως των ηλεκτρονίων εξαρτάται η φωτεινότητα της κηλίδας πάνω στην οθόνη. Άρα με το ποτενσιόμετρο  $P_1$ , ρυθμίζεται η φωτεινότητα του ίχνους της δέσμης πάνω στην οθόνη. Πρέπει να σημειώσουμε ότι η μεταβολή του δυναμικού αυτού επηρεάζει ελαφρά και την εστίαση.

Το ποτενσιόμετρο  $P_2$  ρυθμίζει την τάση της πρώτης ανόδου από την οποία εξαρτάται η εστίαση της δέσμης.

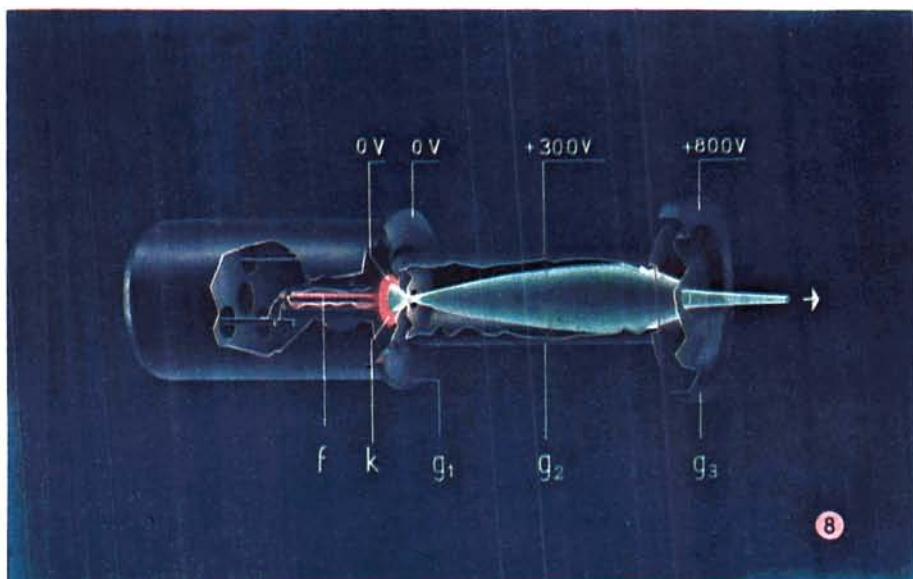
Με τα ποτενσιόμετρα  $P_3$  και  $P_4$  ρυθμίζεται η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα πλακίδια στα ζεύγη  $P_1$  και  $P_2$  αντίστοιχα. Η τάση αυτή είναι συνεχής και χρησιμεύει για τη σταθερή τοποθέτηση της κηλίδας στο επιθυμητό σημείο της οθόνης.

Χαρακτηριστική είναι η κατασκευή των πλακιδίων. Από την πλευρά που εξέρχεται η δέσμη τα πλακίδια αποκλίνουν έτσι, ώστε να υπάρχουν περιθώρια για την απόκλιση της δέσμης.

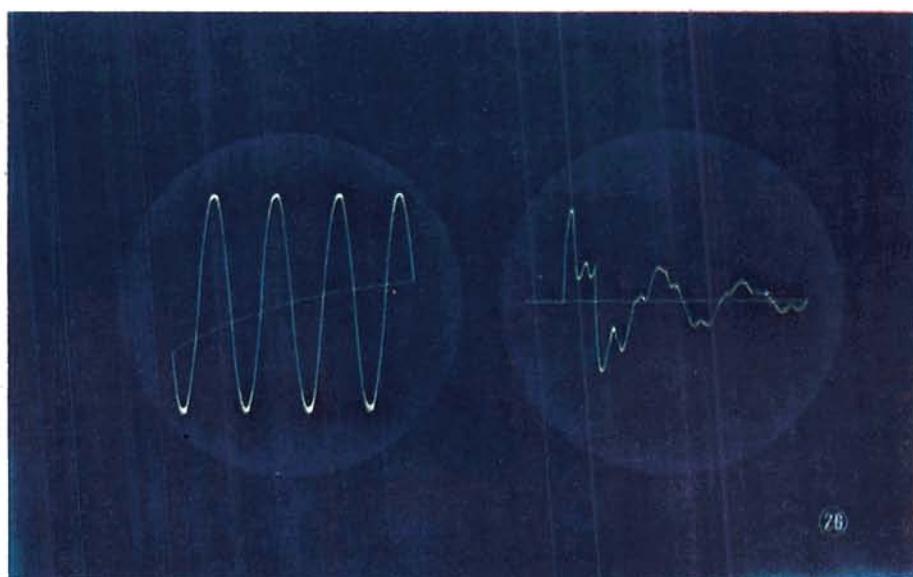
Στο κάθε ζεύγος πλακιδίων υπάρχει και ένα ζεύγος ακροδεκτών ( $X_1$ ,  $X_2$ ,  $Y_1$ ,  $Y_2$ ), δύο που μπορεί κανείς να συνδέσει τις τάσεις που θέλει να μελετήσει κάνοντας συνδυασμούς της οριζόντιας και της κατακόρυφης αποκλίσεως της δέσμης. Συνήθως οι τάσεις που πρόκειται να εξετασθούν ενισχύονται πριν συνδεθούν στους ακροδέκτες αυτούς. Στο σχήμα 3.7β φαίνεται ένα ηλεκτρονικό τηλεβόλο όπως πραγματικά μπορεί να είναι.

Η οθόνη είναι εσωτερικά επιχρισμένη με λεπτό στρώμα από υλικό που φθορίζει ή φωσφορίζει. Το επίχρισμα είναι τόσο λεπτό, ώστε να μπορεί να φαίνεται από το έξω μέρος το φωτεινό ίχνος που δημιουργεί η πρόσπιτωση των ηλεκτρονίων πάνω του [σχ. 3.7γ(α)].

Από τα αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά κάθε σωλήνα είναι το χρώμα του ίχνους στην οθόνη του όπως και ο χρόνος που μπορεί να μείνει στην οθόνη το ίχνος μετά την απομάκρυνση της δέσμης. Ο χρόνος αυτός, ανάλογα με την οθόνη, μπορεί να είναι από  $10^{-6}$  sec [μέχρι μερικά λεπτά]. Στον πίνακα 3.7.1 φαίνονται τα χαρακτηριστικά μερικών τύπων σωλήνων.



**Σχ. 3.7β.**  
Ηλεκτρονικό τηλεθόλο καθοδικού σωλήνα.  
f) Νήματα. k) Κάθοδος.  $g_1$ ) Ρυθμιστικό πλέγμα.  $g_2-g_3$ ) Άνοδοι.



**Σχ. 3.7γ(a).**  
Εικόνα στην οθόνη παλμογράφου.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.7.1**  
**Τα χαρακτηριστικά μερικών τύπων σωλήνων**

Ένδειξη σωλήνα	Φθορίζουσα οθόνη	Φωσφορίζουσα οθόνη	Διάρκεια παραμονής εικόνας	Χρήση
P <sub>1</sub>	Πράσινη	Πράσινη	Μέση (msec)	Γενική
P <sub>2</sub>	Μπλέ - Πράσινο	Πράσινο	Μακρά (sec)	Γενική
P <sub>4</sub>	Λευκή	Κίτρινη	Μέση (msec)	Τηλεόραση
P <sub>11</sub>	Μπλέ	Μπλέ	μsec	Φωτογραφίες ταχέως εξελισσομένων φαινομένων
P <sub>16</sub>	Ιώδες και πρός τό υπεριώδες	Ιώδες και πρός το υπεριώδες	Πολύ μικρή	Απεικόνιση μετακινουμένων κηλίδων

Το εσωτερικό του κωνικού μέρους του σωλήνα είναι επιχρισμένο με αγώγιμο υλικό, συνήθως μια σύνθεση από γραφίτη που συνδέεται και παίρνει το δυναμικό της δεύτερης ανόδου.

Το επίχρισμα αυτό χρησιμεύει στο να μαζεύει τα ηλεκτρόνια που βγαίνουν από δευτερογενή εκπομπή από το υλικό της οθόνης ή ξεφεύγουν από την ηλεκτρονική δέσμη. Χωρίς αυτό τα ηλεκτρόνια θα δημιουργούσαν κατανεμημένα ηλεκτρικά πεδία που θα επηρέαζαν την εστίαση της δέσμης.

Σε ορισμένους σωλήνες το επίχρισμα αυτό συνδέεται με την υψηλή τάση και χρησιμεύει ως ηλεκτρόδιο επιταχύνσεως. Στο σχήμα 3.7γ(β) φαίνεται το σύνολο ενός καθοδικού σωλήνα.

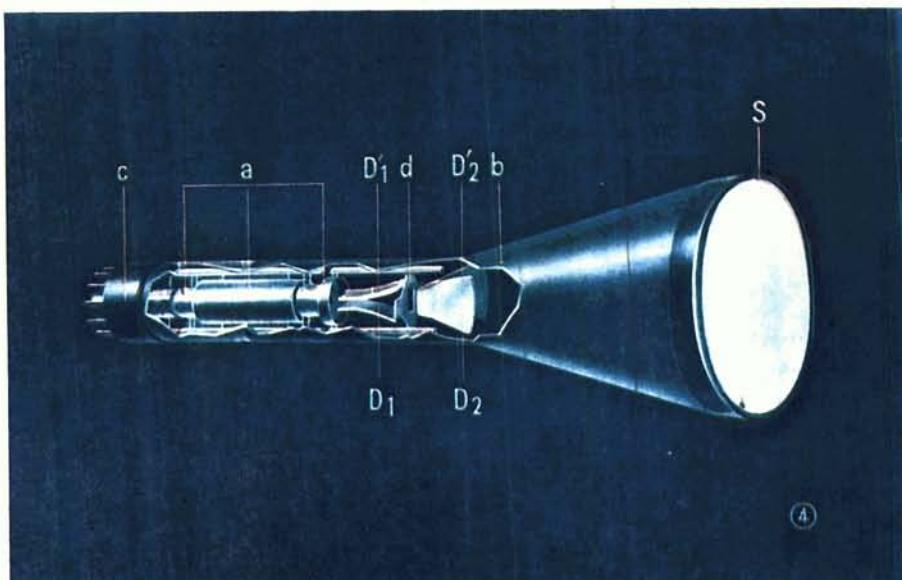
### 3.7.2 Ηλεκτρομαγνητικοί καθοδικοί σωλήνες.

Στους σωλήνες αυτούς μπορεί να έχομε μαγνητική εστίαση και μαγνητική απόκλιση ή ηλεκτροστατική εστίαση και μαγνητική απόκλιση.

Σωλήνες με μαγνητική εστίαση και μαγνητική απόκλιση είναι κυρίως οι σωλήνες λήψεως εικόνων της τηλεοράσεως. Εσωτερικά οι σωλήνες αυτοί έχουν απλούστερη κατασκευή από τους ηλεκτροστατικούς. Η εστίαση γίνεται με ηλεκτρομαγνητικούς φακούς που δημιουργούνται από πηνία που περιβάλλουν το σωλήνα. Τα πηνία αυτά, που περιβάλλουν εξωτερικά τον σωλήνα, όταν διαρρέονται από ρεύμα γίνονται ηλεκτρομαγνήτες. Με ρύθμιση της εντάσεως του ρεύματος μπορούμε να επιτύχομε την κατάλληλη θέση εστίασεως.

Με παρόμοιο τρόπο γίνεται και η απόκλιση της δέσμης. Πηνία τοποθετημένα στο εξωτερικό του σωλήνα, μετά το πηνίο εστίασεως, δημιουργούν, όταν διαρρέονται από ρεύμα, τέτοια μαγνητικά πεδία ώστε να οδηγούν σε κατακόρυφη και οριζόντια απόκλιση. Στο σχήμα 3.7δ φαίνεται η συγκρότηση ενός τέτοιου σωλήνα.

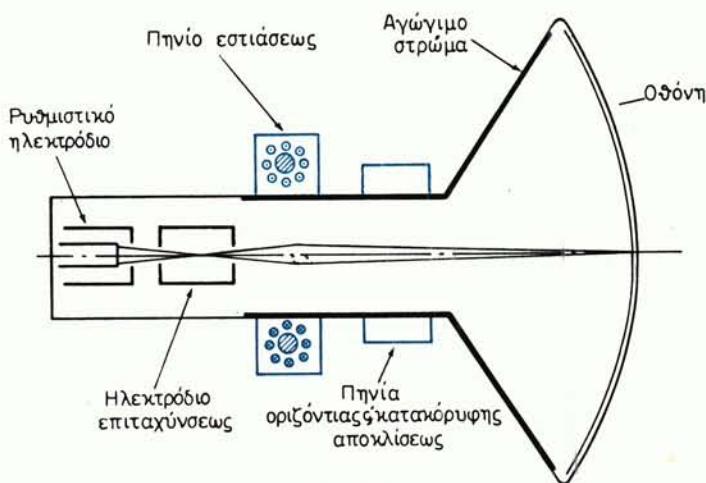
Εδώ δηλαδή το ρόλο που έπαιζαν τα πλακίδια αποκλίσεως στους ηλεκτροστατικούς σωλήνες τον παίζουν τα πηνία αποκλίσεως. Η απόκλιση δηλαδή, αντί να



Σχ. 3.7γ(β).

Πραγματική δομή καθοδικού σωλήνα.

α) Τμήμα ηλεκτρονικού τηλεβόλου.  $D_1 D_1'$  και  $D_2 D_2'$  πλακίδια οριζόντιας και κατακόρυφης αποκλίσεως. S) Οθόνη.



Σχ. 3.7δ.

Καθοδικός σωλήνας μαγνητικής εστιάσεως και αποκλίσεως.

γίνεται με ηλεκτροστατικό πεδίο γίνεται με μαγνητικό.

Στους σωλήνες με ηλεκτροστατική εστιάση και μαγνητική απόκλιση, υπάρχει το **ηλεκτρονικό τηλεβόλο** που παράγει την εστιασμένη δέσμη. Δε χρειάζονται δηλαδή

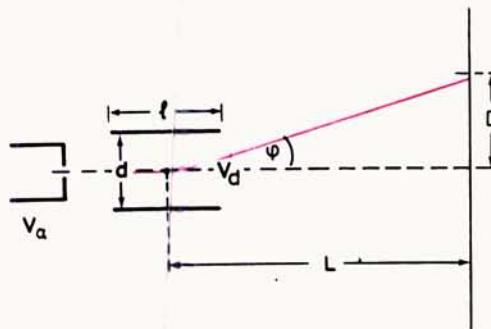
πηνία εστιάσεως. Πηνία χρησιμοποιούνται μόνο για την απόκλιση. Τέτοιοι είναι οι σωλήνες προβολής των δεκτών τηλεοράσεως.

### 3.7.3 Ευαισθησία αποκλίσεως.

Στον ηλεκτροστατικό σωλήνα ορίζεται ως ευαισθησία αποκλίσεως  $S_e$  το πηλίκο του μήκους της μετατοπίσεως  $D$  της κηλίδας πάνω στην οθόνη προς την τάση  $V_d$  των πλακιδίων που την προκάλεσε. Η ευαισθησία αποκλίσεως είναι:

$$S_e = \frac{D}{V_d} = \frac{L \cdot l}{2d \cdot V_a}$$

όπου:  $L$  είναι η απόσταση του κέντρου του χώρου μεταξύ των πλακιδίων αποκλίσεως από την οθόνη,  
 $l$  τό μήκος των πλακιδίων,  
 $d$  η απόσταση ανάμεσά τους και  
 $V_a$  το δυναμικό της τελικής ανόδου (σχ. 3.7ε).



Σχ. 3.7ε.  
Ηλεκτροστατική απόκλιση.

Στους σωλήνες μαγνητικής αποκλίσεως η ευαισθησία αποκλίσεως  $S_m$ , θα είναι το πηλίκο του μήκους της μετατοπίσεως  $D$  της κηλίδας πάνω στην οθόνη [σχ. 3.7στ(α)] προς την ένταση του μαγνητικού πεδίου  $B$  που την προκάλεσε. Δηλαδή:

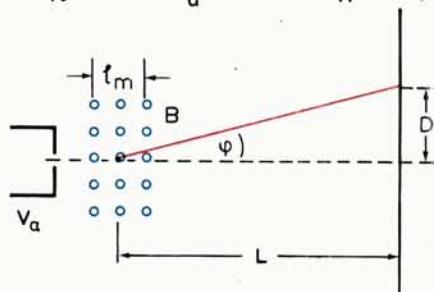
$$S_m = \frac{D}{B} = \sqrt{\frac{\epsilon}{m}} \frac{l_m \cdot L}{\sqrt{2V_a}}$$

όπου:  $\epsilon/m$  ο λόγος του φορτίου προς τη μάζα του ηλεκτρονίου,  
 $l_m$  το μήκος της διαδρομής που δρα το μαγνητικό πεδίο,  
 $L$  η απόσταση του κέντρου του μαγνητικού πεδίου που δρα από την οθόνη  
και  
 $V_a$  το δυναμικό της τελικής ανόδου.

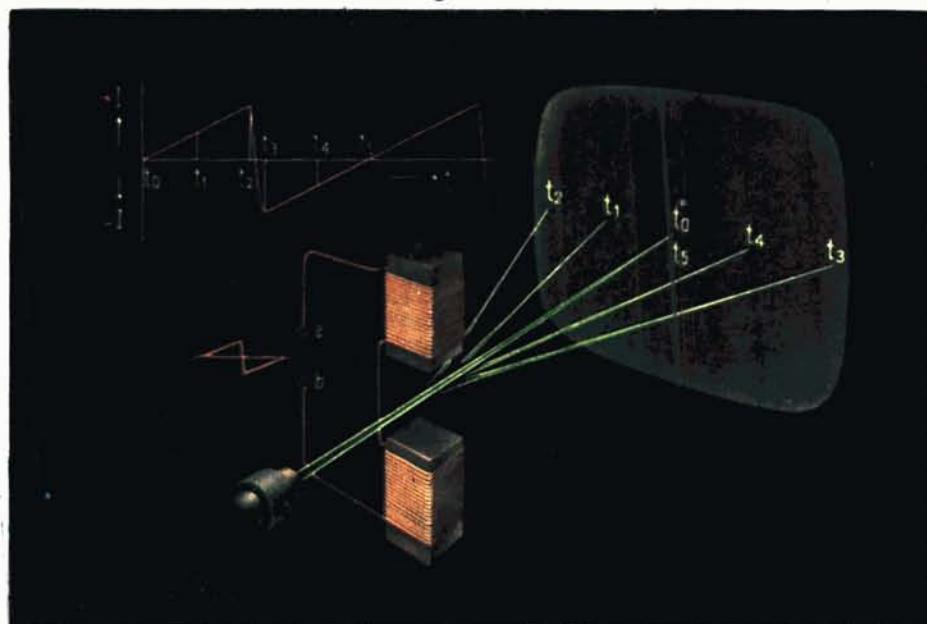
Σωλήνες ηλεκτροστατικής αποκλίσεως έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν με τάσεις μεγάλου φάσματος συχνοτήτων. Το ανώτατο πάντως όριο εργασίας των συνηθισμένων καθοδικών σωλήνων είναι 10 MC/s. Υπάρχουν όμως και σωλήνες ειδικής κατασκευής που εργάζονται σε μεγαλύτερες συχνότητες.

Οι σωλήνες με μαγνητική απόκλιση εργάζονται σε πολύ χαμηλότερες συχνότητες. Όταν στα άκρα ενός πηνίου εφαρμόζεται σταθερή τιμή τάσεως, το ρεύμα που το διαρρέει και συνεπώς η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του, εξαρτάται από τη συχνότητα της τάσεως αυτής. Αυτό σημαίνει ότι στους σωλήνες μαγνητικής αποκλίσεως, η απόκλιση θα εξαρτάται από τη συχνότητα της τάσεως που εφαρμόζεται. Γι' αυτό και τέτοιοι σωλήνες χρησιμοποιούνται συνήθως σε περιπτώσεις που η συχνότητα σαρώσεως είναι σταθερή, όπως συμβαίνει π.χ. στούς σωλήνες της τηλεοράσεως ή των ραντάρ. Στο σχήμα 3.7στ(β) δίνεται μια παραστατική εικόνα οριζόντιας μαγνητικής αποκλίσεως.

Η ηλεκτροστατική απόκλιση απαιτεί μικρή κατανάλωση ισχύος και δεν επηρεάζεται αισθητά από μεταβολές της τάσεως τροφοδοσίας. Οι σωλήνες ηλεκτροστατικής αποκλίσεως χρησιμοποιούνται πολύ στους ηλεκτρονικούς παλμογράφους, όπου οι γωνίες αποκλίσεως [φ στα σχήματα 3.7ε και 3.7στ(α)] είναι συνήθως μικρές. Η τάση της τελικής ανόδου  $V_a$  δεν είναι σχετικά μεγάλη και έτσι η ευαισθη-



(a)



Σχ. 3.7στ.

α) Μαγνητική απόκλιση. β) Παραστατική εικόνα μαγνητικής αποκλίσεως.

σίας αποκλίσεως  $S_a$ , που είναι αντιστρόφως ανάλογη με την  $V_a$  επηρεάζεται λιγότερο.

Σε σωλήνες, όπως π.χ. της τηλεοράσεως, που η  $V_a$  είναι πολύ μεγάλη (10 kV), χρησιμοποιούμε μαγνητική απόκλιση, όπου η ευαισθησία αποκλίσεως είναι αντιστρόφως ανάλογη με την  $\sqrt{V_a}$ . Έτσι επιτυγχάνομε μεγάλες γωνίες αποκλίσεως 90° ή 110° που χρειάζονται σ' αυτήν την περίπτωση.

Η ταχύτητα σαρώσεως της οθόνης από τη δέσμη μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερη στους σωλήνες ηλεκτροστατικής αποκλίσεως από οτι στους σωλήνες μαγνητικής.

Παρόλο που το κενό στους καθοδικούς σωλήνες είναι μεγάλο, συμβαίνει, πολλές φορές, να υπάρχουν μερικά μόρια αερίου που μπορεί να ιονισθούν.

Στους ηλεκτροστατικούς σωλήνες η απόκλιση των αρνητικών ίόντων που θα εμφανίζονταν ακολουθεί την απόκλιση των ηλεκτρονίων. Στους μαγνητικούς σωλήνες που η απόκλιση εξαρτάται από τη μάζα, τα ίόντα δεν αποκλίνουν αισθητά και πέφτουν στην περιοχή του κέντρου της οθόνης δημιουργώντας ανωμαλίες στην εικόνα. Με ειδικές κατασκευές τα ίόντα αυτά μπορεί να παγιδευθούν πριν φθάσουν στην οθόνη και να εξουδετερωθεί έτσι η ενοχλητική τους επίδραση.

Πολλές φορές η οθόνη επιχρίτεται εσωτερικά μ' ενα λεπτό στρώμα από αλουμίνιο. Το στρώμα αυτό επιτρέπει να περάσουν στη φθορίζουσα επιφάνεια μόνο τα ηλεκτρόνια ενώ συγκρατεί τα ίόντα που είναι πολύ μεγαλύτερα. Το επίχρισμα αυτό ανακλά επίσης και ένα μέρος από το φως που παράγεται στην οθόνη και που αλλιώς θα χανόταν στο εσωτερικό του σωλήνα.

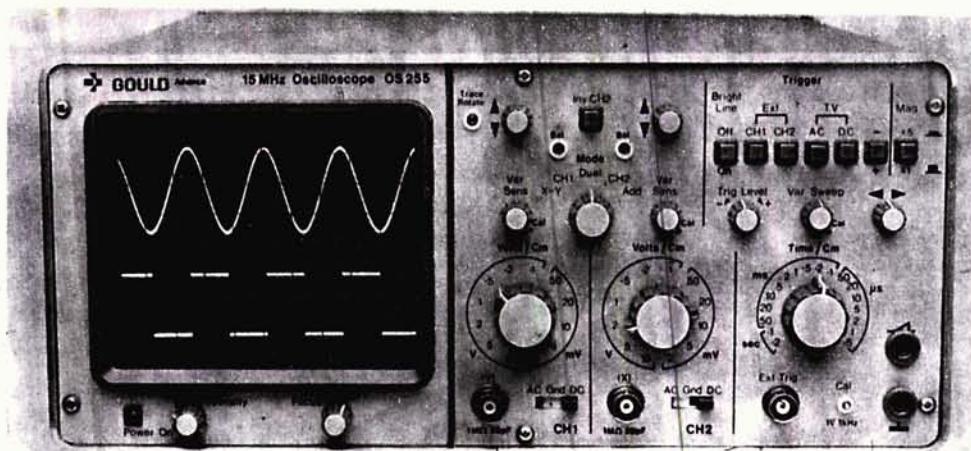
### **Εφαρμογές.**

Ο καθοδικός σωλήνας είναι το κυριότερο εξάρτημα του ηλεκτρονικού παλμογράφου. Στη συσκευή του πάλμογράφου υπάρχουν ενσωματωμένα: το τροφοδοτικό για την παραγωγή των υψηλών τάσεων και των καταλλήλων πολώσεων, ενισχυτές για τις τάσεις που θα τεθούν στα πλακίδια αποκλίσεως, γεννήτρια για την παραγωγή της πριονωτής τάσεως σαρώσεως καθώς και εξαρτήματα με τα οποία μπορούμε εξωτερικά να ρυθμίσουμε την εστίαση, τη φωτεινότητα και τη θέση της δέσμης στην οθόνη. Ο παλμογράφος είναι πολύ χρήσιμο όργανο για εργαστηριακή χρήση αλλά και για ελεγχο. Μπορούμε να μετρούμε τάσεις, ρεύματα, διαφορές φάσεως, συχνότητες, βαθμό διαμορφώσεως κ.α. (σχ. 3.7ζ). Σήμερα οι περισσότεροι εργαστηριακοί παλμογράφοι είναι διπλής δέσμης. Με κατάλληλα ηλεκτρονικά τηλεβόλα δημιουργούνται και φθάνουν στην οθόνη δυο ξεχωριστές ηλεκτρονικές δέσμες.

'Άλλη εφαρμογή τού καθοδικού σωλήνα έχομε στο ραδιοεντοπιστή (Radar). Με συνδυασμό καταλλήλων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, μπορούμε να μετατρέψουμε σε φωτεινό ίχνος πάνω στην οθόνη ενός καθοδικού σωλήνα, την ηχώ ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος που έχει προσκρούσει σε κάποιο εμπόδιο, όπως π.χ. μια έκταση ξηράς, ένα πλοίο, ένα αεροπλάνο, ένα σύννεφο καταιγίδας κλπ.

Το Radar χρησιμοποιείται πολύ στη ναυσιπλοΐα, την αεροπορία, τη μετεωρολογία, την τηλεμέτρηση και άλλοι.

Από τις σημαντικότερες εφαρμογές καθοδικού σωλήνα είναι και η τηλεόραση. Σ' αυτή με σωλήνες ειδικής κατασκευής λαμβάνεται η εικόνα και στη συνέχεια εκπέμπεται ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα που με κατάλληλη επεξεργασία στο δέκτη μετατρέπεται πάλι σε εικόνα στην οθόνη ενός καθοδικού σωλήνα.



Σχ. 3.7ζ.  
Ηλεκτρονικός παλμογράφος.

#### 3.7.4 Ασκήσεις.

1. Τα πλακίδια οριζόντιας αποκλίσεως ενός καθοδικού σωλήνα έχουν μήκος 1 cm και απέχουν μεταξύ τους 0,4 cm. Η απόσταση L του κέντρου των πλακιδίων από την οθόνη είναι 15 cm. Η τάση της τελευταίας ανόδου  $V_a$  είναι 800 V. Πόση θα είναι η απόκλιση της δέσμης πάνω στην οθόνη, αν στα πλακίδια εφαρμοσθεί τάση 200 V;
2. Σε καθοδικό σωλήνα ηλεκτροστατικής αποκλίσεως τα πλακίδια αποκλίσεως έχουν μήκος 6 cm και απέχουν μεταξύ τους 2 cm. Η οθόνη απέχει 20 cm από το κέντρο των πλακιδίων αποκλίσεως. Το δυναμικό της τελικής ανόδου  $V_a$  είναι 1,5 kV. Να υπολογισθεί το μήκος της γραμμής που θα σχηματισθεί στην οθόνη αν στα πλακίδια κατακόρυφης αποκλίσεως εφαρμοσθεί εναλλασσόμενη τάση πλάτους 50 V.
3. Στα πλακίδια κατακόρυφης αποκλίσεως ενός καθοδικού σωλήνα εφαρμόζεται μια τάση  $V_y = 100$  ημ (2π1000t) και ταυτόχρονα στα πλακίδια οριζόντιας αποκλίσεως τάση  $V_x = 120$  ημ (2π250t). Αν η ευαισθησία αποκλίσεως και για τα δυο ζεύγη των πλακιδίων είναι 0,23 mm/V, πόσο θα απέχει η κηλίδα από το κέντρο της οθόνης 0,0005 sec μετά την εφαρμογή αυτών των τάσεων;
4. Σε σωλήνα μαγνητικής αποκλίσεως το μήκος που δρα το μαγνητικό πεδίο αποκλίσεως είναι  $l_m = 2,5$  cm και η απόσταση του κέντρου του από την οθόνη  $L = 30$  cm. Η απόκλιση της δέσμης στην οθόνη είναι 8 cm όταν τό δυναμικό της τελικής ανόδου είναι  $V_a = 1000$  V. Ποιά είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου αποκλίσεως;

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

### ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΛΥΧΝΙΕΣ

#### 4.1 Γενικά.

Πριν από τη διάδοση των διατάξεων με ημιαγωγούς (κρυσταλλοδίοδοι, τρανζίστορ κλπ.), τα βασικά στοιχεία στις ηλεκτρονικές συσκευές ήταν οι ηλεκτρονικές λυχνίες.

Στις λυχνίες αυτές εκμεταλλευόμαστε την κίνηση του ηλεκτρονίου μέσα σ' ένα χώρο κενό (ηλεκτρονικές λυχνίες κενού) ή σε ειδικές περιπτώσεις, μέσα σε χώρο που υπάρχει αέριο με κατάλληλη πίεση (ηλεκτρονικές λυχνίες αερίου).

Το **κενό**, στην περίπτωση των ηλεκτρονικών λυχνιών κενού, είναι ένας συμβατικός όρος που σημαίνει χώρο με πολύ χαμηλή πίεση (κάτω από  $10^{-6}$  mmHg) όπου τα ηλεκτρόνια κινούνται χωρίς να συγκρούονται με μόρια αερίου που μπορεί να βρίσκονται στο χώρο αυτό. Οι μόνοι ηλεκτρικοί φορείς είναι τα ηλεκτρόνια.

Στις λυχνίες αερίου οι ηλεκτρικοί φορείς είναι ηλεκτρόνια αλλά και ιόντα από το αέριο που υπάρχει μέσα σ' αυτές με πιέσεις γύρω στα  $10^{-3}$  mmHg ή και μεγαλύτερες και που ιονίζεται κατά την λειτουργία τους. Τα αέρια που χρησιμοποιούνται σ' αυτές τις λυχνίες είναι κυρίως ατμοί υδραργύρου και τα αδρανή αέρια: αργό, κρυπτό, ξένο, ήλιο.

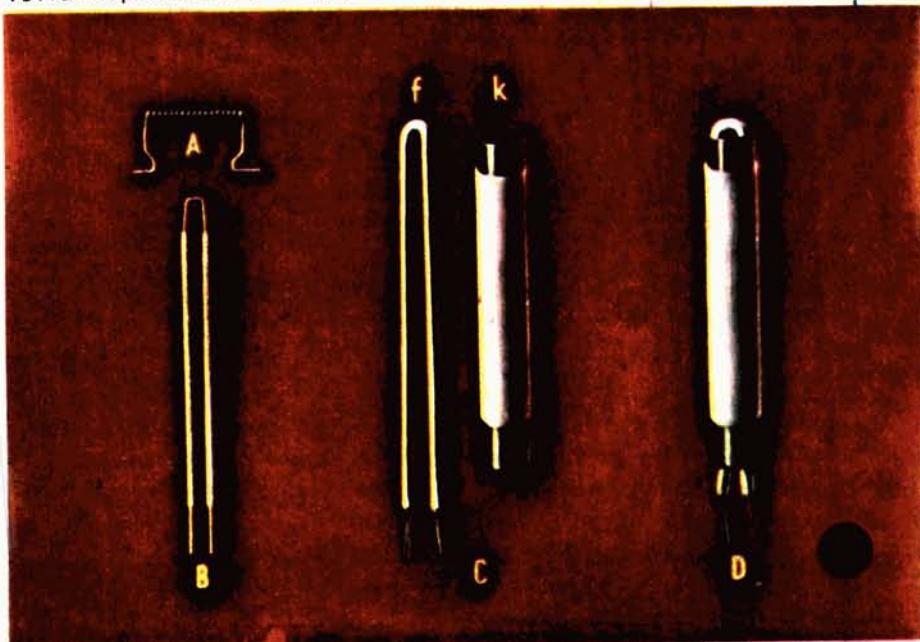
Οι ηλεκτρονικές λυχνίες βρίσκονται σήμερα σε παλιές συσκευές ή και σε μερικές σύγχρονες με ειδικές απαιτήσεις.

Τα βασικά στοιχεία στις ηλεκτρονικές λυχνίες είναι δύο ηλεκτρόδια: Η κάθοδος και η άνοδος. Από την κάθοδο βγαίνουν τα ηλεκτρόνια που κινούνται προς την άνοδο όταν σ' αυτή έχουμε δώσει θετικότερο δυναμικό. Ανάμεσα στην κάθοδο και την άνοδο μπορεί να υπάρχουν και άλλα, ειδικής κατασκευής, ηλεκτρόδια. Τα ηλεκτρόδια αυτά ονομάζονται **πλέγματα**. Η λυχνία που έχει μόνο κάθοδο και άνοδο λέγεται **διοδος**. Αν ανάμεσα στην κάθοδο και την άνοδο υπάρχει ένα πλέγμα, η λυχνία λέγεται **τρίοδος**, αν υπάρχουν δύο πλέγματα, **τέτροδος** και αν υπάρχουν τρία πλέγματα, **πέντοδος**. Είναι δυνατό για ειδικούς σκοπούς να υπάρχουν και περισσότερα πλέγματα. Τότε η λυχνία παίρνει συνήθως ονομασία σχετική με την εργασία για την οποία προορίζεται.

Τα ηλεκτρόνια που κινούνται μέσα στις ηλεκτρονικές λυχνίες εκπέμπονται από καθόδους από τις οποίες μπορούν να βγουν με έναν από τους τρόπους πού είδαμε στο κεφάλαιο 2. Ωστόσο ο συνηθέστερος τρόπος είναι η θέρμανση με ηλεκτρικό ρεύμα. Γι' αυτό πολλές φορές οι λυχνίες με τέτοιες καθόδους λέγονται και **θερμονικές λυχνίες**.

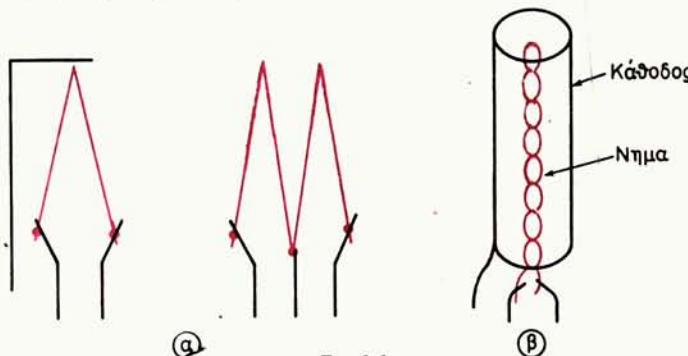
#### 4.1.1 Κάθοδοι.

Ανάλογα με τον τρόπο θερμάνσεως έχουμε δύο είδη καθόδων: Τις καθόδους άμεσης θερμάνσεως και τις καθόδους έμμεσης θερμάνσεως. Οι κάθοδοι αυτές φαίνονται παραστατικά στο σχήμα 4.1α.



Σχ. 4.1β.  
Φωτογραφίες καθόδων.

Α και Β) άμεσης θερμάνσεως. Και Δ) έμμεσης θερμάνσεως. f) Νήμα. K) κάθοδος.



Σχ. 4.1α.  
Παράσταση καθόδων.

α) Άμεσης θερμάνσεως. β) Έμμεσης θερμάνσεως.

Στις πρώτες, ο ίδιος ο αγωγός που διαρρέεται από το ρεύμα, θερμαίνεται και εκπέμπει τα ηλεκτρόνια.

Στις δεύτερες, άλλος είναι ο αγωγός που διαρρέεται από το ρεύμα θερμάνσεως και άλλος ο αγωγός που εκπέμπει τα ηλεκτρόνια. Συνήθως ο αγωγός που διαρρέεται από το ρεύμα θερμάνσεως, περιβάλλεται από έναν κύλινδρο με τον οποίο δεν έχει καμιά ηλεκτρική σύνδεση. Από τη θερμότητα που αναπτύσσεται στον αγωγό

που διαρρέεται από το ρεύμα, θερμαίνεται και ο κύλινδρος που εξωτερικά είναι επιχρισμένος με υλικό κατάλληλο για εκπομπή ηλεκτρονίων. Έτσι, όταν θερμανθεί ο κύλινδρος εκπέμπει ηλεκτρόνια. Σ' αυτό το σύστημα ο αγωγός που διαρρέεται από το ρεύμα λέγεται **νήμα** και ο κύλινδρος **κάθοδος**. Το ρεύμα θερμάνσεως μπορεί να είναι συνεχές ή εναλλασσόμενο. Στο σχήμα 4.1β φαίνονται διάφορες μορφές καθόδων άμεσης και έμμεσης θερμάνσεως.

Τα υλικά των καθόδων είναι κυρίως βολφράμιο, θοριωμένο βολφράμιο ή νικέλιο, επίχρισμένο με οξείδια βαρίου και στροντίου. Καθόδους βολφραμίου έχουν οι λυχνίες που εργάζονται με δυναμικά ανόδου πάνω από 5000 V. Με θοριωμένο βολφράμιο είναι οι κάθοδοι των λυχνιών που εργάζονται με δυναμικά ανόδου 750-5000 V, ενώ όσες λυχνίες εργάζονται με ανοδικά δυναμικά μικρότερα, έχουν συνήθως καθόδους οξειδίων.

Η τάση θερμάνσεως και το ρεύμα θερμάνσεως των καθόδων των λυχνιών δίνονται από τον κατασκευαστή.

#### 4.1.2 Άνοδοι.

Τα ηλεκτρόδια της ανόδου κατασκευάζονται κυρίως από νικέλιο και σίδηρο στις λυχνίες λήψεως και ταντάλιο, μολυβδαίνιο ή κράμα άνθρακα στις λυχνίες εκπομπής. Παίρνουν τέτοια σχήματα, ώστε να απάγεται εύκολα η θερμότητα που αναπτύσσεται από την πρόσκρουση των ηλεκτρονίων. Πολλές φορές μάλιστα γι' αυτό το σκοπό χρησιμοποιούνται και ειδικά συστήματα ψύξεως.

### 4.2 Είδη ηλεκτρονικών λυχνιών.

#### 4.2.1 Διοδος κενού [σχ. 4.2α(α), (β)].

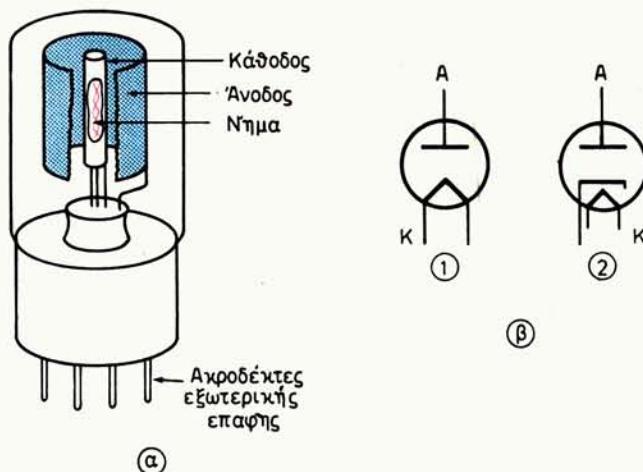
Η δίοδος αυτή έχει θερμαινόμενη κάθοδο. Είναι δηλαδή μια θερμιονική δίοδος λυχνία κενού. Αποτελείται από την κάθοδο και την άνοδο. Το σύνολο είναι κλεισμένο μέσα σ' ένα χώρο με γυάλινο ή μεταλλικό περίβλημα, στον οποίο έχει δημιουργηθεί κενό. Κατάλληλοι ακροδέκτες που συνδέονται με τα ηλεκτρόδια της καθόδου, της ανόδου και της θερμάνσεως βγαίνουν έξω από το περίβλημα για να μπορούν σ' αυτούς να συνδέονται οι κατάλληλες τάσεις (σχ. 4.2α). Η κάθοδος φυσικά μπορεί να είναι άμεσης ή έμμεσης θερμάνσεως.

Όταν η κάθοδος θερμαίνεται εκπέμπει ηλεκτρόνια. Αν η άνοδος είναι σε θετικότερο δυναμικό από την κάθοδο, τα ηλεκτρόνια αυτά έλκονται και κινούνται προς αυτήν σχηματίζοντας έτσι το ανοδικό ρεύμα. Το ανοδικό ρεύμα, σε όλες τις λυχνίες παρακάτω, θα το συμβολίζουμε με  $I_p$ , ενώ την ανοδική τάση, την τάση δηλαδή ανάμεσα στην κάθοδο και την άνοδο, με  $V_p$ . Ως ορθή φορά του ρεύματος θα θεωρούμε τη φορά από την κάθοδο στην άνοδο, δηλαδή τη φορά κινήσεως των ηλεκτρονίων.

Το ανοδικό ρεύμα στη δίοδο λυχνία μπορεί να μεταβληθεί μεταβάλλοντας την ανοδική τάση ή την τάση θερμάνσεως, δηλαδή τη θερμοκρασία της καθόδου, ή και τις δυο μαζί. Στο σχήμα 4.2β φαίνεται η μεταβολή του ανοδικού ρεύματος  $I_p$ , όταν μεταβάλλεται η ανοδική τάση  $V_p$ . Η καμπύλη που αποδίδει τη μεταβολή αυτή ονομάζεται χαρακτηριστική καμπύλη της λυχνίας.

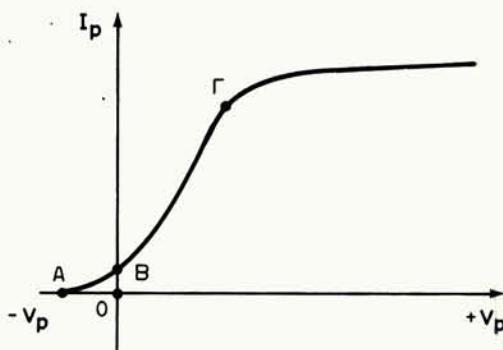
Ας εξετάσουμε λεπτομερέστερα τη λειτουργία της δίοδου.

Όταν θερμάνομε την κάθοδο, εξέρχονται από αυτήν ηλεκτρόνια. Αν δεν υπάρ-



Σχ. 4.2α.  
Δίοδος λυχνία κένού.

α) Συγκρότηση. β) Συμβολική παράσταση. 1) Αμεσης Θερμάνσεως. 2) Έμμεσης Θερμάνσεως.

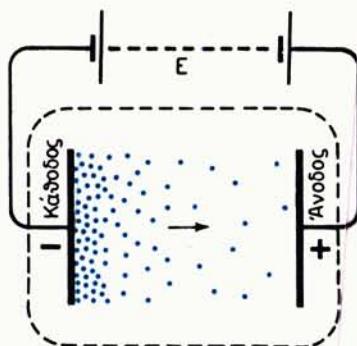


Σχ. 4.2β.

Μεταβολή του ανοδικού ρεύματος όταν μεταβάλλεται η ανοδική τάση σε μια δίοδο λυχνία.

χει διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην κάθοδο και την άνοδο, τα ηλεκτρόνια δεν απομακρύνονται από την κάθοδο, γιατί έλκονται από τα θετικά φορτία που έμειναν μέσα στο μέταλλο (παράγρ. 2.1). Δημιουργείται έτσι ένα νέφος από ηλεκτρόνια γύρω από την κάθοδο (σχ. 4.2γ). Το νέφος αυτό είναι μικρό η μεγάλο ανάλογα με τη θερμοκρασία της καθόδου. Ο χώρος που καταλαμβάνει τό νέφος αυτό λέγεται **χώρος αρνητικών φορτίων**. Μερικά από τα ηλεκτρόνια είναι δυνατό να βγουν από την κάθοδο λόγω της θερμάνσεως με τόση κινητική ενέργεια, ώστε να μπορούν να φθάσουν στην άνοδο όχι μόνο όταν η διαφορά δυναμικού καθόδου-ανόδου είναι μηδέν, αλλά ακόμη και όταν η άνοδος έχει δυναμικό λίγο αρνητικότερο από την κάθοδο. Αυτό εκφράζει το τμήμα AB της καμπύλης του σχήματος 4.2β. Εδώ φαίνεται πως παρά το ότι η  $V_p$  έχει αρνητικές τιμές, υπάρχει κάποιο ανοδικό ρεύμα.

Αν κρατώντας την τάση θερμάνσεως σταθερή, αυξήσομε την ανοδική τάση,



Σχ. 4.2γ.  
Παράσταση της περιοχής φορτίου χώρου:

κάνοντάς την θετικότερη, τότε ηλεκτρόνια από το νέφος θα κινηθούν προς την άνοδο. Όσο θετικότερο γίνεται το δυναμικό της ανόδου, τόσο περισσότερα ηλεκτρόνια θα κινούνται προς την άνοδο, και φυσικά τόσο το νέφος θα αραιώνει και τόσο ο χώρος αρνητικών φορτίων θα επεκτείνεται προς την άνοδο. Σε κάποια τιμή δυναμικού της ανόδου, όσα ηλεκτρόνια βγαίνουν στη μονάδα του χρόνου από την κάθοδο τόσα φθάνουν και στην άνοδο. Όσο και αν αυξήσουμε την ανοδική τάση, το ανοδικό ρεύμα θα μείνει σχεδόν σταθερό, γιατί όσα ηλεκτρόνια παράγονται στη μονάδα του χρόνου στην κάθοδο τόσα φθάνουν στην άνοδο. Λέμε τότε ότι η λυχνία έχει φθάσει σε συνθήκες κόρου.

Το τμήμα της καμπύλης  $BG$  στο σχήμα 4.2β αντιστοιχεί στη λειτουργία της λυχνίας με θετικά δυναμικά ανόδου ως το δυναμικό που εμφανίζεται ο κόρος. Για το τμήμα  $BG$ , ανάμεσα στο ρεύμα και την τάση, ισχύει η σχέση του Langmuir:

$$I_p = \kappa \cdot V_p^{3/2}$$

Στη σχέση αυτή η  $\kappa$  είναι σταθερά της οποίας η τιμή εξαρτάται από τον τρόπο δομής της διόδου. Αν π.χ. τα ηλεκτρόδια της είναι κυλινδρικά, επίπεδα ή έχουν άλλη μορφή. Εξαρτάται επίσης από τις διαστάσεις των ηλεκτροδίων όπως και από τη θέση που έχουν μεταξύ τους.

Το τμήμα της καμπύλης μετά το  $G$  αντιστοιχεί στη λειτουργία της λυχνίας σε συνθήκες κόρου. Το ανοδικό ρεύμα στην περίπτωση αυτή θα δίνεται από τη σχέση του Richardson. Είναι δηλαδή:

$$I_p = A \cdot S \cdot T^2 e^{-E_w/KT}$$

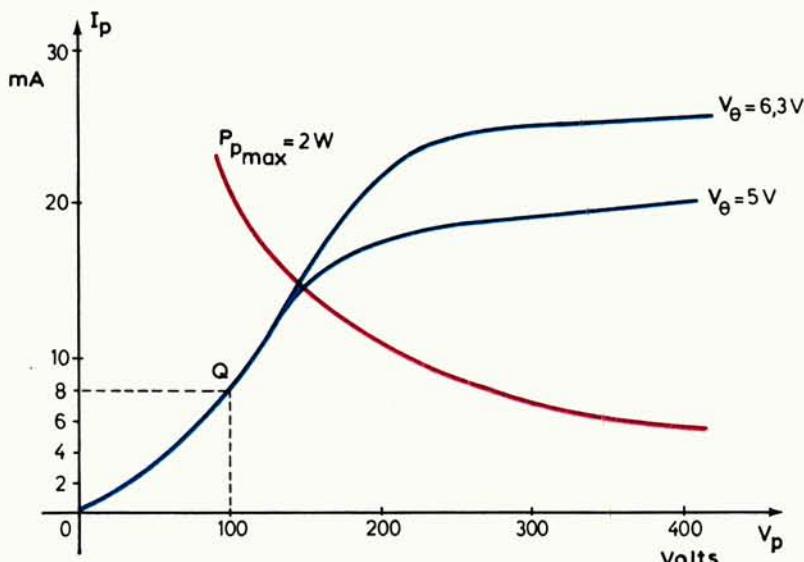
όπου:  $E_w$  είναι το έργο εξαγωγής του υλικού της καθόδου,

$S$  η επιφάνεια της καθόδου και

$T$  η απόλυτη θερμοκρασία της που εξαρτάται φυσικά από την τάση θερμάνσεως.

Η σταθερά  $K$  είναι η σταθερά Boltzmann

Δεν επηρεάζεται συνεπώς αισθητά, μέσα σε ορισμένα όρια, το ανοδικό ρεύμα της λυχνίας από την ανοδική τάση της, όταν αυτή λειτουργεί σε συνθήκες κόρου. Για να μεταβάλλομε το ανοδικό ρεύμα σ' αυτή την περίπτωση πρέπει να μεταβάλλομε το ρεύμα (ή την τάση) θερμάνσεως οπότε θα μεταβληθεί η θερ-



Σχ. 4.26.

Τυπικές χαρακτηριστικές διόδου κενού, για δύο τάσεις θερμάνσεως  $V_\theta$ .

Σημείο ηρεμίας ( $V_{PQ} = 100$  V,  $I_{PQ} = 8$  mA). Σημειώνεται και η καμπύλη μέγιστης ανοδικής απώλειας για  $P_p = 2$  W.

μοκρασία Τ της καθόδου και φυσικά το ρεύμα θερμιονικής εκπομπής της (σχ. 4.26). Παρακάτω θα θεωρούμε πάντοτε την τάση θερμάνσεως των καθόδων σταθερή. Η τάση και το ρεύμα θερμάνσεως για την κανονική λειτουργία δόλων των θερμιονικών λυχνιών, δίνονται από τον κατασκευαστή και κρατούνται σταθερά στα διάφορα κυκλώματα. Σε πολύ ειδικές περιπτώσεις μπορεί να μειωθούν. Η αύξησή τους ωστόσο πάνω από τις τιμές που δίνει ο κατασκευαστής, θα οδηγήσει στην καταστροφή της καθόδου.

Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι ακόμη και στην περίπτωση του κόρου παρατηρείται μια μικρή αύξηση του ανοδικού ρεύματος όταν αυξάνεται η ανοδική τάση. Η αύξηση αυτή οφείλεται στο φαινόμενο Schottky.

Επίσης, αν δώσουμε στην κάθοδο θετικότερο δυναμικό από την άνοδο, αν πολώσουμε δηλαδή, όπως λέμε στην περίπτωση αυτή, τη λυχνία ανάστροφα, το ανοδικό ρεύμα θα διακοπεί. (Το μικρό ανοδικό ρεύμα σ' αυτή την περίπτωση λόγω θερμικής κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων είναι αμελητέο). Στη δίοδο συνεπώς έχομε πρακτικά ανοδικό ρεύμα μόνον όταν η άνοδος είναι θετικότερη από την κάθοδο. Έχομε έτσι σ' αυτή τη δίοδο αγωγιμότητα μόνο κατά τη μια φορά (μονοπολική αγωγιμότητα). Για το λόγο αυτό από τις βασικότερες εφαρμογές της διόδου κενού είναι η ανόρθωση του εναλλασσόμενου ρεύματος, που σε συνδυασμό με άλλα εξαρτήματα (αντιστάσεις κλπ.) οδηγεί στη δημιουργία συνεχούς ρεύματος (ή τάσεως) από εναλλασσόμενο.

### a) Σημείο λειτουργίας.

Όπως φαίνεται από τη χαρακτηριστική καμπύλη του σχήματος 4.26 με σταθε-

ρή τάση θερμάνσεως  $V_\theta$  σε κάθε τιμή ανοδικής τάσεως  $V_p$  αντιστοιχεί μια τιμή ανοδικού ρεύματος  $I_p$ . Ορίζεται έτσι πάνω στην καμπύλη ένα σημείο που λέγεται **σημείο λειτουργίας**. Αν η ανοδική τάση  $V_p$  είναι συνεχής και έχει σταθερή τιμή και το ανοδικό ρεύμα  $I_p$  θα είναι συνεχές και θα έχει σταθερή τιμή. Το σημείο  $Q$  που αντιστοιχεί στη συνεχή αυτή τάση και στο συνεχές αυτό ρεύμα ονομάζεται **σημείο πρεμίας**.

### β) Εσωτερική αντίσταση.

Η αντίσταση που παρουσιάζει η λυχνία ανάμεσα στην κάθοδο και την άνοδο, λέγεται **εσωτερική αντίσταση** και καμία φορά **αντίσταση ανόδου**.

Στη δίοδο διακρίνομε δυο περιπτώσεις αντιστάσεως: τη **στατική** αντίσταση και τη **δυναμική** αντίσταση.

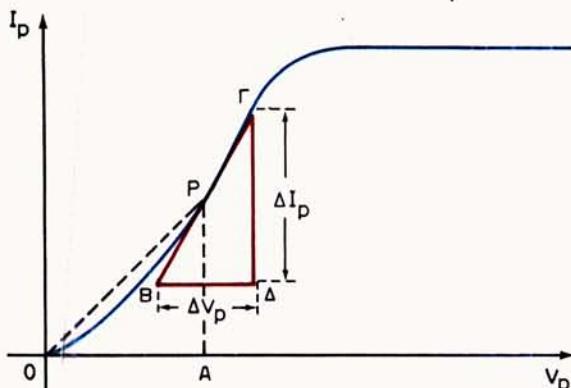
Ως στατική αντίσταση  $\rho_\sigma$  μιας διόδου ορίζεται το πηλίκο της ανοδικής τάσεως  $V_p$  σ' ένα σημείο λειτουργίας της προς την αντίστοιχη ένταση ανοδικού ρεύματος  $I_p$ . Δηλαδή:

$$\rho_\sigma = \frac{V_p}{I_p}$$

Όπως φαίνεται από τη χαρακτηριστική της διόδου, το πηλίκο αυτό δεν είναι σταθερό, αλλά μεταβάλλεται όταν μεταβαλλέται το σημείο λειτουργίας για θετικά δυναμικά ανόδου. Η στατική αντίσταση λοιπόν της διόδου κενού δεν είναι η ίδια για διάφορες τιμές της ανοδικής τάσεως. Η στατική αντίσταση λέγεται και **αντίσταση συνεχούς**.

Μεγαλύτερο ενδιαφέρον στην πράξη παρουσιάζει η δυναμική αντίσταση. Για να υπολογίσουμε τη δυναμική αντίσταση σε κάποιο σημείο λειτουργίας της λυχνίας, φέρομε στο αντίστοιχο σημείο της χαρακτηριστικής την εφαπτομένη και σχηματίζομε ένα στοιχειώδες τρίγωνο  $BΓΔ$  (σχ. 4.2e). Ορίζομε ως δυναμική αντίσταση  $\rho_d$  το πηλίκο  $\Delta V_p$  προς  $\Delta I_p$ . Δηλαδή:

$$\rho_d = \frac{\Delta V_p}{\Delta I_p}$$



Σχ. 4.2e.

Υπολογισμός της δυναμικής αντιστάσεως σε κάποιο σημείο λειτουργίας της λυχνίας.

Οι κατασκευαστές δίνουν, συνήθως, ως δυναμική αντίσταση της λυχνίας μια μέση περίπου τιμή των δυναμικών αντιστάσεων της λυχνίας στα διάφορα σημεία λειτουργίας της με συνθήκες φορτίου χώρου.

Όταν η άνοδος είναι αρνητικότερη από την κάθοδο, η αντίσταση είναι πάρα πολύ μεγάλη και στην πράξη άπειρη. Η τιμή της εσωτερικής αντιστάσεως της λυχνίας κυμαίνεται από μερικές δεκάδες ως μερικές εκατοντάδες Ω κατά την ορθή φορά, ενώ κατά την ανάστροφη οι τιμές είναι αρκετά ΜΩ.

### **γ) Ανοδική απώλεια.**

Όταν η δίοδος λειτουργεί, η ανοδός της θερμαίνεται. Η θέρμανση αυτή της ανόδου και μάλιστα σε μια αρκετά υψηλή θερμοκρασία, οφείλεται κυρίως στη μετατροπή της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων σε θερμότητα κατά την πρόσκρουσή τους στην άνοδο. Το φαινόμενο αυτό λέγεται **ανοδική απώλεια**. Η ανοδική απώλεια  $P_p$  δίνεται από το γινόμενο της ανοδικής τάσεως  $V_p$  επί την ένταση του ανοδικού ρεύματος  $I_p$ . Δηλαδή:

$$P_p = V_p \cdot I_p$$

Η μέγιστη επιτρεπόμενη ανοδική απώλεια σε μια λυχνία δίνεται από τον κατασκευαστή. Για ασφαλέστερη χρησιμοποίησή της λυχνίας, χαράζεται η καμπύλη της μέγιστης επιτρεπόμενης ανοδικής απώλειας με βάση το μέγιστο επιτρεπόμενο γινόμενο  $V_p \cdot I_p$  (σχ. 4.2δ). Η υπέρβαση της μέγιστης επιτρεπόμενης ανοδικής απώλειας, θα οδηγήσει στην καταστροφή της λυχνίας. Έτσι π.χ. αν στη λυχνία στην οποία αντιστοιχούν οι χαρακτηριστικές του σχήματος 4.2δ, το γινόμενο  $V_p \cdot I_p$  διατηρηθεί συνεχώς μεγαλύτερο από 2 W, αυτή θα καταστραφεί σύντομα.

Χαρακτηριστικό επίσης μέγεθος σε μια δίοδο είναι και η χωρητικότητα μεταξύ ανόδου και καθόδου. Η χωρητικότητα αυτή παίζει σημαντικό ρόλο στη λειτουργία της λυχνίας σε υψηλές συχνότητες.

### **δ) Ευθεία φόρτου.**

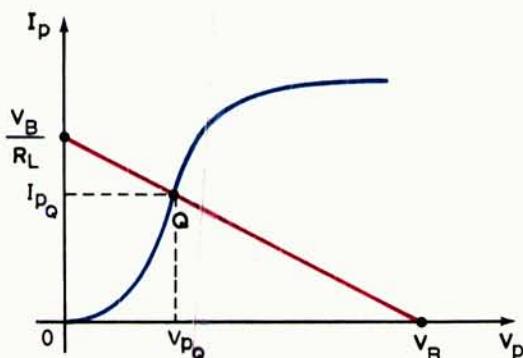
Τη ροή του ανοδικού ρεύματος την εκμεταλλευόμαστε συνδέοντας σε σειρά με την πηγή τροφοδοσίας της διόδου που έχει τάση  $V_B$  και τη λυχνία, μια καθαρά ωμική αντίσταση  $R_L$  (σχ. 4.2ζ).

Την αντίσταση αυτή τη λέμε αντίσταση φόρτου. Το ανοδικό ρεύμα  $I_p$ , περνώντας από την ωμική αντίσταση  $R_L$ , δημιουργεί μια πτώση τάσεως  $I_p \cdot R_L$  στα άκρα της. Η τάση αυτή που εξαρτάται από την τιμή του ανοδικού ρεύματος και της αντιστάσεως  $R_L$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα ή περισσότερα άλλα κυκλώματα.

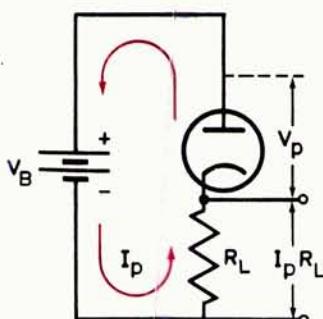
Στο κύκλωμα του σχήματος 4.2ζ θα έχομε με βάση τον κανόνα του Kirchhoff:

$$V_B = V_p + I_p \cdot R_L$$

Η εξίσωση αυτή παριστάνει μια ευθεία στο διάγραμμα  $V_p$  -  $I_p$  (σχ. 4.2στ). Το σημείο τομής της ευθείας με τον άξονα  $I_p$  βρίσκεται, αν στην παραπάνω εξίσωση θέσομε  $V_p = 0$ , οπότε  $I_p = V_B / R_L$ . Το σημείο τομής της με τον άξονα  $V_p$  βρίσκεται, αν θέσομε  $I_p = 0$ , οπότε  $V_p = V_B$ . Έτσι μπορούμε να χαράξουμε την ευθεία φόρτου, αν πάρομε ένα σημείο στον άξονα των τάσεων  $V_p$  που να αντιστοιχεί στην τιμή της τάσεως της πηγής τροφοδοσίας  $V_B$  και ένα άλλο σημείο



Σχ. 4.2στ.



Σχ. 4.2ζ.

στον δέοντα των ρευμάτων  $I_p$  που να είναι:  $I_p = V_B / R_L$ .

Η ευθεία φόρτου θα είναι ευθεία που θα ενώνει αυτά τα δύο σημεία. Η τομή της ευθείας αυτής με τη χαρακτηριστική της λυχνίας μας δίνει το σημείο πρεμίας  $Q$  της λυχνίας. Οι τιμές ανοδικής τάσεως  $V_{p_Q}$  και ανοδικού ρεύματος  $I_{p_Q}$  που αντιστοιχούν στο σημείο αυτό είναι αντίστοιχα η τάση και το ρεύμα πρεμίας.

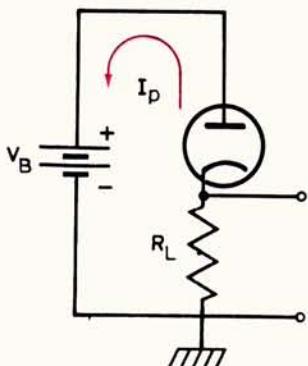
Ειδικά για την ευθεία φόρτου πρέπει να διευκρινίσουμε ότι θα είμασταν ακριβέστεροι αν μιλούσαμε για γραμμή φόρτου και όχι ευθεία φόρτου. Πραγματικά έχουμε ευθεία φόρτου όταν ο φόρτος έχει μόνο καθαρά ωμικά στοιχεία. Ο φόρτος δηλαδή δεν έχει ούτε αυτεπαγωγές ούτε χωρητικότητες. Αν ο φόρτος έχει αυτεπαγωγές ή χωρητικότητες, η γραμμή φόρτου δεν είναι ευθεία αλλά έχει άλλες μορφές. Επίσης, εφόσον οι πηγές τροφοδοσίας στο ανοδικό κύκλωμα της λυχνίας είναι συνεχούς τάσεως, η ευθεία αυτή λέγεται **ευθεία φόρτου συνεχούς**.

#### ε) Χρήση διόδων κενού.

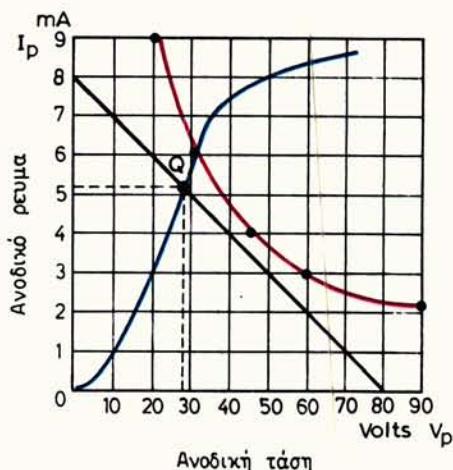
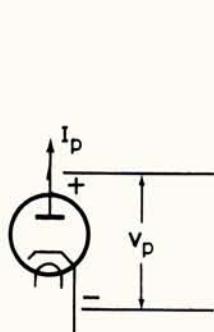
Οι δίοδοι κενού χρησιμοποιούνται κυρίως ως ανορθωτές απλής ή διπλής ανορθώσεως σε συσκευές τροφοδοσίας. Χρησιμοποιούνται επίσης ως φωρατές στα ασθενή ρεύματα υψηλής συχνότητας και γενικά σε πολλές άλλες ηλεκτρονικές εφαρμογές.

#### στ) Εφαρμογή.

Στο κύκλωμα του σχήματος 4.2η η δίοδος έχει τις χαρακτηριστικές του σχήμα-



Σχ. 4.2η.



Σχ. 4.2θ.

Ευθεία φόρτου, σημείο ηρεμίας και καμπύλη μέγιστης ανοδικής απώλειας για το κύκλωμα του σχήματος 4.2η.

τος 4.2θ. Η  $R_L = 10 \text{ k}\Omega$ , η  $V_B = 80 \text{ V}$  και η μέγιστη επιτρεπόμενη ανοδική απώλεια είναι  $180 \text{ mW}$ . Να βρεθεί το σημείο ηρεμίας και να καθορισθεί αν αυτό είναι επιτρεπόμενο.

#### Απάντηση.

Η ευθεία φόρτου θα τέμνει τον άξονα  $V_p$  στο σημείο  $V_p = 80 \text{ V}$  και τον άξονα  $I_p$  στο σημείο  $I_p = \frac{V_B}{R_L} = \frac{80 \text{ V}}{10 \times 10^3 \Omega} = 8 \times 10^{-3} \text{ A} = 8 \text{ mA}$ .

Το σημείο ηρεμίας θα είναι η τομή της ευθείας φόρτου με τη χαρακτηριστική Δηλαδή το σημείο που ορίζεται από  $V_{p_0} \approx 28 \text{ V}$  και  $I_{p_0} \approx 5.3 \text{ mA}$ . Η ανοδική απώλεια θα είναι:

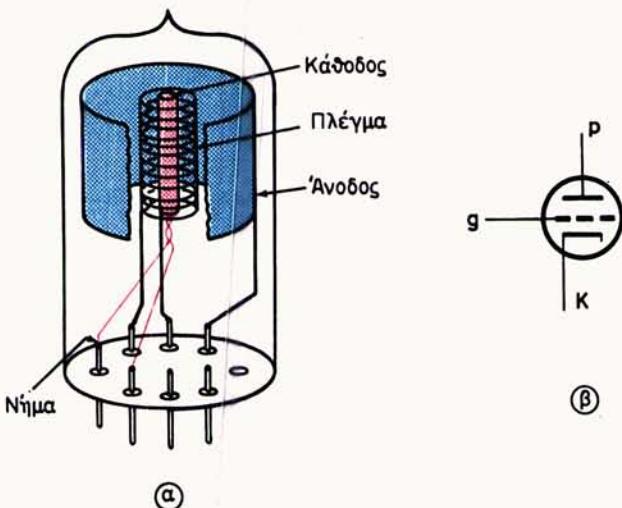
$$P_p = V_{p_0} \cdot I_{p_0} \approx 28 \text{ V} \times 5.3 \text{ mA} \approx 143 \text{ mW}$$

Αφού όμως η μέγιστη επιτρεπόμενη ανοδική απώλεια είναι 180 mW, η λυχνία μπορεί να έχει συνεχή λειτουργία στο παραπάνω σημείο ηρεμίας.

Όσα είπαμε προηγουμένως για την εσωτερική αντίσταση, τη μέγιστη ανοδική απώλεια και την ευθεία φόρτου ισχύουν για όλες τις λυχνίες.

#### 4.2.2 Τρίοδος κενού [σχ. 4.21(α), (β)].

Στα 1906 ο Lee de Forest πρόσθεσε ανάμεσα στήν κάθοδο και την άνοδο της διόδου κενού ένα ακόμη ηλεκτρόδιο (πλέγμα). Η προσθήκη αυτού του ηλεκτρόδιου αποτελεί σταθμό στην εξέλιξη της Ηλεκτρονικής ή καλύτερα σταθμό «ια τεχνολογική εξέλιξη».



Σχ. 4.21.  
Τρίοδος κενού.  
α) Πραγματική κατασκευή. β) Συμβολική παράσταση.

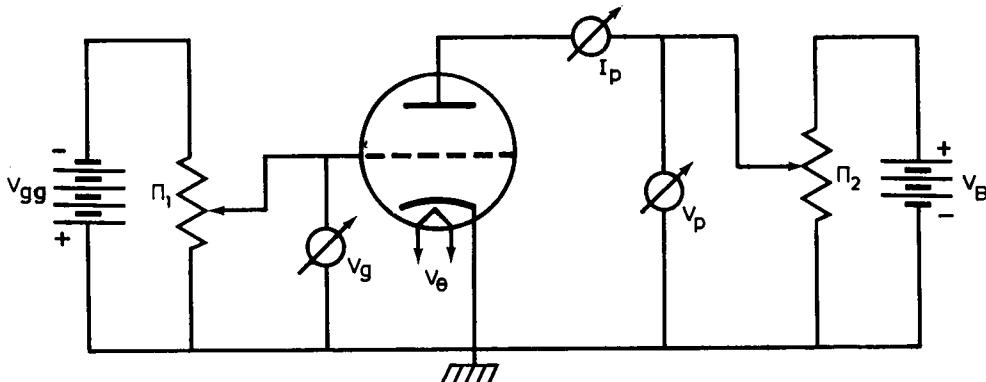
Το πλέγμα έχει συνήθως τη μορφή σπειρώματος που περιβάλλει την κάθοδο [σχ. 4.21(α)]. Έτσι υπάρχει η δυνατότητα να περνούν ηλεκτρόνια ανάμεσα από τις σπείρες. Στο πλέγμα αυτό φίνεται κάποιο δυναμικό. Αν η άνοδος έχει θετικό δυναμικό ως προς την κάθοδο και το πλέγμα επίσης θετικό δυναμικό, τότε υποβοηθείται η δημιουργία του ανοδικού ρεύματος. Σ' αυτή την περίπτωση όμως μερικά ηλεκτρόνια έλκονται από το πλέγμα, όπότε δημιουργείται ένα ρεύμα και στο κύκλωμα του πλέγματος. Το ρεύμα αυτό το λέμε **ρεύμα πλέγματος**. Αν το δυναμικό του πλέγματος γίνει αρνητικότερο από το δυναμικό της καθόδου, τότε δυσκολεύεται η κίνηση των ηλεκτρονίων προς την άνοδο, γιατί ασκείται στα ηλεκτρόνια απωστική δύναμη. Για πολύ μικρά αρνητικά δυναμικά πλέγματος, με την άνοδο πάντα σε θετικό δυναμικό, εξακολουθεί να υπάρχει κάποιο ρεύμα πλέγματος. Όσο αρνητικότερο γίνεται το δυναμικό του πλέγματος, με σταθερή ανοδική τάση, τόσο μικρότερο γίνεται το ανοδικό ρεύμα. Σε κάποια τιμή του αρνητικού δυναμικού το ανοδικό ρεύμα θα διακοπεί. Το δυναμικό αυτό λέγεται **δυναμικό αποκοπής**. Δηλαδή δυναμι-

κό αποκοπής για μια δεδομένη ανοδική τάση της λυχνίας, είναι το λιγότερο αρνητικό δυναμικό στο οποίο παρατηρείται διακοπή του ανοδικού ρεύματος.

Εύκολα γίνεται κατανοητός από τα προηγούμενα ο ρόλος του πλέγματος. Με την τάση που δίνομε στο πλέγμα (συνήθως αρνητικότερη από την τάση καθόδου) μπορούμε να ρυθμίζομε το ανοδικό ρεύμα. Έχουμε έτσι στην τρίοδο άλλον ένα τρόπο για να μεταβάλλομε το ανοδικό ρεύμα. Στη δίοδο μπορούσαμε να μεταβάλλομε το ανοδικό ρεύμα μόνο με μεταβολή της τάσεως ανόδου (υπενθυμίζομε ότι πάντοτε θεωρούμε την τάση θερμάνσεως  $V_\theta$  σταθερή). Στην τρίοδο το ανοδικό ρεύμα μπορεί να μεταβληθεί είτε μεταβάλλοντας την τάση ανόδου είτε μεταβάλλοντας την τάση πλέγματος είτε και τις δύο μαζί. Εξαρτάται λοιπόν το ανοδικό ρεύμα από δύο μεταβλητές: την τάση ανόδου  $V_p$  και την τάση οδηγού πλέγματος που θα τη συμβολίζομε με  $V_g$ . Στην τρίοδο κενού δεν έχουμε μόνο μια χαρακτηριστική καμπύλη για την παράσταση της μεταβολής του ανοδικού ρεύματος, όπως είχαμε στη δίοδο, αλλά πολλές. Διακρίνομε δύο περιπτώσεις:

- 1) Τις καμπύλες που χαράζομε κρατώντας την τάση του πλέγματος σταθερή και μεταβάλλοντας την τάση της ανόδου, που τις λέμε χαρακτηριστικές ανόδου και
- 2) τις καμπύλες που χαράζομε κρατώντας την τάση της ανόδου σταθερή και μεταβάλλοντας την τάση του πλέγματος, που τις λέμε χαρακτηριστικές πλέγματος.

Στο σχήμα 4.2ia φαίνεται μια συνδεσμολογία της τριόδου με την οποία μπορούμε να χαράξουμε τις καμπύλες αυτές. Η συνδεσμολογία αυτή είναι με κοινή (ή προσγειωμένη) την κάθοδο. Είναι η πιό συνηθισμένη συνδεσμολογία για την τρίοδο. Άλλες δυνατές συνδεσμολογίες φαίνονται στο σχήμα 4.2ib. Στη συνδεσμολογία

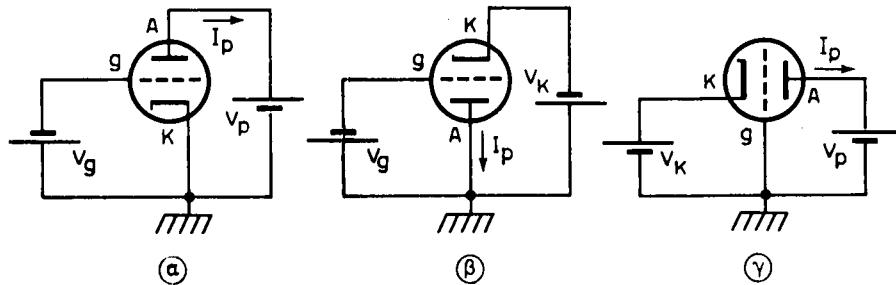


Σχ. 4.2ia.

Συνδεσμολογία τριόδων για τη χάραξη των χαρακτηριστικών τους.

για του σχήματος 4.2ia με το ποτενσιόμετρο  $\Pi_1$  μπορούμε να μεταβάλλομε την τάση του πλέγματος και με το ποτενσιόμετρο  $\Pi_2$  την ανοδική τάση. Με το βολτόμετρο  $V_g$  μετρούμε την τάση που δίνομε στο πλέγμα και με το βολτόμετρο  $V_p$  την τάση που δίνομε στην άνοδο. Το αμπερόμετρο  $I_p$  δείχνει το ανοδικό ρεύμα.

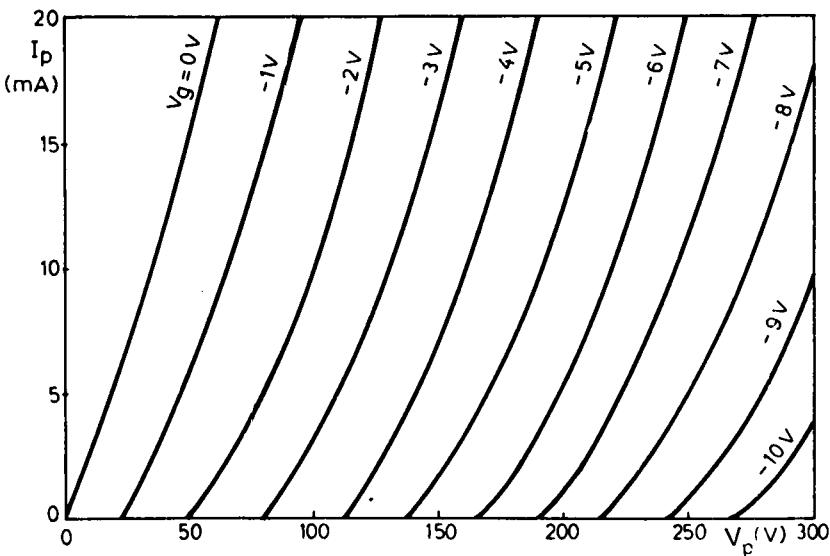
Δίνοντας μια τάση στο πλέγμα και κρατώντας κατόπιν αυτή την τάση σταθερή, μπορούμε να μεταβάλλομε την ανοδική τάση οπότε θα μεταβάλλεται το ανοδικό



Σχ. 4.2ιβ.

### **Συνδεσμολογίες τριόδου.**

α) Με προσγειωμένη κάθισδ. β) Με προσγειωμένη άνοδο. γ) Με προσγειωμένο πλέγμα.

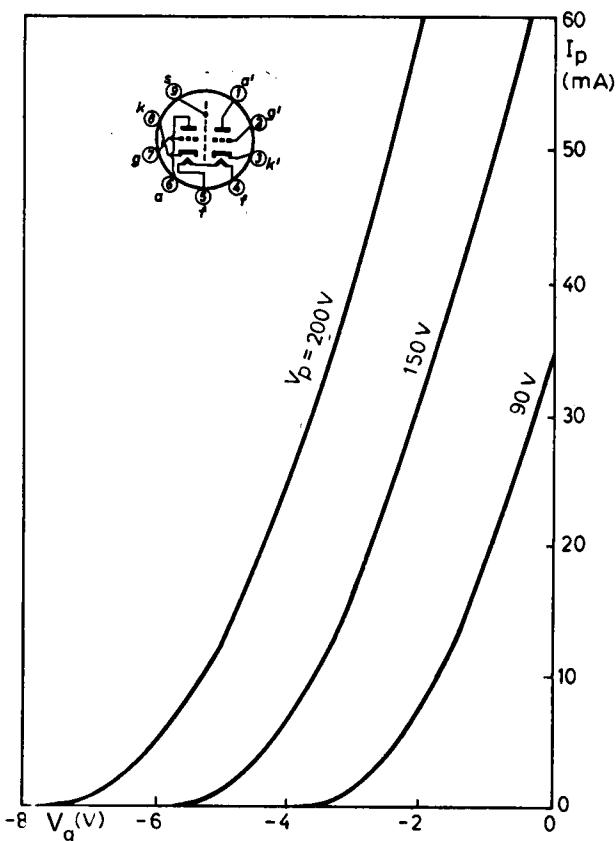


ΣΧ. 4.2Ιγ.

Συμήνος στατικών χαρακτηριστικών ανόδου για την τρίοδο ECC88.

ρεύμα. Χαράζομε έτσι με τις τιμές ανοδικής τάσεως-ανοδικού ρεύματος μια χαρακτηριστική καμπύλη που ονομάζεται χαρακτηριστική ανόδου για τη σταθερή αυτή τάση πλέγματος. Δίνοντας άλλη τιμή στην τάση πλέγματος και κρατώντας την πάλι σταθερή, μπορούμε με τον ίδιο τρόπο να χαράξουμε άλλη χαρακτηριστική ανόδου κ.ο.κ. Θα έχομε λοιπόν πολλές χαρακτηριστικές ανόδου, ένα **σμήνος χαρακτηριστικών** όπως λέμε. Στο σχήμα 4.2ιγ φαίνεται ένα τέτοιο σμήνος. Σε κάθε τιμή τάσεως πλέγματος  $V_g$  αντιστοιχεί και μια χαρακτηριστική ανόδου.

Αν τώρα, κρατώντας την ανοδική τάση σταθερή, μεταβάλομε την τάση πλέγματος, θα μεταβληθεί πάλι το ανοδικό ρεύμα. Για κάθε τιμή τάσεως πλέγματος θα έχουμε μια τιμή ανοδικού ρεύματος με την ανοδική τάση πάντα σταθερή. Μπορούμε έτσι να χαράξουμε μια χαρακτηριστική πλέγματος για την ανοδική αυτή τάση. Αν αλλάξουμε την ανοδική τάση, μπορούμε να χαράξουμε μιαν άλλη χαρακτηριστική



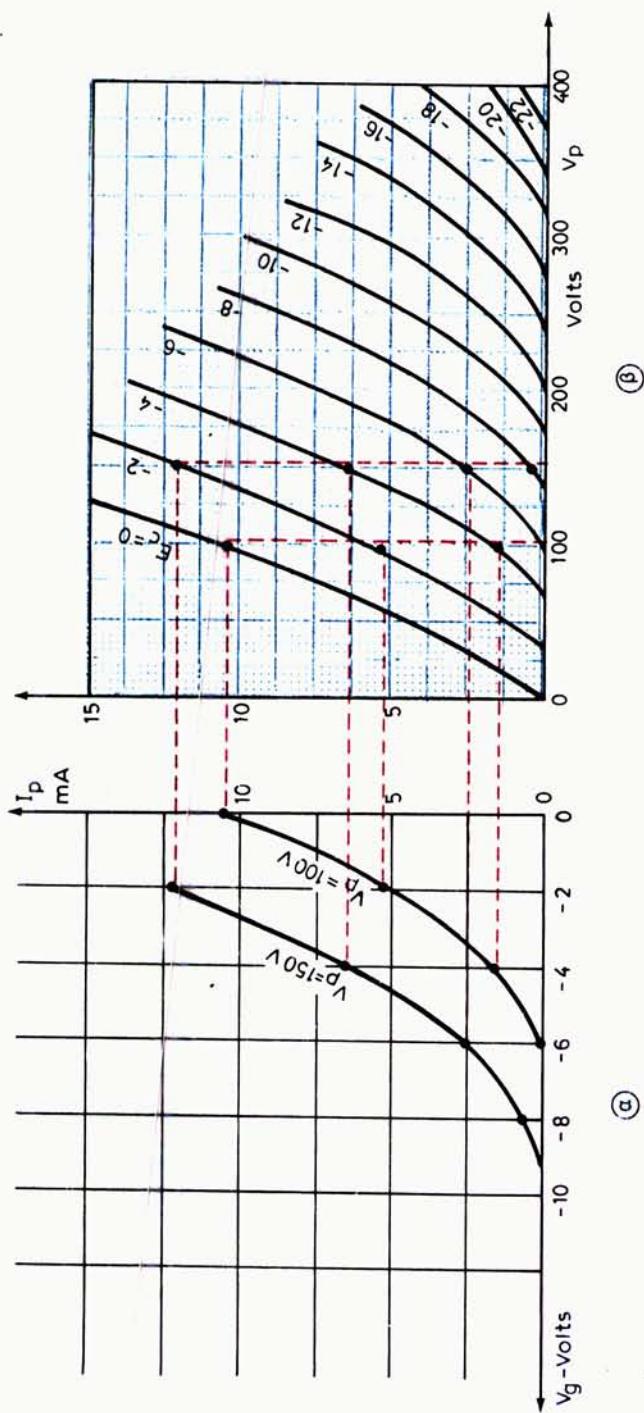
**Σχ. 4.2ιδ.**  
Χαρακτηριστικές πλέγματος της ECC88.

πλέγματος κλπ. Έχομε δηλαδή πάλι ένα σμήνος χαρακτηριστικών πλέγματος από τις οποίες η καθεμιά αντιστοιχεί σε μια διαφορετική ανοδική τάση (σχ. 4.2ιδ). Εύκολα μπορούμε με γραφικό τρόπο όταν έχομε το ένα σμήνος, να χαράξουμε το άλλο όπως π.χ. φαίνεται στο σχήμα 4.2ιε. Στο σχήμα αυτό από τις χαρακτηριστικές ανόδου έχουν χαραχθεί οι χαρακτηριστικές πλέγματος για 100 και 150 V ανοδικής τάσεως. Για να χαράξουμε τις καμπύλες αυτές, υψώνομε κάθετο στον άξονα των τάσεων του διαγράμματος των χαρακτηριστικών ανόδου στην τιμή της τάσεως  $V_p$  για την οποία θέλομε τη χαρακτηριστική. Κάθε σημείο τομής της καθέτου αυτής με τις χαρακτηριστικές δίνει μια τιμή ρεύματος που αντιστοιχεί στην τάση πλέγματος για την οποία έχει χαραχθεί η χαρακτηριστική. Οι τιμές αυτές εύκολα μεταφέρονται στο διάγραμμα  $V_g / I_p$  για να χαραχθεί η καμπύλη μεταβολής του ανοδικού ρεύματος σε συνάρτηση με την τάση πλέγματος.

### Παράμετροι της τριόδου.

#### a) Εσωτερική αντίσταση $r$ .

Αν, κρατώντας την τάση πλέγματος  $V_g$  σταθερή, μεταβάλλομε ελαφρά την



Σχ. 4.2ie.  
Χάραξη των χαρακτηριστικών πλέγματος (a) από τις χαρακτηριστικές ανδόδου (β), στην τρίοδο 12AU7.

τάση ανόδου κατά  $\Delta V_p$ , τότε το ανοδικό ρεύμα θα υποστεί μια μεταβολή  $\Delta I_p$ . Το πηλίκο της μεταβολής  $\Delta V_p$  προς την αντίστοιχη μεταβολή  $\Delta I_p$  δίνει την εσωτερική (δυναμική) αντίσταση της τριόδου. Δηλαδή:

$$\rho = \frac{\Delta V_p}{\Delta I_p} \quad \text{για} \quad V_g = \text{σταθερό}$$

Η αντίσταση αυτή δίνεται σε  $\Omega$ . Οι συνηθισμένες τιμές της εσωτερικής αντίστασεως για διάφορες τριόδους κυμαίνονται από  $50 \Omega$  ως  $100 \text{ k}\Omega$ .

Οπωσδήποτε πάντως η εσωτερική αντίσταση για κάθε τρίοδο δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται με το σημείο λειτουργίας της.

Την αντίσταση αυτή μπορούμε να την υπολογίσουμε γραφικά με τον ίδιο τρόπο που υπολογίζομε και την αντίσταση της διόδου, από το σμήνος των χαρακτηριστικών ανόδου.

### **β) Συντελεστής ενισχύσεως μ.**

Αν δώσομε μια μικρή μεταβολή  $\Delta V_p$  στην ανοδική τάση, θα έχομε, όπως είδαμε, μια μεταβολή του ανοδικού ρεύματος. Για να μη μεταβληθεί το ανοδικό ρεύμα  $I_p$ , θα πρέπει να μεταβάλλομε κατάλληλα και την τάση πλέγματος κατά  $\Delta V_g$ . Το πηλίκο της μεταβολής της ανοδικής τάσεως  $\Delta V_p$  προς τη μεταβολή της τάσεως πλέγματος  $\Delta V_g$  που απαιτείται για να παραμείνει το ανοδικό ρεύμα σταθερό, ορίζεται ως συντελεστής ενισχύσεως της λυχνίας και συμβολίζεται διεθνώς με το  $K$ . Είναι δηλαδή:

$$μ = \frac{\Delta V_p}{\Delta V_g} \quad \text{για} \quad I_p = \text{σταθερό}$$

Εύκολα γίνεται αντιληπτό από τη λειτουργία της τριόδου ότι, αν η άνοδος γίνει θετικότερη κατά  $\Delta V_p$ , το ανοδικό ρεύμα θα αυξηθεί. Για να μην αυξηθεί, πρέπει η τάση πλέγματος να γίνει αρνητικότερη κατά  $\Delta V_g$  δόση ορίζει ο  $\mu$ . Λόγω της αντίθετης δράσεως των μεταβολών  $\Delta V_p$  και  $\Delta V_g$ , το πηλίκο  $\Delta V_p / \Delta V_g$  γράφεται πολλές φορές με αρνητικό σημείο μπροστά.

Ο μ ως πηλίκο ομοειδών μεγεθών, είναι καθαρός αριθμός και οι τυπικές τιμές του για διάφορες τριόδους κυμαίνονται από 2 ως 100.

Αλλά και για την ίδια λυχνία ο μ δεν παραμένει τελείως σταθερός. Ωστόσο είναι πιο σταθερή παράμετρος από την εσωτερική αντίσταση και τη διαγωγιμότητα.

Ο μ μιας λυχνίας μας δίνει ένδειξη για το πόση ενίσχυση τάσεως μπορούμε να επιτύχομε με τη λυχνία αυτή.

### **γ) Διαγωγιμότητα $g_m$ .**

Αν, κρατώντας την ανοδική τάση σταθερή, μεταβάλομε την τάση πλέγματος κατά  $\Delta V_g$ , θα προκληθεί μια μεταβολή του ανοδικού ρεύματος  $\Delta I_p$ .

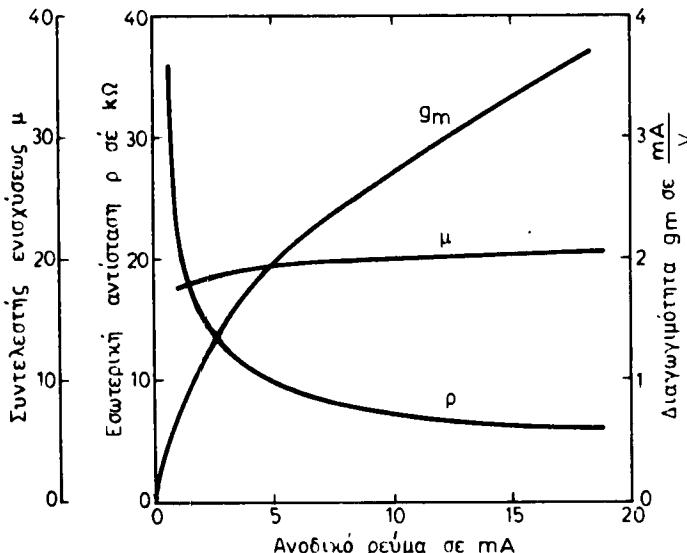
Το πηλίκο της μεταβολής  $\Delta I_p$  του ανοδικού ρεύματος προς τη μεταβολή  $\Delta V_g$  της τάσεως πλέγματος που την προκάλεσε (με την ανοδική τάση σταθερή) λέγεται διαγωγιμότητα της λυχνίας. Δηλαδή:

$$g_m = \frac{\Delta I_p}{\Delta V_g} \quad \text{για} \quad V_p = \text{σταθ.}$$

Η διαγωγιμότητα δίνεται συνήθως σε mA/V ή mmhos. Τυπικές τιμές διαγωγιμότητας στις τρίδους είναι από 0,5 ως 30 mmhos.

Η διαγωγιμότητα μας δίνει μια ένδειξη για το πόσο μεταβάλλεται το ανοδικό ρεύμα ανά μονάδα μεταβολής της τάσεως του πλέγματος, τη δυνατότητα δηλαδή ελέγχου του ανοδικού ρεύματος από την τάση του πλέγματος.

Και η διαγωγιμότητα δεν μένει σταθερή για τα διάφορα σημεία λειτουργίας μιας λυχνίας. Τυπικές μεταβολές των παραμέτρων  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $g_m$  για διάφορες τιμές του ανοδικού ρεύματος  $I_p$  φαίνονται στο σχήμα 4.2ιστ. Στην πράξη όταν η λυχνία δεν εργάζεται στα καμπύλα τρήματα των χαρακτηριστικών της, οι παράμετροι αυτές μπορούν να θεωρηθούν σε μεγάλη προσέγγιση σταθερές.



Σχ. 4.2ιστ.

Μεταβολές του συντελεστή ενισχύσεως  $\mu$ , της διαγωγιμότητας  $g_m$  και της εσωτερικής αντιστάσεως  $\rho$  μιας τρίδου σε συνάρτηση με το ανοδικό ρεύμα.

Μεταξύ των παραμέτρων υπάρχει η σχέση:

$$\mu = \rho \cdot g_m$$

Έτσι αν γνωρίζομε τις δύο από τις τρεις παραμέτρους, μπορούμε να βρούμε την τρίτη.

Την κάθε παράμετρο μπορούμε να την υπολογίσουμε γραφικά από τις χαρακτηριστικές ανόδου ή τις χαρακτηριστικές πλέγματος. Οι παραπάνω παράμετροι εξαρτώνται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της λυχνίας.

Η διαγωγιμότητα εξαρτάται από το μέγεθος της λυχνίας και ιδιαίτερα από το μέγεθος της καθόδου. Όταν έχουμε μεγαλύτερη επιφάνεια εκπομπής της καθόδου, έχουμε και μεγαλύτερη διαγωγιμότητα. Το  $\mu$  εξαρτάται από την κατασκευή του πλέγματος και τη θέση του ως προς την κάθοδο. Όσο πιο αραιό είναι το πλέγμα τόσο πιο μικρό είναι το  $\mu$ , όσο πιο κοντά είναι στην κάθοδο τόσο μεγαλύτερο είναι.

Η εσωτερική αντίσταση επηρεάζεται και αυτή από την κατασκευή του πλέγματος αλλά και από την απόσταση καθόδου-ανόδου.

Το πλέγμα εκτός από τη μορφή σπειρώματος μπορεί καμιά φορά να έχει και τη μορφή κυλίνδρου με δικτυωτή κατασκευή ή τη μορφή κυλίνδρου με οπές στην πλευρική του επιφάνεια.

Χαρακτηριστικά επίσης μεγέθη για μια τρίοδο λυχνία είναι οι χωρητικότητες μεταξύ πλέγματος-ανόδου  $C_{gp}$ , μεταξύ πλέγματος-καθόδου  $C_{gK}$  και μεταξύ ανόδου-καθόδου  $C_{pK}$ .

Στην τρίοδο π.χ. 12AU7 που είναι διπλή τρίοδος (στο ίδιο περίβλημα υπάρχουν δύο όμοιες τρίοδοι λυχνίες) για κάθε τμήμα της είναι:  $C_{gp} = 3,8 \text{ pF}$ ,  $C_{gK} = 4,2 \text{ pF}$ ,  $C_{pK} = 5 \text{ pF}$ . Οι χωρητικότητες αυτές αποκτούν σημασία όταν η λυχνία εργάζεται σε υψηλές συχνότητες.

### δ) Εξίσωση ρεύματος τρίοδου.

Το ανοδικό ρεύμα για την περιοχή στην οποία συνήθως εργάζεται η τρίοδος, δίνεται από τη σχέση:

$$I_p = K \left( V_g + \frac{V_p}{\mu} \right)^{3/2}$$

όπου:  $K$  μια σταθερά που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της λυχνίας,

$V_g$  η τάση πλέγματος

$V_p$  η ανοδική τάση και

$\mu$  ο συντελεστής ενισχύσεως.

Από τη σχέση αυτή φαίνεται πως όταν το  $I_p$  γίνει μηδέν (αφού  $K$  και  $3/2$  είναι διάφορα του μηδενός), θα έχομε:

$$V_g = - \frac{V_p}{\mu}$$

Από τη σχέση αυτή μπορούμε να υπολογίσουμε το δυναμικό αποκοπής, που δύναται να φαίνεται εξαρτάται από το  $\mu$  της λυχνίας και την ανοδική τάση  $V_p$ .

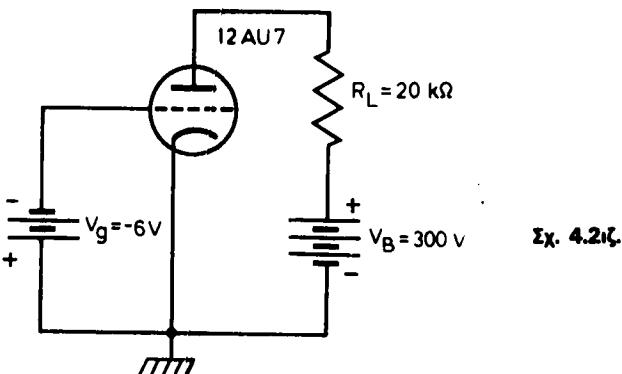
'Οσα είπαμε στη δύοδο για τη μέγιστη ανοδική απώλεια και το ρεύμα κάρου, ισχύουν και για την τρίοδο.

Με τον ίδιο τρόπο επίσης που χαράζεται εκεί η ευθεία φόρτου, χαράζεται κι εδώ. Έτσι π.χ. για τη συνδεσμολογία του σχήματος 4.2ιζ, η ευθεία φόρτου θα είναι όπως φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος 4.2ιη. Θα τέμνει δηλαδή τον άξονα των ρευμάτων  $I_p$  στο σημείο που:

$$I_p = \frac{V_B}{R_L} = \frac{300 \text{ V}}{20 \text{ k}\Omega} = 15 \text{ mA}$$

και τον άξονα των τάσεων στο  $V_p = V_B = 300 \text{ V}$ . Το σημείο ηρεμίας θα καθορίζεται πάνω στο διάγραμμα από την τομή της ευθείας φόρτου με τη χαρακτηριστική ανόδου που αντιστοιχεί στη συνεχή τάση πλέγματος της λυχνίας.

Στο κύκλωμα π.χ. του σχήματος 4.2ιζ, το σημείο ηρεμίας θα είναι η τομή της ευθείας φόρτου με τη χαρακτηριστική για  $V_g = -6 \text{ V}$ , το ανοδικό ρεύμα ηρεμίας θα είναι  $I_{p_0} \approx 6 \text{ mA}$  και η ανοδική τάση ηρεμίας θα είναι:  $V_{p_0} \approx 180 \text{ V}$ .



### ε) Δυναμική χαρακτηριστική.

Μια πολύ ενδιαφέρουσα καμπύλη για τις εφαρμογές είναι η δυναμική χαρακτηριστική. Η καμπύλη αυτή χαρακτηρίζεται από τα σημεία που καθορίζουν οι τομές των χαρακτηριστικών ανόδου με την ευθεία φόρτου.

Η κάθε τέτοια τομή αντιστοιχεί σε μια τιμή ανοδικού ρεύματος και στην τάση πλέγματος για την οποία έχει χαραχθεί η ανοδική χαρακτηριστική. Αν τα σημεία αυτά τα τοποθετήσουμε στο διάγραμμα των χαρακτηριστικών πλέγματος, θα μας δώσουν μια καμπύλη που είναι η δυναμική χαρακτηριστική του συστήματος. Πάνω στη δυναμική χαρακτηριστική θα βρίσκεται, φυσικά, και το σημείο ηρεμίας.

Στο διάγραμμα του σχήματος 4.2iη φαίνεται ο τρόπος που προκύπτει η δυναμική χαρακτηριστική από την ευθεία φόρτου. Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται και η καμπύλη μέγιστης ανοδικής απώλειας για  $P_{max} = 2,5 W$ .

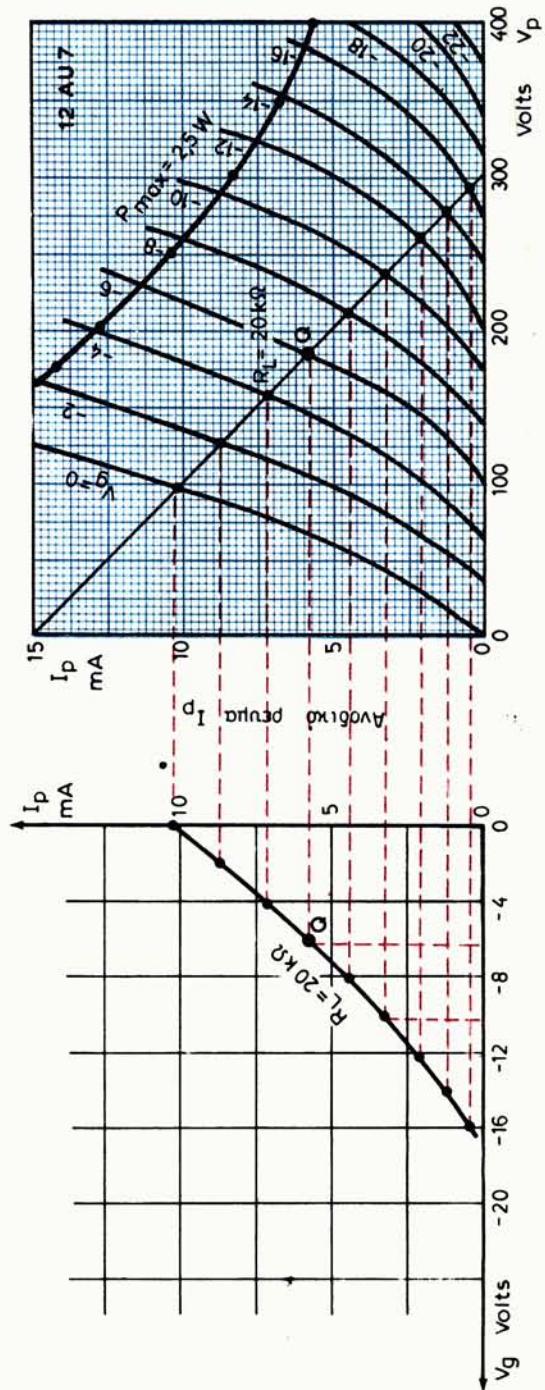
### στ) Ισοδύναμο κύκλωμα.

Για τη διευκόλυνση των υπολογισμών δίνεται για τις λυχνίες ένα ισοδύναμο κύκλωμα τους. Ένα κύκλωμα δηλαδή με το οποίο αν αντικαταστήσουμε τη λυχνία σε μια διάταξη η λειτουργία της διατάξεως δεν αλλάζει. Μπορούμε να έχομε για την τρίοδο δυο ισοδύναμα κυκλώματα (σχ. 4.2iθ).

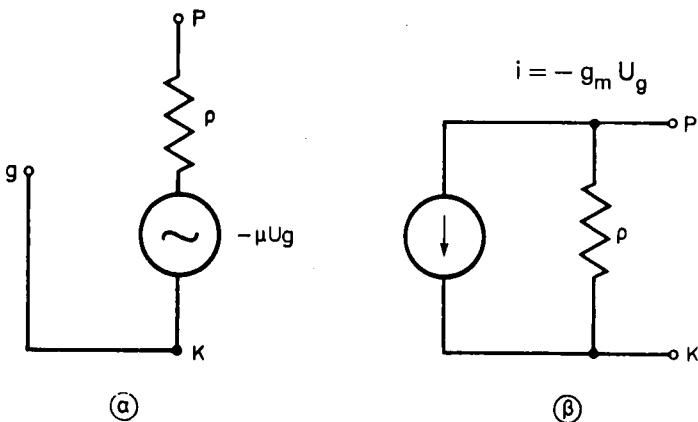
Τα κυκλώματα αυτά είναι βέβαια κυκλώματα για εναλλασσόμενο ρεύμα. Οι ακροδέκτες  $R$  και  $K$  είναι οι αντίστοιχοι της ανόδου και της καθόδου στη λυχνία. Στο κύκλωμα Thevenin η λυχνία εξομοιώνεται με μια πηγή εναλλασσόμενης τάσεως  $-mU_g$  σε σειρά με την εσωτερική της αντίσταση  $r$ . Στο κύκλωμα Norton η λυχνία εξομοιώνεται με μια πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος  $J = -g_m U_g$ . Η  $U_g$  είναι η εναλλασσόμενη τάση ανάμεσα στην κάθοδο και το πλέγμα. Το  $r$  συμβολίζει πάντα την εσωτερική αντίσταση της λυχνίας.

### Ω) Αυτοπόλωση.

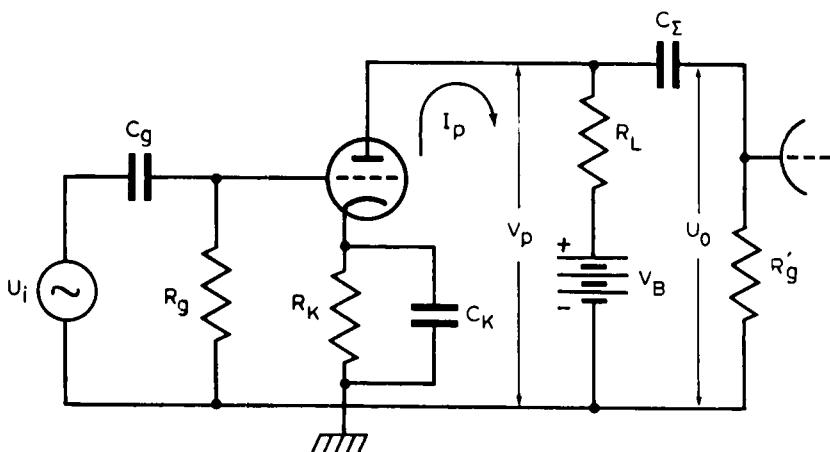
Μια από τις εφαρμογές της τριόδου είναι η ενίσχυση τάσεως. Στο σχήμα 4.2k φαίνεται μια τέτοια συνδεσμολογία στην είσοδο της οποίας εφαρμόζεται η εναλλασσόμενη τάση που θέλουμε να ενισχύσουμε. Ας θεωρήσουμε καταρχήν ότι δεν υπάρχει η τάση  $U_i$ . Θα υπάρχει μόνο η πηγή  $V_B$  από την οποία παίρνομε όπως θα δούμε τις διάφορες τάσεις συνεχούς που μας χρειάζονται στο κύκλωμα.



**Σχ. 4.2η.**  
Χάραξη της δυναμικής χαρακτηριστικής του κυκλώματος του σχήματος 4.2ι.  
Το σημείο Q είναι το σημείο ηρεμίας. Στο οπίλια φεύγεται και η καυτόπλη μέγιστης ανοδικής απώλειας  
( $P_{max} = 2.5 \text{ W}$ ).



**Σχ. 4.2ιθ.**



### **Σχ. 4.2κ.**

**Ενισχυτική διάταξη τάσεως με τρίοδο.**

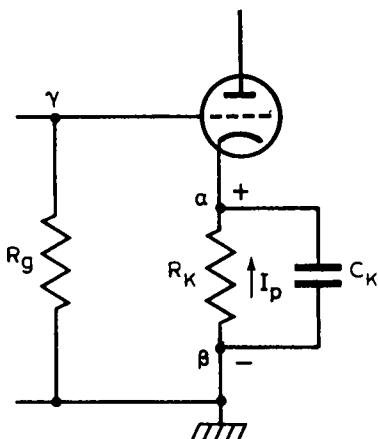
Έτσι η ανοδική τάση  $V_p$  θα είναι:  $V_B = V_p + I_p (R_L + R_K) \Rightarrow$

$$V_p = V_B - I_p (R_L + R_K)$$

Επειδή η αντίσταση  $R_K$  είναι συνήθως πολύ μικρότερη από την  $R_L$ , μπορούμε κατά προσέγγιση να γράψουμε:

$$V_p \approx V_B - I_p R_L$$

Την κατάλληλη συνεχή τάση του πλέγματος (την πόλωση δηλαδή του πλέγματος) την παίρνομε με τη βοήθεια των αντιστάσεων καθόδου  $R_K$  και πλέγματος  $R_{GK}$ . Ας πάρομε το τμήμα του κυκλώματος του σχήματος 4.2κ το οποίο περιλαμβάνει



Σχ. 4.2κα.  
Σύστημα αυτοπολώσεως τριόδου λυχνίας.

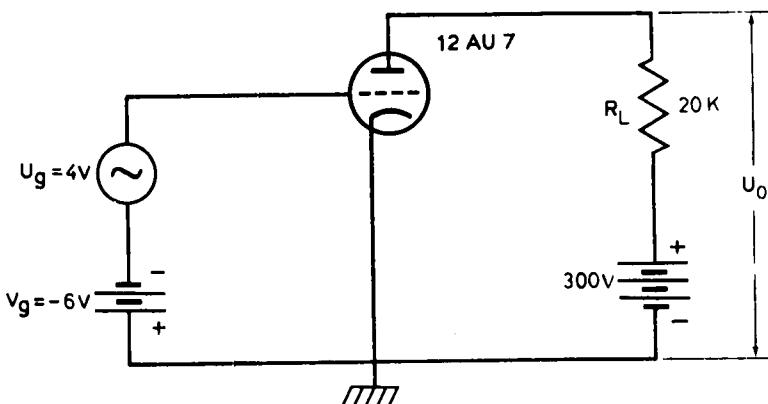
την κάθοδο και το πλέγμα της λυχνίας (σχ. 4.2κα). Σύμφωνα με τη φορά που καθορίσαμε για το ανοδικό ρεύμα (φορά κινήσεως των ηλεκτρονίων) το σημείο α του κυκλώματος θα έχει θετικότερο δυναμικό από το β και μάλιστα θετικότερο κατά την πτώση τάσεως  $I_p \cdot R_K$ . Η αντίσταση  $R_g$  είναι πολύ μεγάλη και το ρεύμα από το οποίο διαρρέεται είναι αμελητέο. Αυτό σημαίνει ότι η πτώση τάσεως στην αντίσταση αυτή είναι πρακτικά μηδέν και το δυναμικό του σημείου γ είναι ίδιο με το δυναμικό του β. Το σημείο β όμως είναι αρνητικότερο από το α. Άρα και το σημείο γ είναι αρνητικότερο από το α. Το πλέγμα δηλαδή της τριόδου είναι αρνητικότερο από την κάθοδο της. Μ' αυτό τον τρόπο επιτύχαμε την **αυτοπόλωση**. Επιτύχαμε δηλαδή χωρίς να χρησιμοποιήσουμε άλλη εξωτερική πηγή, να έχομε συνεχή αρνητική τάση στο πλέγμα.

Αν συνδέσουμε, τώρα και την εναλλασσόμενη τάση  $U_i$  (σχ. 4.2κ), τότε το ανοδικό ρεύμα θα αποτελείται από συνεχή και από εναλλασσόμενη συνιστώσα. Αν η αντίσταση  $R_K$  διαρρέεται από ένα τέτοιο ρεύμα, τότε η πτώση τάσεως στα άκρα της δεν θά είναι σταθερή και επομένως η πόλωση δεν θα είναι σταθερή. Αυτό θα οδηγήσει σε ανωμαλίες στη λειτουργία του ενισχυτή. Για να αποφύγομε αυτές τις ανωμαλίες, συνδέομε, παράλληλα με την αντίσταση  $R_K$ , έναν πυκνωτή  $C_K$ . Η τιμή του πυκνωτή εκλέγεται τέτοια ώστε στη μικρότερη συχνότητα εναλλασσόμενου ρεύματος με το οποίο πρόκειται να εργασθούμε, η αντίστασή του ( $1/C_K$ ) να είναι πολύ μικρότερη (δέκα φορές και πάνω) από την  $R_K$ . Έτσι η εναλλασσόμενη συνιστώσα του ρεύματος περνά μέσα από τον πυκνωτή με την πολύ μικρή αντίσταση, με αποτέλεσμα η εναλλασσόμενη πτώση τάσεως στα άκρα α.β να είναι αμελητέα. Αντίθετα η συνεχής συνιστώσα βρίσκει άπειρη αντίστασή στον πυκνωτή, και έτσι περνά μέσα από την  $R_K$ , οπότε και η πτώση τάσεως στα άκρα α.β της  $R_K$  είναι συνεχής και σταθερή, ανεπηρέαστη από την εναλλασσόμενη συνιστώσα. Τον τρόπο αυτό χρησιμοποιούμε γενικότερα όταν θέλομε να απαλλάξουμε μια αντίσταση από εναλλασσόμενες συνιστώσεις ρεύματος. Συνδέομε δηλαδή στα άκρα της έναν πυκνωτή με κατάλληλη χωρητικότητα. Ο πυκνωτής αυτός ονομάζεται πυκνωτής αποσυζεύξεως. Στο κύκλωμα του ενισχυτή του σχήματος 4.2κ υπάρχουν και οι πυκνωτές  $C_g$  και  $C_s$ . Ο  $C_g$  χρησιμεύει στο να συνδέει την εναλλασσόμενη τάση  $U_i$  που εισάγομε στην είσοδο του ενισχυτή με το πλέγμα, χωρίς όμως η πηγή από

την οποία προέρχεται η  $U_i$  να επηρεάζεται από τις συνεχείς τάσεις του κυκλώματος του ενισχυτή, γιατί ο πυκνωτής εμποδίζει να περάσουν από αυτόν συνεχείς συνιστώσες. Ο  $C_s$  πάλι συνδέει την εναλλασσόμενη τάση  $U_o$  στήν έξοδο του ενισχυτή με την επόμενη βαθμίδα, και απομονώνει την ενισχυτική βαθμίδα από την επόμενή της σε ότι αφορά τις συνεχείς συνιστώσες.

### η) Αρχή ενισχύσεως τάσεως με τρίοδο.

Στα διαγράμματα του σχήματος 4.2ιη είχαμε πάνω στις χαρακτηριστικές ανόδου την ευθεία φόρτου και στις χαρακτηριστικές πλέγματα τη δυναμική χαρακτηριστική. Ας υποθέσουμε ότι στο πλέγμα της λυχνίας που είναι πολωμένη στα -6 V. (σχ. 4.2ιζ), συνδέομε μια εναλλασσόμενη τάση πλάτους  $U_g = 4 V$  (σχ. 4.2κβ) τότε η



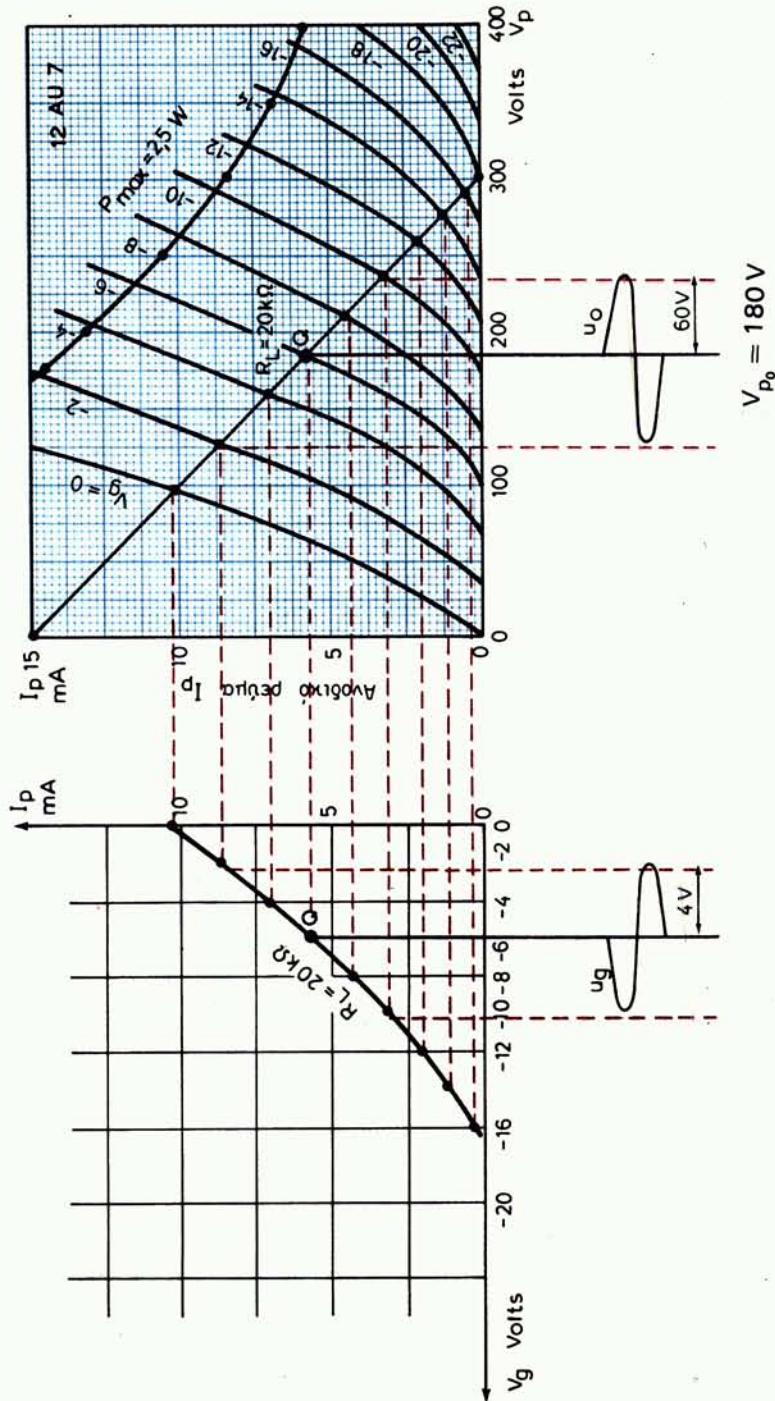
Σχ. 4.2κβ.

Απλή συνδεσμολογία του ενισχυτή με εναλλασσόμενη τάση στο πλέγμα.  
(Η λυχνία 12AU7 είναι διπλή τρίοδος. Εδώ εικονίζεται μόνο το μισό της).

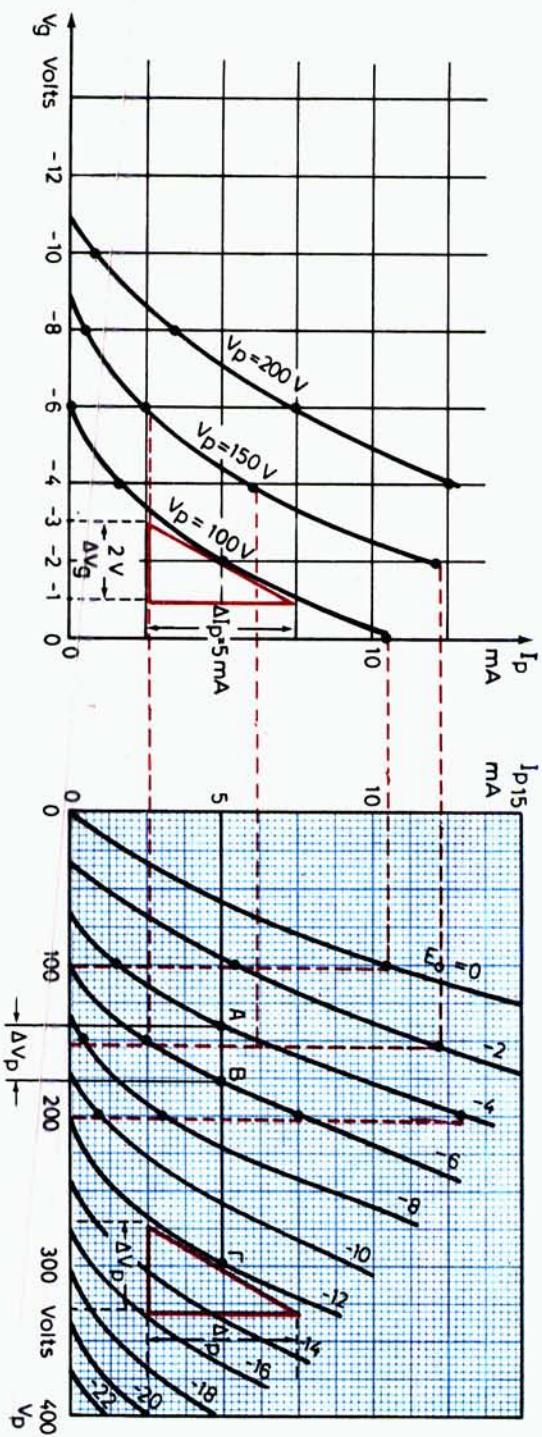
τάση στο πλέγμα θα εναλλάσσεται μεταξύ των τιμών -10 V και -2 V. Όπως όμως φαίνεται από τη γραφική κατασκευή (σχ. 4.2κγ) η ανοδική τάση  $V_p$ , που στην ηρεμία είναι  $V_{p_0} = 180 V$ , γίνεται 230 V όταν η  $V_g$  είναι -10 V και 130 V όταν η  $V_g$  θα είναι -2V. Άρα όταν η τάση μεταβάλλεται κατά 8 V από κορυφή σε κορυφή (από -10 V σε -2 V) η τάση  $V_p$  μεταβάλλεται από κορυφή σε κορυφή κατά 100 V (από 230 V σε 130 V). Έτσι βλέπομε ότι με εναλλαγή πλάτους 4 V στο πλέγμα, πήραμε εναλλαγή πλάτους  $U_o = 50 V$  στην άνοδο. Αυτό λέγεται ενίσχυση τάσεως. Το μέτρο της ενισχύσεως αυτής θα είναι  $A = U_o/U_g = 50/4 = 12.5$ . Βλέπομε επίσης πως όταν το πλέγμα γίνεται αρνητικότερο, η άνοδος γίνεται θετικότερη και αντίστροφα. Υπάρχει όπως λέμε μια διαφορά φάσεως  $180^\circ$  ανάμεσα στην εναλλασσόμενη τάση στην έξοδο και στην εναλλασσόμενη τάση στην είσοδο του ενισχυτή. Παραπάνω πήραμε μια απλή μορφή ενισχυτή τάσεως με φόρτο καθαρά ωμική αντίσταση.

### θ) Εφαρμογή.

Να βρεθούν οι παράμετροι  $\mu$ ,  $r_{g_m}$  της 12AU7 από τις χαρακτηριστικές ανόδου και πλέγματος που δίνονται στο σχήμα 4.2κδ.



Σχ. 4.2κ.  
Γραφική παράσταση της αρχής ενισχύσεως τάσεως με τρίοδο λυχνία.



Σχ. 4.2κδ.  
Γραφικές προσδιορισμός των παραμέτρων της λυκνίδης 12AU7.

### Απάντηση.

Είναι δυνατό μόνο από τις χαρακτηριστικές ανόδου ή μόνο από τις χαρακτηριστικές πλέγματος να υπολογίσουμε και τις τρεις παραμέτρους γραφικά ή έστω τις δύο και κατόπιν την τρίτη από τη γνωστή σχέση  $\mu = g_m \times \rho$ . Εδώ θα χρησιμοποιήσουμε και τα δύο διαγράμματα (α) των χαρακτηριστικών πλέγματος και (β) των χαρακτηριστικών ανόδου.

1) Έστω ότι θέλομε να μετρήσουμε τη διαγωγιμότητα:

$$g_m = \frac{\Delta I_p}{\Delta V_g} / V_p = \text{σταθ.}$$

για ανοδική τάση  $V_p = 100 \text{ V}$  και για μια τιμή ρεύματος  $I_p = 5 \text{ mA}$ .

Χρησιμοποιούμε το σμήνος των χαρακτηριστικών πλέγματος. Στο σημείο, της χαρακτηριστικής πλέγματος για ανοδική τάση 100 V, που αντιστοιχεί σε ανοδικό ρεύμα 5 mA, φέρνουμε εφαπτομένη και σχηματίζομε ένα μικρό ορθογώνιο τρίγωνο με, έστω, κάθετες πλευρές  $\Delta V_g = 2 \text{ V}$  και  $\Delta I_p = 5 \text{ mA}$ . Αν διαιρέσουμε τα 5 mA με τα 2 V, θα πάρομε τη διαγωγιμότητα  $g_m$ . Δηλαδή:

$$g_m = \frac{5 \text{ mA}}{2 \text{ V}} / V_p = 2,5 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

2) Αν θέλομε να βρούμε το συντελεστή ενισχύσεως  $\mu = \frac{\Delta V_p}{\Delta V_g} / V_p = \text{σταθερό}$

μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και τα δύο σμήνη. Έστω ότι χρησιμοποιούμε το σμήνος των χαρακτηριστών ανόδου και ότι θέλομε το μ για ανοδικό ρεύμα  $I_p = 5 \text{ mA}$ . Φέρομε κάθετο στον άξονα των ρευμάτων στο σημείο των 5 mA. Έστω ότι η κάθετος αυτή τέμνει τις χαρακτηριστικές πλέγματος για -4 V και -6 V στα σημεία A και B αντιστοίχως. Οι προβολές των σημείων αυτών στον άξονα των τάσεων ορίζουν μια μεταβολή τάσεως  $|\Delta V_p|$ . Έτσι έχουμε:  $\Delta V_g = 2 \text{ V}$  και  $\Delta V_p = 40 \text{ V}$  για  $I_p = 5 \text{ mA}$  σταθερό. Οπότε:

$$\mu = \left| \frac{\Delta V_p}{\Delta V_g} \right| / I_p = 5 \text{ mA} = \frac{40 \text{ V}}{2 \text{ V}} = 20$$

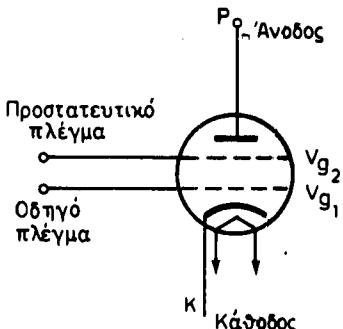
3) Την εσωτερική αντίσταση  $\rho$  μπορούμε να τη βρούμε υπολογιστικά διαιρώντας το μ με την  $g_m$ , αλλά και γραφικά από τις χαρακτηριστικές ανόδου ή πλέγματος. Για να την υπολογίσουμε γραφικά εκλέγομε π.χ. τη χαρακτηριστική για  $V_g = -12 \text{ V}$  και το σημείο Γ για  $I_p = 5 \text{ mA}$ . Φέρομε εφαπτομένη στο Γ και σχηματίζομε ένα μικρό ορθογώνιο τρίγωνο. Ο λόγος των καθέτων πλευρών του  $\Delta V_p$  προς  $\Delta I_p$  θα μας δώσει την εσωτερική αντίσταση της λυχνίας. Δηλαδή:

$$\rho = \frac{\Delta V_p}{\Delta I_p} / V_g = -12 \text{ V} = \frac{40 \text{ V}}{5 \text{ mA}} = 8 \text{ k}\Omega$$

Οι παράμετροι λοιπόν θα είναι  $g_m = 2,5 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$ ,  $\mu = 20$  και  $\rho = 8 \text{ k}\Omega$ . Βέβαια η μέθοδος είναι προσεγγιστική. Οι παράμετροι αλλάζουν εφόσον αλλάζει και το σημείο λειτουργίας.

### 4.2.3 Τέτροδος λυχνία.

Με την προσθήκη ενός ακόμη ηλεκτροδίου στην τρίοδο δημιουργήθηκε η **τέτροδος λυχνία**. Το ηλεκτρόδιο αυτό ονομάζεται προστατευτικό πλέγμα, έχει ομοια κατασκευή με το πλέγμα της τριόδου το οποίο ονομάζεται οδηγό πλέγμα και είναι τοποθετημένο ανάμεσα σ' αυτό και την άνοδο. Έχομε έτσι μια λυχνία με τέσσερα ηλεκτρόδια, γι' αυτό και η λυχνία ονομάζεται τέτροδος. Στο σχήμα 4.2κε παριστάνεται μια τέτροδος.



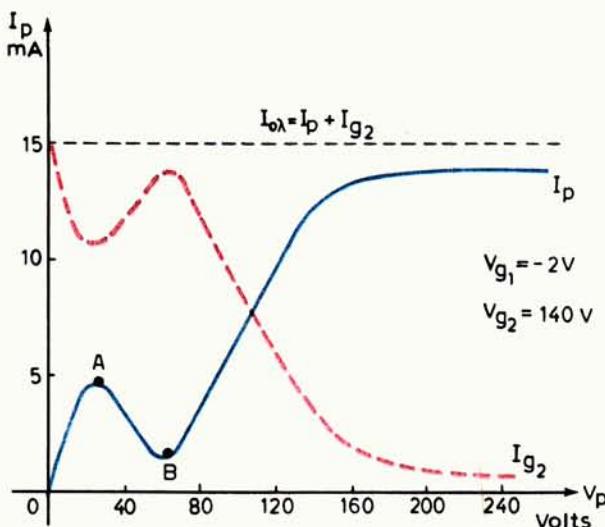
Σχ. 4.2κε.  
Συμβολική παράσταση τετρόδου λυχνίας.

Η προσθήκη του προστατευτικού πλέγματος προέκυψε από την ανάγκη υποβι- βασμού της χωρητικότητας μεταξύ πλέγματος ανόδου στην τρίοδο λυχνία. Η χω- ρητικότητα αυτή δημιουργεί ανωμαλίες κατά τη λειτουργία της τριόδου στις υψη- λές συχνότητες γιατί μέσω αυτής οι μεταβολές του κυκλώματος που ήταν συνδε- μένο στην άνοδο επηρεάζουν την είσοδο της λυχνίας. Η παρουσία αυτού του πλέγματος με θετικό δυναμικό, απομονώνει κατά κάποιο τρόπο την άνοδο από το οδηγό πλέγμα και έτσι αυτό δεν επηρεάζεται από τις μεταβολές του ανοδικού κυ- κλώματος.

Στο προστατευτικό πλέγμα δίνεται συνήθως ένα σταθερό θετικό δυναμικό, μι- κρότερο από το δυναμικό της ανόδου.

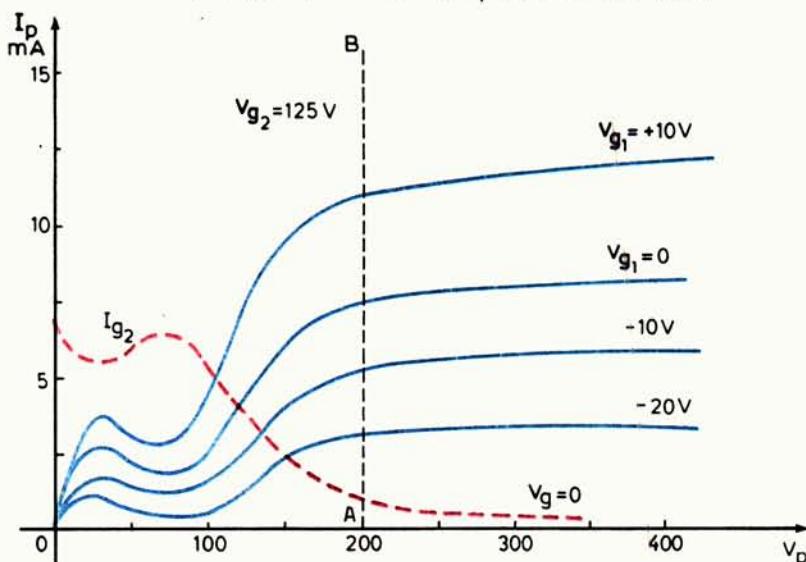
Το ανοδικό ρεύμα στην τέτροδο εξαρτάται, εκτός από το δυναμικό της ανόδου  $V_p$  και το δυναμικό του οδηγού πλέγματος  $V_{g_1}$ , και από το δυναμικό του προστα- τευτικού πλέγματος  $V_{g_2}$ .

Τον κύριο ρόλο βέβαια στη ρύθμιση του ανοδικού ρεύματος τον παίζει το δυνα- μικό του οδηγού πλέγματος. Στο σχήμα 4.2κστ φαίνεται μια καμπύλη μεταβολής του ανοδικού ρεύματος και άλλη μια μεταβολής του ρεύματος προστατευτικού πλέγματος μιας τυπικής τετρόδου λυχνίας. Από τις καμπύλες αυτές φαίνεται ότι στη λυχνία κυκλοφορούν δυο ρεύματα: το ανοδικό ρεύμα  $I_p$  και το ρεύμα προστα- τευτικού πλέγματος  $I_{g_2}$ . Παρατηρούμε ότι όταν η ανοδική τάση είναι μηδέν, κυκλοφορεί μόνο το ρεύμα του προστατευτικού πλέγματος. Αν αρχίσουμε να αυξά- νουμε την ανοδική τάση, το ανοδικό ρεύμα στην αρχή αυξάνει, ενώ το ρεύμα πλέγ- ματος ελαττώνεται. Από μια τάση  $V_p$  (σημείο A) και πέρα, το ανοδικό ρεύμα, παρόλο που η τάση αυξάνει, αυτό ελαττώνεται, ενώ το ρεύμα προστατευτικού πλέγματος αυξάνει. Παρουσιάζει δηλαδή το ανοδικό ρεύμα, όπως λέμε, μια **κατά- δυση**, που συνεχίζεται ως κάποια τιμή της ανοδικής τάσεως (σημείο B) όπου το α- νοδικό ρεύμα αρχίζει πάλι να αυξάνεται, ώσπου να πάρει την τιμή κόρου. Στο τιμή- μα λειτουργίας της AB η λυχνία λέμε οτι παρουσιάζει αρνητική αντίσταση. Έχομε



Σχ. 4.2κστ.

Μεταβολές του ανοδικού ρεύματος  $I_p$  και του ρεύματος προστατευτικού πλέγματος  $I_{g_2}$  σε συνάρτηση με την ανοδική τάση  $V_p$ , σε μια τυπική τέτροδο.



Σχ. 4.2κζ.

Τυπικές χαρακτηριστικές τετρόδου.

έτσι το φαινόμενο να ελαπτώνεται το ρεύμα ενώ αυξάνεται η ανοδική τάση. Η αρνητική αντίσταση κάνει την τέτροδο χρήσιμη στην παραγωγή ταλαντώσεων. Ένα συμήνος από χαρακτηριστικές ανόδου της τετρόδου λυχνίας με ενδεικτικές τιμές φαίνεται στο σχήμα 4.2κζ. Στο διάγραμμα αυτό δίνεται και η μεταβολή του ρεύματος πλέγματος  $I_{g_2}$  για τάση οδηγού πλέγματος  $V_{g_1} = 0$ . Οι χαρακτηριστικές έχουν

χαραχθεί για διάφορες τάσεις οδηγού πλέγματος  $V_{g_1}$ , η καθεμιά, αλλά για την ίδια τάση προστατευτικού:  $V_{g_2} = 125 \text{ V}$ .

**Η κατάδυση** οφείλεται στη δημιουργία δευτερογενούς εκπομπής ηλεκτρονίων από την άνοδο. Στην αρχή για μικρές τάσεις ανόδου, η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων που προσκρούουν στην άνοδο δεν είναι αρκετή για τη δημιουργία δευτερογενούς εκπομπής. Με την αύξηση όμως της ανοδικής τάσεως, και συνεπώς της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων, αρχίζει να προκαλείται δευτερογενής εκπομπή από την άνοδο. Όσο το δυναμικό της ανόδου είναι χαμηλότερο από το δυναμικό του προστατευτικού πλέγματος, τα δευτερογενή πλεκτρόνια έλκονται από το θετικότερο προστατευτικό πλέγμα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ρεύματος με φορά αντίθετη προς τη φορά του ανοδικού ρεύματος. Το συνολικό τότε ρεύμα προς την άνοδο μειώνεται. Όσο όμως αυξάνει η ανοδική τάση τόσο περισσότερα δευτερογενή πλεκτρόνια συγκρατούνται στην άνοδο και τόσο το ανάστροφο ρεύμα γίνεται μικρότερο, ενώ το ανοδικό ρεύμα μεγαλύτερο, ώσπου το ανάστροφο ρεύμα να γίνει αμελητέο και το ανοδικό ρεύμα να τείνει στον κέντρο. Η τέτροδος χρησιμοποιείται ως ενισχύτρια ισχύος αλλά και σε κυκλώματα παραγωγής ταλαντώσεων. Η έλλειψη γραμμικότητας σε πολλά τμήματα της περιορίζει τη χρήση της, με αποτέλεσμα να μην έχει ευρείες εφαρμογές.

Και στην τέτροδο το βασικό ρόλο για τον έλεγχο του ανοδικού ρεύματος τον παίζει το δυναμικό του οδηγού πλέγματος  $V_{g_1}$ . Οι παράμετροι εδώ ορίζονται όπως και στην τρίοδο αλλά με σταθερή την  $V_{g_2}$ . Ο συντελεστής ενισχύσεως είναι:

$$\mu = \frac{\Delta V_p}{\Delta V_{g_1}} \Big| I_p = \text{σταθ.}$$

Η διαγωγιμότητα:

$$g_m = \frac{\Delta I_p}{\Delta V_{g_1}} \Big| V_p = \text{σταθ.}$$

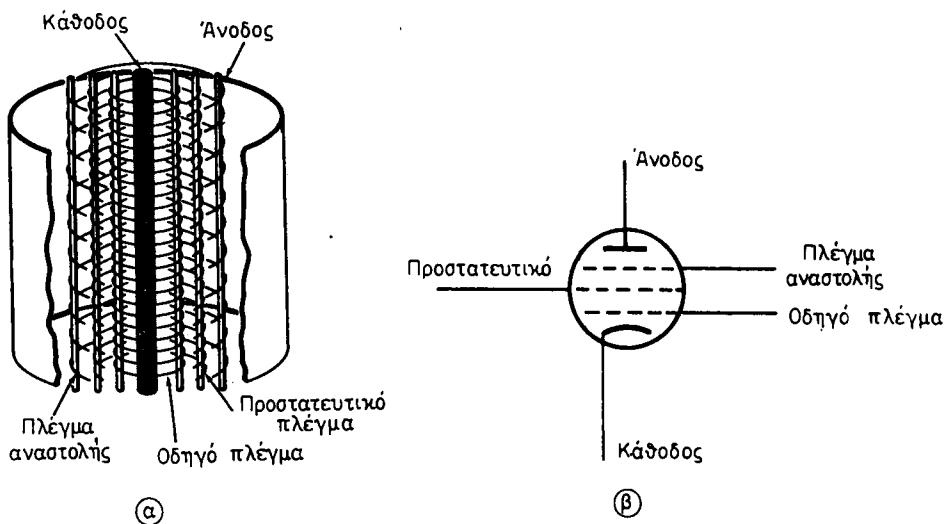
Η εσωτερική αντίσταση:

$$\rho = \frac{\Delta V_p}{\Delta I_p} \Big| V_{g_1} = \text{σταθ.}$$

Οι τιμές του  $\mu$  στις τετρόδους κυμαίνονται από 100 ως 1200, της διαγωγιμότητας  $g_m$  από 0,5 ως 3  $\text{mhos}$  και της αντιστάσεως  $\rho$  από 100  $\text{k}\Omega$  ως 2  $\text{M}\Omega$ .

Στην περίπτωση χρησιμοποίησεως της τετρόδου ως ενισχύτριας χωρίς παραμορφώσεις, πρέπει αυτή να λειτουργεί στα γραμμικά τμήματα των χαρακτηριστικών της. Π.χ. στην περίπτωση της τετρόδου που έχει χαρακτηριστικές όπως στο σχήμα 4.2κζ, πρέπει να εργάζεται με ανοδικές τάσεις μεγαλύτερες από αυτήν που ορίζει η κάθετη γραμμή AB.

Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι χαρακτηριστικές του σχήματος 4.2κζ είναι μια περίπτωση που αντιστοιχεί στην τάση  $V_{g_2} = 125 \text{ V}$ . Μπορούν να υπάρξουν για την ίδια λυχνία και άλλα σμήνη χαρακτηριστικών για διαφορετικές τάσεις προστατευτικού πλέγματος. Ο κατασκευαστής δίνει στοιχεία για τη σωστότερη χρησιμοποίηση κάθε τετρόδου.



Σχ. 4.2κη.  
Πέντοδος λυχνία.  
α) Κατασκευή, β) Συμβολισμός.

#### 4.2.4 Πέντοδος λυχνία [σχ. 4.2κη (α), (β)].

Η πέντοδος λυχνία δημιουργήθηκε με την τοποθέτηση ενός πλέγματος ανάμεσα στο προστατευτικό και την άνοδο της τετρόδου. Το πλέγμα αυτό, που ονομάζεται **πλέγμα αναστολής**, συνδέεται, συνήθως, με την κάθοδο παίρνοντας φυσικά από αυτή το δυναμικό της. Η σύνδεση αυτή σε πολλές λυχνίες γίνεται απευθείας στο εσωτερικό της λυχνίας.

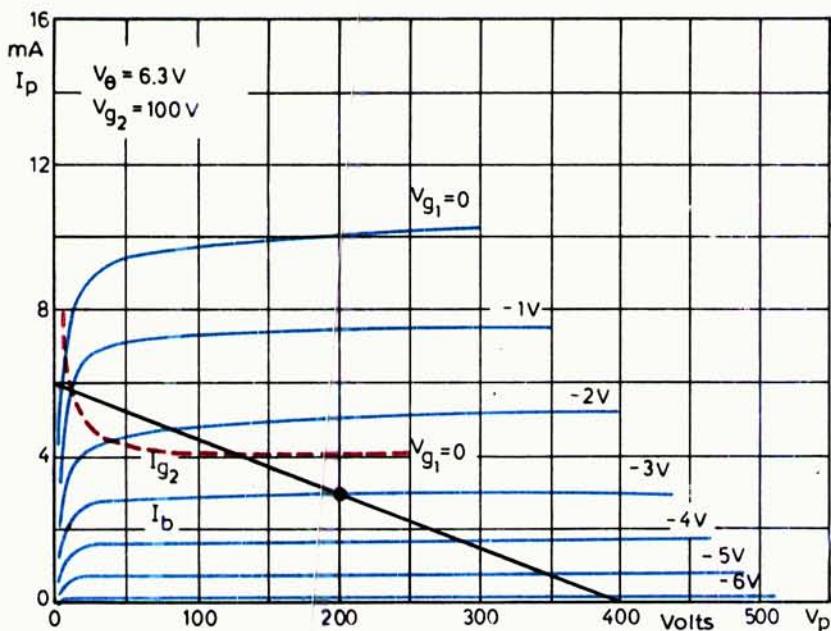
Η παρουσία του πλέγματος αυτού με το δυναμικό της καθόδου οδηγεί στήν κατάργηση της **καταδύσεως** που εμφανίζει η τέτροδος. Τα πρωτογενή ηλεκτρόνια από την κάθοδο, έχουν βέβαια αρκετή ενέργεια, για να υπερνικήσουν το αρνητικό δυναμικό του πλέγματος αναστολής και νά φθάσουν την άνοδο, φθάνουν όμως με μειωμένη κινητική ενέργεια, μέ συνέπεια τη μείωση της δευτερογενούς εκπομπής. Άλλα και τα δευτερογενή ηλεκτρόνια από την άνοδο εμποδίζονται να κινηθούν προς το προστατευτικό πλέγμα. Έτσι δεν υπάρχει ανάστροφο ρεύμα από την άνοδο προς το προστατευτικό πλέγμα και οι χαρακτηριστικές της πεντόδου δεν εμφανίζουν κατάδυση (σχ. 4.2κθ).

Όπως φαίνεται από το σχήμα, οι χαρακτηριστικές παρουσιάζουν απότομη εμφάνιση κόρου. Το ανοδικό ρεύμα εξαρτάται από το θετικό δυναμικό του προστατευτικού πλέγματος  $V_{g_2}$ , κυρίως όμως εξαρτάται από το δυναμικό του οδηγού πλέγματος. Το δυναμικό της ανόδου έχει πολύ μικρή επίδραση στη διαμόρφωση του ανοδικού ρεύματος. Η άνοδος είναι απομονωμένη από το ανοδικό ρεύμα.

Οι πέντοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως ως ενισχύτριες τάσεως και ως ενισχύτριες ισχύος.

Με βραχικύκλωση των πλεγμάτων της πεντόδου δημιουργούνται διάφοροι τύποι τριόδων ή και τέτροδοι.

Τα  $\mu$ ,  $\rho$  και  $g_m$  ορίζονται στην πέντοδο όπως και στην τέτροδο.



Σχ. 4.2κθ.

Χαρακτηριστικές ανόδου πεντόδου χαραγμένες για τάση προστατευτικού πλέγματος  $V_{g_2} = 100$  V. Σ' αυτές φαίνεται και η μεταβολή του ρεύματος προστατευτικού πλέγματος  $I_{g_2}$  για τάση οδηγού πλέγματος  $V_{g_1} = 0$ .

Συνήθεις τιμές για τις πεντόδους είναι:

- Για το  $\mu$  από 100 ως 10000.
- Για το  $\rho$  από 0,1 ως 2 MΩ και
- για τη  $g_m$  από 0,5 ως  $10 \frac{mA}{V}$ .

Το ανοδικό ρεύμα στην τέτροδο και την πέντοδο δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση:

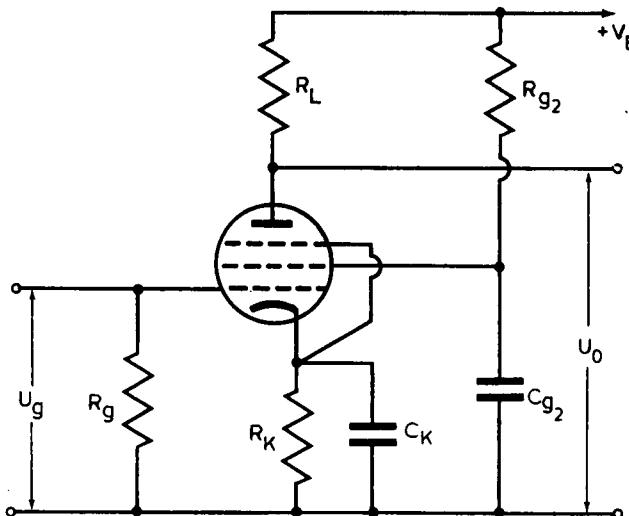
$$I_p \approx K \left( V_{g_1} + \frac{V_{g_2}}{\mu_1} \right)^{3/2}$$

όπου  $\mu_1 = \left( \frac{\Delta V_p}{\Delta V_{g_1}} \right)$  για  $V_{g_2}$  και  $I_p$  σταθερά.

Ένα τυπικό κύκλωμα πεντόδου συνδεσμολογημένης ως ενισχύτριας τάσεως φαίνεται στο σχήμα 4.2λ.

#### 4.2.5 Άλλα είδη λυχνιών κενου.

Εκτός από τους τύπους των λυχνιών που αναφέραμε ως τώρα, υπάρχουν και άλλοι που χρησιμοποιούνται ανάλογα με τις απαντήσεις σε κάθε περίπτωση. Τέτοιες είναι:



Σχ. 4.2λ.

Τυπικό κύκλωμα ενισχυτή τάσεως με πέντοδο.

$R_L$ ) αντίσταση φόρτου.  $R_K$ ,  $C_K$  και  $R_g$ ) σύστημα αυτοπολώσεως οδηγού πλέγματος.  $C_{g_2}$ ,  $R_{g_2}$ ) σύστημα αυτοπολώσεως προστατευτικού πλέγματος.  $U_g$ ) Τάση εισόδου.  $U_o$ ) Τάση εξόδου.

### α) Οι λυχνίες κατευθυνόμενης δέσμης (beam).

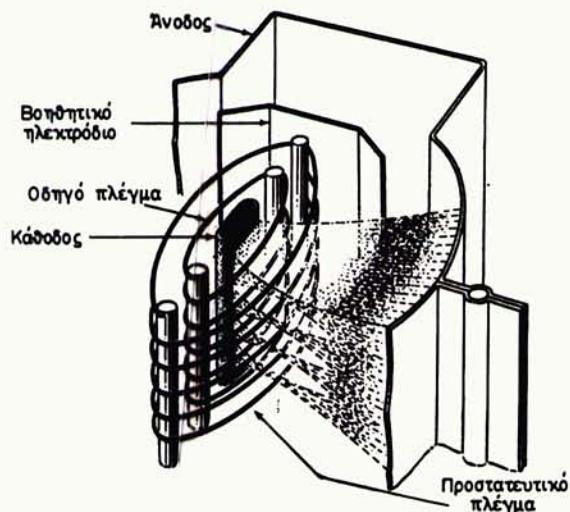
Είναι ενα είδος τετρόδων με ειδικής κατασκευής ηλεκτρόδια (σχ. 4.2λα). Η μορφή των πλέγμάτων, των βοηθητικών ηλεκτροδίων της ανόδου και της καθόδου είναι τέτοια, ώστε τα ηλεκτρόνια να κινούνται κατά δέσμες και έτσι, ώστε να εστιάζουν σε μια περιοχή ανάμεσα στο δεύτερο πλέγμα και στην άνοδο. Η εστίαση αυτή δημιουργεί εκεί ένα χώρο με μεγάλη πυκνότητα αρνητικών φορτίων που δρα, για τα ηλεκτρόνια που κινούνται προς την άνοδο, με τρόπο ανάλογο με τον τρόπο που δρα το πλέγμα αναστολής της πεντόδου. Έτσι έχουμε κατάργηση της καταδύσεως και μάλιστα η εμφάνιση του κόρου είναι πιο απότομη (σχ. 4.2λβ).

Οι λυχνίες αυτές χρησιμοποιούνται ως τελικές ενισχύτριες στη χαμηλή και την υψηλή συχνότητα και ως ταλαντώτριες.

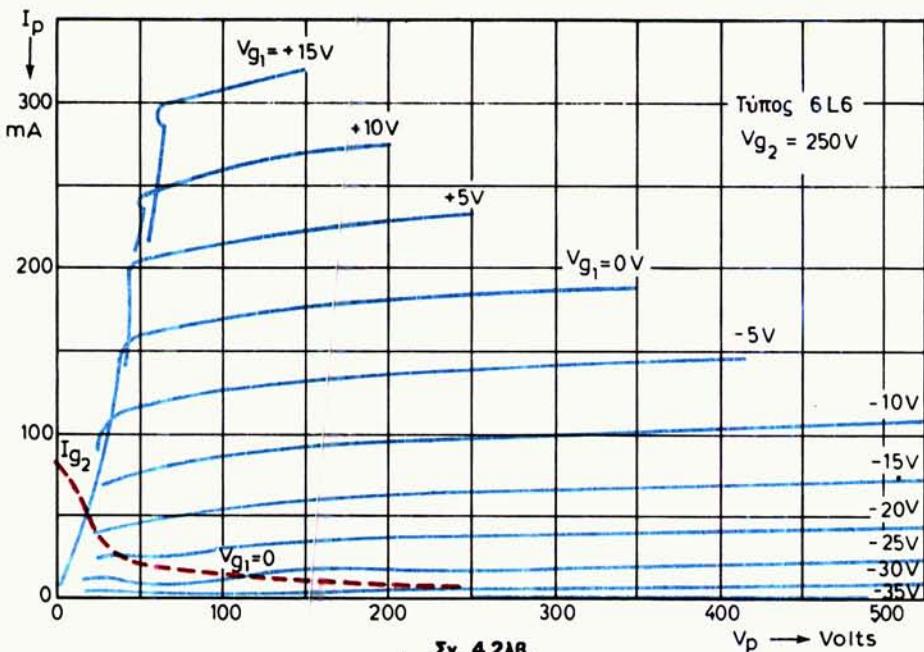
### β) Λυχνίες μεταβλητού μ (ή μεταβλητής διαγωγιμότητας).

Είναι λυχνίες που ο συντελεστής ενισχύσεως τους μ (ή η διαγωγιμότητά τους  $g_m$ ) εξαρτάται από το σημείο λειτουργίας τους. Έτσι π.χ. μια λυχνία 6BA6 μεταβλητού μ, έχει διαγωγιμότητα 4 mA/V όταν η πόλωση του οδηγού της πλέγματος είναι -3 V, οπότε μπορεί να δώσει ενίσχυση 400 με φόρτο 100 K $\Omega$ . Αν η πόλωσή της γίνει -20 V, η διαγωγιμότητά της γίνεται 0,04 mA/V και η ενίσχυσή της 4.

Το οδηγό πλέγμα των λυχνιών αυτών είναι κατασκευασμένο έτσι, ώστε οι σπείρες του να παρουσιάζουν πυκνώματα και αραιώματα. Οι χαρακτηριστικές τους δεν αποκόπτονται τόσο απότομα όσο στις συνηθισμένες λυχνίες (σχ. 4.2λγ). Χρησιμοποιούνται όταν θέλουμε να ρυθμίζομε αυτόματα την ενίσχυση έτσι ώστε, όταν τα σήματα εισόδου είναι ισχυρά, η ενίσχυση να είναι μικρή, ενώ, όταν είναι ασθενή, η ενίσχυση να είναι μεγάλη. Έτσι το σήμα εξόδου κρατείται σε μια σταθερή στάθμη. Στους δέκτες, π.χ. στη βαθμίδα AGC (αυτόματης ρυθμίσεως της ενισχύσεως) χρησιμοποιούνται τέτοιες λυχνίες.



Σχ. 4.2Λα.  
Εσωτερική δομή λυχνίας κατευθυνόμενης δέσμης.

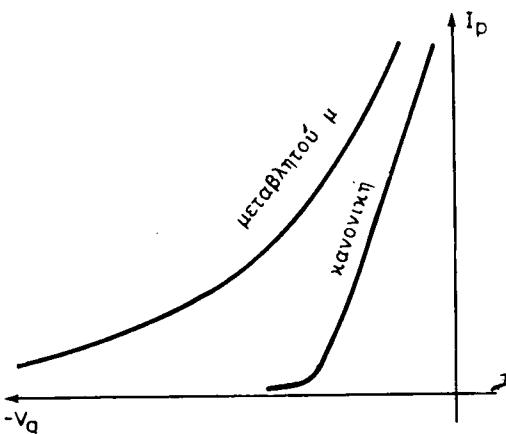


Σχ. 4.2Λβ.

Χαρακτηριστικές ανόδου της λυχνίας κατευθυνόμενης (BEAM) 6L6 χαραγμένες για  $V_{g_2} = 250$  V.  
Σ' αυτό φαίνεται και το ρεύμα προστατευτικού πλέγματος  $I_{g_2}$  για  $V_{g_1} = 0$ .

Υπάρχουν επίσης λυχνίες με περισσότερα από πέντε ηλεκτρόδια. Οι λυχνίες αυτές χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση περισσοτέρων από μιας λειτουργιών. Χρησιμοποιούνται π.χ. στη μίξη σημάτων διαφόρων συχνοτήτων και την παραγωγή άλλων.

Πολλές φορές στο ίδιο περίβλημα υπάρχουν δύο όμοιες λυχνίες. Αυτό γίνεται για οικονομία χώρου, βάρους και εξαρτημάτων συνδεσμολογίας. Έχομε έτσι διπλές διόδους, διπλές τριόδους κλπ.



Σχ. 4.2Λγ.

Μια άλλη κατηγορία λυχνιών κενού είναι οι λυχνίες μικροκυμάτων, κυμάτων δηλαδή μέση συχνότητες της τάξεως των χιλιάδων μεγακύκλων ανά δευτερόλεπτο. Τέτοιες είναι π.χ. η Κλύστρον, η Μάγκεντρον και η λυχνία διαδιδομένων κυμάτων.

### Εφαρμογή.

Για το κύκλωμα του σχήματος 4.2λ δίνονται οι χαρακτηριστικές της πεντόδου του σχήματος 4.2κθ για  $V_{g_2} = 100V$ ,  $R_L = 65 k\Omega$  και  $R_K = 800 \Omega$ . Να επιλεγεί το σημείο ηρεμίας. Με βάση τα στοιχεία του σημείου ηρεμίας να βρεθεί η τιμή της  $R_{g_2}$ .

### Λύση.

Για το ανοδικό κύκλωμα θα είναι:

$$V_B = R_L I_p + R_K (I_p + I_{g_2}) + V_p$$

Επειδή  $R_K \ll R_L$  μπορούμε να γράψουμε:

$$V_B \approx R_L I_p + V_p \Rightarrow I_p \approx \frac{V_B}{R_L} - \frac{V_p}{R_L}$$

Η εξίσωση αυτή είναι η προσεγγιστική εξίσωση της ευθείας φόρτου.

$$\text{Αν } V_p = 0 \quad \text{τότε} \quad I_p \approx \frac{V_B}{R_L} = \frac{400V}{65000\Omega} \approx 6 mA$$

και αν  $I_p = 0$  τότε  $V_p = V_B$ .

Τα  $V_p = 400V$  και  $I_p = 6mA$  είναι τα σημεία τομής της ευθείας φόρτου με τους δίξονες  $V_p$  και  $I_p$  αντίστοιχα.

Για την όσο το δυνατό ομαλότερη λειτουργία της λυχνίας εκλέγομε σαν σημείο ηρεμίας το σημείο τομής της ευθείας φόρτου με την χαρακτηριστική πλέγματος  $V_g = -3V$ . Τότε, όπως φαίνεται από τις χαρακτηριστικές, το ρεύμα ηρεμίας θα είναι  $I_{pQ} = 3 mA$  και η τάση ηρεμίας  $V_{pQ} = 200V$ .

Για να βρούμε το ρεύμα προστατευτικού πλέγματος  $I_{g_2}$  πρέπει να παρατηρήσομε ότι από την αντίσταση καθόδου  $R_K$  περνάει τόσο το ανοδικό ρεύμα  $I_p$  όσο και το ρεύμα πλέγματος  $I_{g_2}$ . Τα ρεύματα αυτά δημιουργούν την πτώση τάσεως για την πόλωση του οδηγού πλέγματος.

$$\text{Θα είναι δηλαδή: } |V_g| = R_k (I_p + I_{g_2}) \Rightarrow I_{g_2} = \frac{|V_g| - R_k I_{pQ}}{R_k}$$

Από το σημείο ηρεμίας όμως φαίνεται ότι το ρεύμα ηρεμίας  $I_{pQ} = 3\text{mA}$ . Θα είναι συνεπώς:

$$I_{g_2} = \frac{3 - 800 \times 3 \times 10^{-3}}{800} = \frac{3 - 24 \times 10^{-1}}{800} = \frac{0,6\text{ V}}{800\text{ }\Omega} = 0,75\text{ mA}$$

Η τάση που χρειάζεται το προστατευτικό πλέγμα είναι  $V_{g_2} = 100\text{V}$ . Αρα στην αντίσταση  $R_{g_2}$  πρέπει να έχομε πτώση τάσεως 300V.

$$\Delta\text{ηλαδή: } V_{g_2} = V_B - I_{g_2} \cdot R_{g_2} \Rightarrow R_{g_2} = \frac{V_B - V_{g_2}}{I_{g_2}}$$

$$\text{Ήτοι: } R_{g_2} = \frac{400\text{V} - 100\text{V}}{0,75 \times 10^{-3}\text{ A}} = \frac{300\text{V}}{7,5 \times 10^{-4}\text{ A}} = 400\text{ k}\Omega$$

### Ασκήσεις.

- Σε μια δίοδο κενού ο κατασκευαστής δίνει ως μέγιστη επιτρεπόμενη ανοδική απώλεια  $P_{max} = 60\text{ W}$ . Η δίοδος αυτή έχει σταθερά  $K = 0,2\text{ mA}, V^{3/2}$ . Η περιοχή ρεύματος κόρου αρχίζει στην ανοδική τάση  $V_{PK} = 100\text{ V}$ . Ποιά είναι η μέγιστη ανοδική τάση  $V_{Pm}$  που μπορούμε να εφαρμόσουμε στη λυχνία αυτή;
- Το ανοδικό ρεύμα σε μια δίοδο κενού που εργάζεται πάντοτε στην περιοχή που ισχύει η σχέση του Langmuir, είναι  $I_p = 50\text{ mA}$ , όταν η ανοδική τάση είναι  $V_p = 50\text{ V}$ . Ποιό είναι το ανοδικό ρεύμα όταν η ανοδική τάση γίνει 100 V;
- Σε μια δίοδο κενού, όταν εφαρμόζεται ανοδική τάση 80V, το ανοδικό ρεύμα είναι 20 mA. Να υπολογισθούν:
  - Ο αριθμός των ηλεκτρανίων που φθάνουν στην άνοδο ανά δευτερόλεπτο.
  - Η κινητική ενέργεια κάθε ηλεκτρονίου όταν φθάνει στην άνοδο (θεωρείται ότι το ηλεκτρόνιο ξεκινά από την κάθοδο με μηδενική αρχική ταχύτητα)
  - Η ισχύς που καταναλώνεται στην άνοδο.
- Τρίοδος κενού έχει  $\rho = 10\text{ k}\Omega$  και  $g_m = 2,5\text{ mA/V}$ . Ποιά θα είναι η εσωτερική αντίσταση  $r'$  μιας δίλλης τριόδου που έχει συντελεστή ενισχύσεως 60% μεγαλύτερο από την πρώτη και διαγωγιμότητα 20% μικρότερη;
- Τρίοδος κενού έχει  $\rho = 20\text{ k}\Omega$  και  $\mu = 25$ . Με  $V_p = 100\text{ V}$  και  $V_g = 0\text{V}$  το ανοδικό της ρεύμα είναι 5 mA. Χαράξετε τις χαρακτηριστικές ανόδου για δυναμικά πλέγματος 0V και -2V. Από την τελευταία προσδιορίστε το ανοδικό ρεύμα όταν  $V_p = 130\text{V}$ .
- Τρίοδος έχει  $g_m = 4000\text{ }\mu\text{A/V}$  και  $\rho = 15\text{ k}\Omega$ .
  - Ποιά θα είναι η μεταβολή του ανοδικού ρεύματος, αν η τάση πλέγματος μεταβληθεί από -2V σε -6V με σταθερή ανοδική τάση 150 V;
  - Πόσο πρέπει να μεταβληθεί κατόπιν η ανοδική τάση με σταθερή τάση πλέγματος για να επανέλθει το ανοδικό ρεύμα στην αρχική τιμή του;
- Σε μια πέντοδο ενισχύτρια τάσεως, η τάση της πηγής τροφοδοσίας είναι  $V_B = 300\text{V}$ . Η τάση του προστατευτικού πλέγματος πρέπει να είναι  $V_{g_1} = 120\text{V}$  και η τάση του οδηγού πλέγματος  $V_g = -2\text{V}$  (αυτοπόλωση). Το ανοδικό ρεύμα ηρεμίας είναι  $I_{pQ} = 1,5\text{ mA}$  και το αντίστοιχο ρεύμα προστατευτικού πλέγματος  $I_g = 0,5\text{ mA}$ . Η τάση του προστατευτικού πλέγματος επιτυγχάνεται με μια ωμική αντίσταση στη σειρά με την πηγή τροφοδοσίας. Ποιές πρέπει να είναι οι τιμές των αντιστάσεων προστατευτικού πλέγματος και καθόδου;

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

### ΛΥΧΝΙΕΣ ΜΕ ΑΕΡΙΟ

#### 5.1 Γενικά.

Εκτός από τις λυχνίες κενού υπάρχουν και λυχνίες που περιέχουν αέριο, λυχνίες δηλαδή μέσα στις οποίες κατά την κατασκευή τους εισάγεται ή δημιουργείται ποσότητα αερίου με κατάλληλη πίεση. Τα συνθησμένα αέρια σ' αυτές τις λυχνίες είναι τα ευγενή (αργό, κρυπτό, νέο, ήλιο, ξένο) και ατμοί υδραργύρου.

Τα περισσότερα λειτουργικά χαρακτηριστικά των λυχνιών αερίου διαφέρουν από τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των λυχνιών κενού. Διαφορές επίσης υπάρχουν και στη μορφή των ηλεκτροδίων τους.

Η λειτουργία τους βασίζεται στην αγωγιμότητα των αερίων και μάλιστα στις εκκενώσεις μέσα σ' αυτά. Δυο κυρίως είναι οι τύποι εκκενώσεων στις λυχνίες με αέριο: η **εκκένωση αίγλης** και η **εκκένωση τόξου**.

Στην περίπτωση λυχνιών με εκκένωση αίγλης, μέσα στο αέριο, δημιουργούνται αρχικά από διάφορα εξωτερικά αίτια, π.χ. κοσμική ακτινοβολία, φωτόνια, **κρούσεις** λόγω θερμικής κινήσεως κλπ. ελεύθερα ηλεκτρόνια και ίόντα. Όταν ανάμεσα στην κάθοδο και την άνοδο δημιουργηθεί ένα ηλεκτρικό πεδίο, αυτό θα αυξήσει την κινητική ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων και θα τα κάνει ικανά να αποσπάσουν και άλλα ηλεκτρόνια από άλλα μάρια του αερίου. Τα ηλεκτρόνια που αποσπάσθηκαν θα αποσπάσουν στη συνέχεια άλλα, με αποτέλεσμα τελικά να δημιουργηθεί εκκένωση μέσα στη λυχνία.

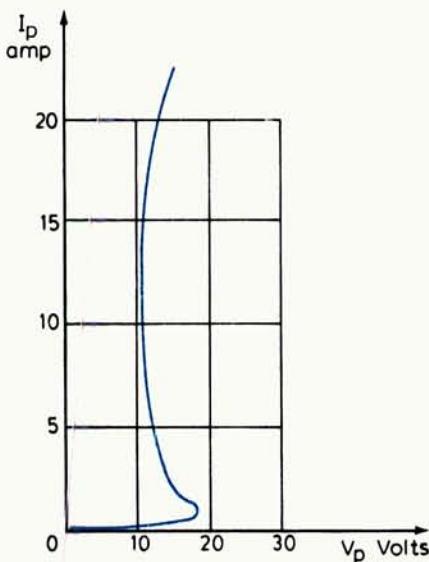
Το ρεύμα σ' αυτές τις λυχνίες συντηρείται και από ηλεκτρόνια που παράγονται με δευτερογενή εκπομπή από την κάθοδο, όταν πάνω σ' αυτή προσκρούουν θετικά ίόντα.

Μετά την εκκένωση, η τάση στα άκρα της λυχνίας παραμένει σταθερή, για μια μεγάλη περιοχή ρευμάτων (σχ. 5.1). Χαρακτηριστικά των λυχνιών αίγλης είναι οι σχετικά μεγάλες τάσεις λειτουργίας και τα ασθενή ρεύματα.

Επίσης η κάθοδος δε θερμαίνεται, γι' αυτό και ονομάζεται **ψυχρή**.

Στις λυχνίες με εκκένωση τόξου, τα ηλεκτρόνια για τη συντήρηση της καταστάσεως εκκενώσεως προέρχονται από θερμή κάθοδο. Η κάθοδος θερμαίνεται από εξωτερικά ηλεκτρικά μέσα ή από τη θερμότητα που αναπτύσσεται κατά την εκκένωση. Έτσι, στην εκκένωση αίγλης π.χ., αν αυξήσουμε την ένταση του ρεύματος, θα υπερθερμανθεί η κάθοδος και η εκκένωση θα μετατραπεί σε εκκένωση τόξου.

Χαρακτηριστικό στην εκκένωση τόξου είναι η χαμηλή τάση στα άκρα της λυχνίας και η σχετικά μεγάλη ένταση του ρεύματος.



Σχ. 5.1.  
Χαρακτηριστική καμπύλη λυχνίας με αέριο.

## 5.2 Δίοδοι ψυχρής καθόδου.

Υπάρχουν δίοδοι αερίου με ψυχρή κάθοδο που λειτουργούν ως λυχνίες αίγλης. Μια κατηγορία από αυτές έχει κατασκευή ίδια με αυτή που φαίνεται στο σχήμα 5.2α. Στη δίοδο αυτή υπάρχει ένα κεντρικό ηλεκτρόδιο που είναι η άνοδος. Η άνοδος περιβάλλεται από έναν κύλινδρο από νικέλιο επιχρισμένο εσωτερικά με υλικό χαμηλού έργου εξόδου. Στον κύλινδρο είναι ενσωματωμένο ένα ηλεκτρόδιο όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2α. Το ηλεκτρόδιο αυτό χρησιμεύει για τη μείωση του δυναμικού με το οποίο ξεκινά η εκκένωση. Τέτοιες λυχνίες χρησιμοποιούνται ως σταθεροποιήτριες λυχνίες τάσεως. Κυριότερες από αυτές είναι η OA - 3 ή VR - 75, OB - 3 ή VR - 90, OC - 3 ή VR - 105 και η OD - 3 ή VR - 150. Οι τάσεις λειτουργίας τους είναι 75 ή 90 ή 105 ή 150 V αντίστοιχα, ενώ οι εντάσεις των ρευμάτων λειτουργίας τους είναι από 5 ως 40 mA.

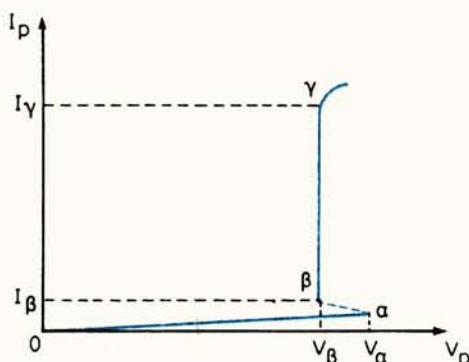
Λυχνίες ψυχρής καθόδου χρησιμοποιούνται επίσης ως ενδεικτικές λειτουργίας διαφόρων συσκευών, σε δοκιμαστικά τάσεως, σε αναγραφή αριθμών ή γραμμάτων στις υπολογιστικές μηχανές και αλλού.

Στο σχήμα 5.2β φαίνεται η χαρακτηριστική μιας δίοδου ψυχρής καθόδου. Από αυτή φαίνεται ότι αυξάνοντας την τάση ανόδου προοδευτικά προς το θετικότερο, το ανοδικό ρεύμα αυξάνεται αργά ως το σημείο α που αντιστοιχεί στη χαρακτηριστική τάση  $V_a$ .

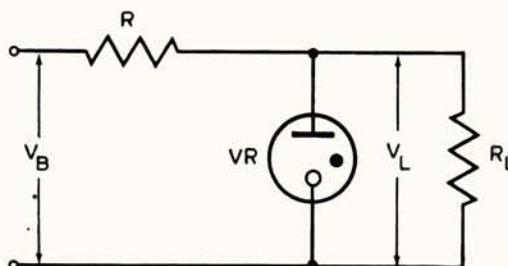
Η τάση  $V_a$  λέγεται **τάση αφής**. Στο σημείο α το αέριο μέσα στη λυχνία γίνεται απότομα πολύ αγώγιμο (εκκένωση) και η τάση στα άκρα της λυχνίας υπόβιβάζεται και μένει στην τιμή  $V_\beta$  όπου διατηρείται σχεδόν σταθερή για τιμές ρεύματος από  $I_\beta$  ώς  $I_y$ . Είναι λαμπτηριστικό ότι  $V_a > V_\beta$ . Αυτή άλλωστε είναι και η περιοχή λειτουργίας της λυχνίας με συνθήκες αίγλης. Η τάση  $V_\beta$  είναι η τάση που μπορεί να σταθεροποιήσει η δίοδος αυτή.



**Σχ. 5.2α.**  
Κατασκευή διόδου  
με διπλή κάθοδο.



**Σχ. 5.2β.**  
Χαρακτηριστική διόδου ψυχρής καθόδου.



**Σχ. 5.2γ.**

Κύκλωμα με δίοδο ψυχρής καθόδου που χρησιμοποιείται ως σταθεροποιήτρια τάσεως.

Στο σχήμα 5.2γ φαίνεται κύκλωμα στο οποίο η λυχνία ψυχρής καθόδου VR σταθεροποιεί την τάση στα άκρα της αντιστάσεως  $R_L$ . Πραγματικά, αν μεταβληθεί (π.χ. υποβιβασθεί) το ρεύμα που διαρρέει το φορτίο  $R_L$ , τότε θα αυξηθεί αντίστοιχα το ρεύμα που περνά από τη δίοδο και έτσι η πτώση τάσεως στην αντίσταση  $R$  θα είναι η ίδια και επομένως η τάση στα άκρα του φόρτου δε θα αλλάξει. Αν πάλι μεταβληθεί (π.χ. αυξηθεί) η τάση τροφοδοσίας  $V_B$  το ρεύμα που διαρρέει το σύστημα  $R_L$ , VR θα αυξηθεί. Η πτώση τάσεως στα άκρα της  $R$  στην περίπτωση αυτή θα αυξηθεί και μάλιστα τόσο, που η υπόλοιπη τάση στα άκρα της  $R_L$  (και της VR) θα μείνει η ίδια. Η  $R$  είναι μια αντίσταση που παίζει σημαντικό ρόλο στη σταθεροποίηση και που περιορίζει το ρεύμα που διαρρέει τη λυχνία στα επιτρεπόμενα από τον κατασκευαστή όρια.

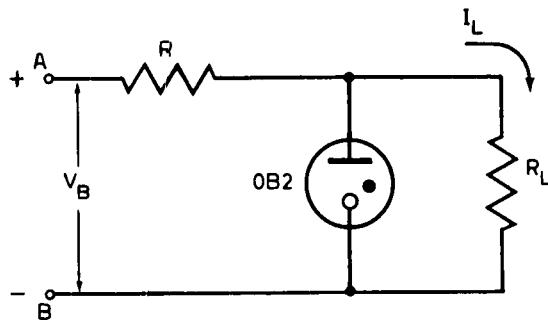
Ο υπολογισμός της  $R$  στην περίπτωση π.χ. του κυκλώματος του σχήματος 5.2γ θα είναι:

$$R = \frac{V_B - V_L}{I_{\max}}$$

όπου:  $I_{\max}$  το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα για τη λυχνία.

### Εφαρμογή:

Ας υποθέσουμε ότι στο κύκλωμα του σχήματος 5.2δ θέλουμε να συνδέσουμε μια



Σχ. 5.26.

συσκευή αντιστάσεως  $R_L$  που απαιτεί για τη λειτουργία της σταθερό ρεύμα 100 mA. Η δίοδος είναι η OB 2 με τάση σταθεροποιήσεως 105 V και περιοχή ρευμάτων λειτουργίας 5 ως 30 mA. Η τάση  $V_B = 250$  V. a) Να καθορισθούν οι τιμές της  $R_L$  και της  $R$  γι' αυτό το κύκλωμα. b) Αν η  $R_L$  παραμένει σταθερή σε ποια όρια μπορεί να μεταβληθεί η  $V_B$  χωρίς η τιμή 100 mA του ρεύματος  $I_L$  να αλλάξει;

### Απάντηση.

Ας υποθέσουμε ότι η μέση τιμή του ρεύματος που περνά από την OB-2 είναι 28 mA. Αφού όμως από την  $R_L$  θα περνάει ρεύμα 100 mA από την αντίσταση  $R$  θα περνάει ρεύμα  $I_R = 100 \text{ mA} + 18 \text{ mA} = 118 \text{ mA}$ .

Επίσης, αφού η λυχνία έχει στα άκρα της τάση  $V_\lambda = 105$ , η τάση στα άκρα της  $R$  θα είναι  $V_R = V_B - V_\lambda = 250V - 105V = 145$  V.

Γνωρίζοντας τώρα την τάση στα άκρα της  $R$  και το ρεύμα που την διαρρέει μπορούμε να υπολογίσουμε την τιμή της.

Δηλαδή:

$$R = \frac{145 \text{ V}}{0,118 \text{ A}} = 1220 \Omega$$

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζουμε και την  $R_L$ :

$$R_L = \frac{105 \text{ V}}{0,100 \text{ A}} = 1050 \Omega$$

β) Αν η  $V_B$  αυξηθεί τόσο, ώστε να προκαλέσει ρεύμα στη λυχνία ίσο με το μέγιστο επιτρεπόμενο δηλαδή 30 mA (με τάση φυσικά στα άκρα της λυχνίας 105 V), τότε το ρεύμα  $I_R$  που θα περάσει από την  $R$ , θά είναι το άθροισμα του ρεύματος  $I_\lambda$  της λυχνίας και του ρεύματος  $I_L$  της συσκευής. Δηλαδή θα είναι:

$$I_R = I_\lambda + I_L = 30 \text{ mA} + 100 \text{ mA} = 130 \text{ mA}$$

Η πτώση τάσεως  $V_R$  στα άκρα της  $R$  θα είναι:

$$V_R = I_R \times R = 130 \text{ mA} \times 1220 \Omega = 158,6 \text{ V}$$

Η τάση τότε της πηγής  $V_B$  θα πρέπει να είναι:

$$V_B = V_R + V_\lambda = 158,6 + 105 = 263,6 \text{ V}$$

Αν η τάση  $V_B$  υποβιβασθεί τόσο, ώστε το ρεύμα από τη λυχνία να φθάσει στο κατώτατο όριο, δηλαδή στα 5 mA, τότε το ρεύμα  $I_R$  που θα περάσει από την αντίσταση  $R$ , θα είναι  $I_R = 100 \cdot \text{mA} + 5 \text{ mA} = 105 \text{ mA}$ . Η πτώση τάσεως  $V_R$  στα άκρα της αντιστάσεως  $R$  θα είναι:

$$V_R = 0,105 \text{ A} \times 1220 \Omega = 128,1 \text{ V}$$

Η ελάχιστη τιμή της τάσεως  $V_B$  θα είναι:

$$V_B = V_\lambda + V_R = 105 \text{ V} + 128,1 \text{ V} = 233,1 \text{ V}$$

Έτσι, σύμφωνα με τους παραπάνω υπολογισμούς, η τάση  $V_B$  μπορεί να κυμαίνεται από 233,1 V ως 263,6 V, χωρίς το ρεύμα από την  $R_L$  να αλλάξει.

### 5.3 Τρίοδοι ψυχρής καθόδου.

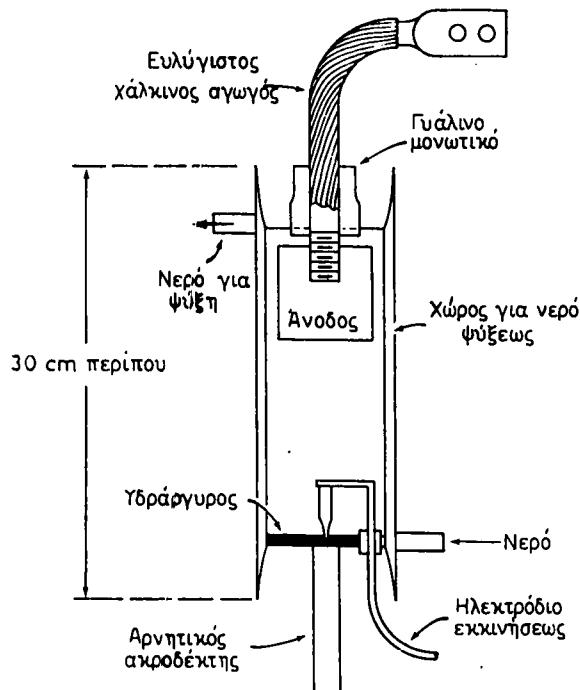
Με την προσθήκη ενός ηλεκτροδίου ανάμεσα στην κάθοδο και την άνοδο, της διόδου ψυχρής καθόδου, δημιουργήθηκε η τρίοδος ψυχρής καθόδου. Με το ηλεκτρόδιο αυτό ελέγχεται η έναρξη της εκκενώσεως. Δίνοντας δηλαδή κατάλληλο δυναμικό στο ηλεκτρόδιο, μπορούμε να προκαλέσουμε έναρξη της εκκενώσεως για μια δεδομένη ανοδική τάση.

### 5.4 Δίοδοι αερίου με θερμαινόμενη κάθοδο.

Είναι δίοδοι που περιέχουν αδρανές αέριο σε χαμηλή πίεση ή ατμούς υδραργύρου. Η κάθοδος στις λυχνίες αυτές θερμαίνεται. Τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από τη θερμαινόμενη κάθοδο, κινούμενα προς την άνοδο, αποσπούν και άλλα ηλεκτρόνια από τα μέρια του αερίου δημιουργώντας έτσι και θετικά ιόντα. Τα θετικά ιόντα κατευθύνονται προς την κάθοδο όπου εξουδετερώνονται από τα ηλεκτρόνια του φορτίου χώρου. Ελευθερώνεται έτσι η κάθοδος από τα φορτία χώρου και εκπέμπει ευκολότερα ηλεκτρόνια. Μερικά θετικά ιόντα μπορεί να προσπέσουν στην κάθοδο και να προκαλέσουν δευτερογενή εκπομπή, με συνέπεια την παραπέρα αύξηση του ανοδικού ρεύματος.

Οι δίοδοι με αέριο χρησιμοποιούνται σε ανορθωτικά συστήματα ισχυρών ρευμάτων. Τα κυκλώματα ανορθώσεως είναι όμοια με εκείνα των λυχνιών κενού. Και σ' αυτά χρειάζεται ιδιαίτερος μετασχηματιστής για τη θέρμανση του νήματος. Αυτό είναι αναγκαίο γιατί χρειάζεται προθέρμανση της καθόδου πριν εφαρμοσθεί η ανοδική τάση. Η προθέρμανση δημιουργεί το χώρο αρνητικών φορτίων που προστατεύει την κάθοδο από το βομβαρδισμό θετικών ιόντων. Για να διακοπεί η λειτουργία των δίοδων, πρέπει πρώτα να διακοπεί η ανοδική τάση και μετά η τάση θερμάνσεως.

Αξιοσημείωτη είναι η περίπτωση της λυχνίας με ατμούς υδραργύρου οι οποίοι προέρχονται από κάθοδο που έχει τη μορφή δεξαμενής. Η δομή της φαίνεται στο σχήμα 5.4. Ο τύπος αυτής της καθόδου έχει το πλεονέκτημα ότι δε διατρέχει κίνδυνο από βομβαρδισμό θετικών ιόντων. Οι ατμοί υδραργύρου που αποτελούν το αέριο της λυχνίας προέρχονται από την εξάτμιση του υδραργύρου της δεξαμενής.



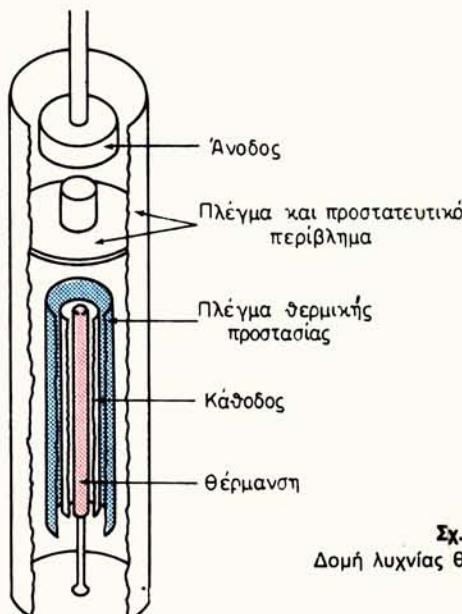
**Σχ. 5.4.**  
Δομή λυχνίας με ατμούς υδραργύρου.

Οι ατμοί αυτοί συμπυκνώνονται στα τοιχώματα της λυχνίας καί επιστρέφουν στη δεξαμενή.

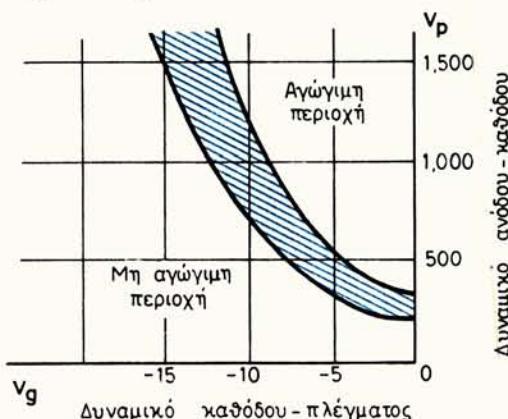
Η εκκίνηση της λυχνίας δίνεται από εκκινητή με τη δημιουργία ενός ηλεκτρικού παλμού. Στους ανορθωτές μεγάλης ισχύος προβλέπεται και ψύξη με κυκλοφορία νερού στα τοιχώματα τους. Αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ισχύς πολλών κιλοβάτ.

## 5.5 Λυχνία Θύρατρον.

Η λυχνία θύρατρον μπορεί να είναι μια ειδικής κατασκευής τρίοδος ή τέτροδος με αέριο. Στο σχήμα 5.5α φαίνεται η δομή μιας τριόδου θύρατρον. Αυτή αποτελείται από την άνοδο, από μια ειδικής κατασκευής κάθοδο και από ένα ηλεκτρόδιο που συμβατικά ονομάζεται πλέγμα, αλλά είναι πολύ διαφορετικό από τα πλέγματα των λυχνιών κενού. Το ηλεκτρόδιο αυτό περιβάλλει και την κάθοδο και την άνοδο τις οποίες απομονώνει ήλεκτροστατικά μεταξύ τους. Δίνοντας κατάλληλη τάση σ' αυτό το ηλεκτρόδιο, μπορούμε να ρυθμίσουμε την ανοδική τάση που θα αρχίσει η εκκένωση. Ο κατασκευαστής δίνει τις χαρακτηριστικές ελέγχου της λυχνίας (σχ. 5.5β). Σ' αυτές φαίνεται για ποιους συνδυασμούς τάσεων πλέγματος και ανόδου αρχίζει η λειτουργία της θύρατρον 5C21. Η γραμμοσκιασμένη περιοχή περιλαμβάνει τους δυνατούς συνδυασμούς  $V_p$ ,  $V_g$  για την εκκίνηση της λυχνίας. Ποιοι θα



**Σχ. 5.5α.**  
Δομή λυχνίας θύρατρον (τρίοδος).



**Σχ. 5.5β.**  
Χαρακτηριστικές ελέγχου λυχνίας θύρατρον.

είναι οι συνδυασμοί αυτοί εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την ηλικία της λυχνίας. Από την κλίση των χαρακτηριστικών αυτών μπορούμε να υπολογίσουμε με γραφική μέθοδο το λόγο ελέγχου λ της θύρατρον. Ο λόγος αυτός θα είναι το πηλίκο μιας μεταβολής  $\Delta V_g$  της τάσεως εκκίνησεως στο πλέγμα, προς την αντίστοιχη μεταβολή της ανοδικής τάσεως που χρειάζεται για να διατηρηθεί η λυχνία σε συνθήκες λειτουργίας. Θα είναι δηλαδή.

$$\lambda = \frac{\Delta V_p}{\Delta V_g}$$

Στα ευθύγραμμα τμήματα των χαρακτηριστικών ελέγχου ο λόγος λ δίνεται α-

πλως σαν τον πηλίκο της ανοδικής τάσεως προς την αντίστοιχη τάση εκκινήσεως του πλέγματος.

Όταν γίνει η εκκένωση, ο ρυθμιστικός ρόλος του πλέγματος σταματάει, γιατί η δράση του εξουδετερώνεται από τα θετικά ιόντα που το περιβάλλουν. Το ρεύμα του πλέγματος μπορεί να γίνει αρκετά μεγάλο, με συνέπεια την απώλεια ρεύματος και ισχύος. Για την εξουδετέρωση των απωλειών συνδέεται σε σειρά στο πλέγμα μια μεγάλη αντίσταση. Για να σταματήσει ο ιονισμός στη λυχνία πρέπει να υποβιβασθεί η ανοδική της τάση κάτω από το δυναμικό ιονισμού.

Με την προσθήκη ενός ακόμη ηλεκτροδίου, δημιουργείται και η τέταρδος θύρατρον.

Οι λυχνίες θύρατρον χρησιμοποιούνται στις ανορθωτικές διατάξεις στις οποίες απαιτείται ρύθμιση της ανορθωμένης τάσεως. Επίσης σε κυκλώματα παραγωγής πριονωτών τάσεων καθώς και σε πολλά κυκλώματα αυτοματισμού.

Οι λυχνίες αερίου έχουν σήμερα αντικατασταθεί σε μεγάλη κλίμακα με στοιχεία από ημιαγωγούς που εκτελούν τις ίδιες ή και περισσότερες λειτουργίες όπως θα δούμε παρακάτω.

## 5.6 Κώδικας λυχνιών.

Για την αναγνώριση των διαφόρων λυχνιών κενού και αερίου χρησιμοποιούνται συνδυασμοί γραμμάτων και αριθμών. Δύο είναι οι βασικοί τρόποι αναγνωρίσεως: ο αμερικανικός και ο ευρωπαϊκός.

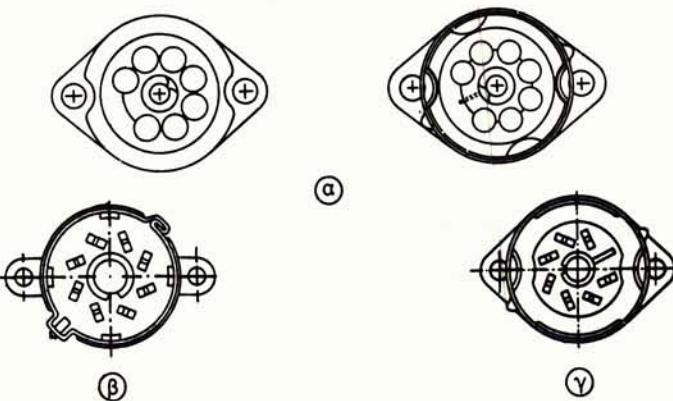
Οι **αμερικανικού τύπου λυχνίες** έχουν γραμμένο πάνω στο περιβλημά τους τουλάχιστον τρεις ομάδες αριθμών και γραμμάτων.

Η πρώτη ομάδα είναι αριθμοί που δηλώνουν προσεγγιστικά την τάση πυρακτώσεως. Η δεύτερη είναι γράμματα που εκφράζουν τη λειτουργία της λυχνίας και η τρίτη αριθμοί που δηλώνουν **ποδαράκια** της βάσεως της λυχνίας που καταλήγουν στο εσωτερικό της σε ηλεκτρόδια.

Οι λυχνίες που έχουν μόνο τις τρεις αυτές ομάδες στοιχείων έχουν μεταλλικό περίβλημα. Οι λυχνίες που πάνω τους είναι γραμμένο επιπλέον και το γράμμα G, έχουν γυάλινο μεγάλο κωνικό περίβλημα, ενώ αυτές πού έχουν γραμμένο GT, έχουν μικρό σχετικά γυάλινο κυλινδρικό περίβλημα.

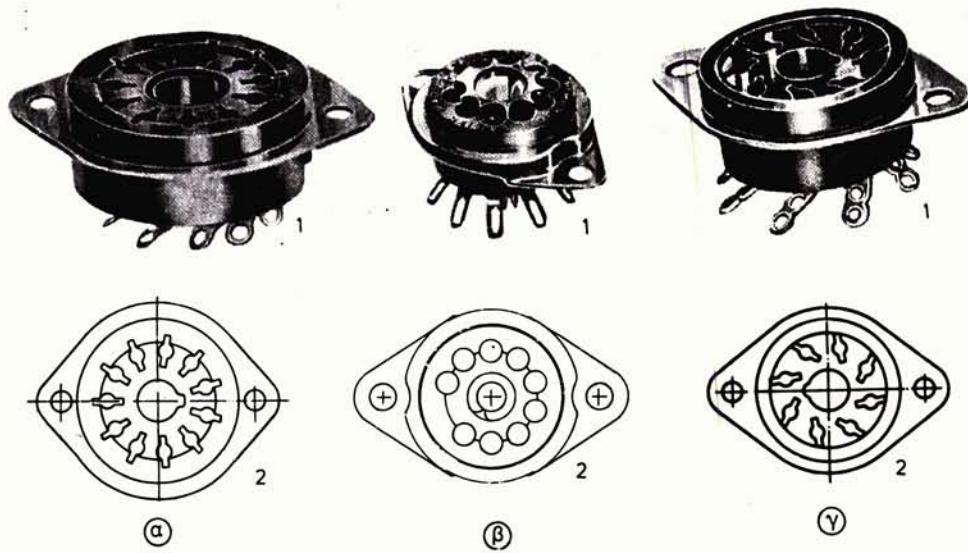
Η 12 SK7-GT π.χ. έχει τάση θερμάνσεως 12,6 V. Το S σημαίνει νεότερο τύπο από προηγούμενη όμοια, το K οτι είναι με τρία πλέγματα και μεταβλητού μ και το 7 οτι έχει επτά **ποδαράκια** της συνδεμένα στο εσωτερικό της. Δηλαδή από ένα στην άνοδο, την κάθοδο και στα τρία πλέγματα και δυο ποδαράκια για την τάση θερμάνσεως.

Ο **ευρωπαϊκός τρόπος σημάνσεως** είναι διαφορετικός. Εδώ έχομε πάλι τρεις ομάδες γραμμάτων και αριθμών. Το πρώτο γράμμα δηλώνει την τάση ή την ένταση του ρεύματος θερμάνσεως. Αν είναι Z σημαίνει ότι η λυχνία είναι ψυχρής καθόδου. Το δεύτερο ή και τρίτο αν υπάρχει, δηλώνουν το είδος της λειτουργίας της λυχνίας. Η τρίτη ομάδα είναι αριθμός που δηλώνει το είδος της βάσεως της λυχνίας. Π.χ. η EF81 έχει τάση πυρακτώσεως 6,3 Volt (το E αντιστοιχεί στα 6,3), είναι πέντεδος ενισχύτρια υψηλών συχνοτήτων (αυτό σημαίνει το F), με βάση εννέα ποδών μινιατούρα. Στο τέλος του βιβλίου υπάρχουν περισσότερα στοιχεία για τους κώδικες των λυχνιών.



Σχ. 5.6α.

Σχέδια παραστάσεων βάσεων. α) Για λυχνίες μινιατούρες. β) Τύπου Ρίμλοκ. γ) Οκτώ ποδιών.



Σχ. 5.6β.

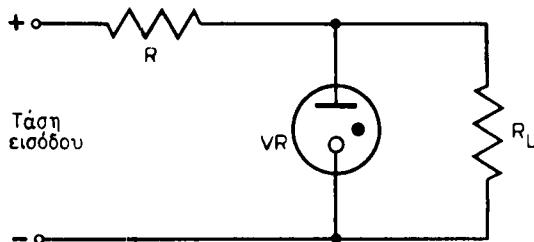
Φωτογραφία και παραστατικά σχέδια διαφόρων τύπων βάσεων.

- α) Βάση μάγκναλ 11 ποδιών για καθοδικό σωλήνα. 1) Φωτογραφία. 2) Παράσταση.
- β) Βάση εννέα ποδιών νόβαλ. 1) φωτογραφία. 2) Παράσταση.
- γ) Βάση οκταλ. 1) Φωτογραφία. 2) Παράσταση.

Άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό για μια λυχνία γενικά αερίου είναι το είδος της βάσεως της. Στα σχήματα 5.6α και 5.6β φαίνονται οι κυριότεροι τύποι από αυτές. Η αρίθμηση των **ποδιών** γίνεται κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού, αρχίζοντας αμέσως μετά τον οδηγό που διαθέτει κάθε βάση και κοιτώντας τη βάση της λυχνίας από κάτω. Αν δεν υπάρχει οδηγός, η θέση των ποδιών έχει σχεδιασθεί κατά τρόπο που να αποκλείεται λάθος στην τοποθέτηση.

### 5.7 Ασκήσεις.

1. Στο κύκλωμα του σχήματος 5.7 η λυχνία είναι VR-105 και χρησιμοποιείται για σταθεροποίηση της τάσεως στα άκρα της  $R_L$ . Η τάση εισόδου μένει σταθερή στα 250 V, αλλά το ρεύμα στο φόρτο μεταβάλλεται ανάμεσα στις τιμές 40 και 60 mA. Να καθορισθεί η τιμή της αντιστάσεως  $R$ . Έτσι που η τάση στα άκρα της  $R_L$  να μένει σταθερή στα 105V. Η λυχνία λειτουργεί κανονικά για τιμές ρευμάτων από 5 ως 40 mA.



Σχ. 5.7.

2. Για τρίοδο με αέριο δίνονται οι παρακάτω τιμές.

Τάση ανόδου (Volt)	17	21	37	63	91	150	210	271	332
Τάση εκκινήσεως (Volt)	0	-1	-2	-3	-4	-6	-8	-10	-12

Να σχεδιασθεί η χαρακτηριστική ελέγχου και να υπολογισθεί ο λόγος ελέγχου της τριόδου.

3. Θύρατρον, με λόγο ελέγχου 35, ξεκινά με ανοδική τάση  $V_g = 200V$  όταν η τάση στο πλέγμα είναι  $V_g = -8V$ . Να καθορισθεί η ελάχιστη ανοδική τάση για την οποία ξεκινά όταν η τάση πλέγματος της είναι  $-20V$ .

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

### ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

#### 6.1 Φωτοηλεκτρικά στοιχεία.

Η λειτουργία τους βασίζεται στην απόσπαση ηλεκτρονίων από υλικά στα οποία πέφτει φως. Τα φωτοηλεκτρικά στοιχεία μετατρέπουν τη φωτεινή ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική. Ανάλογα με τον τρόπο που αποδίδουν την ηλεκτρική ενέργεια, διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

##### **α) Τα στοιχεία φωτοηλεκτρικής εκπομπής.**

Σ' αυτά η πρόσπτωση φωτονίων σε μια ειδικά επεξεργασμένη μεταλλική επιφάνεια προκαλεί έξοδο ηλεκτρονίων. Τα φωτοηλεκτρόνια αυτά συλλέγονται από μια άνοδο και δημιουργούν ρεύμα σε κατάλληλο κύκλωμα.

##### **β) Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία.**

Σ' αυτά η φωτεινή ενέργεια προκαλεί την εμφάνιση ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως από την οποία μπορεί να τροφοδοτηθεί ένα εξωτερικό κύκλωμα. Τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιούνται όπως και οι ηλεκτρικές μπαταρίες.

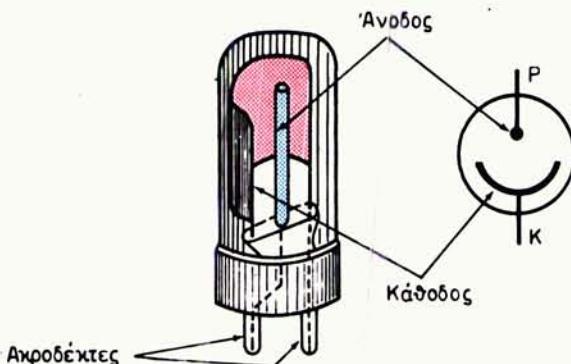
##### **γ) Το φωτοαγώγιμα στοιχεία.**

Η λειτουργία τους στηρίζεται στη δημιουργία ελευθέρων ηλεκτρονίων, κατά τη διείσδυση φωτός, μέσα στη μάζα του υλικού. Από τον αριθμό ελευθέρων ηλεκτρονίων πού δημιουργούνται στη μονάδα του σύγκου εξαρτάται η ειδική αντίσταση του υλικού.

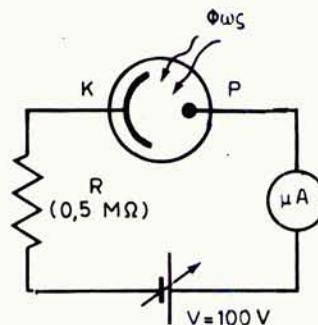
Η μεταβολή της φωτεινής ροής προκαλεί μεταβολή της αντίστασεως του υλικού. Το φαινόμενο είναι πιο έντονο στις διατάξεις με ημιαγωγούς. Στο σχετικό κεφάλαιο θα εξετασθούν λεπτομερέστερα τόσο τα φωτοαγώγιμα όσο και τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Εδώ θα ασχοληθούμε με τα στοιχεία φωτοηλεκτρικής εκπομπής ή όπως συνήθως λέγονται τα **φωτοκύτταρα**.

#### 6.2 Φωτοκύτταρα κενού.

Αποτελούνται από μιά κάθοδο ημικυλινδρική και μια άνοδο συνήθως σε μορφή ευθύγραμμου σύρματος (σχ. 6.2α). Το σύνολο βρίσκεται μέσα σε κατάλληλη θήκη, γυάλινη ή από χαλαζία στην οποία έχει δημιουργηθεί κενό. Στο εσωτερικό της καθόδου έχει δημιουργηθεί φωτοευπαθής επιφάνεια με κατάλληλο επίχρισμα, συνήθως από οξείδια καλίου ή καισίου. Η εκπομπή των ηλεκτρονίων από την κάθοδο γίνεται με πρόσπτωση φωτονίων. Έχομε δηλαδή φωτοηλεκτρική εκπομπή. Έστω τώρα ότι έχομε το κύκλωμα του σχήματος 6.2β. Αν στην φωτοευπαθή επιφάνεια



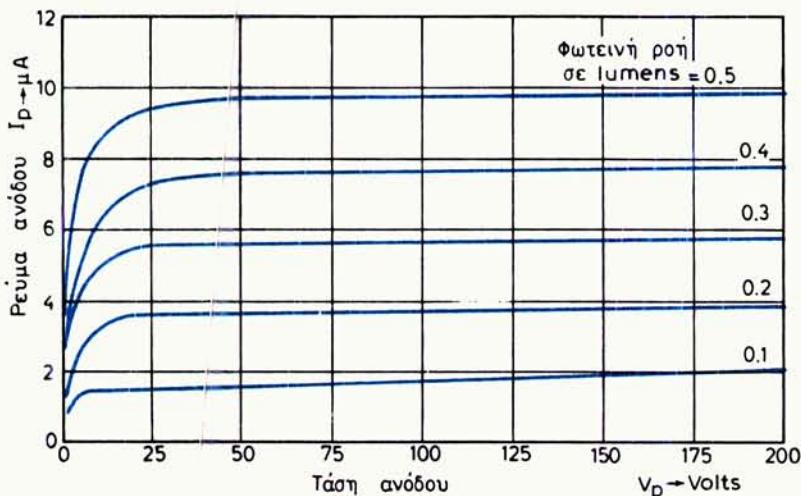
Σχ. 6.2α.  
Φωτοκύπταρο κενου.



Σχ. 6.2β.

της καθόδου πέσει φως κατάλληλου χρώματος, θα εκπεμφθούν ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια αυτά κινούνται προς την άνοδο που έχει θετικότερο δυναμικό από την κάθοδο. Έτσι δημιουργείται ένα ηλεκτρικό ρεύμα. Αν, κρατώντας σταθερή τη φωτεινή ροή αυξήσουμε την τάση, θα αυξηθεί στην αρχή και το ρεύμα.

Από μια τιμή όμως ανοδικής τάσεως και πέρα, το ρεύμα ελάχιστα αυξάνεται με την αύξηση της τάσεως και πρακτικά έχομε ρεύμα κόρου. Έτσι για ορισμένο φως, κρατώντας σταθερή τη φωτεινή ροή και μεταβάλλοντας την ανοδική τάση, μπορούμε να χαράξουμε μια χαρακτηριστική καμπύλη τάσεως ρεύματος. Για το ίδιο φως, αλλάζοντας τη φωτεινή ροή και κρατώντας την πάλι σταθερή, μπορούμε να χαράξουμε άλλη χαρακτηριστική τάση ρεύματος κ.ο.κ. Έτσι για κάθε φωτοκύπταρο έχουμε ένα σμήνος χαρακτηριστικών ανόδου η καθεμιά από τις οποίες έχει χαραχθεί για διαφορετική φωτεινή ροή. Στο σχήμα 6.2γ φαίνεται το σμήνος χαρακτηριστικών ανόδου του φωτοκύπταρου (κενού) τύπου 925. Οι χαρακτηριστικές αυτές



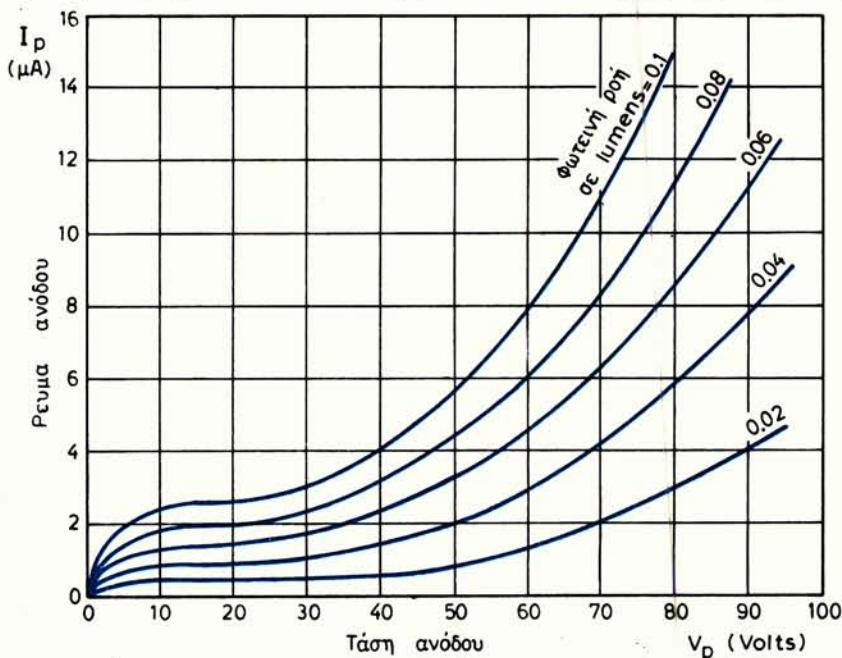
Σχ. 6.2γ.

έχουν χαραχθεί για διαφορετική φωτεινή ροή η καθεμιά. Είναι αξιοσημείωτη η ομοιότητά τους με τις χαρακτηριστικές της πεντόδου λυχνίας κενού. Φαίνεται επίσης ότι για τάσεις πάνω από 20 V περίπου το ρεύμα είναι σχεδόν ανεξάρτητο από την ανοδική τάση.

Πειραματικά έχει διαπιστωθεί ότι ο χρόνος που μεσολαβεί από την πρόσπτωση της ακτινοβολίας μέχρι την εμφάνιση των φωτοηλεκτρονίων είναι 3 msec. Το ρεύμα σ' αυτά τα φωτοκύτταρα είναι πολύ μικρό (10-20 μΑ ανά lumen). Πολλές φορές δίνεται και η χαρακτηριστική καμπύλη της μεταβολής του ανοδικού ρεύματος σε συνάρτηση με τη μεταβολή της φωτεινής ροής για σταθερή ανοδική τάση.

### 6.3 Φωτοκύτταρα με αέριο.

Τα φωτοκύτταρα με αέριο έχουν γενικά την ίδια κατασκευή με τα φωτοκύτταρα κενού, με τη διαφορά ότι περιέχουν αδρανές αερίο σε καθορισμένη ποσότητα και πίεση. Η παρουσία αυτού του αερίου αυξάνει το ρεύμα και την ευαισθησία του φωτοκύτταρου. Πράγματι τα φωτοηλεκτρόνια, κατά τη διαδρομή τους από την κάθοδο στην άνοδο, συγκρούονται με μόρια του αερίου και αποσπούν από αυτά ηλεκτρόνια που προσθέτονται στο ηλεκτρονικό ρεύμα των φωτοηλεκτρονίων. Στο ρεύμα αυτό προσθέτονται και τα ηλεκτρόνια που παράγονται με δευτερογενή εκπομπή από την πρόσπτωση στην κάθοδο των θετικών ιόντων των ιονισμένων μορίων του αερίου. Και τα ιόντα αυτά μπορούν να ιονίσουν και άλλα μόρια αερίου. Έτσι το αρχικό ανοδικό ρεύμα των φωτοηλεκτρονίων μπορεί να γίνει τελικά μέχρι δέκα φορές μεγαλύτερο. Στο σχήμα 6.3 φαίνονται οι χαρακτηριστικές του φωτοκύτταρου με αέριο, τύπου 930. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, για σχετικά χαμη-



Σχ. 6.3.

λές ανοδικές τάσεις, οι χαρακτηριστικές είναι περίπου όμοιες με τις χαρακτηριστικές φωτοκύπταρου κενού. Σε μεγαλύτερες όμως τάσεις, το ρεύμα αυξάνει γρήγορα με την τάση. Δεν έχομε δηλαδή εδώ εμφάνιση κόρου. Επίσης για τις μεγαλύτερες ανοδικές τάσεις οι αποστάσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών δεν είναι ίδιες.

Αυτό δείχνει ότι όταν εργαζόμαστε σ' αυτή την περιοχή των τάσεων, η λειτουργία δεν θα είναι γραμμική. Θα έχομε δηλαδή παραμορφώσεις. Αν επιχειρήσομε ανοδικές τάσεις μεγαλύτερες από 90 V, το φωτοκύπταρο θα καταστραφεί από το βομβαρδισμό της καθόδου με θετικά ιόντα, που θα έχουν αποκτήσει αρκετή κινητική ενέργεια.

#### 6.4 Ευαισθησία φωτοκυπτάρων.

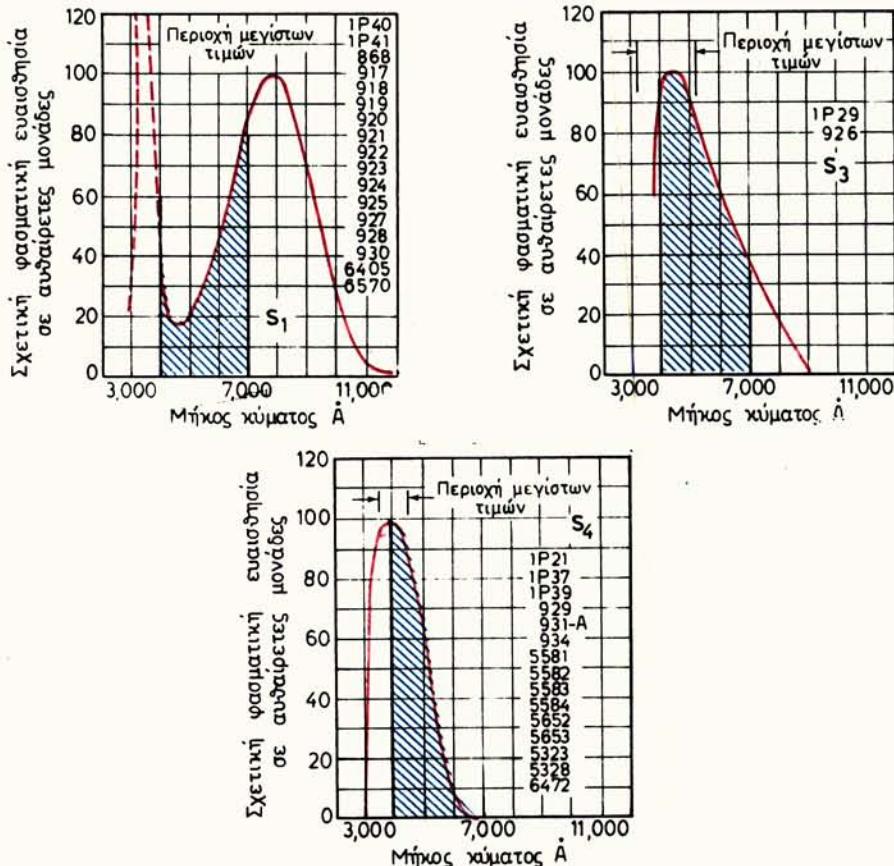
Ένα χαρακτηριστικό μέγεθος στα φωτοκύπταρα είναι η φασματική τους ευαισθησία. Η φασματική ευαισθησία χαρακτηρίζεται από το ρεύμα το οποίο μπορεί να δώσει ανά μονάδα φωτεινής ροής η φωτοευπαθής επιφάνεια της καθόδου του, στις διάφορες συχνότητες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Όταν δηλαδή προσκρούουν στην κάθοδο φωτόνια με διάφορες συχνότητες. Οι πιο κοινές φωτοευπαθείς επιφάνειες είναι αυτές που χαρακτηρίζονται ανάλογα με τα υλικά επιχρήσματα με τους τύπους S1, S3 και S4. Είναι ευαισθητες στην περιοχή του ορατού φωτός, αλλά η ευαισθησία τους εκτείνεται και στην περιοχή του υπέρυθρου όπως και του υπεριώδους.

Στο σχήμα 6.4 εικονίζονται οι καμπύλες φασματικής ευαισθησίας των παραπάνω επιφανειών και συνεπώς και των αντιστοίχων φωτοκυπτάρων. Ο κατακόρυφος άξονας είναι βαθμολογημένος σε σχετικές μονάδες, γιατί το ρεύμα του φωτοκύπταρου εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, ενώ ο οριζόντιος σε μήκη κύματος. Για κάθε φωτοευπαθή επιφάνεια είναι σημειωμένοι στις χαρακτηριστικές και οι τύποι του φωτοκύπταρου που έχουν την επιφάνεια αυτή και που φυσικά έχουν και την αντίστοιχη ευαισθησία. Γραμμοσκιασμένη είναι η περιοχή του ορατού φάσματος. Από το σχήμα φαίνεται ότι η επιφάνεια S1 είναι ευαισθητή στο ορατό αλλά πιο ευαισθητή είναι στο υπέρυθρο. Η S3 είναι ευαισθητή στο ορατό αλλά και αρκετά ευαισθητή στο μπλε. Η S4 τέλος είναι ευαισθητή στο μπλε, στο πράσινο και προς την περιοχή του υπεριώδους, ενώ είναι αδρανής προς την περιοχή του υπέρυθρου.

Σε κάθε πρακτική εφαρμογή πρέπει να δίνεται προσοχή στην πηγή που θα φωτίζει το φωτοκύπταρο όπως επίσης και στις χαρακτηριστικές του φωτοκύπταρου. Αν θέλομε να έχομε ισχυρά ρεύματα στο φωτοκύπταρο, πρέπει να το φωτίζουμε με ακτινοβολίες της περιοχής στην οποία παρουσιάζει τη μεγαλύτερη φασματική ευαισθησία. Συνηθέστερες πηγές φωτισμού είναι τα διάπυρα νήματα βολφραμίου που ανήκουν σε λαμπτήρες φωτισμού και που το φάσμα τους είναι πλούσιο στο υπέρυθρο αλλά και με σημαντική εκπομπή σε μεγάλο τμήμα του ορατού.

Συγκρίνοντας τελικά τους δύο τύπους φωτοκυπτάρων κενού και αερίου, παρατηρούμε ότι:

- Τα φωτοκύπταρα κενού παρουσιάζουν γραμμικότητα. Οι μεταβολές δηλαδή του ρεύματος είναι ανάλογες με τις μεταβολές της φωτεινής ροής, ενώ το ρεύμα μένει πρακτικά σταθερό έστω και αν μεταβάλλεται η ανοδική τάση πάνω από 20 V. Παρουσιάζουν επίσης σταθερότητα ευαισθησίας.



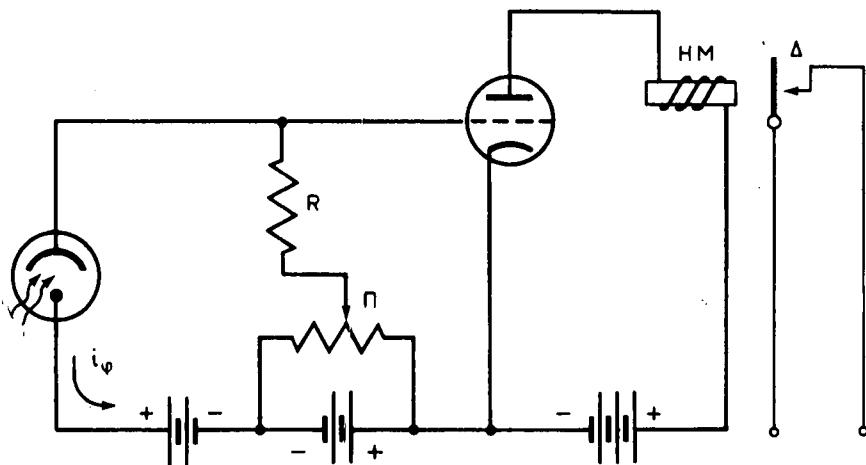
Σχ. 6.4.  
Καμπύλες φασματικής ευαισθησίας φωτοευπαθών επιφανειών.

- Τα φωτοκύτταρα αερίου είναι λιγότερο γραμμικά, παρουσιάζουν μικροτερη σταθερότητα ευαισθησίας και το ρεύμα αυξάνεται με την αύξηση της ανοδικής τάσεως. Ωστόσο τα φωτοκύτταρα αερίου είναι περίπου επτά φορές πιο ευαίσθητα από τα φωτοκύτταρα κενού, αλλά η ευαισθησία τους μειώνεται όταν λειτουργούν σε συχνότητες πάνω από 2000 c/s.

## 6.5 Εφαρμογές.

Η χρήση των φωτοκυττάρων έχει περιορισθεί πάρα πολύ μετά την ανάπτυξη των αντιστοίχων διατάξεων με ημιαγωγούς που παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα. Μπορούν πάντως να χρησιμοποιηθούν σε συσκευές μετρήσεως φωτισμού, ελέγχου εντάσεως φωτισμού, και γενικά έχουν ευρείες εφαρμογές στη φωτομετρία και τη χρωματομετρία.

Στο σχήμα 6.5 φαίνεται η αρχή χρησιμοποιήσεως ενός φωτοκύτταρου σε κύκλωμα αυτόματου διακόπτη. Όταν φωτισθεί το φωτοκύτταρο, δημιουργείται ρεύ-



Σχ. 6.5.

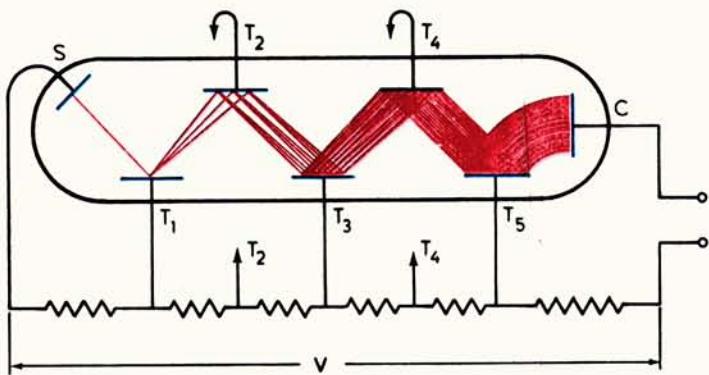
μα  $i_\phi$  που, περνώντας από την αντίσταση  $R$ , αλλάζει την πόλωση του πλέγματος της τριόδου λυχνίας έτσι, ώστε να αυξηθεί το ανοδικό ρεύμα και να ενεργοποιηθεί ο ηλεκτρομαγνήτης  $HM$ , που μπορεί έτσι να ανοίξει π.χ. ένα διακόπτη  $\Delta$ .

### 6.6 Φωτοηλεκτρονικός πολλαπλασιαστής.

Όπως είδαμε παραπάνω, τα φωτοκύτταρα δίνουν πολύ μικρό ρεύμα. Αυτό βάζει πάντα όρια στις εφαρμογές τους. Πολύ περισσότερο όταν η φωτεινή δέσμη είναι πολύ ασθενής. Σ' αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται ο φωτοηλεκτρονικός πολλαπλασιαστής. Με το φωτοηλεκτρονικό πολλαπλασιαστή επιτυγχάνεται η ενίσχυση του ασθενούς ρεύματος που προέρχεται από μία φωτοκάθοδο. Η λειτουργία του βασίζεται στη δευτερογενή εκπομπή ηλεκτρονίων.

Ο φωτοηλεκτρονικός πολλαπλασιαστής αποτελείται από την κάθοδο και από πολλά βοηθητικά ηλεκτρόδια (βοηθητικές ανόδους)  $T_1$ ,  $T_2$  κλπ. (σχ. 6.6α). Οι βοηθητικές αυτές άνοδοι έχουν κατάλληλο σχήμα και είναι επιχρισμένες με υλικό που έχει λόγο δευτερογενούς εκπομπής μεγάλο. Έχουν δυναμικό θετικότερο από την κάθοδο αλλά και μεταξύ τους το δυναμικό της μιάς είναι θετικότερο από το δυναμικό της προηγουμένης της (μεταξύ ανόδου-καθόδου έχει συνδεθεί η τάση  $V$ ).

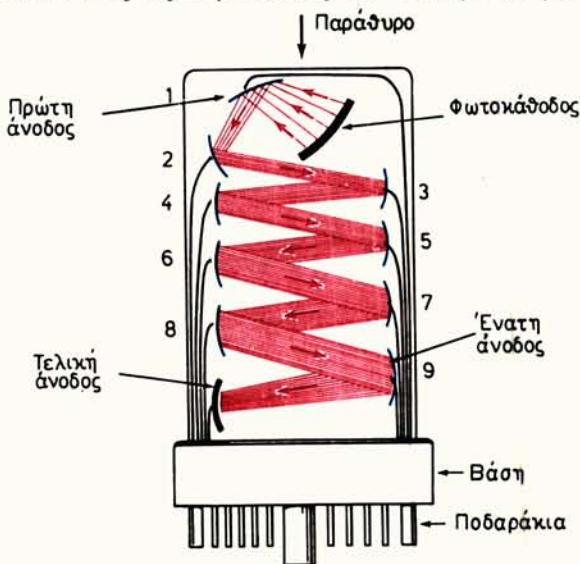
Οι βοηθητικές αυτές άναδοι έχουν τέτοια διάταξη μέσα στο σωλήνα, ώστε όταν φωτισθεί η κάθοδος και εκπέμψει φωτοηλεκτρόνια, αυτά να έλκονται από την πρώτη βοηθητική άνοδο. Όταν πέφτουν πάνω σ' αυτή προκαλούν την έξοδο 3 ή 4 δευτερογενών ηλεκτρονίων το καθένα. Τα δευτερογενή αυτά ηλεκτρόνια έλκονται από τη δεύτερη βοηθητική άνοδο στην οποία όταν προσπέσουν, το καθένα από αυτά θα δημιουργήσει άλλα 3 ως 4 δευτερογενή κ.ο.κ. Έτσι θεωρητικά ένα ηλεκτρόνιο που θα φύγει από την κάθοδο και θα προσπέσει στην πρώτη βοηθητική άνοδο, θα προκαλέσει την έξοδο δ, δευτερογενών ηλεκτρονίων (δ είναι ο λόγος δευτερογενούς εκπομπής των βοηθητικών ανόδων). Τα δ αυτά ηλεκτρόνια όταν προσπέσουν στη δεύτερη άνοδο θα προκαλέσουν έξοδο  $\delta^2$  ηλεκτρονίων και αν π είναι οι βοηθητικές άνοδοι, τότε στην τελική άνοδο C (σχ. 6.6α) από το ένα αρχικό



Σχ. 6.6α.

Παράσταση λειτουργίας του φωτολεκτρονικού πολλαπλασιαστή.

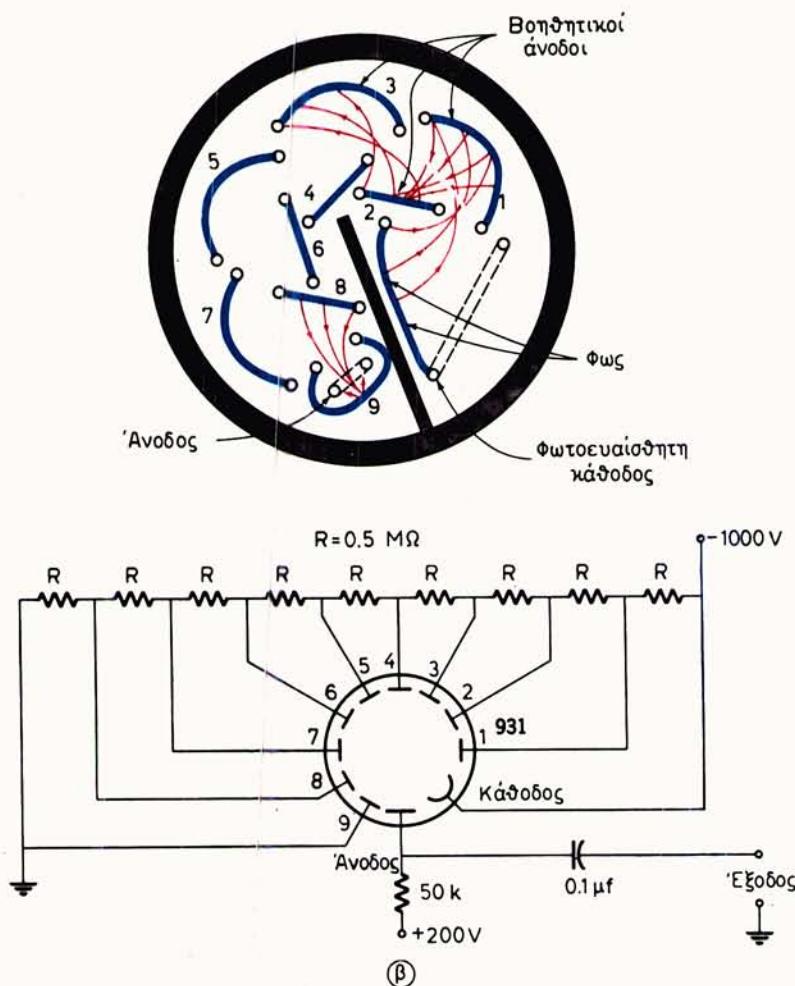
ηλεκτρόνιο θα έχουν δημιουργηθεί δηλαδή ηλεκτρόνια. Αυτό ακριβώς το δηλαδή είναι η ενίσχυση ρεύματος του φωτολεκτρονικού πολλαπλασιαστή. Στην πράξη η απολαβή αυτή είναι μικρότερη εξαιτίας της απώλειας ηλεκτρονίων από ηλεκτρόδιο σε ηλεκτρόδιο. Ωστόσο τιμές ενισχύσεως ίσες προς  $10^8$  είναι δυνατές. Η ευαισθησία τους μπορεί να είναι της τάξεως των  $100 \text{ A/lumen}$ . Το σύνολο, κάθοδος-άνοδος-ηλεκτρόδια είναι κλεισμένο, συνήθως σε γραμμική ή κυκλική διάταξη, μέσα σε περίβλημα που έχει παράθυρο από το οποίο περνάει το φως για να προσβάλλει την κάθοδο [σχήματα 6.6β(α) και 6.6β(β)]. Οι φωτολεκτρονικοί πολλαπλασιαστές χρησιμοποιούνται σε όλες τις περιπτώσεις που θέλουμε να μετρήσουμε έμμεσα



ⓐ

Σχ. 6.6β.

- α) Εξωτερική όψη φωτολεκτρονικού πολλαπλασιαστή με παράσταση της λειτουργίας στο εσωτερικό του.



Σχ. 6.8β.

β) Άνω όψη φωτοπολλαπλασιαστή και παράσταση της ηλεκτρικής τροφοδοτήσεώς του.

ασθενή φωτεινή ακτινοβολία. Για παράδειγμα στην αστρονομία για τη μέτρηση του φωτός μακρυνών αστέρων.

### 6.7 Ασκήσεις.

- Σε φωτοκύπταρο κενού τύπου 925 (βλέπε χαρακτηριστικές σχήματος 6.2γ) η τάση τροφοδοσίας της ανόδου είναι 125V. Η φωτεινή ροή μεταβάλλεται ημιτονικά μεταξύ 0,3 και 0,1 Lumen. Να βρεθεί η ενεργός τιμή του ρεύματος που θα διαρρέει μιαν αντίσταση φόρτου  $2\text{ M}\Omega$  σε σειρά με το φωτοκύπταρο.
- Σ' ένα φωτοηλεκτρονικό πολλαπλασιαστή η πρώτη βοηθητική ανόδος δέχεται ρεύμα  $0,1\text{ }\mu\text{A}$ . Ο φωτοπολλαπλασιαστής έχει 10 βοηθητικές ανόδους με λόγο δευτερογενούς εκπομπής  $\delta = 3$ . Ποιό θα είναι το ρεύμα της τελευταίας βοηθητικής ανόδου του;
- Στον προηγούμενο φωτοηλεκτρονικό πολλαπλασιαστή η ευαισθησία είναι  $2\text{ A/lm}$ . Πόσο τα εκατό πρέπει να μεταβληθεί η φωτεινή ροή για να μειωθεί το ρεύμα εξόδου στο 50%;

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ

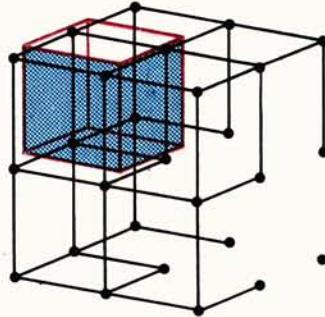
### ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ ΣΤΕΡΕΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ

#### 7.1 Γενικά.

Μεγάλο ενδιαφέρον στα ηλεκτρονικά παρουσιάζει η στερεή κατάσταση της ύλης. Στις διάφορες εφαρμογές των ηλεκτρονικών γίνεται εκμετάλλευση των χημικών, θερμικών, μηχανικών, μαγνητικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων των στερεών.

Στη στερεή κατάσταση τα άτομα δεν έχουν, συνήθως, τυχαίες θέσεις στο χώρο, αλλά είναι τοποθετημένα με μια καθορισμένη τάξη. Τα υλικά με αυτή την κανονικότητα στη διάταξη των ατόμων τους λέγονται **κρύσταλλοι**. Τέτοια υλικά είναι π.χ. τα αλκαλικά άλατα, το διαμάντι, οι πημαγωγοί κ.α. Τα υλικά που τα άτομά τους δεν είναι τοποθετημένα με κάποια τάξη λέγονται **άμορφα**. Τέτοιο π.χ. είναι το γυαλί.

Στους κρύσταλλους τα άτομα είναι έτσι τοποθετημένα, ώστε να σχηματίζεται το **κρυσταλλικό πλέγμα**. Το κρυσταλλικό πλέγμα προέρχεται από την περιοδική επανάληψη στο χώρο ενός στοιχειώδους συγκροτήματος ατόμων που είναι τοποθετημένα σε ένα συγκεκριμένο γεωμετρικό σχήμα. Το στοιχειώδες αυτό συγκρότημα λέγεται **κυψελίδα** (σχ. 7.1) Ανάλογα με το είδος του γεωμετρικού σχήματος, καθορίζεται και το κρυσταλλογραφικό σύστημα στο οποίο ανήκει ο κρύσταλλος (σχ. 7.1).



Σχ. 7.1.

Κρυσταλλικό πλέγμα σε τρεις διαστάσεις (το γραμμοσκιασμένο τρίγμα είναι η κυψελίδα).

Τα άτομα ή τά μόρια μέσα στον κρύσταλλο συνδέονται με ημιπολικούς, ετεροπολικούς ή ομοιοπολικούς δεσμούς, ή με δυνάμεις van der Waals. Τα άτομα των κρυστάλλων σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από το απόλυτο μηδέν έχουν μια ταλάντωση γύρω από τη θέση ισορροπίας τους.

Οι ατέλειεις στην κρυσταλλική δομή του σώματος, όταν δηλαδή δεν έχουμε σε ορισμένα σημεία κανονικά τοποθετημένα τα άτομα, ή δεν υπάρχουν άτομα, ή έχει

καταστραφεί το κρυσταλλικό πλέγμα κλπ. τροποποιούν την αγωγιμότητα του υλικού. Επίσης οι ταλαντώσεις των στόμων, ανάλογα με τον τρόπο που γίνονται, επηρεάζουν την αλληλεπίδραση υλικού και ηλεκτρικών φορέων.

Παρακάτω θα συναντήσομε τους κρύσταλλους **γερμανίου** (Ge) και **πυριτίου** (Si) που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στις εφαρμογές της Ηλεκτρονικής.

## 7.2 Αγωγοί, μονωτές, ημιαγωγοί.

Η αγωγιμότητα των διαφόρων υλικών χαρακτηρίζεται από τη δυνατότητα μετακίνησεως ηλεκτρικών φορτίων μέσα σ' αυτά.

Η μετακίνηση των φορτίων αυτών είναι στην ουσία μετακίνηση ηλεκτρονίων ή ιόντων. Τα σωματίδια που θα μεταφέρουν τα φορτία θα τα λέμε στο εξής **φορείς**. Ανάλογα με το, είδος των φορέων έχομε ηλεκτρονική ή ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα.

Ηλεκτρονική αγωγιμότητα έχομε π.χ. στα μέταλλα, όπου οι φορείς είναι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, ενώ ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα, κίνηση δηλαδή ιόντων, έχομε π.χ. στο θερμό γυαλί, όπου κινούνται ιόντα  $\text{Na}^+$ .

Ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα έχομε σχεδόν πάντοτε στα υγρά. Σε ορισμένες περιπτώσεις υγρών, οπως π.χ. τηγμένα μέταλλα, παρουσιάζεται και ηλεκτρονική αγωγιμότητα. Η αγωγιμότητα των αερίων οφείλεται στη μετακίνηση ηλεκτρονίων και ιόντων.

Γενικά η μετακίνηση των φορέων γίνεται κάτω από την επίδραση πεδίων που ή εφαρμόζονται απ' έξω η δημιουργούνται στο εσωτερικό του υλικού.

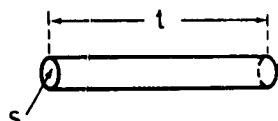
Παρακάτω θα ασχοληθούμε κυρίως με την αγωγιμότητα ορισμένων περιπτώσεων στερεών.

### 7.2.1 Ειδική αντίσταση – ειδική αγωγιμότητα.

'Εστω οτι έχομε ενα μεταλλικό σύρμα με μήκος  $l$  και διατομή  $S$  (σχ. 7.2). Ο αγωγός αυτός θα έχει ωμική αντίσταση:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (7.2.1)$$

όπου  $\rho$  είναι η ειδική αντίσταση. Το αντίστροφο της ειδικής αντιστάσεως  $1/\rho$  λέγεται **ειδική αγωγιμότητα**. Την ειδική αγωγιμότητα θα τη συμβολίζομε με  $\sigma$ . Ως μονάδα ειδικής αντιστάσεως χρησιμοποιείται το  $1\Omega^{-1}$  και πολλές φορές το  $1\Omega\text{cm}^{-1}$ . Το αντίστροφο αυτών των μονάδων  $1\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  ή  $1\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$  χρησιμοποιείται ως μονάδα ειδικής αγωνιμότητας.



Σχ. 7.2.

Από το νόμο του Ohm έχομε για το ρεύμα  $I$  που θα διαρρέει τον αγωγό αν στα άκρα του εφαρμοσθεί τάση  $V$ .

$$I = \frac{V}{R} \quad (7.2.2)$$

Συνδυάζοντας τις 7.2.1 και 7.2.2, θα πάρομε:

$$\frac{I}{S} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{V}{l} \quad (7.2.3)$$

Το πηλίκο  $I/S$  είναι η πυκνότητα του ρεύματος  $J$  που διαρρέει τον αγωγό. Επίσης, το πηλίκο  $V/l$  είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μέσα στο οποίο έχει τοποθετηθεί ο αγωγός. Έτσι την 7.2.3 μπορούμε να την γράψουμε ως εξής:

$$J = \frac{1}{\rho} E \quad \text{ή} \quad J = \sigma \cdot E \quad (7.2.4)$$

Η σχέση 7.2.4 είναι η γενικευμένη μορφή του νόμου του Ohm. Σ' αυτή τη σχέση δεν χρειάζονται οι διαστάσεις του αγωγού, αλλά μόνο η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, μέσα στο οποίο βρίσκεται, και η ειδική του αγωγιμότητα\*.

Η κίνηση των φορέων μέσα στον αγωγό (στην περίπτωσή μας των ηλεκτρών) προέρχεται από το συνδυασμό δυο κινήσεων: της θερμικής και αυτής που προκαλεί το ηλεκτρικό πεδίο. Τελικά μετά την ανταλλαγή ενέργειας των φορέων με τα άτομα του υλικού, κάτι δηλαδή που μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμο με **συγκρούσεις** των φορέων με τα άτομα αυτά, η απώλεια κινητικής ενέργειας αντισταθμίζεται από την ενέργεια που παρέχει το πεδίο. Έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε ότι τα ηλεκτρόνια κινούνται τελικά με μια μέση ταχύτητα σταθερή, με μέτρο:

$$u = \mu \cdot E \quad (7.2.5)$$

όπου  $E$  είναι το μέτρο της εντάσεως του πεδίου και μένας συντελεστής που ονομάζεται **ευκινησία** του ηλεκτρονίου. Η τιμή του μεξαρτάται από τη θερμοκρασία, το είδος του υλικού και την ένταση του πεδίου. Την ταχύτητα υπηρετούσαν ονομάζομε **ταχύτητα ολισθήσεως**. Αν το σύρμα του σχήματος 7.2 έχει η ελεύθερα ηλεκτρόνια στη μονάδα του όγκου, ο συνολικός αριθμός των ηλεκτρονίων  $N$  μέσα σ' αυτό το κομμάτι σύρματος θα είναι:

$$N = V_\sigma \cdot n \Rightarrow N = S \cdot l \cdot n \quad (7.2.6)$$

όπου  $V_\sigma = S \cdot l$  ο όγκος του κομματιού του σύρματος.

Επομένως αφού είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου, το συνολικό φορτίο μέσα σ' αυτό το σύρμα θα είναι:

$$Q = Ne \Rightarrow Q = S \cdot l \cdot n \cdot e \quad (7.2.7)$$

Αν είναι το χρόνος που χρειάζεται ένα ηλεκτρόνιο για να πάει από τη μια άκρη του σύρματος στην άλλη, δηλαδή να διατρέξει το μήκος  $l$ , τότε θα είναι:

$$u = \frac{l}{t} \quad (7.2.8)$$

όπου  $u$  η μέση ταχύτητα που προκύπτει από τη σχέση 7.2.5. Θα είναι δηλαδή:

$$l = u \cdot t \Rightarrow l = \mu \cdot E \cdot t \quad (7.2.9)$$

\* Σε όλες τις σχέσεις χρησιμοποιούνται τα μέτρα των ανυσματικών μεγεθών.

και η σχέση 7.2.7 γίνεται:

$$Q = S \cdot n \cdot e \cdot \mu \cdot E \cdot t \quad (7.2.10)$$

Το ρεύμα που θα διαρρέει τον αγωγό θα είναι:

$$I = \frac{Q}{t} = S \cdot n \cdot e \cdot \mu \cdot E \quad (7.2.11)$$

και η πυκνότητα του ρεύματος:

$$\frac{I}{S} = J = n \cdot e \cdot \mu \cdot E \quad (7.2.12)$$

που μπορεί σύμφωνα με την 7.2.5 να γραφεί:

$$J = n \cdot e \cdot u \quad (7.2.13)$$

Σε συνδυασμό με τη σχέση 7.2.4 της γενικότερης μορφής του νόμου του Ohm, προκύπτει ότι:

$$J = \sigma \cdot E \quad (7.2.14)$$

Και η ειδική αγωγιμότητα σ θα είναι:

$$\sigma = n \cdot e \cdot \mu \quad (7.2.15)$$

Η ειδική δηλαδή αγωγιμότητα εξαρτάται από τον αριθμό των φορέων στη μονάδα του όγκου, από το φορτίο τους και από την ευκινησία τους.

Σύμφωνα με τα παραπάνω μπορούμε να χωρίσουμε τα στερεά σε τρεις κατηγορίες:

### a) Αγωγοί.

Είναι υλικά με μεγάλη πυκνότητα φορέων. Στα μέταλλα η πυκνότητα των ελευθέρων ηλεκτρονίων είναι της τάξεως των  $10^{23}$  ηλεκτρονίων ανά  $\text{cm}^3$  και είναι πρακτικά ανεξάρτητη από τη Θερμοκρασία. Η ειδική τους αντίσταση στη Θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι της τάξεως  $1,6 \times 10^{-8}$  ως  $100 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}$ .

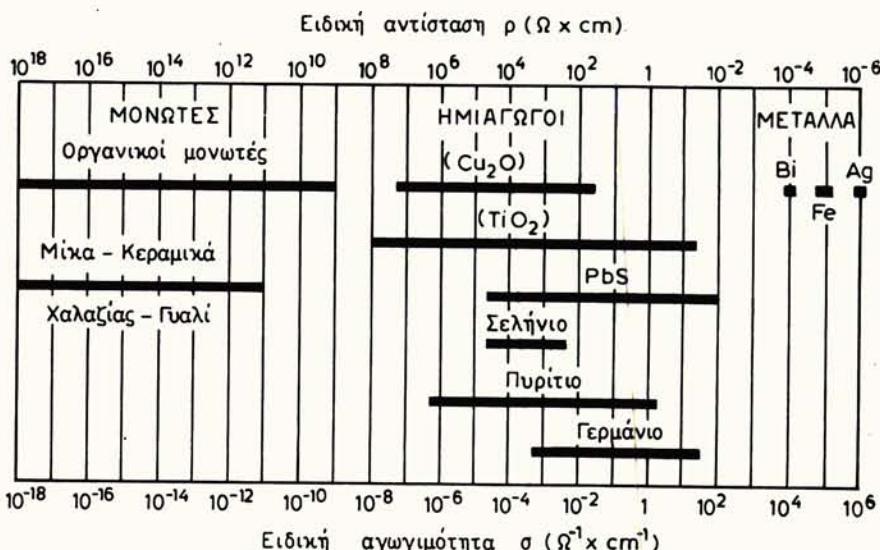
### b) Μονωτές.

Έχουν πολύ μικρή πυκνότητα φορέων σχεδόν μηδενική. Η ειδική τους αντίσταση είναι της τάξεως  $10^9$  ως  $10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$ . Συνήθως έχουν διηλεκτρική σταθερά με τιμές 1 ως 10. Τέτοια υλικά είναι ο χαλαζίας, η πορσελάνη, το καουτσούκ και πολλά άλλα.

### c) Ημιαγωγοί.

Είναι υλικά που η ειδική τους αντίσταση στη Θερμοκρασία του περιβάλλοντος παίρνει τιμές ανάμεσα σ' αυτές των μονωτών και των αγωγών. Σε πολύ χαμηλές Θερμοκρασίες οι ημιαγωγοί είναι μονωτικά υλικά. Σε υψηλότερες Θερμοκρασίες (π.χ. στη Θερμοκρασία του περιβάλλοντος), γίνονται καλοί αγωγοί. Η πυκνότητα φορέων στη Θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι  $10^9$  ηλεκτρόνια ανά  $\text{cm}^3$  για το γερμάνιο και  $10^6$  ηλεκτρόνια ανά  $\text{cm}^3$  για το πυρίτιο.

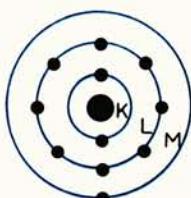
**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.2.1**  
**Ειδική αντίσταση και ειδική αγωγιμότητα διαφέρων υλικών**



### 7.3 Ενεργειακές ζώνες.

Όπως είδαμε στα προηγούμενα, τα ηλεκτρόνια σ' ένα μεμονωμένο άτομο μπορούν να έχουν καθορισμένες ενέργειες. Μπορούν δηλαδή να βρίσκονται μόνο σε καθορισμένες (διάκριτες) ενεργειακές στάθμες. Έτσι τα αντίστοιχα ηλεκτρόνια σε άτομα του ίδιου στοιχείου, όταν αυτά είναι μεμονωμένα και βρίσκονται στη θεμελιώδη κατάσταση, δηλαδή μακριά από άλλα άτομα, έχουν την ίδια ενέργεια. Βρίσκονται δηλαδή στην ίδια ενεργειακή στάθμη.

Ας θεωρήσουμε τώρα ότι πλησιάζομε δύο άτομα, π.χ. Na, μεταξύ τους. Το Na έχει 1.1 ηλεκτρόνια, που είναι 2 στη στοιβάδα K, 8 στη L και 1 στη M (σχ. 7.3a). Το ηλεκτρόνιο της στοιβάδας M είναι το ηλεκτρόνιο σθένους. Οσο πλησιάζομε τα δύο άτομα τόσο τροποποιείται, λόγω αλληλεπιδράσεως, η ενεργειακή κατάσταση των ηλεκτρονίων σθένους. Οι ενεργειακές στάθμες των δύο ηλεκτρονίων δεν είναι πια οι ίδιες αλλά έχουν διασπασθεί σε δύο στάθμες πολύ γειτονικές. Αν τα άτομα είναι περισσότερα οι στάθμες που θα δημιουργηθούν θα είναι περισσότερες. Έτσι από πλήθος ατόμων π.χ. σε ένα στερεό σώμα, θα έχομε ένα πλήθος ενεργειακών σταθμών, πολύ γειτονικών μεταξύ τους, που συγκροτούν τελικά μια ενεργειακή ζώνη.



Σχ. 7.3a.

Τα εξωτερικά ηλεκτρόνια είναι βέβαια τα πιο «ευαίσθητα» στις αλληλοεπιδράσεις μεταξύ των ατόμων. Όταν τα άτομα είναι πολύ κοντά, υφίστανται επιδράσεις και τα ηλεκτρόνια των εσωτερικών στοιβάδων και έτσι μπορεί και από αυτές να προκύψουν ενεργειακές ζώνες. Ωστόσο η τροποποίηση των ενεργειακών σταθμών των ηλεκτρονίων αυτών είναι περιορισμένη και οι ενεργειακές ζώνες που προκύπτουν έχουν μικρό εύρος.

Οι ενεργειακές ζώνες δε σχηματίζονται μόνο από τις στάθμες στις οποίες βρίσκονται ηλεκτρόνια των ατόμων, αλλά και από στάθμες στις οποίες δεν υπήρχαν ηλεκτρόνια αλλά θα μπορούσαν να υπάρχουν.

Έτσι δεν είναι απαραίτητο μέσα σε μια ενεργειακή ζώνη όλες οι στάθμες να είναι πασμένες από ηλεκτρόνια. Από την τροποποίηση των ενεργειακών σταθμών της εξώτατης στοιβάδας, προκύπτει η ζώνη σθένους και η ζώνη αγωγιμότητας.

Ανάμεσα στις ενεργειακές στοιβάδες των ηλεκτρονίων σ' ένα μεμονωμένο άτομο, υπάρχουν ενεργειακές τιμές **απαγορευμένες** για τα ηλεκτρόνια. Υπάρχουν δηλαδή **απαγορευμένες** ενεργειακές στάθμες οι οποίες οδηγούν στο σχηματισμό απαγορευμένων ενεργειακών ζωνών ανάμεσα στις επιτρεπόμενες ζώνες. Οι ζώνες αυτές λέγονται και **ενεργειακά χάσματα** (gap).

Όπως θα δούμε παρακάτω, η αγωγιμότητα ενός υλικού εξαρτάται από το εύρος της απαγορευμένης ζώνης ανάμεσα στη ζώνη σθένους και στη ζώνη αγωγιμότητας. Δηλαδή, από το ενεργειακό χάσμα ανάμεσα στις δυο ζώνες, που θα το συμβολίζομε  $E_g$ .

Το εύρος της απαγορευμένης ζώνης εξαρτάται από τη φύση του υλικού και έχει άμεση σχέση με την απόσταση ανάμεσα στα άτομα του στερεού (πίνακας 7.3.1).

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.3.1**

	Εύρος απαγ. Ζώνης $E_g$ (eV)	Απόσταση ατόμων $a$ (Å)
C Διαμάντι	5.3	1.54
S!	1,12	2,35
Ge	0,72	2,44

Στο σχήμα 7.3β φαίνεται ένα διάγραμμα ενεργειακών ζωνών ενός κρυσταλλικού στερεού.

Αν η ζώνη σθένους είναι πλήρης, αν δηλαδή όλες οι στάθμες μέσα σ' αυτήν κατέχονται από ηλεκτρόνια, και η ζώνη αγωγιμότητας κενή, δεν υπάρχει αγωγιμότητα. Αντίθετα, αν υπάρχουν στη ζώνη σθένους ενεργειακές στάθμες στις οποίες δε βρίσκονται ηλεκτρόνια ή στη ζώνη αγωγιμότητας ενεργειακές στάθμες που κατέχονται από ηλεκτρόνια ή συμβαίνουν και τα δυο μαζί, η αγωγιμότητα είναι δυνατή. Γενικά, για να έχομε αγωγιμότητα πρέπει να έχομε κάποια μη πλήρη ζώνη. Σχεδόν πάντοτε, για την ύπαρξη αγωγιμότητας το ενδιαφέρον μας περιορίζεται στις ζώνες σθένους και αγωγιμότητας.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, μπορούμε να ταξινομήσουμε τα διάφορα υλικά ως βάση τη θεωρία των ενεργειακών ζωνών όπως παρακάτω.

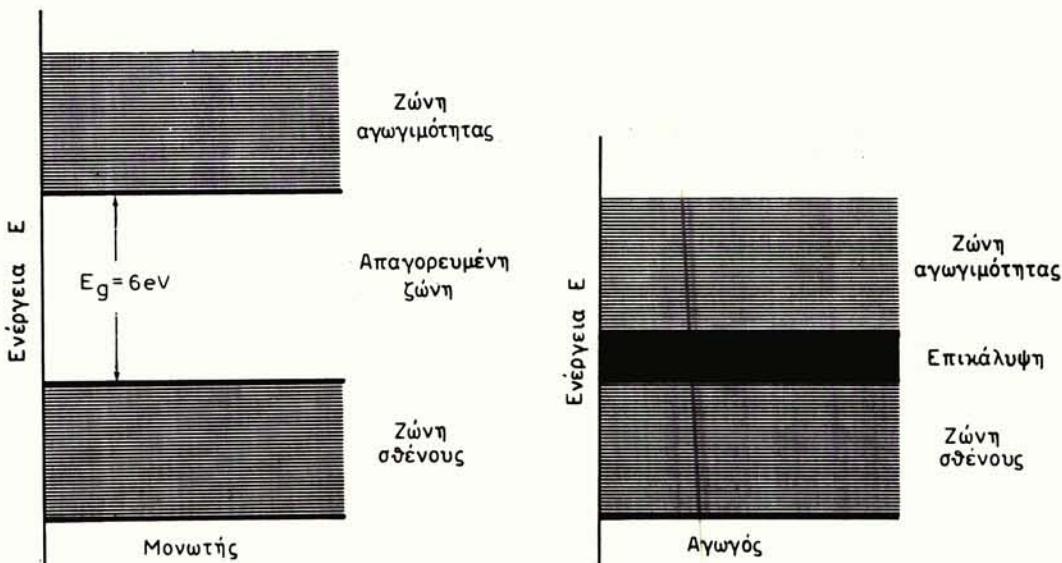
### **α) Μονωτές.**

Χαρακτηρίζονται από μεγάλο σχετικά εύρος της απαγορευμένης ζώνης. Αυτό είναι π.χ. της τάξεως των 6 eV για το διαμάντι (περίπτωση σχήματος 7.3β). Σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (κοντά στο απόλυτο μηδέν) η ζώνη σθένους είναι πλήρης και η ζώνη αγωγιμότητας κενή.

Για να γίνει αγώγιμο το υλικό, πρέπει να βρεθούν ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Πρέπει όμως να τους δοθεί ενέργεια αρκετή, ώστε ίνα πραγματοποιήσουν αυτό το άλμα. Στο διαμάντι π.χ. η ενέργεια αυτή πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 6eV. Για να δημιουργήσουμε συνθήκες αγωγιμότητας, εφαρμόζομε ένα αρκετά ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο η φέρομε το υλικό σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Προσφορά ενέργειας που αντιστοιχεί σε συνθησισμένες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, δεν αλλοιώνει τις μονωτικές ιδιότητες του υλικού, γιατί δεν είναι αρκετή για να κινηθούν ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας.

### **β) Αγωγοί.**

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα μέταλλα. Εδώ η ζώνη σθένους επικαλύπτεται με τη ζώνη αγωγιμότητας (σχ. 7.3γ). Ήτσι δεν υπάρχει ενέργειακό χάσμα μεταξύ των δύο ζωνών και υπάρχουν περισσότερες δυνατάτες στάθμες από όσα είναι τα ηλεκτρόνια στην ζώνη σθένους.



Σχ. 7.3β.

Διάγραμμα ενέργειακών ζωνών μονωτή (διαμάντι) στους 0°C.

Σχ. 7.3γ.

Διάγραμμα ενέργειακών ζωνών αγωγού (μέταλλο) στους 0°C.

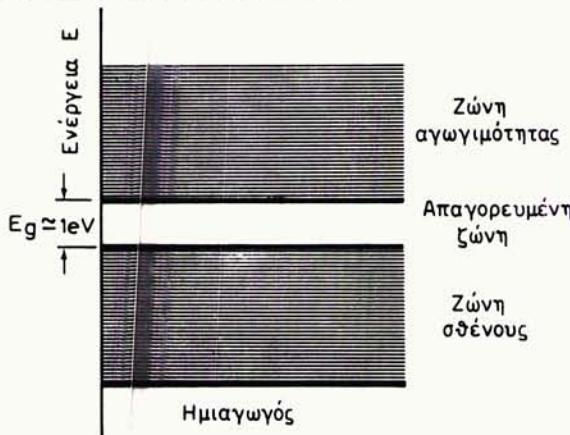
Επομένως δε χρειάζεται περισσότερη ενέργεια για τη δημιουργία αγωγιμότητας, γιατί ήδη στο απόλυτο μηδέν από την επικάλυψη των δύο ζωνών είναι σα να έχομε μια μη πλήρη ζώνη που τις διαθέσιμες στάθμες της μπορούν να καταλάβουν ηλεκτρόνια με την επίδραση συνθησισμένων ηλεκτρικών πεδίων.

Η αύξηση της θερμοκρασίας δεν προκαλεί σημαντική αύξηση των ελευθέρων

ηλεκτρονίων. Αντίθετα, η αύξηση αυτή έχει συνήθως ως συνέπεια την αύξηση της αντιστάσεως του υλικού.

### γ) Ημιαγωγοί.

Στους ημιαγωγούς, η ζώνη σθένους στη θερμοκρασία του απόλυτου μηδενός είναι πλήρης, ενώ η ζώνη αγωγιμότητας κενή. Το εύρος όμως της απαγορευμένης ζώνης  $E_g$  είναι μικρό (σχ. 7.3δ') είναι της τάξεως του 1 eV. Έτσι εύκολα σχετικά μπορούν να δημιουργηθούν συνθήκες αγωγιμότητας. Πράγματι τα υλικά αυτά, ενώ στη θερμοκρασία του απόλυτου μηδενός είναι μονωτές, στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος εμφανίζουν αγωγιμότητα. Αυτό οφείλεται στο ότι ήδη στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος η θερμική ενέργεια που παίρνουν αρκετά ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους από το περιβάλλον, είναι αρκετή για να βρεθούν στη ζώνη αγωγιμότητας υπερπηδώντας το μικρό σχετικά ενεργειακό χάσμα  $E_g$ . Με παραπέρα αύξηση της θερμοκρασίας, θα έχουμε αύξηση των ηλεκτρονίων αυτών. Έτσι τα ηλεκτρόνια αυτά, όντας ελεύθερα, μπορούν να κινηθούν με την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου. Παράλληλα όμως μπορούν να κινηθούν και ηλεκτρόνια μέσα στη ζώνη σθένους, αφού αυτή δε θα είναι πλήρης.



Σχ. 7.3δ.  
Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών ημιαγωγού στους 0°C.

Τυπική περίπτωση ημιαγωγών είναι οι καθαροί κρύσταλλοι γερμανίου (Ge) και πυριτίου (Si). Το εύρος της απαγορευμένης ζώνης  $E_g$  είναι για το καθαρό γερμάνιο 0,7 eV και για το καθαρό πυρίτιο 1,2 V περίπου (πίνακας 7.3.1). Παρακάτω θα ασχοληθούμε κυρίως με τους κρύσταλλους που αποτελούν τα βασικότερα υλικά των κατασκευασμάτων από ημιαγωγούς.

### Εφαρμογή.

Το εύρος της απαγορευμένης ζώνης αυτοτελούς ημιαγωγού είναι  $E_g = 2,4$  eV. Να υπολογισθεί το ορικό μήκος κύματος ακτινοβολίας για να είναι σε θέση αυτή να ματακινεί ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας.

### Λύση.

Για να έχουμε μετακίνηση ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγι-

μότητας πρέπει:

$$h \cdot f \geq E_g$$

όπου:  $h$  η σταθερά Planck

$f$  η συχνότητα

$E_g$  το εύρος της απαγορευμένης ζώνης.

Αν λάβομε υπόψη ότι:  $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$ ,

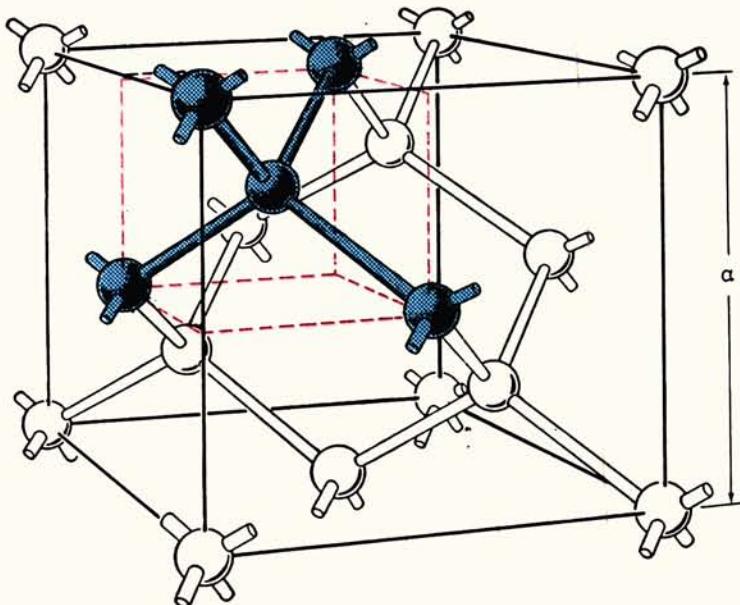
$$\text{τότε } f = \frac{E_g}{h} = \frac{2,4 \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ Joule}}{6,6 \times 10^{-34} \text{ Joule} \cdot \text{sec}} \simeq 5,8 \times 10^{14} \text{ sec}^{-1}$$

Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας θα είναι:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \times 10^{10} \text{ Å} \cdot \text{sec}^{-1}}{5,8 \times 10^{14} \text{ sec}^{-1}} \simeq 5200 \text{ Å}$$

#### 7.4 Καθαροί ημιαγωγοί.

Στους καθαρούς κρυσταλλικούς ημιαγωγούς, όλα τα στοιχεία του κρυσταλλικού πλέγματος είναι όμοια. Έτσι στο ιδανικά καθαρό γερμάνιο ή πυρίτιο το κρυσταλλικό πλέγμα είναι συγκροτημένο αποκλειστικά από άτομα Ge ή Si. Η δομή τους φαίνεται στο σχήμα 7.4a. Η κυψελίδα του πλέγματός τους έχει τη μορφή τετράεδρου



Σχ. 7.4a.  
Κρυσταλλική δομή γερμανίου και πυριτίου.

που στις κορυφές του είναι τοποθετημένα τα άτομα (σκιασμένο τμήμα).

Το πυρίτιο και το γερμάνιο είναι τετρασθενή στοιχεία. Έχουν δηλαδή στην εξώτατη στιβάδα τους 4 ηλεκτρόνια. (Το Ge έχει συνολικά γύρω από το πυρήνα του

32 ηλεκτρόνια και το Si 14). Κάθε εσωτερικό άτομο στο κρυσταλλικό πλέγμα συνδέεται με 4 γειτονικά του με ομοιοπολικό δεσμό. Συνεισφέρει δηλαδή με κάθε γειτονικό του από ένα ηλεκτρόνιο και αποκτά με αυτό ένα κοινό ζεύγος ηλεκτρονίων.

Η ενέργεια που χρειάζεται για να αποσπάσομε ένα ηλεκτρόνιο από αυτό το δεσμό, να σπάσουμε όπως λέμε το δεσμό, είναι περίπου 0,72 eV για το Ge και 1,12 eV για το Si. Αυτή άλλωστε είναι και η ενέργεια  $E_g$  που αντιστοιχεί στο εύρος της απαγορευμένης ζώνης στο διάγραμμα των ενεργειακών ζωνών για τα υλικά αυτά.

Η αγωγιμότητα που παρουσιάζουν οι καθαροί ημιαγωγοί λέγεται **ενδογενής ή αυτοτελής αγωγιμότητα**, και οι ημιαγωγοί αυτοί **ενδογενείς ή αυτοτελείς** ημιαγωγοί.

Τελείως καθαροί ημιαγωγοί δεν υπάρχουν. Η τέλεια καθαρότητα είναι μια ιδανική κατάσταση. Ωστόσο με επεξεργασία των κρυστάλλων περιορίζεται σημαντικά το ποσοστό των ακαθαρσιών, έτσι που πρaktikά οι κρύσταλλοι να συμπεριφέρονται σαν τελείως καθαροί.

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε την περίπτωση του Ge. Ανάλογα θα ισχύουν και για το Si. Όπου εμφανισθούν ιδιομορφίες θα τις επισημάνομε.

### **Ενδογενής αγωγιμότητα.**

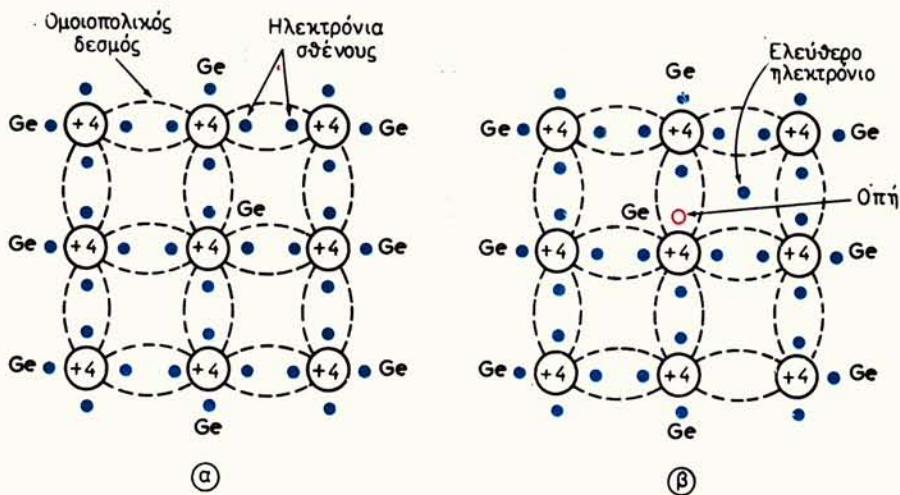
Στη θερμοκρασία του απόλυτου μηδενός η ζώνη σθένους στους ενδογενείς ημιαγωγούς είναι πλήρης και η ζώνη αγωγιμότητας κενή. Οι ημιαγωγοί συμπεριφέρονται σα μονωτές. Όταν προσφερθεί αρκετή ενέργεια, ηλεκτρόνια των δεσμών μπορεί να απομακρυνθούν από τους πυρήνες των ατόμων που ανήκουν και να γίνουν ελεύθερα. Αυτό σημαίνει ότι ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους πηγαίνουν στη ζώνη αγωγιμότητας. Στο δεσμό από τον οποίο έφυγε το ηλεκτρόνιο έμεινε μία θέση κενή. Η θέση αυτή ονομάζεται **οπή**.

Στο (σχήμα 7.4β) δίνεται συμβολική επίπεδη παράσταση της δομής ενός κρυστάλλου Ge σε θερμοκρασία  $T = 0^\circ\text{K}(\alpha)$  και σε θερμοκρασία  $T > 0^\circ\text{K}(\beta)$ . Σ' αυτό φαίνεται η δημιουργία ενός ελεύθερου ηλεκτρονίου και μιας οπής.

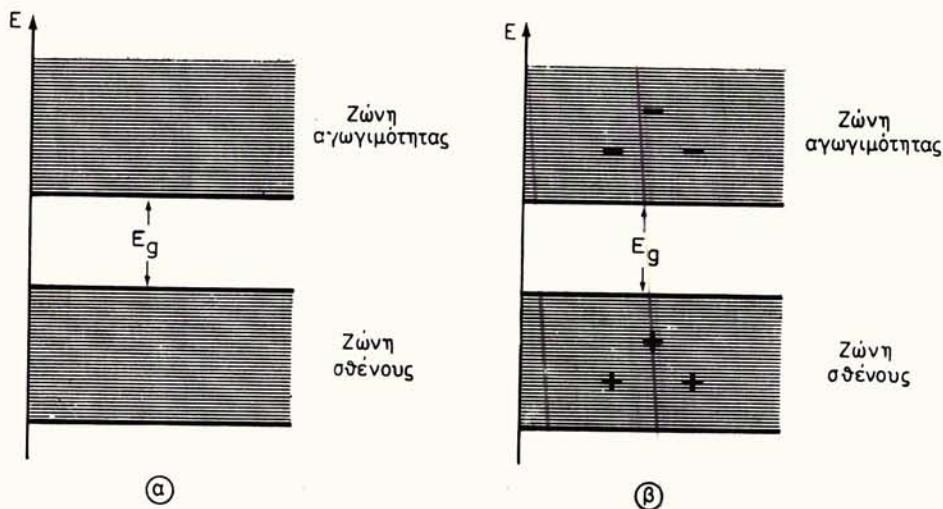
Η οπή μπορεί να χαρακτηρισθεί ως αποτέλεσμα διαταραχής του ηλεκτρικού πεδίου όταν φύγει από το δεσμό ένα ηλεκτρόνιο. Στη θέση όμως που έχει συμβεί αυτή η διαταραχή, μπορεί να συγκρατηθεί, αν πλησιάσει ένα ηλεκτρόνιο, οπότε ο δεσμός αποκτά ξανά την κανονική του δομή. Αυτό σημαίνει ότι η οπή εξουδετερώνεται από το ηλεκτρόνιο. Το φαινόμενο αυτό, που παίζει σημαντικό ρόλο στις επιδόσεις ενός ημιαγωγού, λέγεται **επανασύνδεση**.

Στο σχήμα 7.4γ φαίνεται η παράσταση των ενεργειακών ζωνών σ' έναν ενδογενή ημιαγωγό στη θερμοκρασία  $T = 0^\circ\text{K}(\alpha)$  και στη θερμοκρασία  $T > 0^\circ\text{K}(\beta)$ . Οι οπές εικονίζονται στη ζώνη σθένους, ενώ τα ελεύθερα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας.

Οι οπές αποτελούν ένα νέο στοιχείο στην αγωγιμότητα. Πραγματικά είναι δυνατό ένα ηλεκτρόνιο από γειτονικό προς την οπή δεσμό να μετακινηθεί και να εξουδετερώσει την οπή. Τότε όμως, ενώ η οπή αυτή θα **εξαφανισθεί**, στη θέσή που έφυγε το ηλεκτρόνιο θα εμφανισθεί μια άλλη. Έτσι φαίνεται σαν να κινήθηκε η οπή προς αντίθετη κατεύθυνση από αυτή που κινήθηκε το ηλεκτρόνιο. Φυσικά όταν δεν υπάρχει εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο οι κινήσεις αυτές είναι τυχαίες. Σύμφωνα με όσα είπαμε παραπάνω, όταν **σπάζει** ένας δεσμός, όταν δηλαδή απομακρυνθεί ένα ηλεκτρόνιο από αυτόν, δημιουργείται ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο και μια οπή.



Σχ. 7.4β.  
Επίπεδη παράσταση της δομής ενός κρυστάλλου Ge.  
a)  $T = 0^\circ\text{K}$ . b)  $T > 0^\circ\text{K}$ .



Σχ. 7.4γ.  
Παράσταση των ενέργειακών ζωνών σε ενδογενή ημιαγωγό.  
a)  $T = 0^\circ\text{K}$ . b)  $T > 0^\circ\text{K}$ .

Στους καθαρούς ημιαγωγούς λοιπόν ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι ίσος προς τον αριθμό των οπών. Έτσι όταν ο ημιαγωγός κρατιέται σε ενέργειακή ισορροπία, ο αριθμός οπών και ηλεκτρονίων είναι σταθερός. Αν προσφέρομε εξωτερικά περισσότερη ενέργεια, τότε ο αριθμός αυτός θα αυξηθεί.

Η οπή μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σωμάτιο με θετικό φορτίο, ίσο απόλυτα προς το φορτίο του ηλεκτρονίου και με φαινόμενη μάζα λίγο μικρότερη από τη μάζα του ηλεκτρονίου. Έχομε συνεπώς στους ημιαγωγούς δύο ήδη φορέων: τις θέτες

και τα ηλεκτρόνια. Οι φορείς αυτοί κινούνται, κάτω από την επίδραση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, αντίθετα και έτσι δημιουργείται το ρεύμα μέσα στους ημιαγωγούς.

Αν θεωρήσουμε τον αριθμό των ελεύθερων ηλεκτρονίων στη μονάδα του όγκου μέσα στον ημιαγωγό, ίσο με  $n$  και τον αριθμό των οπών στη μονάδα του όγκου ίσο με  $p$ , τότε αφού  $n = p = n_i$  θα είναι:

$n_i = A_0 \cdot T^{3/2} \cdot e^{-E_g/2KT}$  (7.4.1)

όπου:  $A_0$  σταθερά που εξαρτάται από τις ενεργές μάζες οπών και ηλεκτρονίων,  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία,  $E_g$  το ενεργειακό χάσμα και  $K$  η σταθερά Boltzmann.

Από τη σχέση αυτή φαίνεται η εξάρτηση του αριθμού των οπών και ηλεκτρονίων σ' έναν αυτοτελή ημιαγωγό από τη θερμοκρασία.

Αύξηση της θερμοκρασίας, προκαλεί διάσπαση περισσοτέρων δεσμών, με συνέπεια την αύξηση του αριθμού οπών και ηλεκτρονίων.

Φυσικά η διάσπαση δεσμών δε γίνεται μόνο με προσφορά θερμότητας. Η ενέργεια που χρειάζεται ένας δεσμός για να διασπασθεί, μπορεί να δοθεί από ένα ηλεκτρικό πεδίο ή με φωτόνια ή ακόμη και με τη βοήθεια σωματίων που κινούνται με μεγάλη ταχύτητα.

## 7.5 Ημιαγωγοί με προσμίξεις – Δότες – Αποδέκτες.

Αν σ' έναν καθαρό ημιαγωγό, εισαχθεί μια μικρή ποσότητα προσμίξεως, η μεταβολή της αγωγιμότητάς του θα είναι σημαντική. Το φαινόμενο αυτό είναι βασικό για τις εφαρμογές των ημιαγωγών στη βιομηχανία των ηλεκτρονικών.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν δύο ομάδες υλικών προσμίξεως: η μία είναι μια ομάδα πεντασθενών στοιχείων, όπως ο φωσφόρος, το αρσενικό, το αντιμόνιο, το βισμούθιο, και η άλλη τα τρισθενή στοιχεία ίνδιο, γάλλιο, βόριο και αργίλιο.

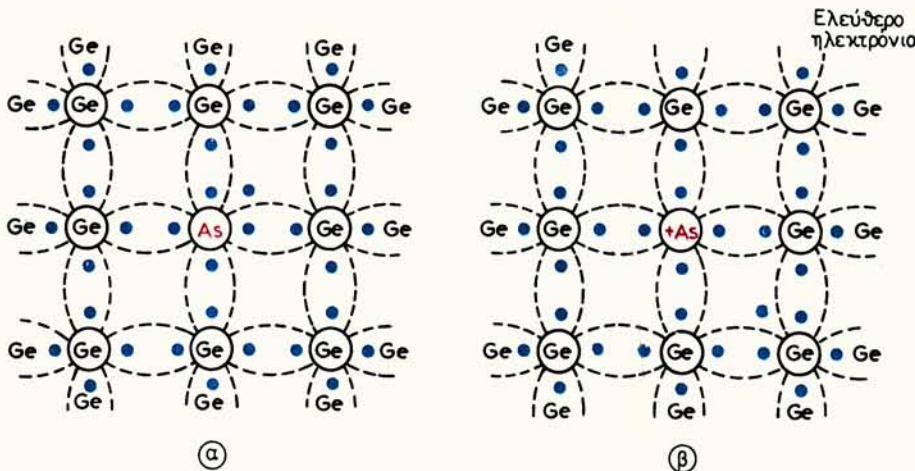
## 7.6 Ημιαγωγοί τύπου N.

Ας υποθέσουμε ότι στις θέσεις μερικών ατόμων Ge ενάς καθαρού κρύσταλλου Ge που η δομή του παριστάνεται στο σχήμα 7.4β τοποθετούμε πεντασθενή άτομα π.χ. αρσενικού (σχ. 7.6a).

Τα 4 ηλεκτρόνια σθένους σχηματίζουν ομοιοπολικό δεσμό με ηλεκτρόνια από 4 γειτονικά άτομα Ge. Το πέμπτο ηλεκτρόνιο του αρσενικού μένει αδέσμευτο. Το ηλεκτρόνιο αυτό κρατιέται πολύ χαλαρά στο άτομο του As και μπορεί με προσφορά μικρού ποσού ενέργειας να αποσπασθεί και να γίνει ελεύθερο, ενώ το άτομο του As που χάνει το ηλεκτρόνιο γίνεται θετικό ίόν.

Η ενέργεια που απαιτείται για την απόσπαση του ηλεκτρονίου είναι ~0,01 eV (αν η πρόσμιξη ήταν σε Si, η ενέργεια αυτή θα ήταν ~0,05 eV).

Το άτομο του πεντασθενούς στοιχείου λέγεται **δότης**. Στη συνηθισμένη θερμοκρασία δωματίου όλα τα άτομα του δότη έχουν χάσει το αδέσμευτο ηλεκτρόνιό τους.



Σχ. 7.6α.

Επίπεδη συμβολική παράσταση της δομής Ge με πρόσμιξη δότη As.

α) Σε  $T = 0^{\circ}\text{K}$ . β) Σε  $T > 0^{\circ}\text{K}$ .

Η προσθήκη συνεπώς ατόμων δότη οδηγεί στη δυνατότητα δημιουργίας ελεύθερων ηλεκτρονίων και ακίνητων θετικών ιόντων.

Βέβαια μερικοί δεσμοί και από τον ενδογενή ημιαγωγό μπορούν να διασπασθούν, με συνέπεια τη δημιουργία ζευγών οπών και ηλεκτρονίων που προέρχονται από τα άτομα του καθαρού ημιαγωγού.

Έχομε έτσι τους φορείς: ελεύθερα ηλεκτρόνια που προέρχονται από την πρόσμιξη, ελεύθερα ηλεκτρόνια που προέρχονται από τον καθαρό ημιαγωγό και οπές. Τα θετικά ιόντα δε μετακινούνται και συνεπώς δεν είναι φορείς. Ούτε φυσικά πρέπει να τα συγχέομε με τις οπές.

Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι περισσότερα από τις οπές. Οι φορείς πλειονότητας δηλαδή είναι τα ηλεκτρόνια. Τα υλικά αυτά τα λέμε **υλικά τύπου N**.

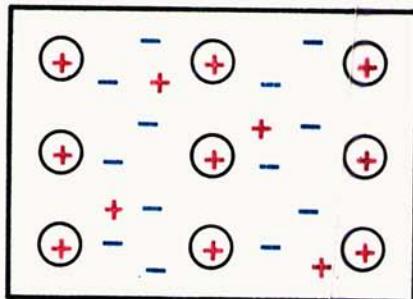
Ωστε στα υλικά τύπου N, έχομε φορείς, ηλεκτρόνια και οπές. Τα ηλεκτρόνια είναι πολύ περισσότερα από τις οπές. Έχομε όμως και θετικά ιόντα. Το σύνολο πάντως σ' ένα τέτοιο υλικό είναι ηλεκτρικά ουδέτερο, γιατί τα θετικά φορτία είναι απόλυτα ίσα με τα αρνητικά.

Παραστατική εικόνα ημιαγωγού τύπου N φαίνεται στο σχήμα 7.6β.

Στο διάγραμμα των ενέργειακών ζωνών η κατάσταση σ' ένα υλικό τύπου N μπορεί να παρασταθεί όπως στο σχήμα 7.6γ(α) και (β).

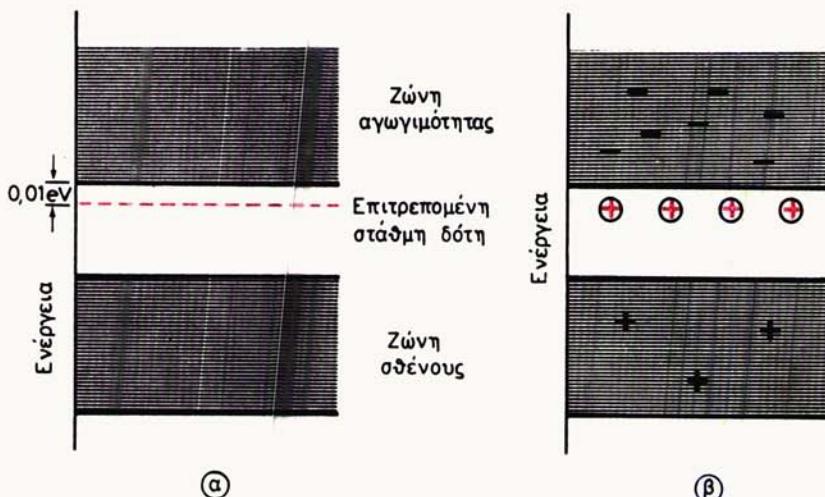
Δεχόμαστε δηλαδή ότι μέσα στην απαγορευμένη ζώνη του καθαρού ημιαγωγού υπάρχει πρακτικά μια ενέργειακή στάθμη στην οποία βρίσκονται τα ηλεκτρόνια των ατόμων του δότη που δεν μετέχουν στο δεσμό. Η στάθμη αυτή είναι πλήρης στο απόλιτο μηδέν και βρίσκεται κοντά στη ζώνη αγωγιμότητας. Η ενέργειακή διαφορά της από αυτή είναι ( $\sim 01$  eV για το Ge και  $\sim 0,06$ eV για το Si).

Με προσφορά της μικρής αυτής ενέργειας, ηλεκτρόνια που κατέχουν τη στάθμη αυτή μεταπηδούν στη ζώνη αγωγιμότητας. Με προσφορά όμως μεγαλύτερης ενέργειας θα μεταπηδήσουν ηλεκτρόνια και από τη ζώνη σθένους του Ge στη ζώνη αγωγιμότητας, ενώ μέσα στη ζώνη σθένους θα μείνουν οι αντίστοιχες οπές.



- (+) θετικά ιόντα
- (-) αρνητικά ιόντα
- +++ οπές
- ελεύθερα ηλεκτρόνια

**Σχ. 7.8β.**  
Παράσταση του είδους των φορέων  
μέσα σε υλικό N.



**Σχ. 7.8γ.**

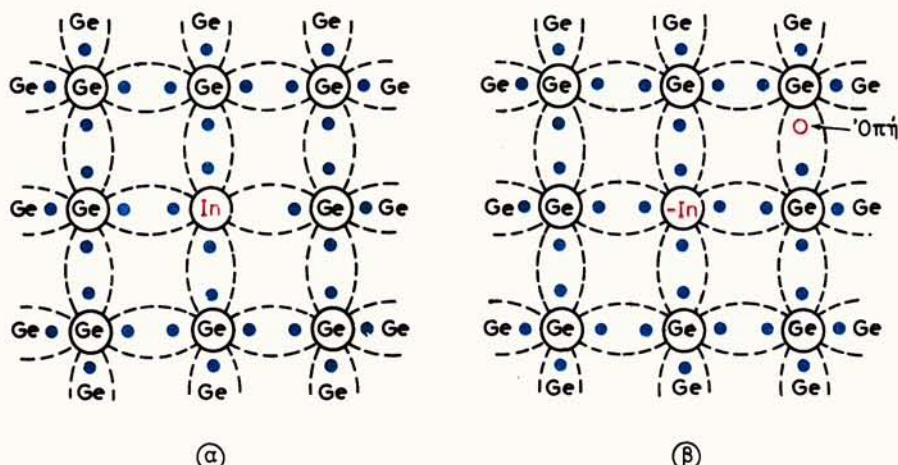
Ενεργειακές ζώνες ημιαγωγού τύπου N. α) Σε  $T = 0^\circ\text{K}$ .

Επιτρεπόμενη στάθμη δότη πλήρης. β) Σε  $T > 0^\circ\text{K}$ . Τα ηλεκτρόνια της στάθμης μετακινήθηκαν στην ζώνη αγωγιμότητας και δημιουργήθηκαν αντίστοιχα θετικά ιόντα. Τα πρόσθετα ηλεκτρόνια που εμφανίζονται προέρχονται από διάσπαση δεσμών από τον αυτοτελή ημιαγωγό.

Η επίδραση της παρασύσας του δότη έχει εντυπωσιακές επιπτώσεις στην τροποποίηση της αγωγιμότητας του καθαρού υλικού. Π.χ. στη Θερμοκρασία των  $30^\circ\text{C}$ , αν προστεθεί πρόσμιξη δότη με αναλογία 1 ατόμου δότη σε  $10^8$  ατόμα καθαρού Ge η ειδική ειδική αγωγιμότητά του δωδεκαπλασιάζεται.

## 7.7 Ημιαγωγοί τύπου P.

Αν στις θέσεις μερικών ατόμων ενός καθαρού κρύσταλλου, π.χ. Ge, τοποθετήσουμε άτομα τρισθενούς στοιχείου, έστω ινδίου (In) (σχ. 7.7α), τότε τα τρία ηλεκτρόνια σθένους του ινδίου θα σχηματίσουν ομοιοπολικούς δεσμούς με τρία γειτονικά άτομα Ge. Όμως δεν μπορεί να υπάρχει τέταρτος ομοιοπολικός δεσμός, γιατί στο άτομο της προσμίξεως δεν υπάρχει τέταρτο ηλεκτρόνιο. Στη θέση που λείπει αυτό το ηλεκτρόνιο μπορεί να κρατηθεί ένα ηλεκτρόνιο το οποίο θα προέρ-



**Ex. 7.7g.**

Επίπεδη συμβολική παράσταση της δουμάς Ge με πρόσωμη αποδέκτη In

b)  $\Sigma \not\models T \equiv 0^\circ\text{K}$ . B)  $\Sigma \models T > 0^\circ\text{K}$

χεται από διάσπαση γειτονικού ομοιοπολικού δεσμού. Το άτομο δηλαδή του In θα προσλάβει το ηλεκτρόνιο αυτό και θα γίνει αρνητικό ιόν. Στη θέση όμως του δεσμού από τον οποίο έφυγε το ηλεκτρόνιο, θα μείνει μια οπή. Για να γίνουν αυτά χρειάζεται να δοθεί ένα μικρό πάλι ποσό ενέργειας της τάξεως του  $0,01 \text{ eV}$  για το Ge ή  $0,055 \text{ eV}$  για το Si. Το άτομο του τρισθενούς στοιχείου λέγεται **αποδέκτης**. Στη συνηθισμένη θερμοκρασία περιβάλλοντος, όλα τα άτομα του αποδέκτη έχουν προσλάβει πλεκτρόνιο και έχουν γίνει αρνητικά ιόντα.

Με την προσθήκη λοιπόν ατόμων αποδέκτη μπορούμε σε θερμοκρασίες διαφορετικές από το απόλυτο μηδέν να έχουμε οπές και ακίνητα αρνητικά ιόντα. Μερικοί πάλι από τους δεσμούς του καθαρού υλικού μπορούν να διασπασθούν και να δημιουργηθούν ζεύγη οπών και ελευθέρων ηλεκτρονίων. Έτσι μέσα στο υλικό έχουμε ακίνητα αρνητικά ιόντα και φορείς που είναι: οπές που προέρχονται από τα ηλεκτρόνια δεσμών που έφυγαν και προσκολλήθηκαν στο άτομο του τρισθενούς στοιχείου, οπές που προέρχονται από ηλεκτρόνια δεσμών που έγιναν ελεύθερα και τα ελεύθερα αυτά ηλεκτρόνια. Όπως φαίνεται, οι οπές είναι περισσότερες από τα ηλεκτρόνια. Έχουμε δηλαδή πλειονότητα φορέων από οπές και μειονότητα από ηλεκτρόνια. Τα υλικά αυτά λέγονται **υλικά τύπου P**.

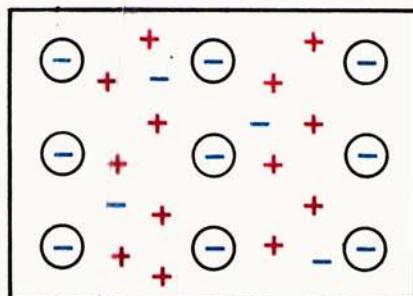
Το σύνολο βέβαια είναι ηλεκτρικά ουδέτερο, γιατί πάλι τα θετικά φορτία είναι απόλυτα ίσα με τα αρνητικά.

Παραστατική εικόνα ενός ημιαγωγού τύπου R φαίνεται στο σχήμα 7.7β.

Στο διάγραμμα των ενεργειακών ζωνών ενός υλικού τύπου P, δεχόμαστε ότι μέσα στην απαγορευμένη ζώνη του καθαρού υλικού, κοντά στη ζώνη σθένους, υπάρχει μια ενεργειακή στάθμη στην οποία εύκολα μπορούν να βρεθούν ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους (σχ. 7.7γ).

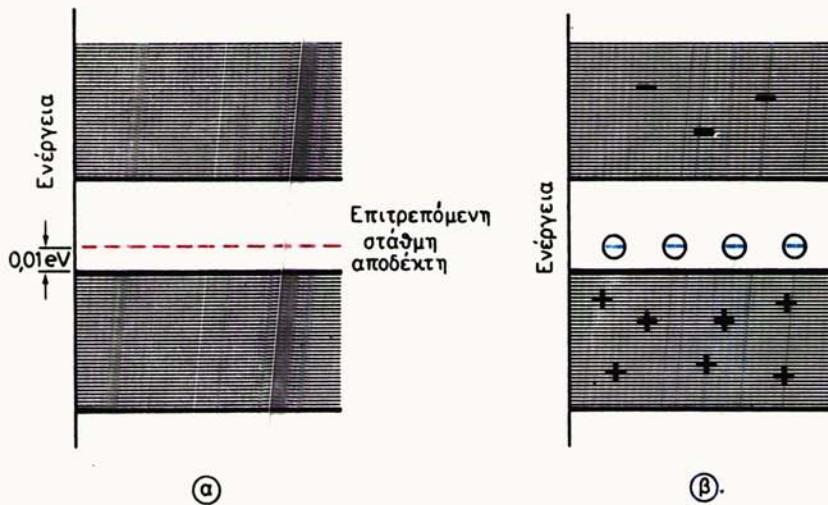
Η ενεργειακή διαφορά της στάθμης αυτής από τη ζώνη σθένους είναι π.χ. για το ίνδιο της τάξεως των 0,011 εV σε πρόσμιξη με Ge και 0,016 εV σε πρόσμιξη με Si.

Αν προσφέρουμε αυτή τουλάχιστο την ενέργεια, τότε ηλεκτρόνια της ζώνης



Σχ. 7.7β.

Παράσταση του είδους των φορτίων μέσα σε ημιαγαγό τύπου P.



Σχ. 7.7γ.

Ενεργειακές ζώνες ημιαγαγού τύπου P.

- a) Σε  $T = 0^\circ\text{K}$  (Σημειώνεται η επιτρεπόμενη στάθμη αποδέκτη). β) Σε  $T > 0^\circ\text{K}$  (Τη στάθμη αυτή κατέχουν τώρα αρνητικά ιόντα ενώ στη ζώνη σθένους εμφανίζονται αντίστοιχες οπές).

σθένους θα καταλάβουν τη στάθμη αυτή και θα δημιουργήσουν ιόντα, ενώ μέσα στη ζώνη σθένους θα δημιουργηθούν οπές. Με προσφορά όμως μεγαλύτερης ενέργειας ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους μπορούν να μεταποδήσουν στη ζώνη αγωγιμότητας. Και αυτά τα ηλεκτρόνια θα αφήσουν αντίστοιχες οπές, μέσα στη ζώνη σθένους.

Και εδώ η παρουσία του αποδέκτη αυξάνει σε πολύ μεγάλο βαθμό την αγωγιμότητα του καθαρού υλικού.

Μπορεί επίσης μέσα στο ίδιο υλικό να υπάρχουν μαζί προσμίξεις δότη και αποδέκτη. Ανάλογα με το ποιο είδος προσμίξεως βρίσκεται σε σημαντικά μεγαλύτερη αναλογία, χαρακτηρίζεται το υλικό ως υλικό τύπου N ή P.

## 7.8 Ειδική αγωγιμότητα στούς ημιαγωγούς.

### 7.8.1 Ειδική αγωγιμότητα ενδογενών ημιαγωγών.

Είδαμε στα προηγούμενα ότι οι φορείς σ' έναν αυτοτελή ημιαγωγό είναι οπές και ηλεκτρόνια που βρίσκονται μάλιστα σε ίσο αριθμό. Από την πλευρά της αγωγιμότητας, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια στους αυτοτελείς ημιαγωγούς δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερη συμπεριφορά από αυτή που παρουσιάζουν τά ελεύθερα ηλεκτρόνια μέσα στους αγωγούς. Το καινούργιο στοιχείο στους ημιαγωγούς είναι η οπή. Όπως είδαμε, η οπή θεωρείται ως ένα σωμάτιο με θετικό φορτίο ίσο σε απόλυτη τιμή με το φορτίο του ηλεκτρονίου και με ενεργό μάζα μικρότερη από τη μάζα του ηλεκτρονίου.

Η ευκινησία των οπών  $\mu_p$  είναι μικρότερη από την ευκινησία των ηλεκτρονίων  $\mu_n$ . Αυτό καταρχήν μπορεί να αποδοθεί στο ότι οι οπές κινούνται ανάμεσα σε καθορισμένες θέσεις, που είναι θέσεις ατόμων στο κρυσταλλικό πλέγμα.

Βέβαια η ευκινησία των φορέων γενικά εξαρτάται από το είδος του υλικού μέσα στο οποίο κινούνται και από τη θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται το υλικό αυτό (πίνακας 7.8.1).

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.8.1**  
**Φυσικά χαρακτηριστικά Ge και Si στους 300°C**

Σταθερές	Πυρήνιο	Γερμανία
Ευκινησία ηλεκτρονίων $\mu_n$ m <sup>2</sup> /(volt) (sec)	0,13	0,38
Ευκινησία οπών $\mu_p$ m <sup>2</sup> /(volt) (sec)	0,05	0,18
Σταθερά διαχύσεως ηλεκτρονίων $D_n$ m <sup>2</sup> /sec	0,0034	0,0098
Σταθερά διαχύσεως οπών $D_p$ m <sup>2</sup> /sec	0,0013	0,0046
Χρόνος ζωής ηλεκτρονίων $T_n$ / μsec	50 – 500	100 – 1000
Χρόνος ζωής οπών $T_p$ μsec	50 – 500	100 – 1000
Μήκος διαχύσεως ηλεκτρονίων $L_n$ (m)	$0,40 \times 10^{-3} - 1,3 \times 10^{-3}$	$10^{-3} - 3,0 \times 10^{-3}$
Μήκος διαχύσεων οπών $L_p$ (m)	$0,25 \times 10^{-3} - 0,80 \times 10^{-3}$	$0,7 \times 10^{-3} - 2,0 \times 10^{-3}$

Στην ταυτόχρονη κίνηση οπών και ηλεκτρονίων με την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου, οφείλεται το ηλεκτρικό ρεύμα στους ημιαγωγούς. Σύμφωνα με τη σχέση 7.2.12, αν τοποθετήσουμε τον ημιαγωγό μέσα σ' ένα ηλεκτρικό πεδίο εντάσεως  $E$ , η πυκνότητα  $J_n$  του ρεύματος ηλεκτρονίων θα είναι:

$$J_n = -\mu_n \cdot e \cdot n \cdot E \quad (7.8.1)$$

και του ρεύματος οπών  $J_p$ :

$$J_p = \mu_p \cdot e \cdot p \cdot E \quad (7.8.2)$$

όπου  $\mu_n$  η ευκινησία των ηλεκτρονίων,  $\mu_p$  η ευκινησία των οπών και  $n, p$  η πυκνότητα των ηλεκτρονίων και οπών αντίστοιχα.

Το μείον στη σχέση 7.8.1 οφείλεται στο φορτίο του ηλεκτρονίου. Στις σχέσεις 7.8.1 και 7.8.2 οι ταχύτητες οπών και ηλεκτρονίων είναι αντίθετες. Έτσι, αν ως θετική φορά έχομε τη συμβατική από το + προς το - της πηγής, η ταχύτητα των οπών θα έχει θετικό σημείο και η ταχύτητα των ηλεκτρονίων αρνητικό.

Και σύμφωνα και με τη σχέση 7.2.5 θα έχομε:

$$J_n = -e \cdot n(-\mu_n \cdot E) \quad (7.8.3)$$

και

$$J_p = e \cdot p(\mu_p \cdot E) \quad (7.8.4)$$

Δηλαδή:

$$J_n = e \cdot n \cdot \mu_n \cdot E \quad \text{καὶ} \quad J_p = e \cdot p \cdot \mu_p \cdot E \quad (7.8.5)$$

Η συνολική πυκνότητα ρεύματος στον ημιαγωγό  $J$  που θα οφείλεται στην επίδραση του πεδίου  $E$  και που θα το λέμε **ρεύμα ολισθήσεως**, θα είναι:

$$J_0 = J_n + J_p \Rightarrow J_0 = n \cdot \mu_n \cdot e \cdot E + p \cdot \mu_p \cdot e \cdot E \quad (7.8.6)$$

καὶ

$$J_0 = (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p) e \cdot E \quad (7.8.7)$$

Αυτή είναι η γενικευμένη μορφή του νόμου του Ohm για τους αυτοτελείς ημιαγωγούς. Από αυτή φαίνεται ότι η ειδική αγωγιμότητα σ του ενδογενούς ημιαγωγού θα είναι:

$$\sigma = (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p) e \quad (7.8.8)$$

Από τη σχέση αυτή σε συνδυασμό με τη σχέση 7.4.1, φαίνεται ότι η ειδική αγωγιμότητα στους αυτότελείς ημιαγωγούς αυξάνει με αύξηση της θερμοκρασίας γιατί αυξάνονται οι φορείς. Η αύξηση μάλιστα των φορέων, υπερκαλύπτει την ελάττωση της αγωγιμότητας από τη μείωση της ευκινησίας, λόγω αυξήμενης θερμικής ταλαντώσεως των στοιχείων του κρυσταλλικού πλέγματος.

### **Εφαρμογή.**

Να υπολογίσετε την ειδική αντίσταση του καθαρού γερμανίου στη θερμοκρασία των  $27^{\circ}\text{C}$ , αν η ευκινησία των ηλεκτρονίων  $\mu_n = 0,36 \text{ m}^2/\text{V sec}$  και τών οπών  $\mu_p = 0,17 \text{ m}^2/\text{V sec}$  καὶ ή σταθερά  $A = 10^{22} \text{ }^{\circ}\text{K}^{-3/2} \cdot \text{m}^{-3}$ .

### **Λύση.**

Το εύρος  $E_g$  της απαγορευμένης ζώνης του καθαρού γερμανίου είναι  $0,75 \text{ eV}$  ή

$$E_g = 0,75 \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ joule} = 1,2 \times 10^{-19} \text{ joule}.$$

Η απόλυτη θερμοκρασία  $T = (273 + 27) \text{ }^{\circ}\text{K} = 300 \text{ }^{\circ}\text{K}$ . Σύμφωνα με τη σχέση 7.4.1 έχομε:

$$n = p = 10^{22} \times 300^{1.5} \cdot e^{-\frac{1.2 \times 10^{-19}}{2 \times 1.38 \times 10^{23} \times 300}} \quad \frac{\text{Φορείς}}{\text{m}^3} = 1,3 \times 10^{19} \cdot \frac{\text{Φορείς}}{\text{m}^3}$$

Επομένως θα έχομε:

$$\sigma = e \cdot n(\mu_n + \mu_p) = 1,6 \times 10^{-19} \times 1,3 \times 10^{19} (0,36 + 0,17) \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1} = 1,06 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

Άρα:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = 0,94 \Omega \cdot m = 94 \Omega \cdot cm$$

### 7.8.2 Αγωγιμότητα ημιαγωγών με προσμίξεις.

Στην περίπτωση των ημιαγωγών με προσμίξεις η σχέση 7.8.8 απλοποιείται ανάλογα με το αν ο ημιαγωγός είναι τύπου P ή τύπου N. Έτσι στην περίπτωση ημιαγωγού τύπου N, όπου  $n > > \rho$  η σχέση 7.8.8 γίνεται:

$$\sigma_n \approx e \cdot n \cdot \mu_n \quad (7.8.9)$$

Στην περίπτωση ημιαγωγών τύπου P όπου  $n < < \rho$  η 7.8.8 γίνεται

$$\sigma_p \approx e \cdot p \cdot \mu_p \quad (7.8.10)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις βλέπουμε ότι η ειδική αγωγιμότητα στους ημιαγωγούς με προσμίξεις είναι περίπου ανάλογη με τον αριθμό των φορέων πλειονότητας ανά μονάδα όγκου. Επομένως θα αυξάνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία και επίσης το ποσοστό προσμίξεως.

### Εφαρμογή.

Να υπολογίσετε την ειδική αντίσταση στους  $27^{\circ}C$  του γερμανίου της προηγούμενης εφαρμογής αν αυτό εμπλουτισθεί με στοιχείο δότη με αναλογία ενός ατόμου προσμίξεως σε  $10^8$  άτομα γερμανίου. Δίνεται ο αριθμός ατόμων γερμανίου  $N_{Ge}$  ανά  $m^3$ , που είναι ίσος με  $4,43 \times 10^{28}$  άτομα/ $m^3$ .

### Λύση.

Στη θερμοκρασία των  $27^{\circ}C$  όλα τα άτομα του δότη έχουν χάσει το αδέσμευτο ηλεκτρόνιό τους. Ο αριθμός όμως των ατόμων προσμίξεως ανά  $m^3$  θα είναι  $n = 4,43 \times 10^{28}/10^8$  συνεπώς τόσα θα είναι και τα ηλεκτρόνια.

Αφού στους ημιαγωγούς με προσμίξεις ο αριθμός των φορέων από την αυτοτελή αγωγιμότητα θεωρείται αμελητέος, η ειδική αγωγιμότητα θα είναι (σχέση 7.8.9).

$$\sigma \approx (1,6 \times 10^{-18} \times 4,43 \times 10^{20} \times 0,36) \Omega^{-1} \cdot m^{-1} = 25,5 \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$$

Άρα η ειδική αντίσταση:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{25,5} \Omega \cdot m = 3,9 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot m = 3,9 \Omega \cdot cm$$

Σημειώνομε ότι χάρη σ' αυτή την πολύ μικρή αναλογία προσμίξεως, η ειδική αντίσταση του Ge η οποία ήταν  $40 \Omega \cdot cm$  έγινε  $3,9 \Omega \cdot cm$ .

### 7.9 Ευκινησία φορέων, χρόνος ζωής, μηκος διαχύσεως.

#### 7.9.1 Ευκινησία.

Από τη σχέση 7.2.5 φαίνεται ότι η ευκινησία ενός φορέα μπορεί να ορισθεί ως το πηλίκο του μέτρου της μέσης ταχύτητας που αποκτά υπό την επίδραση ενός η-

λεκτρικού πεδίου εντάσεως  $E$ , διά του μέτρου της εντάσεως αυτής. Θα είναι δηλαδή:

$$\mu = \frac{U}{E} \quad (7.9.1)$$

$$\text{Αυτή μετριέται σε μονάδες } \frac{m^2}{\text{Volt} \times \text{sec}}$$

Την ευκινησία των ηλεκτρονίων τη συμβολίζομε με  $\mu_n$  και των οπών με  $\mu_p$ . Γενικά είναι  $\mu_p < \mu_n$ .

Η ευκινησία μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία.

### 7.9.2 Χρόνος ζωής.

Είδαμε στα προηγούμενα ότι στους ημιαγωγούς έχομε συνεχώς δημιουργία φορέων αλλά και επανασύνδεση οπών και ηλεκτρονίων, έτσι που το υλικό να βρίσκεται σε ηλεκτρική ισορροπία. Ο μέσος χρόνος που μεσολαβεί από τη δημιουργία των ελευθέρων ηλεκτρονίων μέχρι την επανασύνδεσή τους λέγεται **χρόνος ζωής** των ηλεκτρονίων. Ανάλογα αρίζεται και ο χρόνος ζωής των οπών. Ο χρόνος ζωής των φορέων παίζει σημαντικό ρόλο σε πολλές εφαρμογές των ημιαγωγών.

Ο μέσος χρόνος ζωής των ηλεκτρονίων και των οπών στους καθαρούς ημιαγωγούς είναι ο ίδιος.

Στους ημιαγωγούς με πρωσμίξεις, ο μέσος χρόνος ζωής των φορέων πλειονότητας είναι πολύ μεγαλύτερος από το μέσο χρόνο ζωής των φορέων μειονότητας.

Στον πίνακα 7.8.1 δίνονται τάξεις μεγέθους τιμών για χρόνους ζωής φορέων.

### 7.9.3 Διάχυση — Μήκος διαχύσεως.

Ας υποθέσουμε ότι σ' ένα μέρος κομματιού από ημιαγωγό παρουσιάζεται μεγαλύτερη πυκνότητα φορέων απ' ό,τι στο υπόλοιπο (σχ. 7.9). Έστω πως οι φορείς αυτοί είναι ηλεκτρόνια. Τότε θα παρατηρηθεί, χωρίς καμία εξωτερική επίδραση, κίνηση των ηλεκτρονίων έτσι, ώστε να δημιουργηθεί τελικά εξίσωση της πυκνότητάς τους σε δόλη τη μάζα του ημιαγωγού. Την κίνηση αυτή των ηλεκτρονίων (η των οπών) τη λέμε **διάχυση**. Η κίνηση δημιουργεί ένα ρεύμα που ονομάζεται ρεύμα διαχύσεως.

Η πυκνότητα του ρεύματος διαχύσεως προς μια διεύθυνση εξαρτάται από τη μεταβολή της πυκνότητας των φορέων ανά μονάδα μήκους, από το φορτίο των φορέων και από ένα συντελεστή που ονομάζεται σταθερά διαχύσεως και εξαρτάται από τη φύση του υλικού και τη θερμοκρασία του.

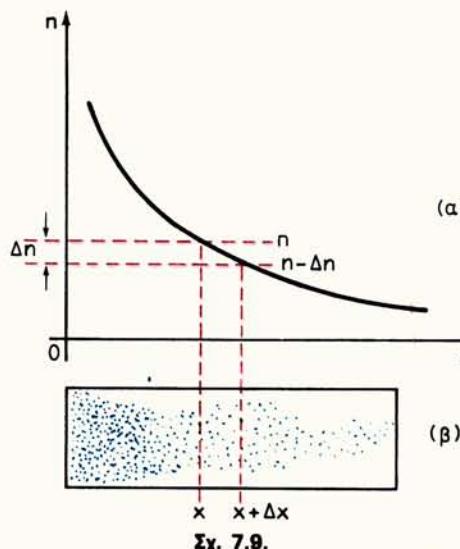
Έστι θα έχομε για την πυκνότητα ρεύματος διαχύσεως ηλεκτρονίων:

$$J_{\delta n} = e \cdot D_n \frac{\Delta n}{\Delta x} \quad (7.9.2)$$

και πυκνότητα ρεύματος οπών:

$$J_{\delta p} = -e \cdot D_p \frac{\Delta p}{\Delta x} \quad (7.9.3)$$

όπου  $D_n$ ,  $D_p$  οι σταθερές διαχύσεως για ηλεκτρόνια και οπές αντίστοιχα και  $\Delta n/\Delta x$



Καμπύλη (a) που παριστάνει τη μεταβολή της πυκνότητας των ηλεκτρονίων κατά τη διεύθυνση  $x$  του δείγματος (b).

οι μεταβολή της πυκνότητας ηλεκτρονίων και οπών ανά μονάδα μήκους κατά μια διεύθυνση (σχ. 7.9).

Το ρεύμα διαχύσεως είναι ένα μεταβατικό ρεύμα που διαρκεί οσο διαρκεί η κίνηση των φορέων για εξίσωση της πυκνότητας.

Η μέση απόσταση που διανύουν οι φορείς λόγω διαχύσεως κατά το χρόνο ζωής τους ονομάζεται **μήκος διαχύσεως**.

Για τα ηλεκτρόνια το μήκος διαχύσεως είναι:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \quad (7.9.4)$$

ενώ για τις οπές:

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad (7.9.5)$$

όπου:  $D_n$ ,  $D_p$  οι σταθερές διαχύσεως ηλεκτρονίων και οπών και  $\tau_n$ ,  $\tau_p$  οι χρόνοι ζωής ηλεκτρονίων και οπών αντίστοιχα. Στον πίνακα 7.8.1 δίνονται σχετικές τιμές για το Ge και Si.

## 7.10 Επίδραση της Θερμοκρασίας και του φωτός στους ημιαγωγούς. Θερμίστορ. Βαρίστορ. Φωτοαντιστάσεις.

Όπως είδαμε στα προηγούμενα, η επίδραση των μεταβολών της θερμοκρασίας στην ειδική αντίσταση των ημιαγωγών είναι έντονη: όταν αυξάνομε τη θερμοκρασία, η ειδική αντίσταση γενικά ελαττώνεται. Συμβαίνει δηλαδή το αντίθετο απ' ό,τι στα περισσότερα μέταλλα στα οποία όταν αυξάνεται η θερμοκρασία, αυξάνεται και η ειδική αντίσταση.

Η ειδική αγωγιμότητα των ημιαγωγών μπορεί επίσης να αυξηθεί (και φυσικά η ειδική αντίσταση τους να ελαττωθεί) με προσφορά φωτεινής ενέργειας.

Πραγματικά, οι ενέργειες των φωτονίων του οπτικού φάσματος εκτείνονται από το ερυθρό που είναι περίπου 1,6 eV ως το ιώδες που είναι περίπου 3,3 eV. Αυτό σημαίνει ότι και τα ασθενέστερα από τα φωτόνια αυτά έχουν ενέργεια που είναι αρκετή για να αποσπασθούν ηλεκτρόνια από τους δεσμούς του καθαρού ημιαγωγού, με συνέπεια τη δημιουργία αντίστοιχων οπών, και πολύ περισσότερο να δη-

μιουργηθούν φορείς οπές και ηλεκτρόνια από τις προσμίξεις. Η αύξηση των φορέων αυτών οδηγεί λοιπόν στην αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας.

Στα επόμενα θα δούμε πώς εκμεταλλεύμαστε τις παραπάνω ιδιότητες στην κατασκευή ειδικών αντιστάσεων φως οι θερμίστορς και οι φωτοαντιστάσεις.

### 7.10.1 Θερμίστορ (Thermistor).

Τα θερμίστορς είναι αντιστάσεις που η τιμή τους μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία και ανήκουν στην κατηγορία των μη γραμμικών αντιστάσεων, των αντιστάσεων δηλαδή στις οποίες η μεταβολή του ρεύματος όταν μεταβάλλεται την τάση που εφαρμόζομε στα άκρα τους, δεν ακολουθεί το νόμο του Ohm.

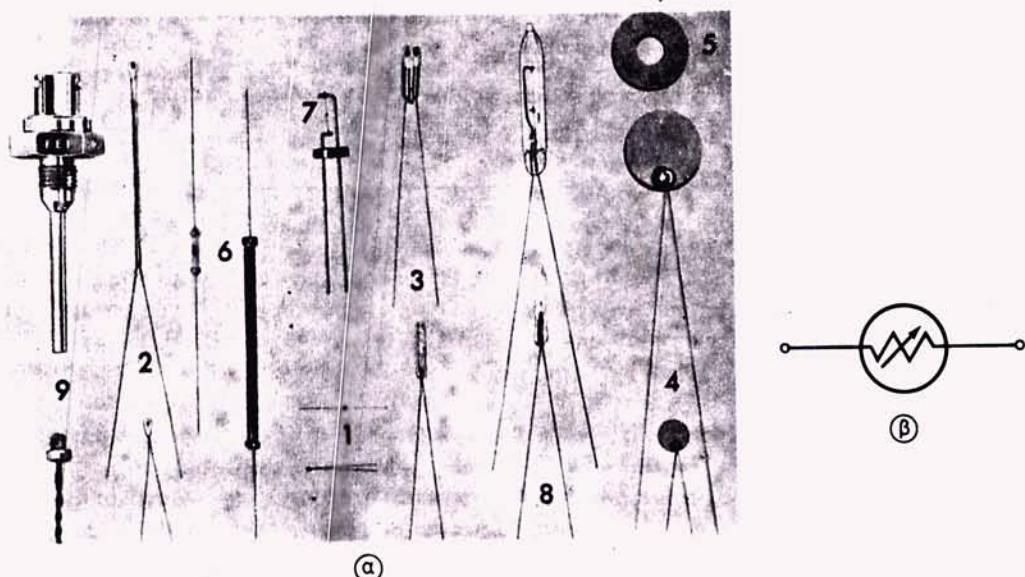
Τα θερμίστορας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες.

Σ' αυτά που έχουν αρνητικό θερμικό συντελεστή (NTC) σ' αυτά δηλαδή που η αντίστασή τους μειώνεται όταν η θερμοκρασία τους αυξάνεται και σ' αυτά που έχουν θετικό θερμικό συντελεστή (PTC), σε αυτά δηλαδή που η αντίστασή τους αυξάνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία τους. (τα αρχικά NTC και PTC, είναι από τα αγγλικά Negative Temperature Coefficient και Positive Temperature Coefficient αντίστοιχα. Με τα αρχικά αυτά χαρακτηρίζονται συνήθως διεθνώς οι θερμίστορς).

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα θερμίστορα NTC είναι προιόντα συντηξιους οξειδίων μαγνησίου, νικελίου, κοβαλτίου, τιτανίου, χαλκού, σιδήρου και ουρανίου. Τα θερμίστορα PTC κατασκευάζονται από πολυκρυστάλλους με βάση το διοξείδιο του τιτανίου, το πεντοξείδιο του νιοβίου και ενώσεις του βαρίου και του στροντίου με άνθρακα.

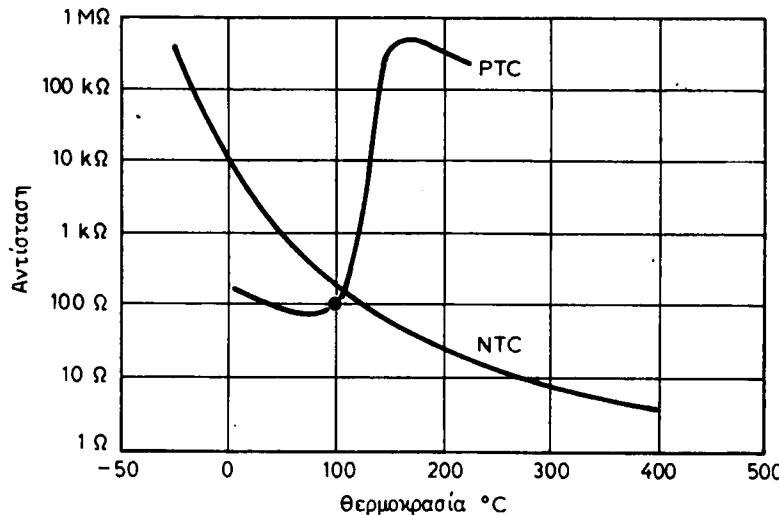
Τα θερμίστορα έχουν διάφορες μορφές, όπως π.χ. δακτυλίου, δίσκου κλπ. (σχ. 7.10a).

Στο διάγραμμα του σχήματος 7.10β φαίνονται τυπικές καμπύλες μεταβολής της αντιστάσεως σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Είναι χαρακτηριστικό ότι η μετα-



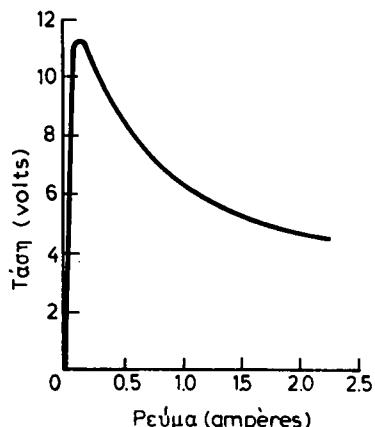
Σχ. 7.10a.  
α) Διάφορες μορφές θερμίστορας. β) Συμβολισμός

βολή της αντιστάσεως γίνεται βαθμιαία σ' ένα μεγάλο σχετικά φάσμα θερμοκρασιών για θερμίστορς με αρνητικό θερμικό συντελεστή(NTC), ενώ η αντίσταση των θερμίστορς με θετικό θερμικό συντελεστή(PTC) μεταβάλλεται απότομα από κάποιο σημείο και πέρα για στενό φάσμα θερμοκρασιών.



Σχ. 7.10β.

Τυπικές καμπύλες μεταβολής της αντιστάσεως σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.



Σχ. 7.10γ.

Τυπική χαρακτηριστική ρεύματος-τάσεως για NTC Θερμίστορ.

Η θέρμανση των αντιστάσεων αυτών γίνεται από θερμότητα που προέρχεται από το περιβάλλον ή που αναπτύσσεται εσωτερικά κατά τη διόδο του ηλεκτρικού ρεύματος.

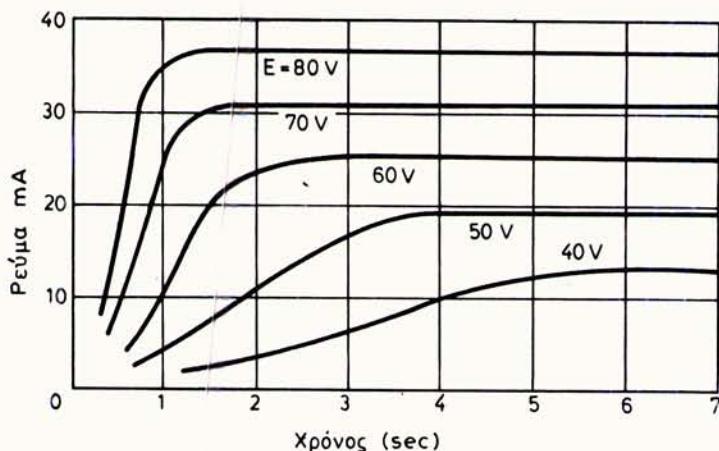
Εκτός από τη μεταβολή της αντιστάσεως σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μεταβολή της τάσεως στα άκρα θερμίστορ NTC σε συνάρτηση με το ρεύμα που τη διαρρέει (σχ. 7.10γ). Από την καμπύλη αυτή φαίνεται ότι η τάση παρουσιάζει ένα μέγιστο και κατόπιν υποβιβάζεται. Πραγματικά σε χαμηλά ρεύματα, η αντίσταση μένει σταθερή και η σχέση τάσεως-ρεύματος α-

κολουθεί το νόμο του Ohm.

Για μεγαλύτερα ρεύματα αναπτύσσονται ποσά θερμότητας που υποβιβάζουν την αντίσταση, με συνέπεια και τον υποβιβασμό της τάσεως.

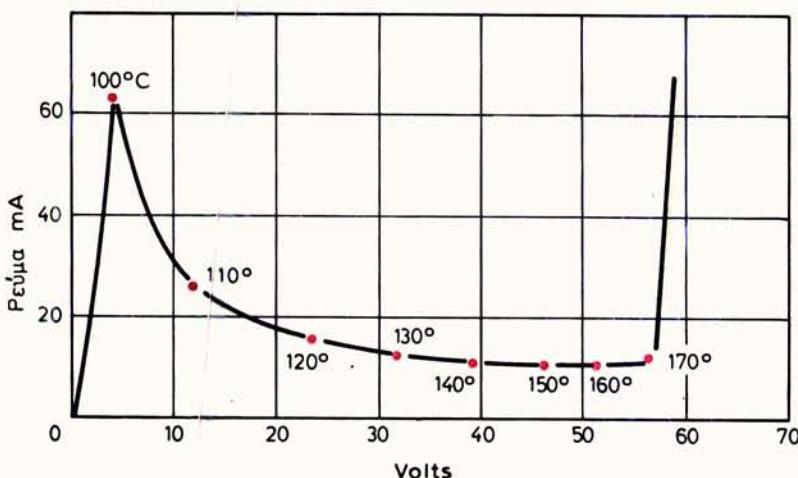
Επίσης, από τη στιγμή που θα αρχίσει να διαρρέεται από ρεύμα το θερμίστορ δε φθάνει αμέσως στη μέγιστη θερμοκρασία της. Μεσολαβεί κάποιος χρόνος που εξαρτάται από τη μάζα του θερμίστορ, την τιμή της σε σειρά αντιστάσεως και την τάση που εφαρμόζεται στα άκρα της.

Στο σχήμα 7.10δ φαίνεται σμήνος από καμπύλες μεταβολής του ρεύματος σε συνάρτηση με το χρόνο για διάφορες τιμές τάσεως, για NTC θερμίστορ. Η χρονική καθυστέρηση της σταθεροποίησης του ρεύματος από τη στιγμή της τάσεως σε συνδυασμό θερμίστορ και κατάλληλου κυκλώματος μπορεί να είναι από 0,001 δευτερόλεπτα μέχρι αρκετές ώρες.



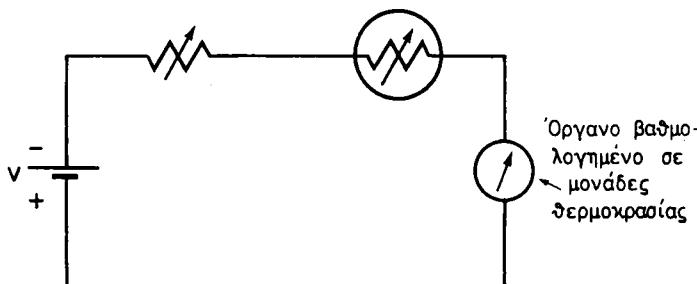
Σχ. 7.10δ.

Μεταβολή του ρεύματος σε συνάρτηση με το χρόνο για διάφορες τιμές τάσεως.



Σχ. 7.10ε.

Καμπύλη για θερμίστορ PTC.



**Σχ. 7.10στ.**  
Απλή συνδεσμολογία ηλεκτρικού θερμομέτρου.

Καμπύλη επίσης τάσεως σε διάφορες θερμοκρασίες για θερμίστορ PTC φαίνεται στο σχήμα 7.10ε.

Απλό κύκλωμα μετρήσεως της θερμοκρασίας με τη βοήθεια θερμίστορ φαίνεται στο σχήμα 7.10στ. Με τις μεταβολές της θερμοκρασίας μεταβάλλεται η αντίσταση του θερμίστορ και συνεπώς και το ρεύμα που διαρρέει το όργανο. Αν το όργανο είναι βαθμολογημένο σε βαθμούς θερμοκρασίας, θα μας τη δείχνει απευθείας. Η μεταβλητή αντίσταση χρησιμεύει για να ρυθμίζουμε το όργανο.

Στην πράξη εκμεταλλευόμαστε τις διάφορες ιδιότητες των θερμίστορ. Έτσι τη μεταβολή της αντίστασεως με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος μπορούμε να εκμεταλλευθούμε για να μετρήσομε, με συνδυασμό καταλήλων κυκλωμάτων, θερμοκρασίες ή για να ανιχνεύσουμε άνοδο της θερμοκρασίας σε χώρους που η ανίχνευση θα ήταν επικίνδυνη.

Τη μεταβολή της αντίστασεως με τη θέρμανση, που προκαλείται από τη δίοδο του ηλεκτρικού ρεύματος σε NTC θερμίστορ μπορούμε να εκμεταλλευθούμε, θέτοντας θερμίστορ σε σειρά σ' ένα σύστημα που επιθυμούμε να μην περάσει απότομα μεγάλο ρεύμα, αλλά να αυξηθεί βαθμιαία. Έτσι στην αρχή το θερμίστορ έχει μεγάλη αντίσταση και επιτρέπει τη δίοδο σε μικρό ρεύμα. Σιγά-σιγά όμως θερμαίνεται, μειώνεται η αντίστασή του και το ρεύμα αυξάνεται.

Ανάλογα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και PTC θερμίστορ, σε περιπτώσεις όμως που θέλουμε να προστατεύσουμε μια διάταξη από αυξήσεις ρευμάτων.

Μπορούμε επίσης να εκμεταλλευθούμε κατάλληλα τη χρονική καθυστέρηση στα θερμίστορας αποκαταστάσεως του ρεύματος από τη στιγμή της εφαρμογής της τάξεως.

Τα θερμίστορας παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες διατάξεις, ευαίσθητες στις μεταβολές της θερμοκρασίας Δηλαδή:

- Παρουσιάζουν μεγάλη ευαίσθησια στις μεταβολές της θερμοκρασίας, πράγμα που βοηθάει στη μέτρηση πολύ μικρών διαφορών θερμοκρασίας.
- Ο μικρός τους όγκος επιτρέπει τη χρησιμοποίησή τους σε χώρους που δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν άλλα θερμικά όργανα. Μπορούν να μετρηθούν μεταβολές της θερμοκρασίας της τάξεως των  $0,0005^{\circ}\text{C}$ .
- Χρησιμοποιούνται ως μετρητές ισχύος σε πολύ ψηλές συχνότητες. Σ' αυτή την περίπτωση η μέτρηση γίνεται από τη μεταβολή της αντίστασεως που προέρχεται από την απορρόφηση ενέργειας υψηλής συχνότητας που μετα-

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.10.1**  
**Χαρακτηριστικά γενικής χρήσεως Θερμόστατος**

Μορφή	Γυάλινη χάρδρα	Γυάλινη χάρδρα	Γυάλινος σωλήνας	Δίσκος	Πεπλαστισμένος δικτύοιος	Ραβδία	Σφαιρίδια
Θερμοκρασία λειτουργίας	300°C	450°C	300°C	150°C	150°C	150°C	300°C
Μέγιστη θερμοχρεψία	400°C						
Συνηθισμένα μεγέθη διαμέτρων (σε ίντσες)	0,005 0,007 0,010 0,012 0,014	0,043	0,02 0,03 0,06 0,07 0,10 0,15	0,05 0,10 0,20 0,30 0,40 0,50 0,60	0,75	0,05 x 0,5 0,11 x 0,9 0,17 x 0,9 0,22 x 0,38 0,38 x 1,13	0,07
Αντίσταση (25°C)	1000 Ω ως 9,1 MΩ	30 Ω ως 20 MΩ	30 Ω ως 20 MΩ	1,00 100 kΩ	1 Ω ως 4000 Ω	200 Ω ως 2 MΩ	2000 Ω ως 1 MΩ
Ανοκές	±50% ως ±1%	±50% ως 1%	±50% ως ±1%	±10% ±5% 3 sec 300 sec	±10% ±5% 3 sec 300 sec	±10% ως 1% 150 sec 400 sec	±10% 4 sec 90 sec
Σταθερά χρόνου στον αέρα	Min. 1,00 sec	Max. 5,5 sec					8 sec
Σταθερά απωλειών mW/°C στον αέρα	Min. 0,045 0,100	Max. 0,35 0,40	0,10 1,70	1,0 40	55 —	2,5 125	2 —

τρέπεται σε θερμότητα.

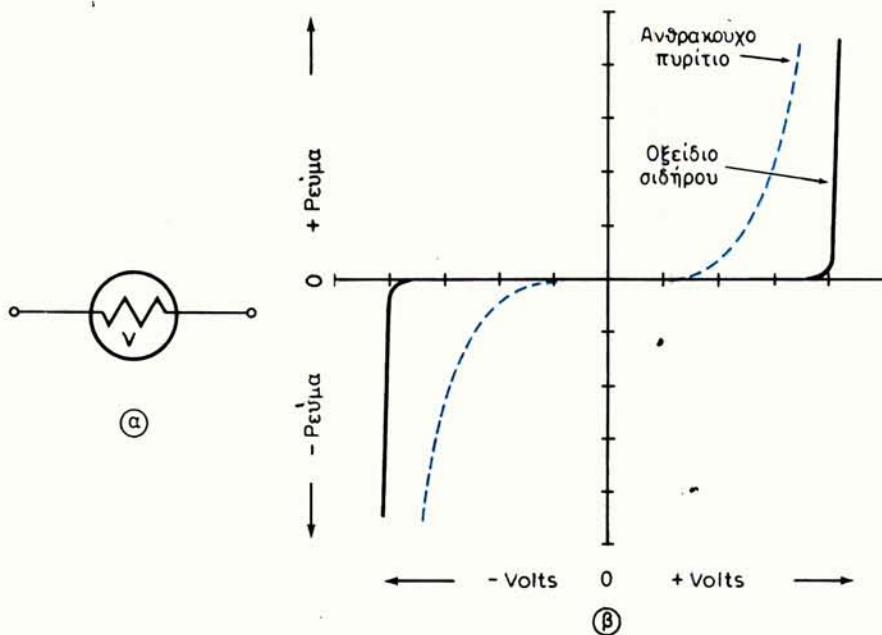
- Χρησιμοποιούνται επίσης σε μανόμετρα, σε ενισχυτικές διατάξεις, στην αυτόματη ρύθμιση της ενισχύσεως (A.G.C), στους δέκτες και σε πλήθος άλλων περιπτώσεων.

Υπάρχουν θερμίστορ που μπορούν να εργασθούν και σε θερμοκρασίες 1000°C.

Χαρακτηριστικά διαφόρων τύπων θερμίστορ υπάρχουν στον πίνακα 7.10.1.

### 7.10.2 Varistor (Varistor).

Στην κατηγορία των μη γραμμικών αντιστάσεων ανήκουν και τα varistors. Είναι αντιστάσεις που η τιμή τους μεταβάλλεται όταν μεταβάλλεται η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα τους. Στο σχήμα 7.10ζ δίνονται καμπύλες μεταβολής του ρεύματος σε συνάρτηση με την τάση Varistor με πυρίτιο και άνθρακα και με οξείδιο του ψευδάργυρου. Από αυτές φαίνεται πώς όταν η τάση πάρει μια τιμή, το ρεύμα αυξάνει γρήγορα. Η αντίσταση δηλαδή μειώνεται γρήγορα.



Σχ. 7.10ζ.

α) Συμβολισμός Varistor. β) Σύγκριση χαρακτηριστικών Varistors με πυρίτιο-άνθρακα και Varistors οξείδιο του ψευδάργυρου.

Τα Varistor χρησιμοποιούνται σε προστατευτικές διατάξεις με τις οποίες θέλομε να προφυλάξουμε κυκλώματα από απότομες ανυψώσεις της τάσεως. Όταν γίνονται αυτές οι ανυψώσεις, η αντίσταση του Varistor μειώνεται, με συνέπεια να μπορεί να περάσει περισσότερο ρεύμα.

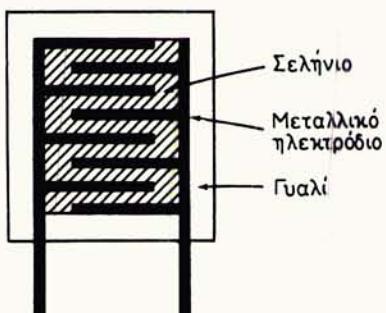
### 7.10.3 Φωτοαντιστάσεις.

Η λειτουργία τους στηρίζεται στην αύξηση των φορέων (ελευθέρων ηλεκτρο-

νίων και οπών) ενός ημιαγωγού όταν σ' αυτόν προσπέσουν φωτόνια. Η αύξηση των φορέων έχει ως συνέπεια τη μείωση της ειδικής αντιστάσεως. Έτσι με περισσότερο ή λιγότερο κατάλληλο φωτισμό θα έχομε μικρότερη ή μεγαλύτερη αντίσταση.

Με βάση το φαινόμενο αυτό κατασκευάζονται οι φωτοαντιστάσεις. Αυτές είναι αντιστάσεις από κατάλληλους ημιαγωγούς που παρουσιάζουν ευαισθησία σε ορισμένη περιοχή του φωτεινού φάσματος.

Το πιο παλιό είδος των αντιστάσεων αυτών, που χρησιμοποιούνται και σήμερα είναι αυτές με σελήνιο. Η κατασκευή μιας τέτοιας αντιστάσεως με σελήνιο φαίνεται στο σχήμα 7.10η. Η φασματική της ευαισθησία είναι δόμοια με του ματιού. Παρουσιάζει όμως μικρές μεταβολές στην αντίσταση σχετικά με τις μεταβολές του φωτισμού της και καθυστερεί να ανταποκριθεί στις μεταβολές αυτές.



Σχ. 7.10η.  
Φωτοαντίσταση σελήνιου.



Σχ. 7.10θ.  
Δύο τύποι αντιστάσεων θειούχου καδμίου.



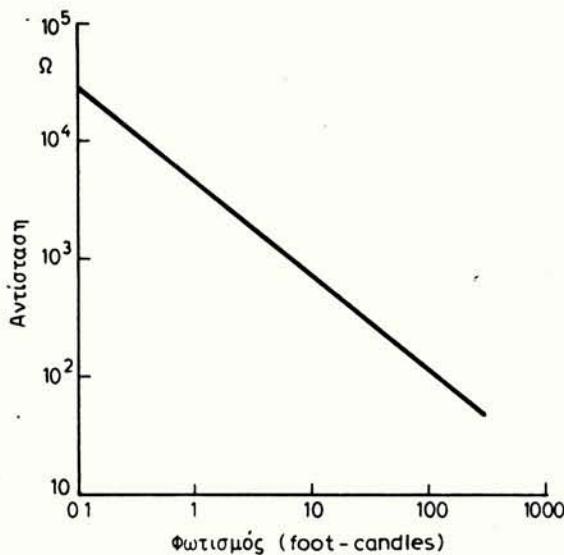
Ένα από τα συνηθισμένα υλικά για τις φωτοαντιστάσεις είναι το θειούχο κάδμιο (CdS). Ανταποκρίνεται σ' ολόκληρο το ορατό φάσμα και φθάνει μέχρι το υπέρυθρο, είναι πολύ πιο ευαίσθητο από τό σελήνιο και εξαιτίας της ευαισθησίας του χρησιμοποιείται σε αντιστάσεις με πολύ μικρό σχετικά μέγεθος (σχ. 7.10θ).

Τυπική χαρακτηριστική καμπύλη μεταβολής-τής αντιστάσεως σε συνάρτηση με το φωτισμό δίνεται στο σχήμα 7.10ι. Στο σχήμα 7.10ια φαίνονται οι καμπύλες φασματικής ευαισθησίας για το θειούχο κάδμιο, αλλά και για το καθαρό πυρίτιο και γερμάνιο. Στα σχήματα 7.10ιβ και 7.10ιγ φαίνονται δύο σμήνη χαρακτηριστικών της φωτοαντιστάσεως ORP 90.

Στο εμπόριο υπάρχουν και φωτοαντιστάσεις με υλικά από ενώσεις του μολύβδου με θείο, με σελήνιο κ.λπ. και υλικά από ένωση του αντιμονίου με ίνδιο.

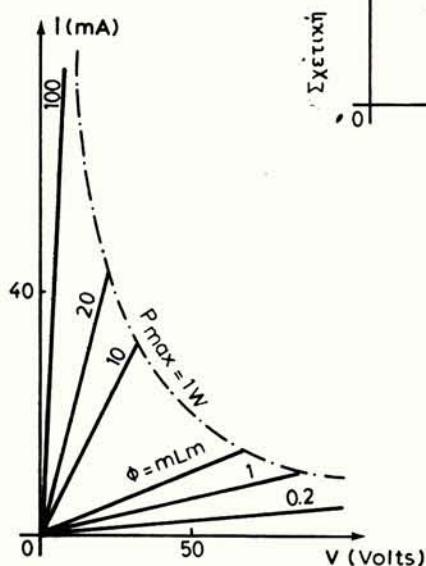
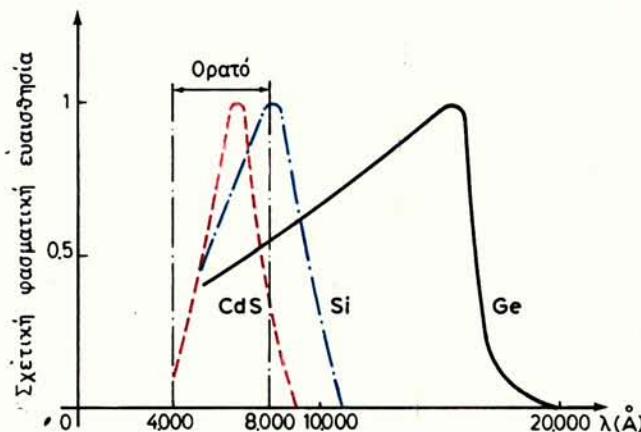
Κύρια χαρακτηριστικά των φωτοαντιστάσεων είναι:

- Η τιμή σκότους, δηλαδή η τιμή της αντιστάσεως όταν αυτή δε φωτίζεται.
- Τα όρια στα οποία μεταβάλλεται η αντίσταση όταν φωτίζεται με σταθερή φωτεινή ροή.
- Ο χρόνος που απαιτείται για να πάρει η αντίσταση την τελική τιμή από τη στιγμή που θα φωτισθεί.
- Η μέγιστη τάση που επιτρέπεται να εφαρμοσθεί στα άκρα της και



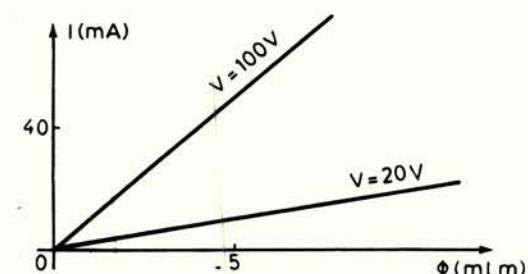
Σχ. 7.10ι.

Σχ. 7.10ια.



Σχ. 7.10ιβ.

Συμήνος χαρακτηριστικών ρεύματος-τάσεως για διάφορες τιμές φωτεινής ροής  $\Phi$ .



Σχ. 7.10ιγ.

Συμήνος χαρακτηριστικών ρεύματος-φωτεινής ροής για διάφορες τιμές τάσεως  $V$ .

— η χωρητικότητα που μπορεί να παρουσιάσει.

Οι φωτοαντιστάσεις χρησιμοποιούνται σε συστήματα συναγερμού (ειδοποίηση για ύπαρξη φλόγας), σε συστήματα αυτοματισμών και σε πολλές άλλες περιπτώσεις.

Μια από τις πιό ενδιαφέρουσες εφαρμογές τους είναι στις φωτογραφικές μηχανές για την αυτόματη ρύθμιση του διαφράγματος, ανάλογα με τη φωτεινή ένταση του περιβάλλοντος ή του αντικείμενου.

### 7.11 Φαινόμενο Hall.

Όπως έχομε αναφέρει, όταν φορτία κινούμενα βρεθούν μέσα σε μαγνητικό πεδίο, ασκείται σ' αυτά μια δύναμη (δύναμη Laplace) κάθετη προς την πορεία τους, και τα εκτρέπει από αυτή.

Όταν έχομε λοιπόν ένα κομμάτι μέταλλο ή ημιαγωγό που διαρρέεται από ρεύμα, τότε αν αυτό βρεθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο, θα ασκηθεί πάνω στους κινούμενους φορείς του μια δύναμη που θα δημιουργήσει πύκνωση των φορέων στη μια πλευρά του ημιαγωγού σε διεύθυνση κάθετη προς τη φορά κινήσεώς τους. Η πύκνωση αυτή των φορέων θα δημιουργήσει μια διαφορά δυναμικού στη διεύθυνση αυτή. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **φαινόμενο Hall** και είναι εντονότερο στους ημιαγωγούς παρά στους αγωγούς (σχ. 7.11α). Πιο αναλυτικά:

Ας υποθέσουμε ότι έχομε έγα κομμάτι από ημιαγωγό τύπου  $n$ , σε σχήμα παραλληλεπιδέου με τομή που έχει πλευρές  $d$  και  $W$  (σχ. 7.11β). Το παραλληλεπίπεδο διαρρέεται από ρεύμα φοράς  $I$  και βρίσκεται μέσα σ' ένα μαγνητικό πεδίο εντάσεως  $B$  και φοράς κάθετης προς τη διεύθυνση κινήσεως του ρεύματος όπως φαίνεται στο σχήμα. Στα κινούμενα ηλεκτρόνια (ο ημιαγωγός είναι τύπου  $n$ ) θα ασκηθεί μια δύναμη κάθετη στο επίπεδο που ορίζουν τα  $B$  και  $I$  και τέτοια, ώστε να πυκνώσουν τα ηλεκτρόνια προς την πλευρά 1, που παρουσιάζεται έτσι αρνητικότερα φορτισμένη από την πλευρά 2. Ανάμεσα στις δύο πλευρές εμφανίζεται έτσι μια διαφορά δυναμικού  $V_H$ . Η διαφορά αυτή δυναμικού λέγεται **τάση Hall**. Το ηλεκτρικό πεδίο που θα δημιουργηθεί θα έχει ένταση.

$$E = \frac{V_H}{d} \quad (7.11.1)$$

Η δύναμη που θα ασκηθεί στα κινούμενα ηλεκτρόνια, θα είναι η δύναμη Laplace:

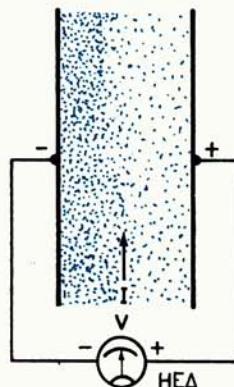
$$F = e \cdot B \cdot u \quad (7.11.2)$$

όπου  $u$  είναι η ταχύτητα κινήσεως των ηλεκτρονίων και  $e$  το φορτίο τους.

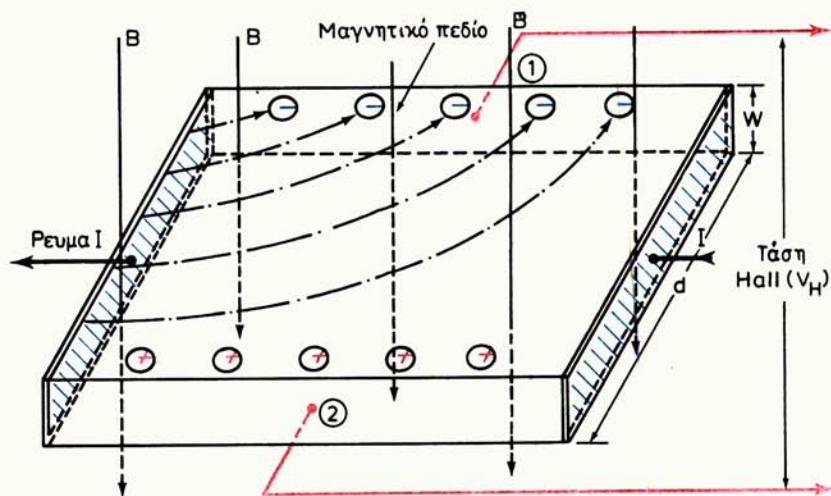
Όταν θα υπάρξει ισορροπία στη μετακίνηση των ηλεκτρονίων προς τη μια πλευρά μέσα στον ημιαγωγό, τότε η δύναμη που θα ασκεί το πεδίο  $E$  πάνω στα ηλεκτρόνια, θα είναι  $eE$  και θάναι ίση σε μέτρο, αλλά αντίθετης φοράς με τη δύναμη Laplace θα είναι δηλαδή:

$$e \cdot E = e \cdot B \cdot u \quad (7.11.3)$$

$$E = B \cdot u \quad (7.11.4)$$



Σχ. 7.11α.



Σχ. 7.11β.

Παράσταση της δημιουργίας φαινομένου Hall σε ένα ημιαγωγό τύπου N.

Αν είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων στη μονάδα του όγκου, συνδυάζοντας την 7.11.1 και την 7.11.4 όπως επίσης και τη σχέση 7.2.13, θα πάρομε:

$$u = \frac{J}{n \cdot e} \quad (7.11.5)$$

αλλά,

$$J = \frac{I}{w \cdot d} \quad (7.11.6)$$

(όπου  $w \cdot d$  το εμβαδό της διατομής του αγωγού).

$$V_H = E \cdot d \Rightarrow V_H = B \cdot u \cdot d \Rightarrow V_H = \frac{B \cdot J \cdot d}{n \cdot e} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_H = \frac{B \cdot I \cdot d}{W \cdot d \cdot n \cdot e} \Rightarrow V_H = \frac{B \cdot I}{W \cdot n \cdot e} \quad (7.11.7)$$

Μπορούμε συνεπώς από τη σχέση 7.11.7, όταν γνωρίζουμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου  $B$ , την ένταση του ρεύματος  $I$  και τη διάσταση  $W$ , να υπολογίσουμε το πλήθος των ηλεκτρονίων  $n$  στη μονάδα του όγκου, όταν μετρήσουμε την τάση Hall ( $V_H$ ). Ανάλογα ισχύουν και για τις οπές με τη διαφορά ότι, σύμφωνα με όσα είπαμε παραπάνω, η πλευρά 1 (σχ. 7.11β) θα έχει αρνητικό δυναμικό ως προς τη 2 όταν οι φορείς θα έναι κατά πλειονοτητα ηλεκτρόνια (υλικό τύπου  $n$ ), ενώ θα έχει δυναμικό θετικότερο όταν οι φορείς θα είναι κυρίως οπές (υλικό τύπου  $p$ ).

Η ποσότητα  $R_H = 1/n e$  (7.11.8) λέγεται σταθερά Hall. Η σχέση 7.11.7 ισχύει μόνο στην περίπτωση που θεωρούμε πως τα ηλεκτρόνια κινούνται όλα με την ίδια ταχύτητα. Αυτό φυσικά δε συμβαίνει. Γι' αυτό η σχέση 7.11.8 αποδεικνύεται ότι είναι:

$$R_H = \frac{3\pi}{8n \cdot e} \quad (7.11.9)$$

$$\text{οπότε } \eta \quad V_H = \frac{3p}{8n \cdot e} \frac{B \cdot I}{w} \quad (7.11.10)$$

Ξέρουμε επίσης ότι η ειδική αγωγιμότητα είναι:  $\sigma = \mu \cdot e \cdot n$   
οπότε σε συνδυασμό με την σχέση 7.11.9, γράφουμε:

$$\mu = \frac{8\sigma}{3\pi} R_H \quad (7.11.11)$$

Στην πράξη το φαινόμενο Hall έχει πλήθος εφαρμογές.

Σύμφωνα με όσα είπαμε παραπάνω, από την πολικότητα της τάσεως Hall μπορούμε να καθορίσουμε αν οι φορείς είναι κυρίως οπές ή ηλεκτρόνια.

Μπορούμε επίσης να υπολογίσουμε την ευκινησία και την πυκνότητά τους.

Πολλές εφαρμογές στηρίζονται στη σχέση της τάσεως  $V_H$  και της εντάσεως του μαγνητικού πεδίου  $B$ .

Έτσι π.χ. μπορούμε να μετρήσουμε την ισχύ ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος από την εναλλασσόμενη τάση  $V_H$  που θα δημιουργήσουν τα κάθετα μεταξύ τους ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, στα άκρα ενός κομματιού από κατάλληλο ημιαγωγό.

Στο φαινόμενο Hall στηρίζεται επίσης η λειτουργία οργάνων μέ τα οποία μπορούμε να μετρήσουμε το συνεχές ρεύμα που διαρρέει ένα αγωγό, χωρίς να τον κόψουμε για να τα παρεμβάλλομε.

### 7.12 Ασκήσεις.

- Σ' ένα κομμάτι αλουμινίου η πυκνότητα των ηλεκτρονίων είναι  $n = 18 \times 10^{28}$  ηλεκτρονία/ $m^3$ , η ειδική του αντίσταση  $\rho = 3.44 \mu\Omega \cdot cm$ . Ποια θα είναι η ευκινησία των ελευθέρων ηλεκτρονίων μέσα σ' αυτό;

2. Το εύρος της απαγορευμένης ζώνης σε ένα καθαρό ημιαγωγό είναι  $2,4\text{eV}$ . Ποιο πρέπει να είναι το μέγιστο μήκος κύματος μιας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, για να μπορεί αυτή να μετακινεί η-λεκτρόνια από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας;
  3. Ράβδος από χαλκό με διάμετρο  $1\text{mm}$  διαρρέεται από ρεύμα με ένταση  $2\text{A}$ . Αν η πυκνότητα των ηλεκτρονίων είναι  $8,45 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$  ποια θα είναι η ταχύτητα κινήσεώς τους;
  4. Αν η ράβδος του προηγούμενου προβλήματος έχει μήκος  $2,5\text{m}$  και στα άκρα της εφαρμοσθεί διαφορά δυναμικού  $0,1 \text{ V}$  να καθορισθεί:
    - α) Η ευκινησία των ηλεκτρονίων.
    - β) Η ειδική αγωγιμότητα του σύρματος.
  5. Πόσο θα είναι το μήκος διαχύσεως των οπών σε γερμάνιο που η σταθερά διαχύσεως των οπών είναι  $D_p = 46,6 \text{ cm}^2 \text{ sec}$  και ο χρόνος ζωής τους  $T_p = 100 \mu\text{sec}$ ;
  6. Η σταθερά Hall σε ένα μέταλλο είναι  $1,6 \times 10^{-4} \text{ cm}^3 \text{ Coulomb}^{-1}$ . Ποια είναι η πυκνότητα των ελευθέρων ηλεκτρονίων μέσα σ' αυτό;
-

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ο ΓΔΟΟ

### ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΔΙΟΔΟΙ

#### 8.1 Γενικά.

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με την κατασκευή, λειτουργία και εφαρμογές διαφόρων τύπων διόδων που έχουν βάση υλικά ημιαγωγών. Τις διόδους αυτές, για να ξεχωρίζουν από τις ηλεκτρονικές διόδους παλιάς τεχνικής, τις ονομάζαμε **κρυσταλλοδιόδους**. Το πλήθος των εφαρμογών τους όμως και η σπανιότητα των ηλεκτρονικών διόδων έχουν καθιερώσει σήμερα την απλή ονομασία **δίοδος** για τις κρυσταλλοδιόδους. Κι εμείς αυτή την ονομασία θα χρησιμοποιήσουμε παρακάτω.

#### 8.2 Επαφή P-N.

Είναι δυνατό κομμάτι καθαρού ημιαγωγού, με κατάλληλη επεξεργασία ενός μέρους του, να γίνει π.χ. τύπου P και στη συνέχεια το υπόλοιπο τύπου N. Το σύνολο αυτό αποτελεί μια επαφή P-N.

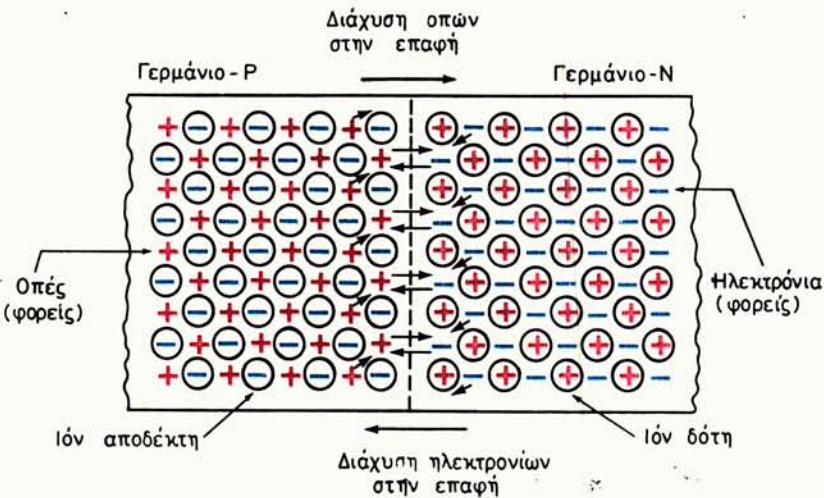
Η επαφή P-N παρουσιάζει ιδιότητες που έχουν πολύ μεγάλη σημασία στην τεχνολογία των ημιαγωγών.

Παρόλο που στην πραγματικότητα το πέρασμα από το τμήμα P στο τμήμα N (ή και το αντίστροφο φυσικά) σε μια επαφή P-N, γίνεται προοδευτικά, για να μελετήσουμε πιο εύκολα τα φαινόμενα που παρουσιάζονται σε μια επαφή P-N, θα θεωρήσουμε πως το τμήμα του ημιαγωγού του ενός τύπου διαδέχεται απότομα το τμήμα του άλλου τύπου (σχ. 8.2α), θα θεωρήσουμε δηλαδή πως τα δυο τμήματα χωρίζονται μεταξύ τους από μια νοητή επίπεδη επιφάνεια.

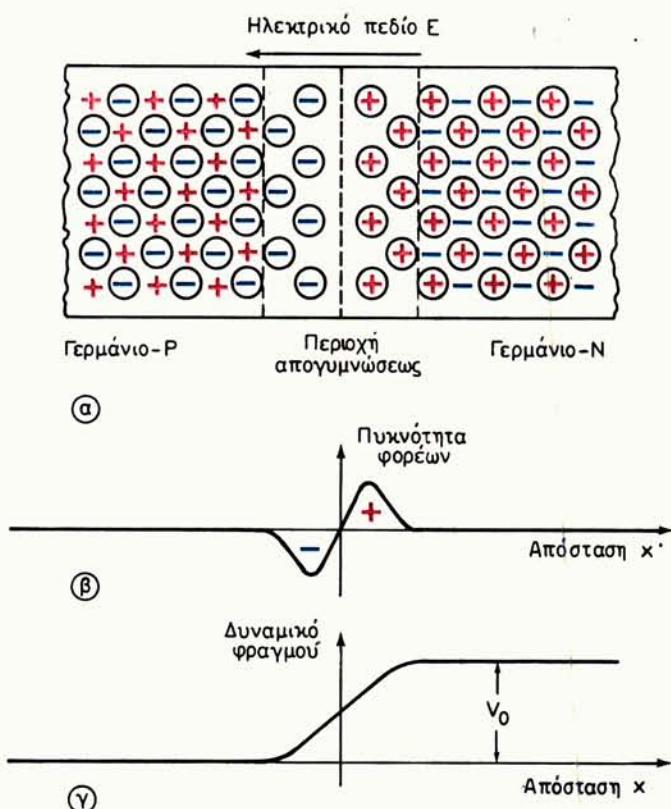
Έχομε λοιπόν καταρχήν ένα τμήμα, με πλειονότητα φορέων οπές, σε επαφή με άλλο τμήμα που έχει πλειονότητα φορέων ηλεκτρόνια. Επόμενο είναι να σημειωθεί το φαινόμενο της διαχύσεως (παράγρ. 7.9.3). Οπές δηλαδή από το τμήμα P θα κινηθούν προς το τμήμα N και ηλεκτρόνια από το τμήμα N θα κινηθούν προς το P. Όταν όμως οι οπές βρεθούν στο τμήμα N, που έχει πλήθος ηλεκτρονίων, επανασυνδέονται με ηλεκτρόνια γειτονικά στη διαχωριστική επιφάνεια. Το ίδιο συμβαίνει και με τα ηλεκτρόνια που θα βρεθούν στο τμήμα P.

Η επανασύνδεση αυτή δημιουργεί γύρω από τη διαχωριστική επιφάνεια μια περιοχή στην οποία υπάρχουν σχεδόν μόνο ακίνητα ιόντα (θετικά στο τμήμα N και αρνητικά στο τμήμα P) (σχ. 8.2β). Μια περιοχή δηλαδή απογυμνωμένη από φορείς. Την περιοχή αυτή ονομάζομε **περιοχή απογυμνώσεως**.

Το εύρος της περιοχής αυτής σε κάθε τμήμα (P ή N) της επαφής είναι αντιστρόφως ανάλογο της πυκνότητας των προσμίξεων.



**Σχ. 8.2α.**  
Ανάπαρασταση μιας επαφής P-N.



**Σχ. 8.2β.**

- α) Αναπαράσταση της καταστάσεως σε μια επαφή P-N, από πλευράς φορτίων μετά την αποκατάσταση της θερμοδυναμικής ισορροπίας. β) Κατανομή ιόντων στην περιοχή φραγμού. γ) Μεταβολή δυναμικού  $V_0$ .

Παρακάτω θα θεωρήσομε ότι η πυκνότητα των προσμίξεων είναι η ίδια σε κάθε τμήμα της επαφής. Για συνήθεις πυκνότητες προσμίξεων το εύρος αυτό είναι περίπου  $10^{-8}$  m.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, στην περιοχή απογυμνώσεως υπάρχουν σχεδόν μόνο ακίνητα ιόντα, θετικά από τη μια πλευρά και αρνητικά από την άλλη. Έτσι στην περιοχή αυτή εμφανίζεται ένα ηλεκτρικό πεδίο και μάλιστα με φορά τέτοια που να παρεμποδίζεται η παραπέρα κίνηση φορέων λόγω διαχύσεως, από το ένα τμήμα στο άλλο. Εμποδίζεται δηλαδή η κίνηση οπών, λόγω διαχύσεως, από το P στο N και ηλεκτρονίων από το N στο P. Το πεδίο αυτό οφείλεται σε μια διαφορά δυναμικού  $V_0$ , που αναπτύχθηκε ανάμεσα στα υλικά P και N της επαφής και που η πολικότητά του είναι τέτοια, ώστε να αντιτίθεται στην κίνηση των φορέων λόγω διαχύσεως. Το δυναμικό  $V_0$  ονομάζεται **δυναμικό φραγμού**. Η τιμή του είναι μερικά δεκατά του βολτ [σχ. 8.2β(γ)].

Η κίνηση των οπών προς το υλικό N και των ηλεκτρονίων προς το υλικό P, λόγω διαχύσεως, δημιουργεί ένα ρεύμα, το **ρεύμα διαχύσεως**, που θα το συμβολίζομε  $I_F$ .

Μέσα στην περιοχή απογυμνώσεως είναι δυνατό να βρεθούν και φορείς (οπές και ηλεκτρόνια) που να μην προέρχονται από διάχυση. Οι φορείς αυτοί προέρχονται, κυρίως, από θερμική διάσπαση δεσμών των ατόμων του καθαρού υλικού (π.χ. του Ge ή Si). Το πλήθος των φορέων αυτών εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Βέβαια ο αριθμός αυτών των φορέων μπορεί να αυξηθεί και με παροχή φωτεινής, ηλεκτρικής ή και άλλης μορφής ενέργειας.

Οι φορείς αυτοί μέσα στην περιοχή απογυμνώσεως κινούνται με την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου της περιοχής. Η κίνηση θα είναι, για τις οπές, από την πλευρά των θετικών ιόντων (τμήμα τύπου N) προς την πλευρά των αρνητικών ιόντων (τμήμα τύπου P). Τα ηλεκτρόνια θα κινούνται αντίθετα.

Έχομε δηλαδή μια κίνηση οπών και ηλεκτρονίων ανάστροφη από την κίνησή τους λόγω διαχύσεως. Δημιουργείται έτσι ένα άλλο ρεύμα, που θα το ονομάζομε **ανάστροφο ρεύμα**, αντίθετο προς το ρεύμα λόγω διαχύσεως. Το ρεύμα αυτό θα το συμβολίζομε  $I_0$ .

Στην περίπτωση θερμικής σταθερότητας τα ρεύματα  $I_F$  και  $I_0$  είναι ίσα κατά μέτρο αλλά αντίθετης φοράς, με συνέπεια το τελικό ρεύμα της επαφής να είναι μηδέν. Πρέπει επίσης να σημειώσουμε ότι αν θελήσουμε να μετρήσουμε διάφορά δυναμικού στα άκρα των τμημάτων P και N της επαφής P-N, το δργανό θα δείχνει μηδέν, ως συνέπεια του νόμου του Volta.

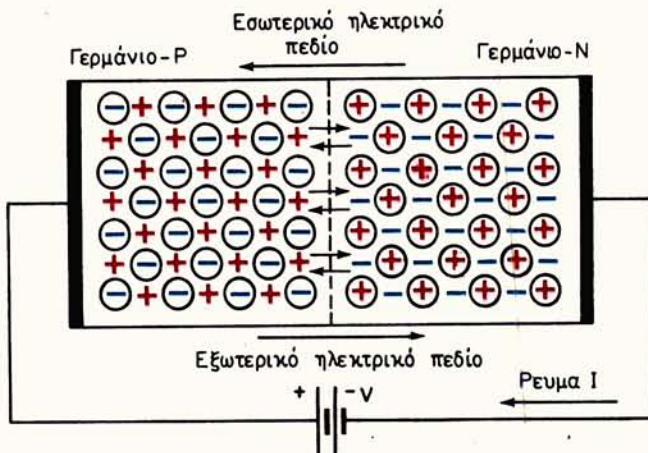
Όσα είπαμε παραπάνω ισχύουν για μιαν **ανοικτή** επαφή P-N. Μια επαφή δηλαδή που στα άκρα της δεν εφαρμόζεται τάση.

### 8.3 Επαφή P-N με εξωτερική τάση.

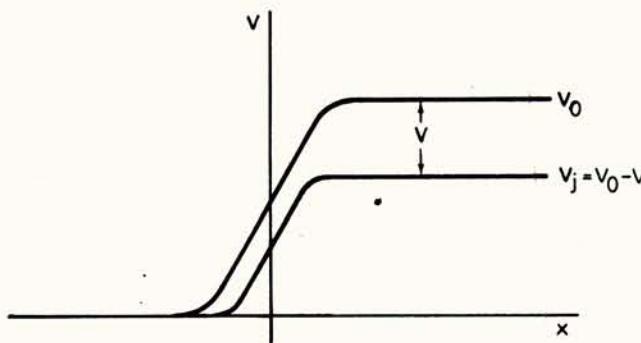
Μια ηλεκτρική πηγή συνεχούς τάσεως μπορεί να συνδεθεί στα άκρα μιας επαφής P-N με δύο τρόπους: Με την ορθή φορά και με την ανάστροφη.

#### 8.3.1 Πόλωση κατά την ορθή φορά.

Στην περίπτωση αυτή συνδέομε το θετικό πόλο της πηγής με το τμήμα P και τον αρνητικό με το τμήμα N (σχ. 8.3a). Με τη σύνδεση αυτή ωθούνται οι οπές από το



Σχ. 8.3α.  
Επαφή P-N με πόλωση κατά την ορθή φορά.



Παράσταση του υποβιβασμού του φραγμού δυναμικού στην ορθή πόλωση.

τμήμα P προς το τμήμα N και τα ηλεκτρόνια από το τμήμα N προς το τμήμα P. Υποβοηθούνται έτσι οι φορείς να υπερνικήσουν το φραγμό δυναμικού, με αποτέλεσμα να περνούν λόγω διαχύσεως περισσότεροι φορείς από την περιοχή απογυμνώσεως που γίνεται στενότερη.

Η σύνδεση κατά την ορθή φορά υποβιβάζει το φραγμό δυναμικού περίπου κατά V, δση δηλαδή είναι η τάση της εξωτερικής πηγής (σχ. 8.3β). Θα είναι δηλαδή:

$$V_j \approx V_0 - V \quad (8.3.1)$$

Το  $V_j$  είναι ο νέος φραγμός δυναμικού που θα είναι ίσος προς τη διαφορά του αρχικού μείον την τάση της εξωτερικής πηγής V, αν θεωρήσουμε αμελητέες τις πτώσεις τάσεως μέσα στα υλικά P και N.

Αφού υποβιβάζεται ο φραγμός δυναμικού, αυξάνεται το ρεύμα διαχύσεως  $I_F$ .

Το ανάστροφο ρεύμα  $I_0$  στην περίπτωση αυτή μένει πρακτικά σταθερό, δση η ενέργεια (θερμική, φωτεινή ή άλλη) που προσφέρεται στην επαφή μένει σταθερή.

Στο κύκλωμα έτσι θα κυκλοφορεί ένα ρεύμα:

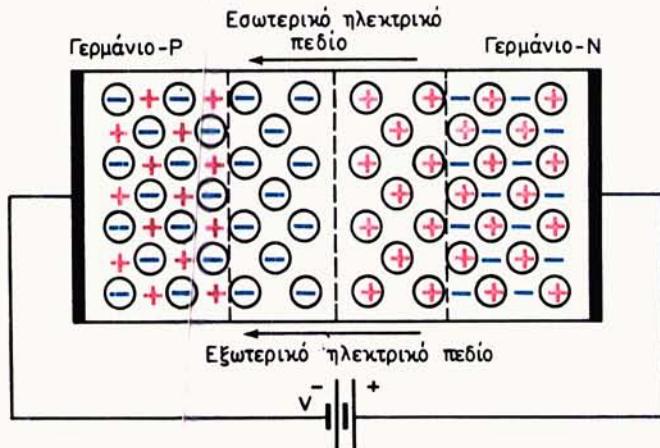
$$I_D = I_F - I_0 \quad (8.3.2)$$

Η τιμή του ρεύματος εξαρτάται, κυρίως, από την τάση  $V$  που εφαρμόζεται εξωτερικά.

### 8.3.2 Πόλωση κατά την ανάστροφη φορά.

Αν η πηγή συνδεθεί έτσι ώστε ο θετικός πόλος της να συνδέεται με το τρίμα  $N$  και ο αρνητικός με το τρίμα  $P$  τότε έχομε ανάστροφη πόλωση (σχ. 8.3γ).

Στην περίπτωση αυτή οι οπές έλκονται από τον αρνητικό πόλο και τα ηλεκτρόνια από το θετικό, με αποτέλεσμα να διευρυνθεί η περιοχή απογυμνώσεως.



Σχ. 8.3γ.

Επιφή P-N με ανάστροφη πόλωση.

Ο φραγμός δυναμικού θα είναι:

$$V_j \simeq V_0 - (-V) = V_0 + V \quad (8.3.3)$$

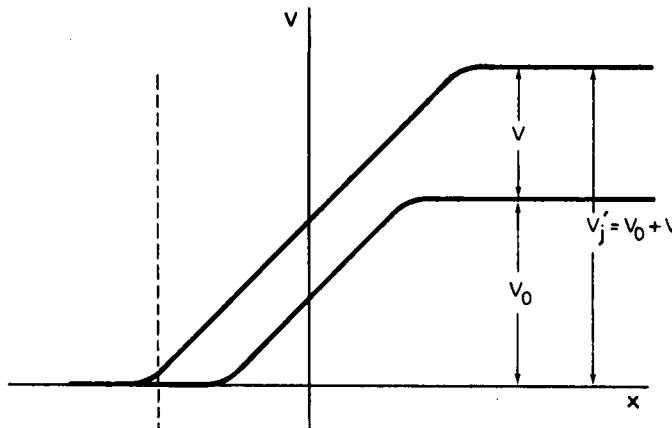
Άρα θα αυξηθεί περίπου κατά  $V$  (σχ. 8.3δ).

Αποτέλεσμα της πολώσεως αυτής είναι η μεγάλη ελάττωση του ρεύματος διαχύσεως  $I_F$  έτσι που πρακτικά να μπορούμε να θεωρήσομε ότι:

$$I_D \simeq -I_0 \quad (8.3.4)$$

Το ρεύμα δηλαδή που επικρατεί τώρα στο κύκλωμα είναι το ανάστροφο ρεύμα  $I_0$ .

Αυξάνοντας την ανάστροφη τάση, με σταθερή θερμοκρασία, το ανάστροφο ρεύμα αρχικά αυξάνει αλλά γρήγορα παίρνει μια σταθερή τιμή που τη διατηρεί μεσα σε ορισμένα όρια ανάστροφης τάσεως. Πέρα από τα όρια αυτά, εμφανίζονται άλλα φαινόμενα όπως θα δούμε παρακάτω. Εξαιτίας αυτής της σταθερότητας που παρουσιάζει το ανάστροφο ρεύμα  $I_0$  ονομάζεται και **ρεύμα κόρου**. Το ανάστροφο ρεύμα βέβαια μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία και γενικά με την παροχή εξωτερικής ενέργειας.



Σχ. 8.36.

Παράσταση της αυξήσεως του φραγμού δυναμικού στην ανάστροφη πόλωση.

Πρέπει να σημειώσουμε ότι το  $I_0$  μέσα σε καθορισμένα όρια τάσεων και θερμοκρασιών είναι γενικά ένα πολύ μικρό ρεύμα.

### 8.3.3 Φαινόμενα Zener – Χιονοστιβάδας.

Αν επιμείνουμε στην αύξηση της ανάστροφης τάσεως σε μια επαφή P-N θα παρατηρήσουμε, για κάποια τιμή της, απότομη αύξηση του ανάστροφου ρεύματος. Η αύξηση αυτή οφείλεται στον πολλαπλασιασμό των φορέων (όπων και ηλεκτρονίων) που προέρχονται από τον καθαρό ημιαγωγό. Δυο έννοιες αιτίες αυτού του πολλαπλασιασμού: Πρώτο η δημιουργία ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου μέσα στην περιοχή απογυμνώσεως που έχει ως αποτέλεσμα τη διάσπαση πολλών δεσμών από το καθαρό υλικό, και φυσικά τη δημιουργία πλήθους φορέων. Σ' αυτή την περίπτωση έχουμε το φαινόμενο Zener. Η άλλη αιτία είναι η διάσπαση δεσμών μέσα στην περιοχή απογυμνώσεως από τις **κρούσεις** ηλεκτρονίων που κινούνται με αρκετή κινητική ενέργεια. Το ένα ηλεκτρόνιο αποσπά άλλο και έχουμε έτσι δύο, τέσσερα κ.ο.κ. Δημιουργείται δηλαδή μια αλυσιδωτή διάσπαση δεσμών με συνέπεια την απότομη αύξηση των φορέων. Το φαινόμενο αυτό λέγεται **φαινόμενο χιονοστιβάδας** (avalanche).

Η τάση στην οποία εμφανίζεται, και στις δύο περιπτώσεις, η απότομη αύξηση του ρεύματος, λέγεται τάση εκκενώσεως (breakdown). Στις εφαρμογές, η τάση αυτή λέγεται **τάση Zener**, ανεξάρτητα με το αν πρόκειται για φαινόμενο Zener ή χιονοστιβάδας.

Η τάση Zener επηρεάζεται από τή θερμοκρασία.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η επαφή P-N παρουσιάζει διαφορετική αγωγιμότητα σε κάθε περίπτωση πολώσεως. Έτσι έχουμε μεγάλη αγωγιμότητα κατά την ορθή φορά και πολύ μικρή (ως την τάση διασπάσεως) κατά την ανάστροφη.

### 8.4 Χωρητικότητα επαφής P-N.

#### 8.4.1 Στατική χωρητικότητα φραγμού $C_T$ .

Ας πάρομε την περίπτωση που η επαφή P-N είναι ανοικτή, χωρίς δηλαδή εξω-

τερική τάση. Στην περιοχή απογυμνώσεως, όπως είδαμε, υπάρχουν ακίνητα φορτία που οφείλονται στα ιόντα δότη και αποδέκτη. Τα ιόντα αυτά βρίσκονται σε καθορισμένες θέσεις. Οι φορείς είναι σπάνιοι μέσα στην περιοχή απογυμνώσεως και έτσι η περιοχή είναι ένας μονωτικός χώρος.

Έχουμε λοιπόν ένα διπολικό στρώμα από αρνητικά ιόντα (τμήμα P) και θετικά ιόντα (τμήμα N), μέσα σ' ένα μονωτικό χώρο. Το διπολικό αυτό στρώμα, που στα άκρα του επικρατεί μια διαφορά δυναμικού  $V_0$ , ισοδυναμεί μ' ένα φορτισμένο πυκνωτή με χωρητικότητα:

$$C_T = \frac{\Delta Q}{\Delta V_0} \quad (8.4.1)$$

Η χωρητικότητα αυτή είναι η χωρητικότητα επαφής.

Η τιμή της χωρητικότητας αυτής εξαρτάται από το εμβαδό S της διαχωριστικής επιφάνειας ανάμεσα στα τμήματα P και N, από το εύρος της περιόχης απογυμνώσεως l και από τη διηλεκτρική σταθερά ε του ημιαγωγού. Θα είναι δηλαδή:

$$C_T = \epsilon \frac{S}{l}$$

Αν  $V$  είναι η τάση που εφαρμόζομε εξωτερικά στα άκρα της επαφής P-N τότε η τάση  $V_j$  στην περιοχή απογυμνώσεως θα είναι:

$$V_j \approx V_0 - V \quad (8.4.2)$$

Η χωρητικότητα  $C_T$  εξαρτάται από την τάση  $V_j$  και κατά συνέπεια από την τάση  $V$  που εφαρμόζεται εξωτερικά.

Για επαφές που η μετάβαση από την περιοχή P στην περιοχή N είναι απότομη η χωρητικότητα  $C_T$  είναι ανάλογη προς  $(1/V_j)^{1/2}$ , ενώ για επαφές που η μετάπτωση από την περιοχή P στην περιοχή N γίνεται βαθμιαία η χωρητικότητα  $C_T$  είναι ανάλογη προς  $(1/V_j)^{1/3}$ .

Και στη μια περίπτωση και στην άλλη, μεταβάλλοντας την  $V_j$ , δηλαδή μεταβάλλοντας τη  $V$ , μεταβάλλεται η χωρητικότητα C. Η ιδιότητα αυτή της επαφής P-N επιτρέπει τη χρησιμοποίησή της ως ελεγχόμενης χωρητικότητας. Μπορούμε δηλαδή μεταβάλλοντας την εξωτερική τάση να μεταβάλλομε τη χωρητικότητα.

Σ' αυτή στηρίζεται η λειτουργία των διόδων μεταβλητής χωρητικότητας (varicaps ή varactors).

#### 8.4.2 Χωρητικότητα από διάχυση.

Στη χωρητικότητα φραγμού  $C_T$  θεωρήσαμε πως τα φορτία του ισοδύναμου πυκνωτή οφείλονται μόνο στα απογυμνωμένα ακίνητα ιόντα. Η χωρητικότητα αυτή είναι η μόνη χωρητικότητα που εμφανίζεται στην επαφή όταν αυτή είναι ανάστροφα πολωμένη. Όταν όμως πολώσουμε την επαφή κατά την ορθή φορά, όπως είδαμε, περισσότερες οπές από το υλικό P θα περάσουν στο N και περισσότερα ηλεκτρόνια από το N στο P λόγω διαχύσεως. Πολλοί από τους φορείς αυτούς θα επανασυνδεθούν. Άλλοι όμως μπορεί να μένουν μέσα στην περιοχή απογυμνώσεως σαν πρόσθετα φορτία που οφείλονται στην παρουσία, φορέων τώρα, και όχι ιόντων.

Τα φορτία αυτά (οπές στο τμήμα Ν και ηλεκτρόνια στο τμήμα Ρ) δρουν σαν να ήταν φορτία αποθηκευμένα στους οπλισμούς ενός πυκνωτή. Εμφανίζεται δηλαδή τώρα μια πρόσθετη χωρητικότητα που οφείλεται στη συγκέντρωση φορέων, που προέρχονται από διάχυση, μέσα στην περιοχή απογυμνώσεως. Η χωρητικότητα αυτή ονομάζεται **χωρητικότητα διαχύσεως**  $C_D$  και είναι:

$$C_D = T_{np} \theta_{dn} + T_{pn} \theta_{dp} \quad (8.4.3)$$

όπου:  $T_{np}$  ο μέσος χρόνος ζωής των ηλεκτρονίων μέσα στην περιοχή Ρ.

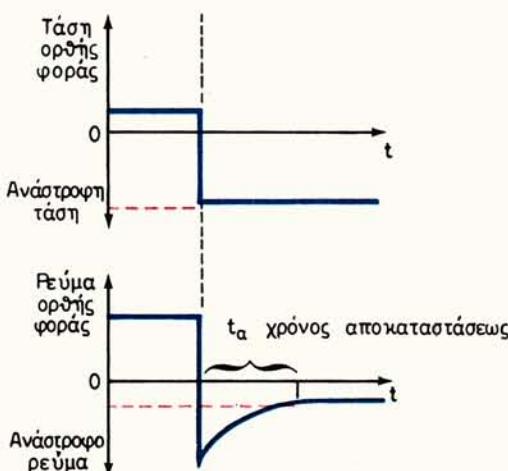
$T_{pn}$  ο μέσος χρόνος ζωής των οπών μέσα στην περιοχή Ν.

$\theta_{dn}$  και  $\theta_{dp}$  οι διαγωγιμότητες της επαφής για το ρεύμα ομάδας ηλεκτρονί-

ων και οπών αντίστοιχα, ( $g_d = \frac{dI}{dV} / V_Q = \text{σταθ.}$ ) για τάση ηρεμίας  $V_Q$ .

Η χωρητικότητα από διάχυση  $C_D$  είναι πολύ μεγαλύτερη από τη στατική χωρητικότητα φραγμού  $C_T$ , όταν η δίδοση είναι πολωμένη κατά την ορθή φορά. Σ' αυτή την περίπτωση η  $C_T$  αμελείται. Αντίθετα, στην ανάστροφη πόλωση η  $C_T >> C_D$  και η χωρητικότητα από διάχυση μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Όταν η επαφή είναι πολωμένη κατά την ορθή φορά και αναστραφεί απότομα η πολικότητά της, το ρεύμα δεν παίρνει αμέσως την τιμή κόρου του ανάστροφου ρεύματος, αλλά για κάποιο χρονικό διάστημα έχει τιμές μεγαλύτερες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όταν η πόλωση γίνει ανάστροφη, οι πρόσθετοι φορείς που ήταν αποθηκευμένοι στην περιοχή απογυμνώσεως, λόγω χωρητικότητας διαχύσεως, τείνουν να επιστρέψουν στο τμήμα από το οποίο είχαν ξεκινήσει όταν η πόλωση ήταν ορθή.

Η επιστροφή τους αυτή γίνεται με κίνηση ομόρροπη με την κίνηση που έχουν οι φορείς του ανάστροφου ρεύματος. Στο κανονικό ανάστροφο ρεύμα προσθέτεται και το ρεύμα των συγκεντρωμένων στην περιοχή απογυμνώσεως φορέων. Έτσι το συνολικό ανάστροφο ρεύμα θα είναι αρχικά μεγαλύτερο από το κανονικό και θα μειώνεται βαθμιαία ώσπου να εξαντληθούν τα αποθέματα των επιπλέον φορέων μέσα στην περιοχή απογυμνώσεως, οπότε παίρνει την τιμή του κόρου (σχ. 8.4). Αυτό ισοδυναμεί με εκφόρτιση της  $C_D$ .



Σχ. 8.4.

Διάρκεια χρόνου αποκαταστάσεως σε κύκλωμα πάλμων.

Ο χρόνος που μεσολαβεί από τη στιγμή της εφαρμογής της ανάστροφης τάσεως μέχρι το ανάστροφο ρεύμα να πάρει την τιμή κόρου, λέγεται **χρόνος αποκαταστάσεως**. Ο χρόνος αυτός έχει μεγάλη σημασία στις εφαρμογές και πολλές φορές δίνεται από τον κατασκευαστή για διόδους και τρανζίστορ.

Η χωρητικότητα διαχύσεως παίζει σημαντικό ρόλο στη λειτουργία σε υψηλές συχνότητες. Όσο μεγαλύτερη είναι τόσο η λειτουργία της επαφής περιορίζεται σε χαμηλότερες συχνότητες.

Η χωρητικότητα  $C_D$  είναι μερικών  $\mu F$  για χαμηλές τάσεις κατά την ορθή φορά, ενώ αυξάνει εκθετικά όταν αυξάνεται η τάση. Για συνηθισμένες εφαρμογές, η τιμή της χωρητικότητας αυτής είναι περίπου  $20 \mu F$ .

Η χωρητικότητα διαχύσεως επηρεάζεται από τη θερμοκρασία.

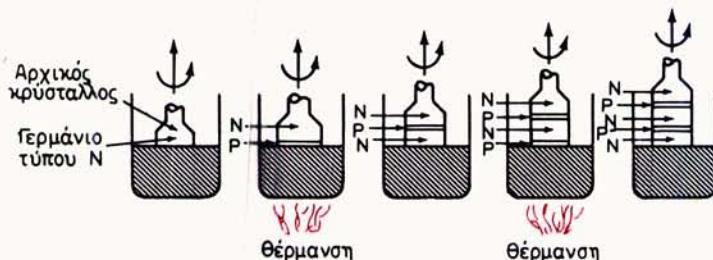
## 8.5 Κατασκευή της επαφής P-N.

Η τεχνική της δημιουργίας μιας επαφής P-N ακολουθεί διάφορες μεθόδους που αποτελούν και τη βάση για την παραγωγή κρυσταλλοδιόδων και τρανζίστορ διαφόρων κατηγοριών. Παρακάτω θα περιγράψουμε σύντομα τους βασικούς τρόπους δημιουργίας μερικών τέτοιων επαφών.

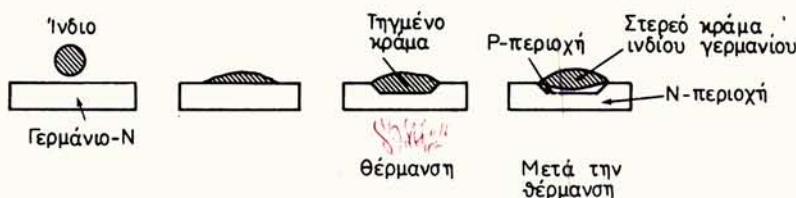
### 8.5.1 Επαφή με ανάπτυξη (*grown junction*).

Με τη μέθοδο άυτή βυθίζομε ενα κομμάτι καθαρού ημιαγωγού σ' ένα τήγμα ημιαγωγού που μπορούμε να το κάνομε εναλλακτικά τύπου P ή N. Περιστρέφομε το κομμάτι του καθαρού ημιαγωγού και ταυτόχρονα το ανυψώνομε (σχ. 8.5α) με σταθερή ταχύτητα. Το λιωμένο υλικό κρυσταλλώνεται στην εξωτερική επιφάνεια του καθαρού υλικού, καθώς αυτό βγαίνει από το τήγμα και ψύχεται, ακολουθώντας παράλληλα και την κρυσταλλική δομή του. Σχηματίζεται έτσι ένα στρώμα π.χ. N (άν το τήγμα ήταν εμπλουτισμένο με άτομα δότη). Αν τώρα στη συνέχεια εμπλουτίσουμε το τήγμα με άτομα αποδέκτη θα σχηματισθεί, συνέχεια με το στρώμα N, ένα στρώμα P. Έτσι αλλάζοντας διαδοχικά τον τύπο του τήγματος επιτυγχάνομε εναλλακτικά τμήματα P και N. Κόβοντας ύστερα π.χ. ανά 2 (P και N) έχομε διόδους P-N, ή ανά τρία (P-N-P ή N-P-N) όπότε έχομε τρανζίστορ.

Το είδος αυτό της επαφής επιτρέπει τη διέλευση μεγάλων σχετικώς ρευμάτων, αλλά παρουσιάζει μεγάλη χωρητικότητα και είναι επίσης δύσκολη η μαζική παραγωγή της.



Σχ. 8.5α.  
Σχηματισμός επαφής με ανάπτυξη (*grown junction*).



Σχ. 8.5β.  
Μέθοδος επαφής κράματος.

### 8.5.2 Επαφή κράματος (*alloy junction*).

Σ' αυτή χρησιμοποιείται μια λεπτή πλακέτα, π.χ. Ge, τύπου N, πάνω στην οποία σε κατάλληλη υποδοχή τοποθετείται ένα δισκίο από τρισθενές στοιχείο, π.χ. In (ίνδιο) (σχ. 8.5β).

Το σύνολο θερμαίνεται έτσι ώστε να λιώσει το In, αλλά να μη λιώσει η πλακέτα του Ge. Έτσι στην περιοχή της επιφάνειας επαφής σχηματίζεται κράμα In-Ge. Αν ψύξομε το σύνολο αυτό, θα δούμε ότι στην περιοχή της επιφάνειας επαφής In-Ge έχει δημιουργηθεί μια επαφή P-N.

Τα σχετικά μεγέθη πλακέτας και δισκίου εκλέγονται ανάλογα με τον προορισμό της διόδου. Με την τοποθέτηση και άλλου δισκίου στην αντίθετη πλευρά της πλακέτας, κατασκευάζομε και τρανζίστορ.

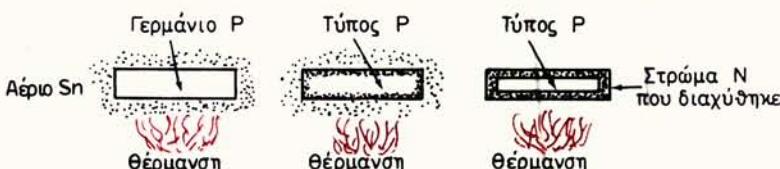
Η κατασκευή αυτή επιτρέπει μαζικότερη παραγωγή. Οδηγεί επίσης σε λειτουργία σε υψηλότερες συχνότητες. Ωστόσο και αυτή δεν είναι εύκολη στην κατασκευή μικροποιημένων και ολοκληρωμένων διατάξεων.

### 8.5.3 Επαφή διαχύσεως (*diffusion junction*).

Στην περίπτωση αυτή η εξωτερική επιφάνεια μιας πλακέτας από ημιαγωγό, τοποθετείται σε ατμόσφαιρα κατάλληλου υλικού που επιθυμούμε να διαχυθεί μέσα στη μάζα του υλικού της πλακέτας (σχ. 8.5γ).

Μια πλακέτα π.χ. από υλικό τύπου P τοποθετείται μέσα σε ατμόσφαιρα αντιμονίου σε υψηλή θερμοκρασία. Τα άτομα του αντιμονίου διαχέονται μέσα στή μάζα του ημιαγωγού της πλακέτας μεταβάλλοντας την περιοχή που εισδύουν από περιοχή P σε περιοχή N, με συνέπεια το σχηματισμό μιας επαφής P-N.

Ελέγχοντας το ποσοστό των προσμίξεων από το χρόνο εκθέσεως της πλακέτας στους ατμούς του αντιμονίου και τη θερμοκρασία, μπορούμε να καθορίσουμε με σχετική ακρίβεια τις επιδόσεις της επαφής που δημιουργείται.

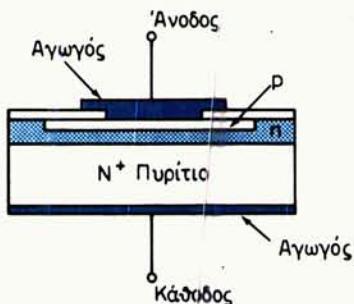


Σχ. 8.5γ.  
Διαδοχικές φάσεις σχηματισμού επαφής διαχύσεως.

Επίσης με τη μέθοδο αυτή μπορούμε να καλύψουμε την εξωτερική επιφάνεια της πλακέτας με στρώμα  $\text{SiO}_2$ . Μπορούμε, με κατάλληλη φωτογραφική τεχνική, να αφαιρέσουμε τμήματα από το στρώμα αυτό και να δημιουργήσουμε στις περιοχές που αποκαλύφθηκαν με διάχυση, διάφορα στοιχεία ενός κυκλώματος, όπως πυκνωτές, αντιστάσεις, διόδους, τρανζίστορ κλπ. Με τη μέθοδο αυτή μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα ολόκληρο κύκλωμα μέσα στην πλακέτα.

#### 8.5.4 Ανάπτυξη με επαλληλία (επιταξιακή τεχνική, epitaxial growth).

Σ' αυτό το είδος της επαφής υπάρχει μια βάση με υλικό τύπου η με μεγάλη πυκνότητα προσμίξεων, που παίζει το ρόλο προεκτάσεως του ακροδέκτη της επαφής. Πάνω σ' αυτή τη βάση δημιουργείται με διάχυση ένα λεπτό στρώμα από υλικό τύπου η (σχ. 8.5δ) και κατόπιν, όπου χρειάζεται ένα άλλο στρώμα από υλικό τύπου Ρ. Στη συνέχεια προσθέτονται και οι μεταλλικοί ακροδέκτες. Φυσικά μπορεί τα είδη των υλικών να είναι αντίθετα τοποθετημένα (ρ βάση, η και ρ στρώμα).



**Σχ. 8.5δ.**  
Επαφή με ανάπτυξη επαλληλίας.  
(επιταξιακή τεχνική).

Η τεχνική αυτή επιτρέπει την κατασκευή διόδων ή τρανζίστορ που θα λειτουργούν με μεγαλύτερες τάσεις ή ρεύματα καθώς και σε υψηλότερες συχνότητες.

### 8.6 Χαρακτηριστικά κρυσταλλοδιόδων.

#### 8.6.1 Γενικά.

Οι ιδιότητες της επαφής P-N οδήγησαν στην κατασκευή των **κρυσταλλοδιόδων** (ή διόδων όπως θα λέμε απλούστερα) **επαφής**. Μια τέτοια δίοδος είναι βασικά μια επαφή P-N κατάλληλα επεξεργασμένη, έτσι ώστε να μπορεί να συνδεθεί εύκολα στο κύκλωμα, να παρουσιάζει αντοχή στις μηχανικές ταλαιπωρίες και να επηρεάζεται όσο γίνεται λιγότερο από τις μεταβολές της θερμοκρασίας.

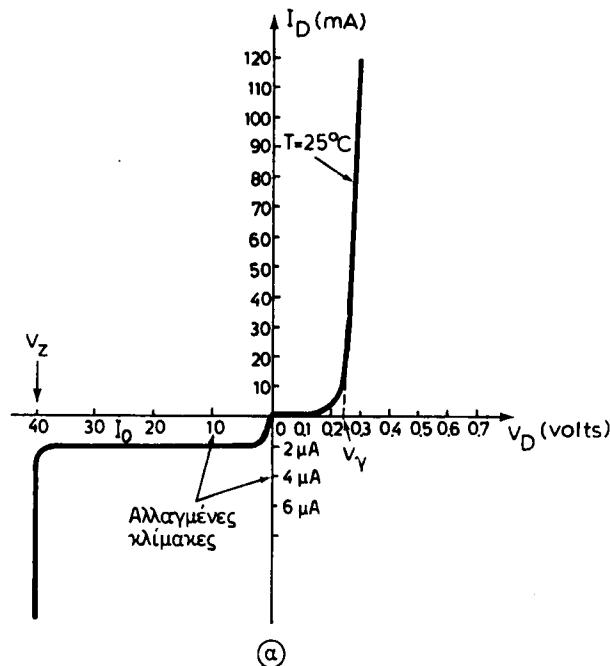
Πριν από τις διόδους επαφής χρησιμοποιούνταν δίοδοι κατασκευασμένες από μια μεταλλική ακίδα που ακουμπούσε πάνω σ' ένα κομμάτι ημιαγωγό. Βελτιωμένες τέτοιες κατασκευές υπάρχουν σήμερα στο εμπόριο και είναι οι **δίοδοι ακίδας**.

Σχετικά μ' αυτές θα μιλήσουμε παρακάτω.

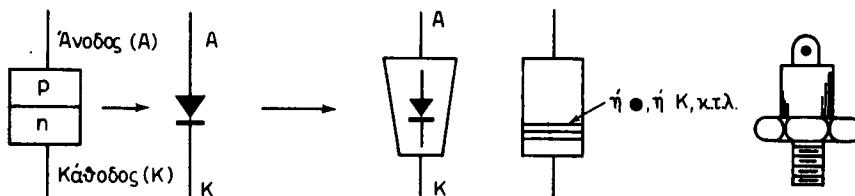
#### 8.6.2 Χαρακτηριστική δίοδου.

Σύμφωνα με όσα ξέρουμε για την επαφή P-N, αν έχουμε σε μια δίοδο επαφής πόλωση κατά την ορθή φορά, θα έχουμε εύκολη διάβαση του ρεύματος, μικρή δηλαδή αντίσταση. Με πόλωση κατά την ανάστροφη το ρεύμα θα είναι πολύ μικρό (θα έχουμε πολύ μεγάλη αντίσταση) και θα μένει σταθερό για μια περιοχή αναστρόφων τάσεων.

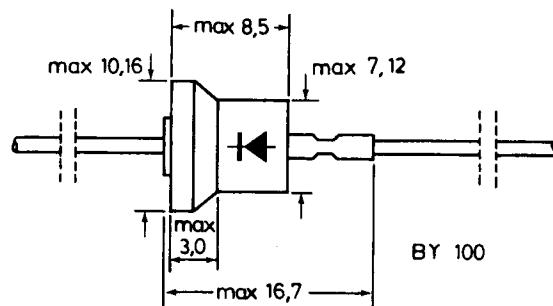
Στο σχήμα 8.6α φαίνεται μια τυπική χαρακτηριστική καμπύλη που δίνει τη μετα-



(a)



(b)



(c)

Σχ. 8.6α.

- α) Τυπική χαρακτηριστική διόδου επαφής. β) Συμβολισμοί και σήμανση διόδων. γ) Θέση διόδου μέσα στο περίβλημά της με ενδεικτικές διαστάσεις σε mm.

βολή του ρεύματος  $I_D$  σε συνάρτηση με τη μεταβολή της τάσεως  $V_D$  σε μια δίοδο Ge. Βλέπομε από τη χαρακτηριστική αυτή ότι όταν αρχίζουμε να αυξάνουμε την τάση κατά την ορθή φορά το ρεύμα στην αρχή παραμένει πολύ μικρό και κατόπιν αυξάνεται απότομα όταν η τάση πάρει τιμές μερικών δεκάτων του βόλτη. Η αύξηση στη συνέχεια του ρεύματος κατά την ορθή φορά σε συνάρτηση με την τάση γίνεται εκθετικά. Η τάση  $V_y$  στην οποία αυξάνεται απότομα το ρεύμα είναι χαρακτηριστική του είδους της διόδου. Αν δηλαδή π.χ είναι δίοδος Ge ή Si. Η τάση αυτή έχει άμεση σχέση με το φραγμό δυναμικού  $V_0$  της επαφής P-N και είναι γύρω στα 0,3 V για συνηθισμένες διόδους Ge και στα 0,7 V για διόδους Si.

Αν τώρα ξεκινώντας από το Ο αρχίσουμε να αυξάνουμε την τάση ανάστροφα τότε το ανάστροφο ρεύμα παίρνει σύντομα την τιμή κόρου. Η τιμή αυτή μένει περίπου σταθερή μέχρι που να φθάσουμε στην τάση Zener ( $V_z$ ).

Το ρεύμα τότε αυξάνεται απότομα, ενώ η τάση στα άκρα της διόδου μένει σταθερή.

Στη χαρακτηριστική του σχήματος οι άξονες των τάσεων και των ρευμάτων έχουν βαθμολογηθεί με διαφορετικές κλίμακές για να αποδοθεί η σχετική διαφορά τους κατά την ορθή και την ανάστροφη πόλωση.

Από τη χαρακτηριστική φαίνεται ότι σε μια συνηθισμένη δίοδο για τάσεις ορθής φοράς μερικών δεκάτων του βόλτη το ρεύμα είναι αρκετά mA.

Αντίθετα, στην ανάστροφη τάση, το ρεύμα είναι της τάξεως μερικών μΑ για αρκετές δεκάδες βόλτη.

Η εξίσωση που δίνει το ρεύμα  $I_D$  σε μια κρυσταλλοδίοδο σε συνάρτηση με την τάση  $V_D$  που εφαρμόζεται στα άκρα της είναι:

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{eV_D}{\eta KT}} - 1 \right) \quad (8.6.1)$$

όπου:  $I_D$  σε A όταν το ανάστροφο ρεύμα  $I_0$  σέ A.

ε το φορτίο του ηλεκτρονίου σε Cb.

$V_D$  η τάση στα άκρα της διόδου σε V.

K η σταθερά Boltzmann σε Joule/K.

T η απόλυτη θερμοκρασία και

η ένας συντελεστής που είναι ίσος με τη μονάδα για το Ge και ίσος με 2 για το Si για μικρά ρεύματα, ενώ για μεγαλύτερα γίνεται και στο Si ίσος με 1.

Για απόφυγη συγχύσεως η βάση των νεπερίων λογαρίθμων σημειώνεται εδώ με ε.

$$\frac{eV_D}{\eta KT}$$

Για σχετικά μεγάλες τάσεις κατά την ορθή φορά ( $V_D$  θετική) ο όρος ε γίνεται πολύ μεγαλύτερος από τη μονάδα και μπορούμε να γράψουμε:

$$I_D \simeq I_0 e^{\frac{eV_D}{\eta KT}} \quad (8.6.2)$$

Επίσης για σχετικά μεγάλες τιμές ( $V_D$ ) σε ανάστροφη πόλωση ( $V_D$  αρνητικό), ο

εκθετικός όρος που είναι τώρα:

$$\epsilon = \frac{1}{\frac{\theta |V_D|}{nKT}}$$

για μεγάλες σχετικά  $V_D$  τείνει στο μηδέν και μπορούμε να γράψουμε:

$$I_D \approx -I_0 \quad (8.6.3)$$

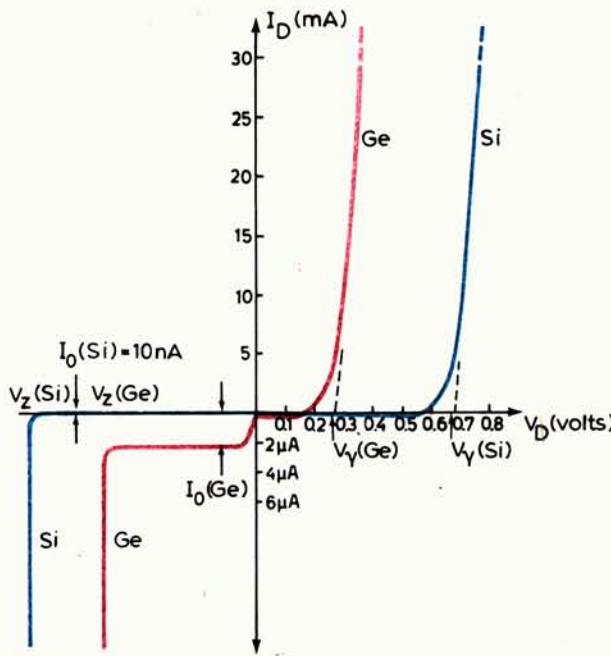
Το ρεύμα δηλαδή είναι το ανάστροφο ρεύμα κόρου  $I_0$ .

Χρήσιμο είναι να πούμε ότι για θερμοκρασία περιβάλλοντος γύρω στους  $25^\circ C$ , δηλαδή  $T = 298^\circ$ , ο παράγοντας  $\theta/KT \approx 39 V^{-1}$  και μπορούμε να γράψουμε με μεγάλη προσέγγιση τη σχέση (8.6.1) για μεγάλα σχετικά ρεύματα ( $\eta = 1$ ):

$$I_D \approx I_0 (\epsilon^{39V_D} - 1) \quad (8.6.4)$$

Η σχέση αυτή είναι χρήσιμη στην πράξη.

Στο σχήμα 8.6β φαίνονται δύο χαρακτηριστικές διόδων Ge και Si για τις ίδιες εφαρμογές. Φαίνεται η διαφορά της τάσεως  $V_Y$  στην οποία αυξάνεται απότομα το ρεύμα σε κάθε είδους δίοδο, όπως και η διαφορά στο ανάστροφο ρεύμα και την τάση  $V_Z$ .



Σχ. 8.6β.

Σύγκριση χαρακτηριστικών τυπικών διόδων πυριτίου και γερμανίου.

### 8.6.3 Επίδραση της θερμοκρασίας στο ρεύμα της διόδου.

Το ανάστροφο ρεύμα κόρου  $I_0$  όπως είπαμε επηρεάζεται πολύ από τη θερμοκρασία. Αυτό φαίνεται και από τη σχέση

$$I_o = BT^m \frac{eVg}{kT} \quad (8.6.5)$$

που δίνει το ανάστροφο ρεύμα.

Στη σχέση (8.6.5) είναι  $B$  μια σταθερά και  $e$  το φορτίο ηλεκτρονίου.

Για το Ge:  $\eta = 1$      $m = 2$      $Vg = 0,785$  V

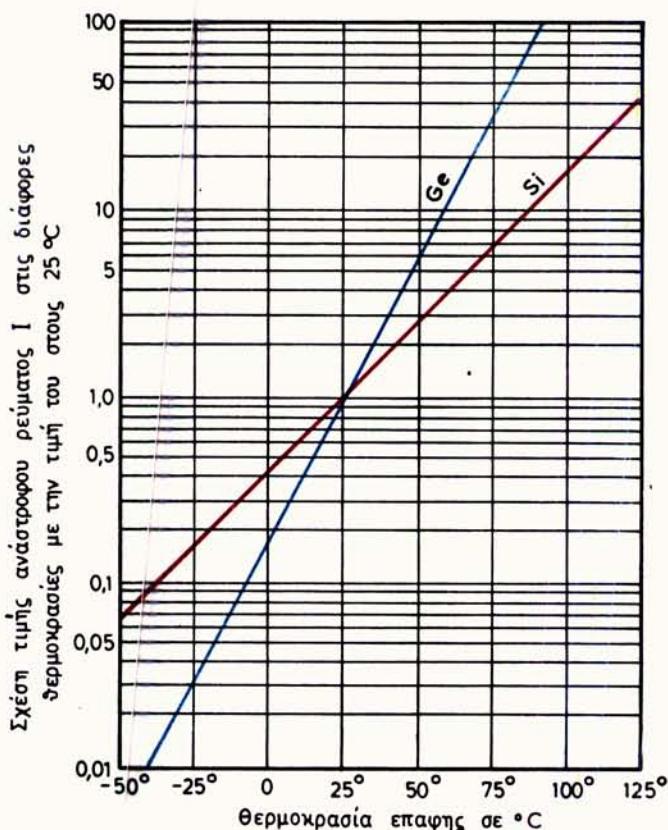
Για το Si:  $\eta = 2$      $m = 1,5$      $Vg = 1,21$  V

Η επίδραση των μεταβολών της θερμοκρασίας είναι σχετικά εντονότερη στη λειτουργία κατά την ανάστροφη πόλωση από ότι στη λειτουργία με πόλωση κατά την ορθή φορά.

Πειραματικά έχει βρεθεί ότι το ανάστροφο ρεύμα και στους δύο τύπους διόδων, Ge ή Si, διπλασιάζεται περίπου για κάθε  $10^\circ\text{C}$  αυξηση της θερμοκρασίας.

Το ανάστροφο ρεύμα στις διόδους Ge είναι πολύ μεγαλύτερο από το ανάστροφο ρεύμα στις διόδους Si, του ίδιου προορισμού. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε  $10^\circ\text{C}$  το ανάστροφο ρεύμα σε μια δίοδο Ge θα γίνεται πολύ μεγαλύτερο από το ανάστροφο ρεύμα σε μια δίοδο Si.

Στο διάγραμμα (σχ. 8.6γ) δίνεται η μεταβολή του ανάστροφου ρεύματος σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία σε μια δίοδο Ge και σε μια δίοδο Si σχετικά με το ανάστροφο ρεύμα που είχαν στους  $25^\circ\text{C}$ .



Σχ. 8.6γ.

Και το ρεύμα κατά την ορθή φορά επηρεάζεται από τη θερμοκρασία αλλά όπως είπαμε πολύ λιγότερο. Η μεταβολή εδώ φαίνεται καλύτερα ως μεταβολή της τάσεως  $V_y$  στην οποία αυξάνει απότομα το ρεύμα. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, τόσο η τάση αυτή γίνεται μικρότερη.

Στην πράξη, σε μεγάλη προσέγγιση, η μεταβολή αυτή είναι:

$$\Delta V = -2,5 \frac{\text{mV}}{\text{°C}}$$

είτε για δίοδο Ge πρόκειται είτε για δίοδο Si.

Οι δίοδοι Si μπορούν να εργασθούν με θερμοκρασίες μέχρι 200°C, ενώ οι Ge μέχρι 100°C.

#### 8.6.4 Ανάστροφη τάση.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, όταν σε μια δίοδο αρχίζουμε να αυξάνουμε την ανάστροφη τάση, αρχικά θα έχουμε το ρεύμα κόρου και όταν φθάσουμε στην τάση Zener  $V_z$  το ρεύμα γίνεται απότομα μεγάλο.

Την ιδιότητα αυτή εκμεταλλεύμαστε στις ειδικά κατασκευασμένες για σταθεροποίηση τάσεως διόδους, τις **διόδους Zener**. Με αυτές θα ασχοληθούμε παρακάτω.

Στις κοινές διόδους όμως, η λειτουργία στην τάση Zener πρέπει να αποφεύγεται. Η μέγιστη ανάστροφη τάση με την οποία μπορεί να λειτουργήσει μια κοινή δίοδος πριν φθάσει στην περιοχή της τάσεως Zener είναι κατασκευαστικό χαρακτηριστικό και δίνεται από τον κατασκευαστή. Αυτή συμβολίζεται με διάφορους τρόπους, όπως PIV (Peak Inverse Voltage) ή PRV (Peak Reverse Voltage) ή  $V_{BR}$  (Breakdown) ή  $V_{RM}$  (Reverse Maximum).

Γενικά οι δίοδοι πυριτίου μπορούν να λειτουργήσουν με μεγαλύτερες ανάστροφες τάσεις από αντίστοιχες διόδους Ge.

Οι ανάστροφες τάσεις στις διόδους Si μπορεί να φθάσουν τα 1000 V ενώ στις Ge τα 400 V.

Ο κατασκευαστής, εκτός από άλλα, δίνει συνήθως και τα παρακάτω λειτουργικά χαρακτηριστικά.

- Τη μέγιστη τάση κατά την ορθή φορά [ $V_{F(max)}$ ] (για ορισμένο ρεύμα και θερμοκρασία).
- Το μέγιστο ρεύμα κατά την ορθή φορά  $I_{F(max)}$  (για ορισμένη θερμοκρασία).
- Το μέγιστο ανάστροφο ρεύμα  $I_{o(max)}$  (για ορισμένη θερμοκρασία).
- Τη μέγιστη ανάστροφη τάση (για ορισμένη θερμοκρασία).
- Τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας.

Εκτός από αυτά δίνονται κι άλλα στοιχεία, όπως π.χ. η περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας, η στάθμη θορύβου, η χωρητικότητα κλπ. Στο τέλος του βιβλίου θα δώσουμε δείγμα ενός φύλλου με στοιχεία λειτουργίας διόδου που δίνει ο κατασκευαστής της.

#### Εφαρμογή 1.

Να υπολογισθεί το ρεύμα που θα διαρρέει μια δίοδο επαφής Ge σε θερμοκρασία 25°C όταν στα άκρα της τεθεί τάση: a)  $V_D = 0,3$  V και b)  $V_D = -0,3$  V. Το ανάστροφο ρεύμα κόρου είναι  $I_0 = 10 \mu\text{A}$ .

### Απάντηση.

Από τη σχέση (8.6.4) θα έχομε για  $V_D = 0,3 \text{ V}$

$$I_D = 10 \times 10^{-6} (\epsilon^{39 \times 0,3} - 1) \text{ A} \approx 10 \times 10^{-6} \times \epsilon^{11,7} \text{ A} = 1,2 \text{ A}$$

Το ρεύμα λοιπόν κατά την ορθή φορά θα είναι:  $I_D \approx 1,2 \text{ A}$

Για  $V_D = -0,3 \text{ V}$  θα είναι:

$$I_D = 10 \times 10^{-6} (\epsilon^{-39 \times 0,3} - 1) \text{ A} = 10 \times 10^{-6} (\epsilon^{-11,7} - 1) \text{ A} =$$

$$= 10 \times 10^{-6} \left( \frac{1}{\epsilon^{11,7}} - 1 \right) \approx -10 \times 10^{-6} \left( \text{επειδή } \frac{1}{\epsilon^{11,7}} \ll 1 \right)$$

Θα έχουμε λοιπόν (αφού  $I_D = -I_0$ ) οτι  $I_0 \approx 10 \mu\text{A}$ .

Το ανάστροφο ρεύμα δηλαδή στην τάση αυτή θα έχει ήδη φθάσει στην τιμή κόρου.

### Εφαρμογή 2.

Σε μια δίοδο Ge το ανάστροφο ρεύμα  $I_0$  στους  $27^\circ\text{C}$  είναι  $10^{-6} \text{ A}$ . Να χαραχθεί η χαρακτηριστική της διόδου για θερμοκρασίες  $27^\circ\text{C}$  και  $47^\circ\text{C}$ . Για το Ge έχομε:  $V_g = 0,72 \text{ eV}$ .

### Απάντηση.

Από τη σχέση (8.6.5) θα έχομε για τα ανάστροφα ρεύματα στους  $27^\circ\text{C}$  και τους  $47^\circ\text{C}$ .

$$I_{0_{27^\circ\text{C}}} = K T_1^2 \epsilon^{\frac{-eVg}{KT_1}} \quad \text{οταν} \quad T_1 = 300^\circ\text{K}$$

$$I_{0_{47^\circ\text{C}}} = K T_2^2 \epsilon^{\frac{-eVg}{KT_2}} \quad \text{οταν} \quad T_2 = 320^\circ\text{K}$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει οτι:

$$I_{0_{47^\circ\text{C}}} = I_{0_{27^\circ\text{C}}} \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^2 \epsilon^{\left[ \frac{eVg}{K} \left( \frac{T_2 - T_1}{T_2 T_1} \right) \right]}$$

οπότε το ανάστροφο ρεύμα στους  $47^\circ\text{C}$  θα είναι  $I_{0_{47^\circ\text{C}}} = 6,16 \times 10^{-6} \text{ A}$

Με τη βοήθεια της σχέσεως (8.6.4)  $I_D = I_0 (\epsilon^{39V_D} - 1)$  δίνοντας διάφορες τιμές στην  $V_D$  μπορούμε να χαράξουμε την καμπύλη  $I_D = f(V_D)$  για ανάστροφα ρεύματα  $I_{0_{27^\circ\text{C}}}$  και  $I_{0_{47^\circ\text{C}}}$ .

### 8.6.5 Ισχύς διόδου.

Η ισχύς που καταναλίσκεται σε μια δίοδο δίνεται από τη σχέση:

$$P_D = V_D \cdot I_D \quad (8.6.6)$$

όπου τα  $V_D$  και  $I_D$  είναι οι τιμές τάσεως στα άκρα της διόδου και ρεύματος που τη διαρρέει, στο σημείο λειτουργίας.

Ο κατασκευαστής δίνει συνήθως τη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ  $P_{Dmax}$  για τη διόδο. Αυτό σημαίνει ότι το γινόμενο  $V_D \cdot I_D$  δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή  $P_{Dmax}$ . Η τάση όμως  $V_D$  και το ρεύμα  $I_D$  δεν πρέπει να υπερβαίνουν τις καθορισμένες από τον κατασκευαστή μέγιστες τιμές.

Η ισχύς που καταναλίσκεται στη διόδο οδηγεί στην αύξηση της θερμοκρασίας της επαφής P-N. Η αύξηση της θερμοκρασίας της επαφής είναι τόσο μεγαλύτερη σού δυσκολότερα γίνεται η απαγωγή της θερμότητας από την επαφή στο περιβάλλον.

Η δυσκολία απαγωγής της θερμότητας στο περιβάλλον χαρακτηρίζεται από ένα μέγεθος που λέγεται θερμική αντίσταση  $\Theta$ . Η τιμή του  $\Theta$  δίνεται σε  $^{\circ}\text{C/W}$  και εκφράζει τη μεταβολή της θερμοκρασίας της επαφής σε βαθμούς Κελσίου σχετικά με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος για κάθε Watt καταναλισκόμενης ισχύος.

Η τιμή της  $\Theta$  είναι χαρακτηριστική του μέσου μέσα στο οποίο διαδίδεται η θερμότητα.

Η θερμοκρασία της επαφής  $T_j$  συνδέεται με την ισχύ που καταναλώνεται  $P_D$  και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος  $T_a$  με τη σχέση:

$$T_j = \Theta P_D + T_a \quad (8.6.7)$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι:

$$P_D = \frac{T_j - T_a}{\Theta} \quad (8.6.8)$$

πού μπορεί να γραφεί για τις μέγιστες τιμές:

$$P_{Dmax} = \frac{T_{jmax} - T_a}{\Theta} \quad (8.6.9)$$

Από τη σχέση (8.6.9) φαίνεται ότι για ένα περιβάλλον με θερμική αντίσταση  $\Theta$ , η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς για μια διόδο  $P_{Dmax}$  θα εξαρτάται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος  $T_a$  αφού η  $T_{jmax}$  είναι κατασκευαστικό χαρακτηριστικό της διόδου. Φυσικά η  $P_{Dmax}$  θα είναι τόσο μεγαλύτερη σού η θερμική αντίσταση  $\Theta$  είναι μικρότερη.

Γι' αυτό στις κατασκευές όπου χρησιμοποιούνται διόδοι ισχύος, αυτές τοποθετούνται σε βάσεις από υλικό πολύ μικρής θερμικής αντιστάσεως, όπως π.χ. βάσεις από χαλκό ή αλουμίνιο με μεγάλη μάζα και επιφάνεια. Οι βάσεις αυτές λέγονται συνήθως θερμοαπαγωγοί.

### **Εφαρμογή.**

Για τη διόδο Si BAX78 δίνεται ως μέγιστη θερμοκρασία επαφής  $T_{jmax} = 190^{\circ}\text{C}$ . Αυτή βρίσκεται σε περιβάλλον με θερμική αντίσταση  $\Theta = 0,4 \ ^{\circ}\text{C/mW}$ . Αν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι  $T_a = 20^{\circ}\text{C}$  ποιά είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς και ποιο το μέγιστο συνεχές ρεύμα αν στα άκρα της διόδου εφαρμόζεται τάση κατά την ορθή φορά 1 V;

### Απάντηση.

Από τη σχέση (8.6.9) προκύπτει ότι:

$$P_{Dmax} = \frac{T_{jmax} - T_a}{\Theta} = \frac{190^\circ C - 20^\circ C}{0,4^\circ C/mW} \simeq 425 mW = 0,425 W$$

Επίσης:

$$P_{Dmax} = V \cdot I_{max} \Rightarrow I_{max} = \frac{P_{Dmax}}{V} \quad \text{δούτε} \quad I_{max} = \frac{0,425 W}{1} = 0,425 A$$

### 8.6.6 Συμβολισμός διόδων.

Ο συμβολισμός που χρησιμοποιείται συνήθως για τις διόδους και η θέση της διόδου μέσα στο περίβλημά της και η τάξη του μεγέθους συνηθισμένων διαστάσεων φαίνεται στο σχήμα 8.6a (β)(γ).

### 8.6.7 Ευθεία φόρτου.

Έστω ότι έχομε συνδεσμολογήσει στο κύκλωμα του σχήματος 8.6δ(α) μια δίοδο που έχει τη χαρακτηριστική του σχήματος 8.6δ(β).

Αν εφαρμόσουμε τον κανόνα του Kirchoff στο κύκλωμα, θα έχομε:

$$V = V_D + V_{R_L} \quad \text{ή} \quad V_D = V - V_{R_L} \quad (8.6.10)$$

όπου  $V_{R_L} = I_D R_L$ .

Η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$V_D = V - I_D R_L \Rightarrow I_D = -\frac{1}{R_L} V_D + \frac{V}{R_L} \quad (8.6.11)$$

Η σχέση (8.6.11) είναι μια εξίσωση που παριστάνει ευθεία γραμμή σ' ένα σύστημα αξόνων που έχουν τετμημένη  $V_D$  και τεταγμένη  $I_D$ . Σε διάφορες τιμές της  $V_D$  θα αντιστοιχούν τιμές του  $I_D$ . Η ευθεία αυτή, που είναι η ευθεία φόρτου, τέμνει τους αξόνες  $V_D$  και  $I_D$ .

Για να βρούμε σε ποιο σημείο τέμνει τον αξόνα  $V_D$  θα θέσουμε στην εξίσωση (8.6.11):  $I_D = 0$ .

$$\text{Τότε} \quad 0 = -\frac{1}{R_L} V_D + \frac{V}{R_L} \Rightarrow V_D = V$$

Άρα η ευθεία φόρτου τέμνει τον αξόνα των τάσεων  $V_D$  σε ένα σημείο που αντιστοιχεί στην τάση της πηγής  $V$ .

Το σημείο που τέμνει τον αξόνα των ρευμάτων  $I_D$  βρίσκεται αν στη σχέση (8.6.11) θέσουμε  $V_D = 0$ , οπότε:

$$I_D = \frac{V_D}{R_L}$$

Η ευθεία φόρτου δηλαδή τέμνει τον αξόνα  $I_D$  σε σημείο που αντιστοιχεί σε

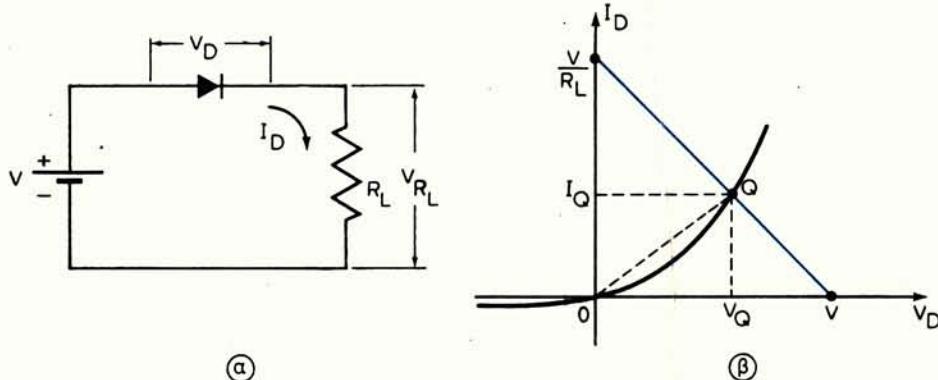
ρεύμα ίσο προς το πηλίκο της τάσεως της πηγής  $V$  διά της αντιστάσεως φόρτου  $R_L$ .

Το σημείο  $Q$  που η ευθεία φόρτου τέμνει τη χαρακτηριστική της διόδου είναι το σημείο ηρεμίας. Η τάση  $V_Q$  και το ρεύμα  $I_Q$  που αντιστοιχούν στο σημείο αυτό είναι η τάση και το ρεύμα ηρεμίας αντίστοιχα.

### Εφαρμογή.

Δίνεται το κύκλωμα του σχήματος 8.6ε και η χαρακτηριστική της διόδου που είναι σ' αυτό.

Να βρεθεί το σημείο ηρεμίας και η ισχύς πάνω στην αντίσταση  $R$ .



Σχ. 8.66.

### Απάντηση.

Σχεδιάζουμε την ευθεία φόρτου. Αυτή θα τέμνει τον άξονα των τάσεων στο σημείο  $V = 1$  V και τον άξονα των ρευμάτων στο σημείο:

$$I_D = \frac{V}{R_L} = \frac{1}{40} = 2,5 \times 10^{-2} \text{ A}$$

ή

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

Το σημείο ηρεμίας  $Q$  αντιστοιχεί σε τάση ηρεμίας  $V_Q = 0,4$  V και σε ρεύμα ηρεμίας  $I_Q = 15$  mA.

Η ισχύς στην αντίσταση φόρτου  $R_L$  θα είναι

$$P_R = I_Q^2 R = (15 \times 10^{-3})^2 \times 40 \text{ A}^2 \Omega = 15^2 \times 10^{-6} \times 40 \text{ W}$$

$$P_R = 225 \times 4 \times 10^{-6} \Rightarrow P_R = 0,009 \text{ W}$$

$$P_R = 9 \text{ mW}$$

### 8.6.8 Αντίσταση διόδου.

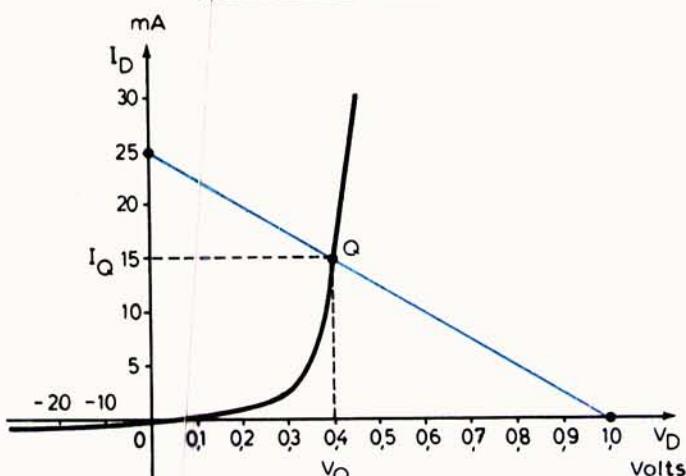
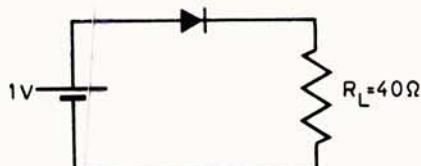
Όπως και στη δίοδο ηλεκτρονική λυχνία θα διακρίνομε κι εδώ τη στατική και τη δυναμική αντίσταση.

Τη στατική αντίσταση  $r_{dc}$  θα την υπολογίζουμε για κάθε σημείο της καμπύλης σαν το πηλίκο της τάσεως  $V_D$  που αντιστοιχεί σ' αυτό το σημείο δια του αντίστοιχου ρεύματος  $I_D$ . Θα είναι δηλαδή:

$$r_{dc} = \frac{V_D}{I_D} \quad (8.6.12)$$

Φυσικά η ενδιαφέρουσα τιμή της στατικής αντιστάσεως θα είναι αυτή που αντιστοιχεί στο σημείο ηρεμίας  $Q$  (σχ. 8.6στ). Θα είναι δηλαδή:

$$r_{dc} = \frac{V_{DQ}}{I_{DQ}}$$

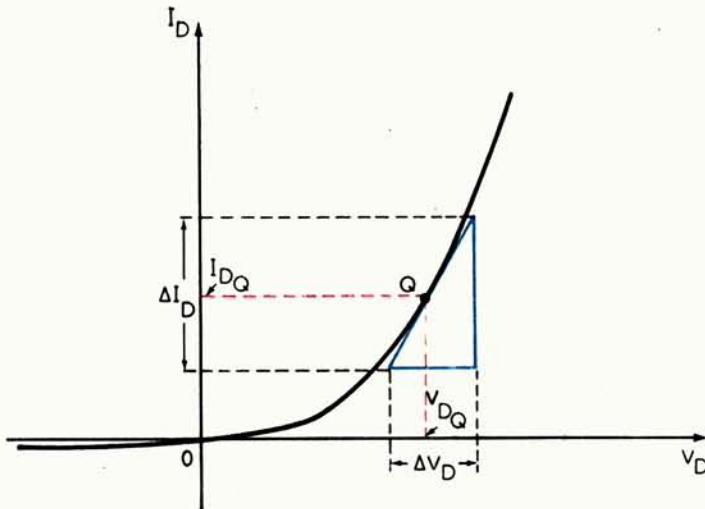


Σχ. 8.6.

Η στατική αντίσταση της διόδου κατά την ορθή φορά και πέρα από την τάση  $V_V$  είναι σχετικά μικρή μερικές δεκάδες  $\Omega$ .

Αντίθετα, κατά την ανάστροφη φορά η αντίσταση είναι πολύ μεγάλη, δηλαδή μερικά  $M\Omega$ . Οπωσδήποτε δύναμης μικρότερη από αυτή των διόδων κενού που είναι πρακτικά άπειρη. Φυσικά η τιμή της αντιστάσεως αυτής μεταβάλλεται με το σημείο ηρεμίας. Ωστόσο αν οι μεταβολές του σημείου ηρεμίας είναι μικρές η στατική αντίσταση μπορεί να θεωρηθεί σταθερή.

Η δυναμική αντίσταση ορίζεται και εδώ όπως και στη δίοδο κενού. Στο σημείο που θέλουμε να υπολογίσουμε τη δυναμική αντίσταση φέρνουμε εφαπτομένη (σχ. 8.6στ). Η κλίση της εφαπτομένης αυτής, που είναι το πηλίκο μιας μικρής μεταβολής  $\Delta V_D$  της τάσεως στα άκρα της διόδου προς την αντίστοιχη μεταβολή  $\Delta I_D$  του



Σχ. 8.6στ.

ρεύματος, δίνει τη δυναμική αντίσταση. Θα είναι δηλαδή η δυναμική αντίσταση:

$$r_{ac} = \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D} \quad (8.6.13)$$

Από την εξίσωση 8.6.4 με διαφόριση προκύπτει ότι για μια δίοδο στη θερμοκρασία των  $25^\circ\text{C}$  η δυναμική αντίσταση μπορεί να δοθεί σε  $\Omega$  από ένα προσεγγιστικό τύπο:

$$r_{ac} \approx \frac{26 \text{ mV}}{I_D} \quad (8.6.14)$$

όπου  $I_D$  το ρεύμα στο σημείο ηρεμίας στο οποίο μετρούμε την αντίσταση και που μπαίνει στη σχέση σε mA.

### **Εφαρμογή.**

Να βρεθεί γραφικά η στατική και η δυναμική αντίσταση στο σημείο λειτουργίας  $Q$  της διόδου του σχήματος 8.6ζ.

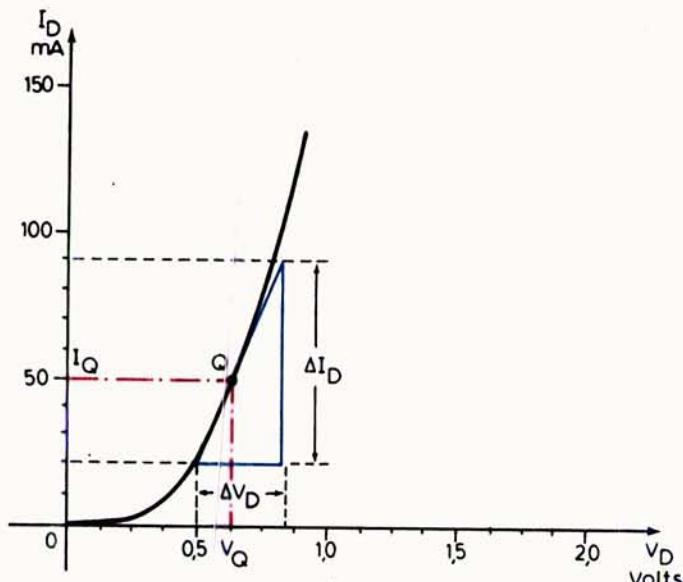
### **Απάντηση.**

α) Η αντίσταση θα είναι:

$$r_{dc} = \frac{V_Q}{I_Q} = \frac{0,6 \text{ V}}{50 \times 10^{-3} \text{ A}} = 12 \Omega$$

β) Η δυναμική αντίσταση θα είναι:

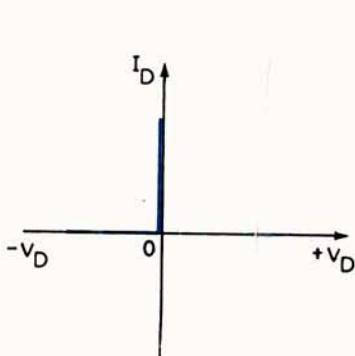
$$r_{ac} = \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D} \approx \frac{0,3 \text{ V}}{70 \times 10^{-3} \text{ A}} \approx 4,3 \Omega$$



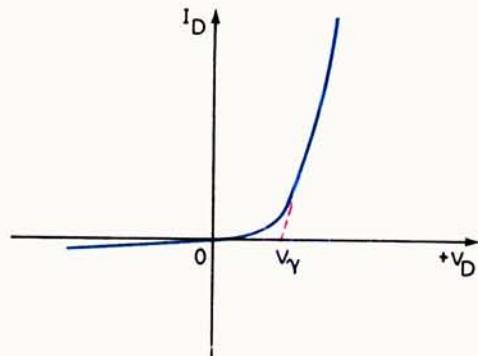
Σχ. 8.6ζ.

### 8.6.9 Ισοδύναμο κύκλωμα διόδου.

Η δίοδος θα ήταν ιδανική αν η χαρακτηριστική της είχε τη μορφή του σχήματος 8.6η. Θα ήταν ισοδύναμη δηλαδή με ένα ιδανικό διακόπτη, με μηδενική αντίσταση κατά την ορθή φορά και άπειρη κατά την ανάστροφη. Η πραγματική όμως χαρακτηριστική της διόδου είναι διαφορετική. Επιχειρώντας μια γραφική προσέγγιση στη χαρακτηριστική αυτή μπορούμε να κατασκευάσουμε ένα ισοδύναμο κύκλωμα για τη δίοδο. Έτσι π.χ. ας πούμε ότι έχομε τη χαρακτηριστική μιας διόδου (σχ. 8.6θ). Προεκτείνοντας προς τα κάτω το ανοδικό τμήμα δημιουργούμε μια χαρακτηριστική που θα αποτελείται από δύο ευθύγραμμα τμήματα που ενώνονται στην τάση  $V_y$ .

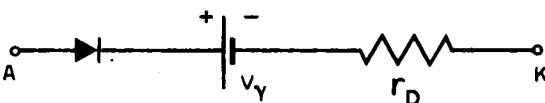


Σχ. 8.6η.



Σχ. 8.6θ.

Βλέπομε ότι αν ξεκινήσουμε από το O της τάσεως και αυξήσουμε την τάση κατά την ορθή φορά, το ρεύμα θα είναι σχεδόν 0 ως την τάση  $V_y$ . Από την τάση αυτή και πέρα αρχίζει πρακτικά να κυκλοφορεί ρεύμα και μάλιστα ρεύμα που αυξάνεται γραμμικά. Ενώ δηλαδή είχαμε βάλει στα άκρα της διόδου μια θετική τάση, το ρεύμα δεν άρχισε να κυκλοφορεί παρά από μια θετική τιμή αυτής της τάσεως και πέρα. Είναι δηλαδή σαν να υπήρχε μια άλλη πηγή που έδινε μια αντίθετη τάση  $V_y$ . Από την κλίση επίσης του ανοδικού τμήματος της χαρακτηριστικής βλέπομε ότι το πηλίκο  $V_D / I_D$  δίνει μια σταθερή αντίσταση στην οποία κυκλοφορεί το ρεύμα. Με βάση τα στοιχεία αυτά μπορούμε να κατασκευάσουμε για μια δίοδο το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 8.6i.



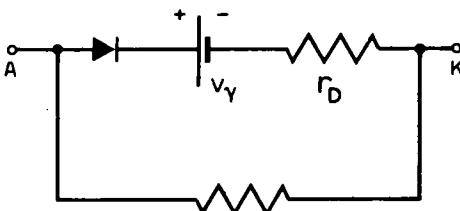
Σχ. 8.6i.

Σ' αυτό η δίοδος είναι ιδανική. Η πηγή  $V_y$  είναι η ισοδύναμη πηγή που αντιτίθεται στην αρχική κυκλοφορία του ρεύματος. Για να κυκλοφορήσει ρεύμα θα πρέπει η άνοδος A της διόδου να γίνει θετικότερη από τον πόλο της πηγής που είναι ο  $+V_y$ .

Η αντίσταση  $r_D$  είναι αυτή που προκύπτει από τη κλίση του ανοδικού τμήματος της χαρακτηριστικής:

$$r_D = \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D}$$

Το ισοδύναμο αυτό κύκλωμα είναι για τάση συνεχή κατά την ορθή φορά. Για να περιληφθεί και η περίπτωση της ανάστροφης πολώσεως πρέπει όλο το κύκλωμα να παραλληλισθεί από μια πολύ μεγάλη αντίσταση, που είναι η αντίσταση κατά την ανάστροφη συνεχή πόλωση. Η αντίσταση αυτή είναι η μόνη που υπάρχει στο κύκλωμα τότε, γιατί στην ανάστροφη πόλωση η ιδανική δίοδος παρουσιάζει άπειρη αντίσταση, και επομένως ο κλάδος του κυκλώματος που την περιέχει είναι ανοικτός (σχ. 8.6ia). Αυτό το ισοδύναμο κύκλωμα είναι γιά όχι υψηλές συχνότητες.

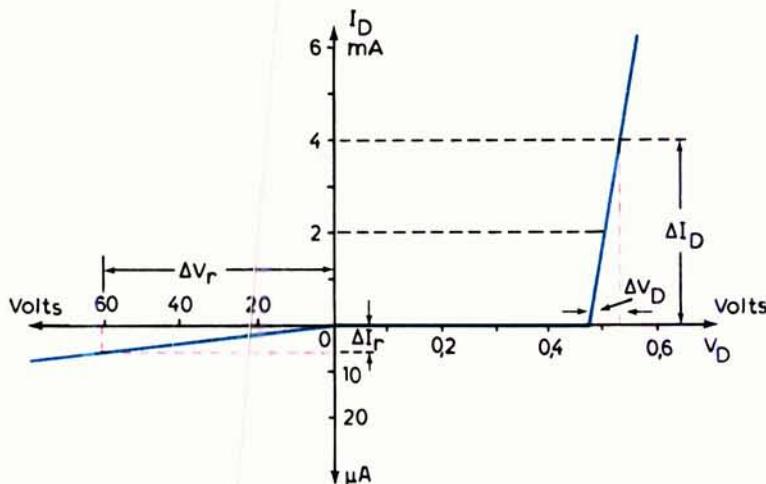


Σχ. 8.6ia.

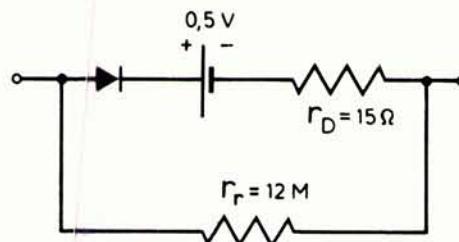
### Παράδειγμα.

Στο σχήμα 8.6iβ δίνεται η προσεγγιστική χαρακτηριστική μιας διόδου. Το ισο-

δίοδος δίνεται η προσεγγιστική χαρακτηριστική μιας διόδου. Το ισο-



Σχ. 8.6ιβ.



Σχ. 8.6ιγ.

δύναμο της κύκλωμα θα είναι το κύκλωμα του σχήματος 8.6ιγ.

Αυτό φαίνεται από την τάση  $V_F$  που είναι ίση με 0,5 V και από την κλίση της χαρακτηριστικής από την οποία προκύπτουν κάθε φορά οι αντιστάσεις:

$$r_{DF} = \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D} = \frac{0,06 \text{ V}}{4 \times 10^{-3} \text{ A}} = 15 \Omega \quad \text{κατά την ορθή φορά}$$

$$\text{και} \quad r_{Dr} = \frac{\Delta V_r}{\Delta I_r} = \frac{60 \text{ V}}{5 \times 10^{-6} \text{ A}} = 12 \text{ M}\Omega \quad \text{κατά την ανάστροφη}$$

### 8.7 Δίοδοι μεταβλητής χωρητικότητας.

Σε προηγούμενη παράγραφο είδαμε τις χωρητικότητες που μπορούν να εμφανίσθουν σε μια επαφή P-N. Είπαμε εκεί ότι με τη μεταβολή μιας εξωτερικής τάσεως που εφαρμόζουμε στα άκρα της επαφής, μπορούμε να μεταβάλλουμε τη χωρητικότητα φραγμού  $C_T$  που εμφανίζεται στην περιοχή απογυμνώσεως. Στο φαινόμενο αυτό στηρίζεται η κατασκευή διόδων μεταβλητής χωρητικότητας που είναι γνωστές ως **varactors** ή **varicaps**.

Η χωρητικότητα των διόδων αυτών μεταβάλλεται με μεταβολή της ανάστροφης τάσεως που εφαρμόζεται στα άκρα τους.

Η χωρητικότητα  $C_T$  μιας διόδου είναι:

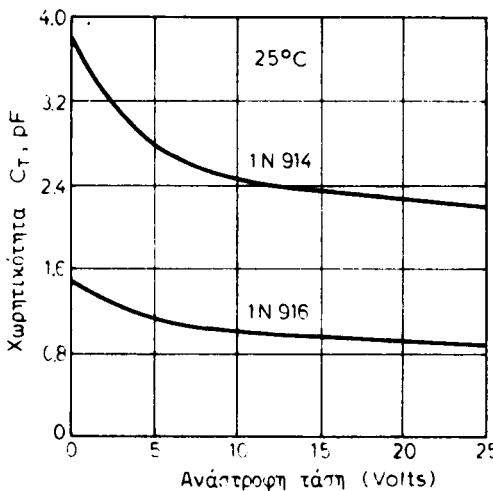
$$C_T = \frac{K}{(V_0 + V_r)^n} \quad (8.7.1)$$

όπου  $K$  είναι μια σταθερά που εξαρτάται από το υλικό του ημιαγωγού και τον τρόπο κατασκευής της διόδου,  $V_0$  είναι το δυναμικό φραγμού και  $V_r$  η ανάστροφη τάση που εφαρμόζεται εξωτερικά. Η τιμή του εκθέτη η εξαρτάται από τον τρόπο κατασκευής της επαφής. Όταν δηλαδή η μετάβαση από το τμήμα  $P$  στο τμήμα  $N$  της επαφής γίνεται βαθμιαία, τότε η τιμή του η είναι περίπου 0,33, ενώ όταν η μετάβαση γίνεται απότομα το η είναι περίπου 0,5.

Η  $C_T$  επίσης μπορεί να δοθεί για διάφορες τιμές της ανάστροφης τάσεως  $V_r$  σε συνάρτηση και με τη χωρητικότητα της επαφής χωρίς εξωτερική τάση  $C_T(0)$ , από την παρακάτω σχέση:

$$C_{T(V_r)} = \frac{C_T(0)}{\left(1 + \frac{V_r}{V_0}\right)^n} \quad (8.7.2)$$

Στο σχήμα 8.7a δίνονται οι χαρακτηριστικές δύο τυπικών διόδων μεταβλητής χωρητικότητας, της 1N914 και της 1N916.



Σχ. 8.7a.

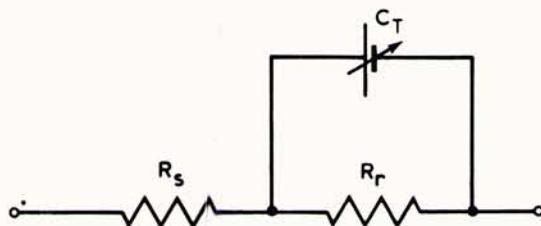
Μεταβολή της χωρητικότητας επαφής σε συνάρτηση με την ανάστροφη τάση στις διόδους 1N914 και 1N916.

Γενικά η αντίσταση των διόδων μεταβλητής χωρητικότητας, αφού οι δίοδοι πολύνονται κατά την ανάστροφη φορά, είναι πολύ μεγάλη (1 MΩ και περισσότερο).

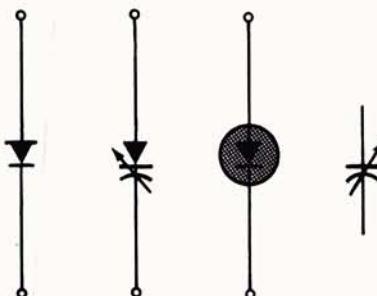
Η χωρητικότητά τους κυμαίνεται από 1 ως 100 pF.

Οι συνηθισμένες ανάστροφες τάσεις δεν ξεπερνούν τα 30 V.

Για τη δίοδο μεταβλητής χωρητικότητας δίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα του



Σχ. 8.7β.



Σχ. 8.7γ.

Σύμβολα διόδων μεταβλητής χωρητικότητας.

σχήματος 8.7β. Σ' αυτό η  $R_s$  είναι η ωμική αντίσταση του υλικού του ημιαγωγού. Η τιμή της  $R_s$  είναι πολύ μικρή. Στο ισοδύναμο αυτό θεωρήθηκαν αμελητέες η χωρητικότητα του περιβλήματος και οι αυτεπαγωγές των συρμάτων.

Στο σχήμα 8.7γ φαίνεται ο συμβολισμός των διόδων μεταβλητής χωρητικότητας.

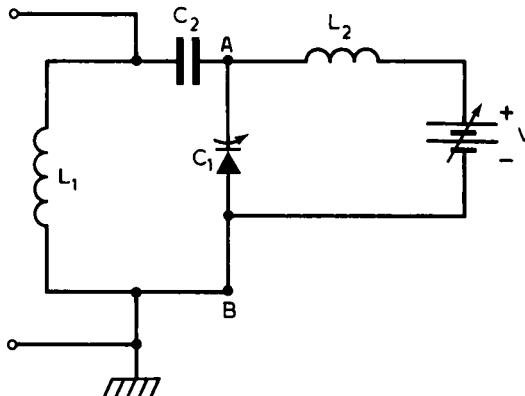
Για την κατασκευή τους χρησιμοποιείται συνήθως πυρίτιο που εξασφαλίζει μικρό ανάστροφο ρεύμα. Η τιμή της χωρητικότητας μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία με συντελεστή περίπου  $3 \times 10^{-4} / ^\circ\text{K}$  για τάση  $V_r = 3 \text{ V}$ .

Οι varactors χρησιμοποιούνται ως μεταβλητές χωρητικότητες με τα πλεονεκτήματα του μικρού όγκου, μικρού βάρους, χαμηλού εσωτερικού θορύβου και της ρυθμίσεως της χωρητικότητας με τη μεταβολή τάσεως και όχι με μηχανικά ή αλλά ογκώδη μέσα.

Εφαρμόζονται σε κυκλώματα αυτόματου λεπτού συντονισμού, στη διαμόρφωση συχνότητας (FM), σε φίλτρα ρυθμιζόμενου εύρους ζώνης συχνοτήτων, στους παραμετρικούς ενισχυτές κλπ.

Στο σχήμα 8.7δ δίνεται η αρχή της χρησιμοποίησεως ενός varactor σε κύκλωμα συντονισμού.

Σ' αυτό υπάρχει το βασικό κύκλωμα συντονισμού που αποτελείται από το πηνίο με αυτεπαγωγή  $L_1$ , παράλληλα με τη χωρητικότητα  $C_1$ , που είναι η χωρητικότητα ενός varactor. Η χωρητικότητα  $C_1$ , μπορεί να μεταβάλλεται με την τάση  $V$ , οπότε μεταβάλλεται και η συχνότητα συντονισμού του κυκλώματος  $L_1, C_1$ . Η χωρητικότητα  $C_2$ , που είναι πολύ μεγάλη σχετικά με τη  $C_1$ , έχει συνδεθεί για να μη βραχυκυκλώνεται η πηγή συνεχούς  $V$  μέσω των μικρών ωμικών αντιστάσεων των πηνίων  $L_1$  και  $L_2$ . Η  $L_2$  είναι επίσης μεγάλη, ώστε να παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση



Σχ. 8.76.

στο εναλλασσόμενο και να αποκλείει τη δίοδο της εναλλασσόμενης συνιστώσας του ρεύματος από την πηγή. Έστι για το εναλλασσόμενο ρεύμα το κύκλωμα στο  $L_2$  είναι ανοικτό και στον  $C_2$  βραχυκλωμένο. Στην ουσία δηλαδή για το συντονισμό παίζουν ρόλο μόνο η αυταπαγωγή  $L_1$ , παράλληλα με τη χωρητικότητα  $C_1$ .

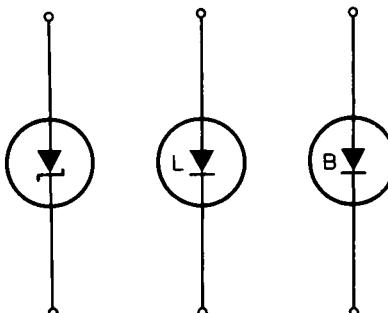
### 8.8 Δίοδος Zener.

Είδαμε προηγουμένως ότι το ανάστροφο ρεύμα στη δίοδο μένει σταθερό για μια περιοχή ανάστροφων τάσεων. Σε κάποια δύναμη ανάστροφη τάση  $V_z$  (τάση Zener) το ρεύμα παίρνει απότομα μεγάλες τιμές. Η τιμή της τάσεως  $V_z$  είναι σχετικά μεγάλη στις συνηθισμένες διόδους. Η τιμή της  $V_z$  εξαρτάται από την πυκνότητα των προσμίξεων στα τρίματα P και N. Όσο η πυκνότητα αυτή είναι μεγαλύτερη τόσο η  $V_z$  είναι μικρότερη.

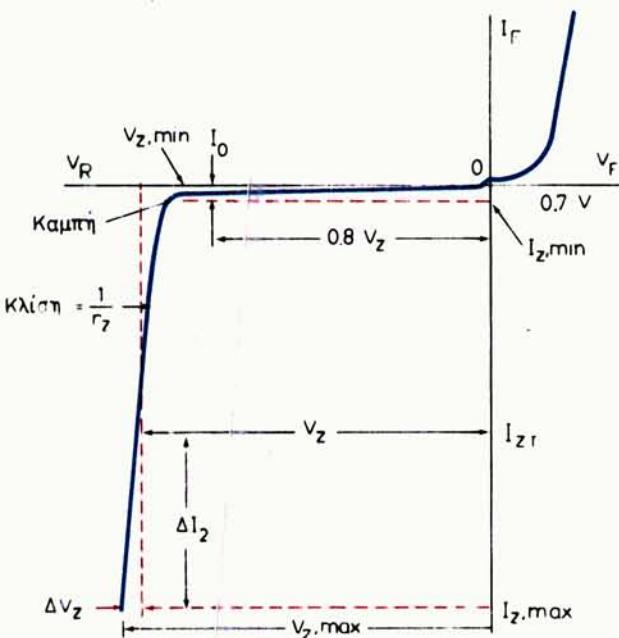
Είδαμε επίσης ότι, ενώ το ανάστροφο ρεύμα αυξάνει απότομα, η τάση  $V_z$  ελάχιστα μεταβάλλεται. Τη σταθερότητα αυτή της τάσεως, παρά τη μεταβολή του ρεύματος, εκμεταλλεύομε στε με ειδικά κατασκευασμένες διόδους για να κρατάμε οπου χρειάζεται την τάση σταθερή στα άκρα διατάξεων.

Οι ειδικές αυτές δίοδοι ονομάζονται δίοδοι Zener. Στο εμπόριο σήμερα υπάρχουν δίοδοι Zener με τάσεις  $V_z$  από 2 ως 200 V.

Οι δίοδοι Zener συμβολίζονται όπως φαίνεται στο σχήμα 8.8a.



Σχ. 8.8a.  
Συμβολισμός διόδων Zener.



**Σχ. 8.8β.**  
Χαρακτηριστική καμπύλη διόδου Zener.

Στο σχήμα 8.8β φαίνεται η χαρακτηριστική μιας τυπικής διόδου Zener. Η χαρακτηριστική αυτή είναι όμοια με τη χαρακτηριστική μιας κοινής διόδου. Κατά την ορθή φορά παρουσιάζει, σε πολύ χαμηλές τάσεις, απότομη αύξηση του ρεύματος. Κατά την ανάστροφη, το ρεύμα μένει σχεδόν σταθερό και μικρό ως την ανάστροφη τάση  $V_{z,\min}$  οπότε γίνεται απότομα μεγάλο. Μετά την τάση  $V_{z,\min}$  η τάση στα άκρα της διόδου μεταβάλλεται ελαφρά, καθώς αυξάνεται το ρεύμα. Η μεταβολή όμως αυτή είναι τόσο μικρή που πρακτικά η τάση στα άκρα της Zener θεωρείται σταθερή. Τη σταθερότητα της τάσεως αυτής εκμεταλλεύμαστε στις εφαρμογές όπου χρειαζόμαστε μια σταθερή τάση. Το ρεύμα βέβαια δεν μπορεί να γίνει απεριόριστα μεγάλο. Ο κατασκευαστής δίνει το μέγιστο ρεύμα που επιτρέπεται να περνά από τη δίοδο. Ο περιορισμός του ρεύματος γίνεται με μιά αντίσταση που συνδέεται εξωτερικά στη σειρά με τη δίοδο. Δεν πρέπει επίσης να γίνεται πολύ μικρό, γιατί τότε δε γίνεται σταθεροποίηση. Το ελάχιστο ρεύμα  $I_{z,\min}$  για να έχομε μια σταθεροποίηση είναι αυτό που αντιστοιχεί στη  $V_{z,\min}$ .

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά για μια δίοδο Zener, που φυσικά λειτουργεί συνδεμένη πάντοτε ανάστροφα, είναι:

- Η τάση Zener  $V_z$ .
- Η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς (ή το μέγιστο ρεύμα).
- Η δυναμική αντίσταση.
- Ο θερμικός συντελεστής.

Στη χαρακτηριστική του σχήματος 8.8β δίνεται το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα  $I_{z,\max}$  αλλά και το ελάχιστο  $I_{z,\min}$  κάτω από το οποίο πρακτικά δεν υπάρχει σταθεροποίηση.

Η τάση  $V_z$  δίνεται συνήθως για το ρεύμα  $I_z$  που ορίζεται από το μέσο του ευθύγραμμου τμήματος της χαρακτηριστικής ανάμεσα στα σημεία της που αντιστοιχούν στο  $I_{zmax}$  και  $I_{zmin}$ .

Η τάση  $V_z$  μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία. Άλλα και σε διόδους του ίδιου τύπου μπορεί η τάση  $V_z$  να διαφέρει από δίοδο σε δίοδο. Η διαφορά από την τιμή που δίνεται από τον κατασκευαστή είναι  $\pm 5\text{-}20\%$ .

Η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να καταναλώνεται στη δίοδο. Αυτή δίνεται από το γινόμενο  $P_{zmax} = V_z I_{zmax}$ .

Στο εμπόριο βρίσκονται δίοδοι με μέγιστη ισχύ από  $1/4 \text{ W}$  ως  $50 \text{ W}$ .

Η δυναμική αντίσταση ορίζεται από την κλίση της χαρακτηριστικής του ανάστροφου ρεύματος στο σημείο λειτουργίας της. Η αντίσταση αυτή για το ευθύγραμμο τμήμα της χαρακτηριστικής που ορίζεται από το  $I_{min}$  και το  $I_{max}$  είναι σταθερή.

Για μια μεταβολή της τάσεως  $\Delta V_z$  θα έχομε μια μεταβολή του ρεύματος  $\Delta I_z$ . Η δυναμική αντίσταση  $r_z$  θα είναι:

$$r_z = \frac{\Delta V_z}{\Delta I_z} \quad (8.8.1)$$

Ο θερμικός συντελεστής δίνει τη μεταβολή της τάσεως  $V_z$  σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Εκφράζεται σε  $\pm \%$  ανά βαθμό Κελσίου. Είναι δηλαδή θετικός ή αρνητικός. Θετικός είναι όταν με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται και η τάση  $V_z$ , ενώ αρνητικός όταν αυξανόμενης της θερμοκρασίας μειώνεται η τάση  $V_z$ .

Σημειώνομε πως όταν η τάση  $V_z$  είναι μεγαλύτερη από  $6 \text{ V}$ , ο θερμικός συντελεστής είναι θετικός, ενώ όταν είναι κάτω από  $6 \text{ V}$  ο θερμικός συντελεστής είναι αρνητικός.

Στην πρώτη περίπτωση ( $6 \text{ V} < V_z$ ) επικρατεί ο μηχανισμός αγωγιμότητας με **χιονοστιβάδα**, ενώ στη δεύτερη ( $V_z < 6 \text{ V}$ ) επικρατεί ο μηχανισμός **Zener**.

Για τη δίοδο 1N961 π.χ. δίνεται θερμικός συντελεστής  $+0,072\%/\text{°C}$ . Έτσι για ένα βαθμό αυξήσεως της θερμοκρασίας στη δίοδο αυτή θα έχομε μια αύξηση της  $V_z$  ( $= 10 \text{ V}$ ):

$$\frac{0,072 \times 10 \text{ V}}{100\text{°C}} = 0,0072 \text{ V/°C}$$

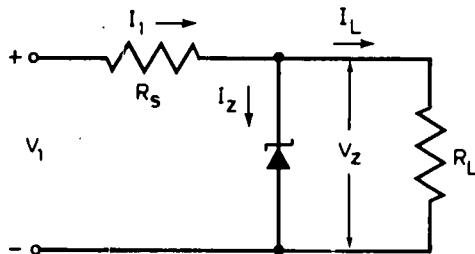
οπότε για  $50\text{°C}$  αύξηση της θερμοκρασίας θα έχομε αύξηση της  $V_z$ :

$$(0,0072 \text{ V/°C}) \times (50\text{°C}) = 0,36 \text{ V}$$

Οι Zener εμφανίζουν χωρητικότητες που κυμαίνονται από  $10$  ως  $10000 \text{ pF}$ .

### 8.8.1 Εφαρμογές.

Η κυριότερη εφαρμογή των διόδων Zener είναι στη σταθεροποίηση τάσεως. Στην περίπτωση δηλαδή που θέλομε να κρατήσουμε σταθερή την τάση στα άκρα ενός φόρτου, όταν το ρεύμα που τον διαρρέει μεταβάλλεται. Ένα απλό κύκλωμα σταθεροποίησεως φαίνεται στο σχήμα 8.8γ. Η τάση στα άκρα της αντιστάσεως  $R_L$  θα είναι η τάση  $V_z$  στα άκρα της Zener. Το ρεύμα  $I_1$  που δίνεται από την πηγή  $V_1$  θα είναι το άθροισμα των ρευμάτων  $I_2$  που διαρρέει την Zener και  $I_L$  που



Σχ. 8.8γ.

διαρρέει την αντίσταση  $R_L$  (φόρτο). Δηλαδή:

$$I_1 = I_z + I_L \quad (8.8.2)$$

Επίσης:

$$V_1 = I_1 R_s + V_z \quad (8.8.3)$$

Σε ένα τέτοιο κύκλωμα θα έχομε τις παρακάτω περιπτώσεις:

1) Να είναι σταθερή η τάση  $V_1$ , και να μεταβάλλεται το ρεύμα  $I_L$  που περνάει από το φόρτο ( $R_L$ ). Η μεταβολή του ρεύματος φόρτου μπορεί να είναι το πολύ ίση με τη διαφορά  $I_{zmax} - I_{zmin}$  χωρίς να μεταβάλλεται το  $I_1$ . Το  $I_{zmax}$  είναι το μέγιστο ρεύμα που επιτρέπεται να περνάει από τη Zener με βάση τα δεδομένα του κατασκευαστή για τη μέγιστη ισχύ της και  $I_{zmin}$  είναι το ελάχιστο ρεύμα της Zener για το οποίο έχομε μια ανεκτή σταθεροποίηση.

2) Να είναι σταθερό το ρεύμα  $I_L$  και να μεταβάλλεται η  $V_1$ . Αύξηση της  $V_1$  προκαλεί αύξηση του ολικού ρεύματος  $I_1$ . Η αύξηση αυτή εκδηλώνεται ως αύξηση του ρεύματος  $I_z$  της Zener. Αντίθετα, μείωση του  $I_1$  οδηγεί σε αντίστοιχη μείωση του ρεύματος της Zener.

Και στη μια περίπτωση και στην άλλη το ρεύμα από το φόρτο μένει πρακτικά σταθερό.

### 8.8.2 Παραδείγματα.

#### Παράδειγμα 1.

Στο κύκλωμα του σχήματος 8.8γ η  $V_1 = 20$  V, και η  $R_s = 50 \Omega$ . Η Zener είναι ισχύος  $P_{zmax} = 1$  W με  $V_z = 10$  V. Για ποια περιοχή ρεύματος φόρτου  $I_L$  θα έχομε σταθερή τάση στα άκρα του φόρτου, αν το ελάχιστο ρεύμα της διόδου για ανεκτή σταθεροποίηση είναι  $I_{zmin} = 2$  mA;

#### Απάντηση.

Το ολικό ρεύμα  $I_1$  δίνεται από τη σχέση (8.8.3) και είναι:

$$V_1 = I_1 R_s + V_z$$

$$\text{ή} \quad I_1 = \frac{V_1 - V_z}{R_s}$$

Αντικαθιστώντας από τα δεδομένα του παραδείγματος θα έχομε:

$$I_1 = \frac{20V - 10V}{50\Omega} = 200 \text{ mA}$$

Με την ισχύ  $P_{zmax} = 1 \text{ W}$  που δίνεται θα έχομε μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα από τη δίοδο:

$$I_{zmax} = \frac{P_{zmax}}{V_z} = \frac{1 \text{ W}}{10 \text{ V}} = 100 \text{ mA}$$

Αφού το ελάχιστο ρεύμα από τη Zener είναι  $I_{zmin} = 2 \text{ mA}$ , η περιοχή του ρεύματος  $I_L$  φόρτου στην οποία θα μένει η τάση στα άκρα του σταθερή είναι:

$$I_{Lmin} = I_1 - I_{zmax} = 200 \text{ mA} - 100 \text{ mA} = 100 \text{ mA}$$

$$I_{Lmax} = I_1 - I_{zmin} = 200 \text{ mA} - 2 \text{ mA} \approx 200 \text{ mA}$$

### Παράδειγμα 2.

Στο κύκλωμα του σχήματος 8.8γ το ρεύμα στο φόρτο  $I_L$  πρέπει να μένει σταθερό στα 50 mA. Η αντίσταση  $R_s = 100 \Omega$ . Η Zener που χρησιμοποιείται είναι μέγιστης ισχύος 1 W με  $V_z = 10 \text{ V}$  και  $I_{zmin} = 2 \text{ mA}$ . Τι περιθώρια μεταβολής έχει η  $V_1$ , έτσι, ώστε να μην αλλάζει το ρεύμα  $I_L$ ;

#### Απάντηση.

Το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα  $I_z$  από τη Zener θα είναι:

$$I_{zmax} = \frac{P_z}{V_z} = \frac{1 \text{ W}}{10 \text{ V}} = 100 \text{ mA}$$

οπότε το μέγιστο ολικό ρεύμα  $I_{1max}$  θα είναι:

$$I_{1max} = I_1 + I_{2max} = 50 \text{ mA} + 100 \text{ mA} = 150 \text{ mA}$$

Το ελάχιστο επιτρεπόμενο ολικό ρεύμα  $I_{1min}$  θα είναι:

$$I_{1min} = I_1 + I_{2min} = 50 \text{ mA} + 2 \text{ mA} \approx 50 \text{ mA}$$

Από τα παραπάνω θα έχομε για τα άρια μεταβολής της τάσεως  $V_1$ , μέσα στα οποία μένει σταθερό το ρεύμα του φόρτου:

$$V_{1max} = I_{1max} \cdot R_s + V_z = 0,150 \times 100 \Omega + 10 \text{ V} = 25 \text{ V}$$

$$V_{1min} = I_{1min} \cdot R_s + V_z = 0,050 \times 100 \Omega + 10 \text{ V} = 15 \text{ V}$$

### Παράδειγμα 3.

Διαθέτομε πηγή 24 V και θέλομε να τροφοδοτήσουμε με σταθεροποιημένη τάση 12 V συσκευή που καταναλώνει ισχύ 120 mW. Να επιλεγεί η κατάλληλη Zener.

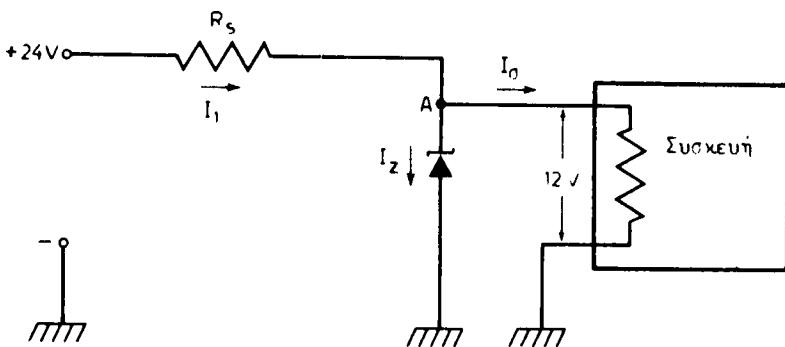
#### Απάντηση.

Μπορούμε να πραγματοποιήσουμε τη συνδεσμολογία του σχήματος 8.8δ.

Η συσκευή θα διαρρέεται από ρεύμα:

$$I_\sigma = \frac{120 \text{ mW}}{12 \text{ V}} = 10 \text{ mA}$$

Το ρεύμα  $I_1$  πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το  $I_\sigma$ . Έστω ότι επιλέγομε μια



Σχ. 8.86.

Zener που για ρεύμα  $I_z = 2 \text{ mA}$  έχει  $V_z = 12 \text{ V}$ . Τότε το  $I_1$  θα είναι:

$$I_1 = I_z + I_\sigma = 2 \text{ mA} + 10 \text{ mA} = 12 \text{ mA}$$

Το δυναμικό του σημείου Α πρέπει να είναι  $V_A = 12 \text{ V}$ .

Αφού το ρεύμα  $I_1$  θα είναι  $12 \text{ mA}$ , η αντίσταση  $R_s$  πρέπει να είναι:

$$R_s = \frac{V_{\text{πηγής}} - V_A}{I_1} = \frac{24 \text{ V} - 12 \text{ V}}{12 \times 10^{-3} \text{ A}} = 1 \text{ k}\Omega$$

Η ισχύς που θα παρέχει η πηγή θα είναι:

$$P_{\text{πηγής}} = 24 \text{ V} \cdot 12 \text{ mA} = 288 \text{ mW}$$

Από αυτή  $120 \text{ mW}$  καταναλώνονται στη συσκευή.

Η ισχύς  $P_R$  επίσης που θα καταναλώνεται στην αντίσταση  $R_s$  θα είναι:

$$P_R = \frac{(12 \text{ V})^2}{1000 \Omega} = 144 \text{ mW}$$

και στη Zener:

$$P_z = 12 \text{ V} \cdot 2 \text{ mA} = 24 \text{ mW}$$

Στην επιλογή όμως της Zener πρέπει να έχομε υπόψη μας ότι όταν τεθεί εκτός η συσκευή, όλο το ρεύμα των  $12 \text{ mA}$  θα περάσει μέσα από τη Zener.

Έτσι η ισχύς  $P_{z_0}$  για τη Zener στην περίπτωση αυτή θα είναι:

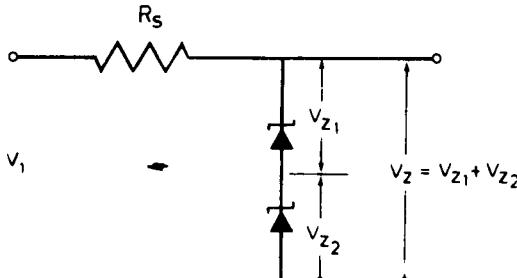
$$P_{z_0} = 12 \text{ V} \cdot 12 \text{ mA} = 144 \text{ mW}$$

Θα πρέπει συνεπώς να επιλέξουμε Zener μεγαλύτερης ισχύος από  $144 \text{ mW}$ .

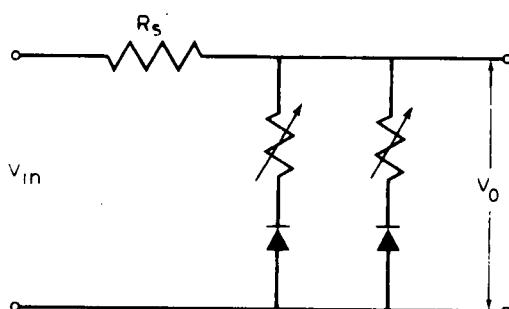
### 8.8.3 Ειδικές περιπτώσεις σταθεροποίησεως με Zener.

Στη σταθεροποίηση με Zener είναι δυνατό να σταθεροποιήσουμε τάσεις πολλαπλάσιες από την τάση που μπορεί να σταθεροποιήσει μια Zener μόνη της, συνδέοντας περισσότερες Zener στη σειρά (σχ. 8.8ε).

Αν πάλι θέλουμε να αυξήσουμε την ισχύ στη σταθεροποιούμενη τάση, μπορούμε να συνδέσουμε Zener παράλληλα (σχ. 8.8στ).



Σχ. 8.8ε.



Σχ. 8.8στ.

Στην περίπτωση αυτή καλό είναι να συνδέομε μια μικρή ρυθμιζόμενη αντίσταση στη σειρά με κάθε δίοδο, έτσι ώστε να εξουδετερώνονται οι μικρές διαφορές τάσεων στα άκρα των Zener.

Ωστόσο η συνδεσμολογία αυτή σπάνια εφαρμόζεται στην πράξη γιατί είναι δύσκολη η ρύθμιση των αντιστάσεων για την εξίσωση των ρευμάτων στους παράλληλους κλάδους.

Αξιοσημείωτο είναι επίσης ότι οι Zener μπορούν να σταθεροποιούν πολύ χαμηλότερες τάσεις από αυτές που σταθεροποιούνται με λυχνίες αερίου.

Για τη σταθεροποίηση ποι χαμηλών τάσεων από αυτές που μπορούν να σταθεροποιήσουν οι Zener, μπορούν σε ορισμένες περιπτώσεις, να χρησιμοποιηθούν συνηθισμένες δίοδοι πολωμένες κατά την ορθή φορά. Η σταθεροποίηση γίνεται στην τάση της ορθής φοράς όπου το ρεύμα γίνεται απότομα μεγάλο. Δηλαδή στην τάση  $V_y$ .

Για τις περιπτώσεις που απαιτείται σταθερός θερμικός συντελεστής υπάρχει συνδυασμός Zener που πολώνεται ανάστροφα με θετικό θερμικό συντελεστή, μέσα στο ίδιο περίβλημα. Οι μεταβολές λόγω θερμοκρασίας στη μια δίοδο εξουδετερώνονται από τις μεταβολές στην άλλη.

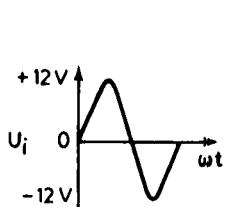
Μια τέτοια διάταξη είναι π.χ. η transitron SV3176.

Τη σταθερότητα της τάσεως στα άκρα της Zener εκμεταλλεύομενος και στη σειρά μιουργία τάσεων αναφοράς. Η τάση αναφοράς σε ένα κύκλωμα είναι τάση σταθερή και ανεξάρτητη από τις συνθήκες λειτουργίας του υπόλοιπου κυκλώματος της μ' αυτή συγκρίνομε όλες τις τάσεις που επικρατούν στο κύκλωμα.

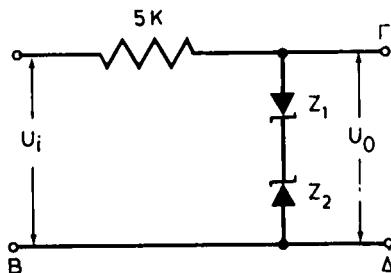
Η Zener επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα κύκλωμα ως περιοριστής τ.

σεως. Ως στοιχείο δηλαδή που εμποδίζει μια τάση να αναπτυχθεί πέρα από μια ορισμένη τιμή.

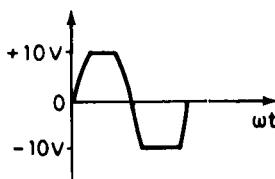
Στο σχήμα 8.8ζ φαίνεται η αρχή ενός τέτοιου κυκλώματος για την αποκοπή μέρους από μια εναλλασσόμενη τάση. Οι Zener έχουν  $V_z = 10$  V. Στην είσοδο AB του κυκλώματος συνδέεται μια εναλλασσόμενη τάση που έχει τη μορφή του σχήματος 8.8η. Το πλάτος της τάσεως είναι 12 V. Όταν η εναλλαγή είναι θετική, η  $Z_1$  είναι πολωμένη κατά την ορθή φορά και η  $Z_2$  κατά την ανάστροφη. Η  $Z_1$  δηλαδή παρουσιάζει πολύ μικρή αντίσταση και μπορούμε σ' αυτή την περίπτωση να τη θεωρήσουμε πρακτικά ως βραχυκύκλωμα. Η  $Z_2$  όμως παρουσιάζει πολύ μεγάλη αντίσταση και το κύκλωμα σ' αυτή είναι ανοικτό, ώσπου η εναλλασσόμενη τάση να φθάσει στην τιμή των +10 V, οπότε γίνεται και αυτή αγώγιμη. Έτοιμα στα άκρα ΓΔ το κύκλωμα θα είναι ανοικτό, ώσπου η τάση να γίνει +10 V. Θα μερισθεί δηλαδή



Σχ. 8.8ζ.



Σχ. 8.8η.



Σχ. 8.8θ.

ως τότε στα άκρα ΓΔ την τάση  $U_1$  που υπάρχει στην είσοδο. Στα 10 V ο κλάδος που περιέχει τις Zener γίνεται αγώγιμος, επειδή όμως η  $Z_1$  είναι πολωμένη κατά την ορθή φορά και η τάση στα άκρα της θα είναι πολύ μικρή, στην έξοδο ΓΔ θα επικρατεί πρακτικά η τάση στα άκρα της  $Z_2$ , δηλαδή η τάση των +10 V. Αυτό θα κρατήσει ώσπου η τάση  $U_1$  να πάρει τη μέγιστη θετική τιμή της και να ξανάρθει στα +10 V (πάντοτε, στη θετική ημιπερίοδο). Τότε σταματάει να άγει πάλι η  $Z_2$ , ανοίγει το κύκλωμα στα άκρα ΓΔ και πάλι στην έξοδο θα μετρούμε την τάση  $U_1$  της εισόδου ώσπου αυτή να γίνει μηδέν. Μόλις η τάση εισόδου περάσει στην αρνητική ημιπερίοδο, η κατάσταση αναστρέφεται. Η  $Z_2$  άγει αμέσως και η  $Z_1$  στην τάση των -10 V εισόδου. Στην έξοδο τώρα θα μετράμε την αρνητική ημιπερίοδο για την οποία συμβαίνουν ανάλογα με αυτά που είπαμε για τη θετική. Ενώ λοιπόν στην είσοδο έχουμε την τάση της μορφής του σχήματος 8.8η, στην έξοδο θα πάρομε μια τάση

που έχει τη μορφή του σχήματος 8.8θ και που θα είναι αποκομμένη στα +10 V και στα -10 V. Η εργασία αυτή λέγεται **ψαλίδιση**.

Ο πίνακας 8.8.1 περιέχει τα χαρακτηριστικά λειτουργίας μερικών Zener.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 8.8.1.**  
**Χαρακτηριστικά Zener.**

Τύπος	Τάση Zener (V)	Μέγιστη ισχύς (W)	Αντίσταση κοντά στο σημείο καμπής $\Omega$	Αντίσταση για $I_z = \dots$ $\Omega$	Θερμικός συντελεστής (%/°C)
1N 957	6,8	0,4	700	5,5 + 18,5 mA	—
1N3825	4,7	1	500	8 + 53 mA	-0,02
1N3048	150	1	6000	1000 + 1,7 mA	0,095
1N2804	6,8	50	70	0,2 + 1,85 A	0,04
1N2846	200	50	600	100 + 65 mA	0,1

### 8.9 Δίοδος σήραγγας (δίοδος tunnel).

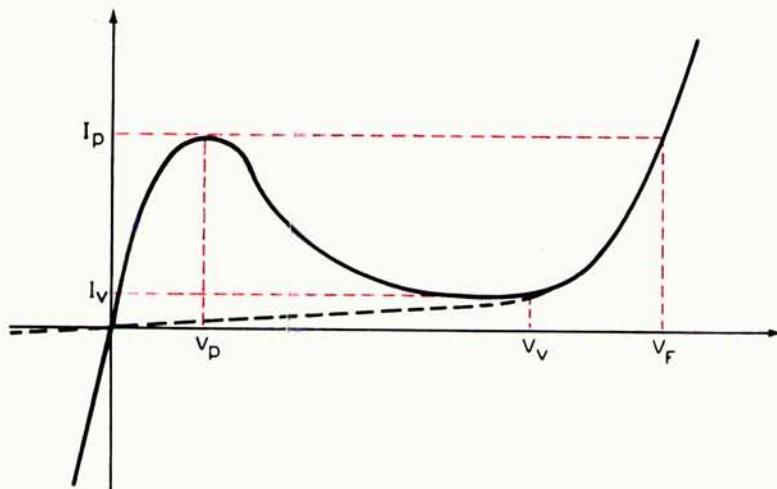
Η δίοδος tunnel είναι κατασκευασμένη με πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα προσμίξεων από ό,τι οι συνηθισμένες δίοδοι. Η αναλογία των προσμίξεων είναι γύρω στα 1:10<sup>3</sup>, από 1:10<sup>9</sup> που είναι στις συνηθισμένες διόδους. Εξαιτίας της μεγάλης πυκνότητας των προσμίξεων, η περιοχή απογυμνώσεως είναι πολύ λεπτή. Αυτό διευκολύνει την εμφάνιση του φαινόμενου σήραγγας. Το φαινόμενο σήραγγας, που ερμηνεύεται στην κυματομηχανική, είναι το φαινόμενο όπου ηλεκτρόνια φαίνονται να υπερνικούν ένα φραγμό δυναμικού χωρίς να έχουν αρκετή ενέργεια γι' αυτό.

Με το φαινόμενο αυτό εξηγείται η εμφάνιση ενάς μεγάλου ρεύματος, για πολύ μικρά δυναμικά, κατά την ορθή φορά, στη δίοδο αυτή. Η υπερνίκηση δηλαδή του φραγμού δυναμικού της επαφής από φορείς, για τόσο μικρά δυναμικά, δε δικαιολογείται παρά μόνο με το φαινόμενο tunnel.

Στο σχήμα 8.9α φαίνεται η χαρακτηριστική μιας τέτοιας τυπικής διόδου. Με παχιά διακοπόμενη γραμμή έχει χαραχθεί η καμπύλη μιας κοινής διόδου. Παρατηρούμε πώς για πολύ χαμηλές τιμές τάσεων, κατά την ορθή φορά, όπου οι κοινές δίοδοι παρουσιάζουν πολύ μικρό ρεύμα, το ρεύμα της διόδου σήραγγας είναι σχετικά μεγάλο. Το ρεύμα αυτό παρουσιάζει ένα μέγιστο  $I_p$  σε μια τάση  $V_p$  και κατόπιν, ενώ η τάση αυξάνεται, το ρεύμα ελαττώνεται μέχρι μια ελάχιστη τιμή  $I_v$  για μια τάση  $V_v$ . Από την τάση  $V_v$  και πέρα το ρεύμα αυξάνεται πάλι. Παρατηρούμε επίσης ότι για πολύ μικρές ανάστροφες τάσεις το ρεύμα γίνεται πολύ μεγάλο. Πρακτικά δηλαδή η tunnel δεν εμφανίζει ανάστροφο ρεύμα κόρου.

Στη δίοδο αυτή διακρίνομε τις χαρακτηριστικές τάσεις  $V_p$  όπου σημειώνεται το πρώτο μέγιστο του ρεύματος  $I_p$ , που λέγεται και **ρεύμα κορυφής**.  $V_v$  είναι η τάση κοιλάδας όπου αντιστοιχεί το **ρεύμα κοιλάδας**  $I_v$  και  $V_F$  η τάση όπου το ρεύμα γίνεται πάλι ίσο με το ρεύμα κορυφής  $I_p$ .

Όπως είπαμε, κατά την αύξηση της τάσεως από  $V_p$  σε  $V_v$  το ρεύμα ελαττώνεται. Η χαρακτηριστική της tunnel εμφανίζει στην περιοχή αυτή **κατάδυση**. Η ε-



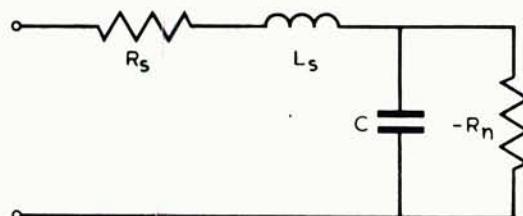
**Σχ. 8.9α.**  
Τυπική χαρακτηριστική καμπύλη διόδου tunnel.

λάπτωση του ρεύματος ενός αγωγού οταν αυξάνεται η τάση που εφαρμόζεται σ' αυτόν, ισοδυναμεί, όπως είδαμε, με την εμφάνιση αρνητικής αντιστάσεως. Η αρνητική αντίσταση είναι το στοιχείο που εκμεταλλευόμαστε για την παραγωγή ταλαντώσεων με διόδους tunnel.

Οι δίοδοι tunnel κατασκευάζονται με βάση διάφορα υλικά όπως Ge, Si, GaAs, InP, InAs, InSb. Τα συνηθέστερα ωστόσο υλικά για τις tunnel εμπορίου είναι το Ge και το GaAs.

Στον πίνακα 8.9.1 δίνονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά για μερικά είδη από αυτές.

Στο σχήμα 8.9β φαίνεται ο συμβολισμός του ισοδύναμου κυκλώματος της tunnel για την περιοχή της αρνητικής αντιστάσεως.



**Σχ. 8.9β.**  
Ισοδύναμο κύκλωμα διόδου tunnel.

$R_s$  είναι η αντίσταση του υλικού της διόδου έξω από την περιοχή απογυμνώσεως και η αντίσταση των ακροδεκτών της διόδου. Η τιμή της κυμαίνεται από 0,1 ως  $10 \Omega$ . Η  $L_s$  είναι αυτεπαγωγή που εξαρτάται από το μήκος των ακροδεκτών και τη γεωμετρία του περιβλήματος της διόδου. Είναι πολύ μικρή αλλά δημιουργεί ανωμαλίες στις πολύ υψηλές συχνότητες. Η χωρητικότητα  $C$  είναι η χωρητικότητα διαχύσεως της διόδου για το ρεύμα  $I_v$ . Αυτή είναι της τάσεως μερικών pF. Η

αντίσταση  $-R_n$  είναι η αρνητική αντίσταση της διόδου. Η τιμή της βρίσκεται προσεγγιστικά από την κλίση της χαρακτηριστικής ανάμεσα στις τάσεις  $V_p$  και  $V_v$ . Αυτή είναι της τάξεως των  $-150 \Omega$ . Η κατανάλωση ισχύος είναι μερικά mW.

Η επίδραση των μεταβολών της θερμοκρασίας στη χαρακτηριστική της tunnel δεν είναι μεγάλη.

Οι tunnel είναι πολύ μικρότερες σε όγκο και πολύ γρηγορότερες σε λειτουργία από τα τρανζίστορ ή τις λυχνίες κενού. Γι' αυτό, αλλά και για τη μικρή τους κατανάλωση, χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα παλμών που απαιτείται μικρός χρόνος ανυψώσεως του παλμού (rise time), οπως π.χ. στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Ο λόγος  $I_p/I_v$  σχετικά με τη διαφορά  $V_v - V_p$  είναι εδώ πολύ σημαντικός.

Tunnel χρησιμοποιούνται και σε ταλαντωτές πολύ υψηλής συχνότητας. Με tunnel έχουν παραχθεί συχνότητες της τάξεως 100GC/s (γιγακύκλων ανά sec).

Χρησιμοποιούνται επίσης και ως ενισχυτές καθώς και ως διατάξεις μεταλλαγής συχνότητας ακόμη και στην περιοχή των μικροκυμάτων.

Μειονέκτημα για τις tunnel είναι ότι εργάζονται με πολύ χαμηλές τάσεις. Επίσης δεν υπάρχει απομόνωση της εξόδου από την είσοδο.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 8.9.1.**  
**Τυπικές τιμές χαρακτηριστικών μεγεθών διόδου σήραγγας.**

	Ge	GaAs	Si
$I_p/I_v$	8	15	3,5
$V_p$ Volts	0,055	0,15	0,065
$V_v$ Volts	0,35	0,50	0,42
$V_F$ Volts	0,50	1,10	0,70

## 8.10 Φωτοδίοδος.

Είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο ότι ένας τρόπος για να διασπάσουμε δεσμούς σ' ενα ημιαγωγό και να δημιουργήσουμε ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές είναι να τον προσβάλλουμε με φωτεινή ακτινοβολία με κατάλληλο μήκος κύματος. Να τον προσβάλλουμε δηλαδή με ακτινοβολία που τα φωτόνια της να έχουν ενέργεια hf τουλάχιστο δόση απαιτείται για τη διάσπαση του δεσμού. Στο φαινόμενο αυτό στηρίζεται η λειτουργία των φωτοδιόδων.

Η φωτοδίοδος αποτελείται από μια επαφή P-N που είναι τοποθετημένη μέσα σε διαφανές υλικό. Το διαφανές υλικό είναι κατάλληλα χρωματισμένο ή σκεπάζεται με κατάλληλο μεταλλικό περίβλημα έτσι, ώστε το φως να πέφτει μόνο σε ορισμένη περιοχή της επαφής. Το σύνολο έχει πολύ μικρό όγκο με διαστάσεις μερικά δέκατα του cm.

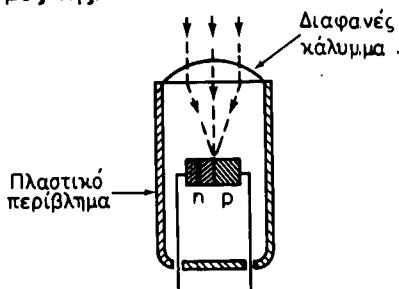
'Όταν πολώσουμε ανάστροφα την επαφή P - N, σε σκοτεινό χώρο, θα έχουμε ένα ανάστροφο ρεύμα πολύ μικρό και σταθερό· το ανάστροφο ρεύμα της κρυσταλλοδιόδου. Το ρεύμα αυτό στην περίπτωση της φωτοδιόδου λέγεται **ρεύμα σκότους**.

Αν τώρα φωτίσουμε τη φωτοδίοδο με φως κατάλληλης συχνότητας, το ανάστροφο ρεύμα θα αυξηθεί, γιατί τα φωτόνια που προσπίπτουν αποσπούν ηλεκτρόνια από τους δεσμούς του καθαρού ημιαγωγού, δημιουργώντας έτσι νέα ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές μέσα στην περιοχή απογυμνώσεως που προστίθενται σ' αυτά που υπήρχαν πριν φωτισθεί η επαφή.

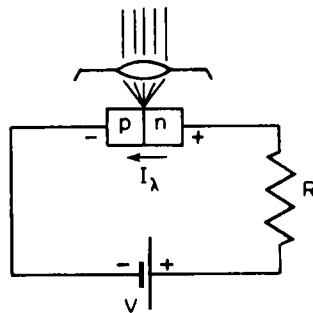
Η τιμή του ρεύματος εξαρτάται από το είδος της διόδου, από τη φωτεινή ροή και από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που προσπίπτει.

Στο σχήμα 8.10α δίνεται ένα διάγραμμα κατασκευής φωτοδιόδου επαφής.

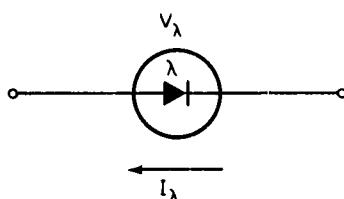
Στο σχήμα 8.10β φαίνεται η συνδεσμολογία της και στο σχήμα 8.10γ ο συμβολισμός της.



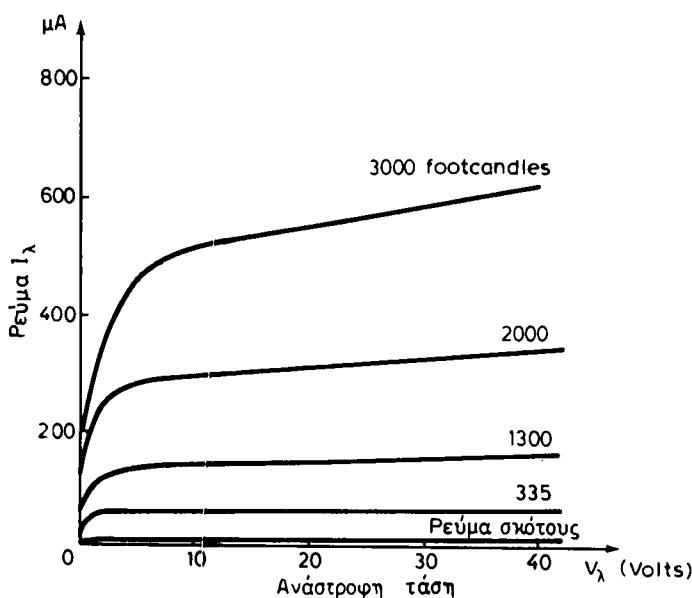
**Σχ. 8.10α.**  
Κατασκευή φωτοδιόδου.



**Σχ. 8.10β.**  
Βασική συνδεσμολογία φωτοδιόδου.



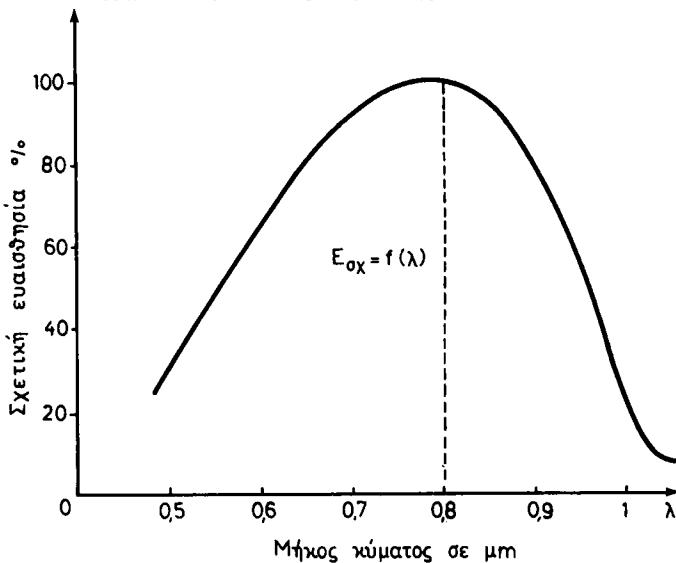
**Σχ. 8.10γ.**  
Συμβολισμός φωτοδιόδου.



**Σχ. 8.10δ.**  
Χαρακτηριστικές της φωτοδιόδου 1N77.

Στο σχήμα επίσης 8.10δ φαίνονται οι χαρακτηριστικές μιας φωτοδιόδου Ge της 1N77. Σ' αυτή φαίνεται πώς μεταβάλλεται το ρεύμα σε συνάρτηση με την ανάστροφη τάση και το φωτισμό.

Μια χρήσιμη πολλές φορές καμπύλη είναι η καμπύλη φασματικής ευαισθησίας. Από αυτή μπορούμε να δούμε σε ποια συχνότητα της ακτινοβολίας που προσπίπτει η δίοδος είναι πιο ευαίσθητη. Δίνει δηλαδή το περισσότερο ρεύμα. Στο σχήμα 8.10ε δίνεται το σχήμα μιας τέτοιας καμπύλης.



Σχ. 8.10ε.

Σχετική ευαισθησία φωτοδιόδου σε συνάρτηση με το μήκος κύματος

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των φωτοδιόδων είναι:

- Η περιοχή φάσματος φωτεινής ακτινοβολίας που μπορεί να λειτουργεί.
- Το ρεύμα σκότους.
- Η μέγιστη ανάστροφη τάση λειτουργίας.
- Η απόκριση σε συχνότητα. Μέχρι ποια δηλαδή μέγιστη συχνότητα μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά.
- Η ευαισθησία ρεύματος. Πόσο δηλαδή ρεύμα μπορεί να δώσει ανά μονάδα φωτισμού.

Στον πίνακα 8.10.1 δίνονται μερικές πιθανές τιμές των παραπάνω χαρακτηριστικών για φωτοδιόδους Ge και Si.

Εκτός από τις φωτοδιόδους επαφής P-N υπάρχουν και φωτοδιόδοι ακίδας που έχουν μεγάλες ταχύτητες λειτουργίας. Η χρησιμοποίησή τους είναι δυνατή σε διάταξης που είναι εύκολη η εστίαση της ακτινοβολίας σε μια πολύ μικρή περιοχή.

Υπάρχουν επίσης φωτοδιόδοι χιονοστιβάδας. Αυτές λειτουργούν με ανάστροφες τάσεις μεγαλύτερες από την τάση Zeneg, και κυρίως στην περιοχή των μικροκυμάτων.

Φωτοδιόδοι επίσης που μπορούν να λειτουργήσουν σε μεγάλες ταχύτητες αποκρίσεως και με μεγάλη επιλεκτικότητα στη συχνότητα κατασκευάζονται με επαφή P-N από διαφορετικά υλικά, π.χ. GaAs τύπου P σε επαφή με Ge τύπου N<sub>1</sub>

Οι φωτοδίοδοι χρησιμοποιούνται στην ανάγνωση διάτρητων καρτελών ή ταινιών στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές, σε διακόπτες που λειτουργούν με φωτισμό στην αναπαραγωγή ήχου γραμμένου πάνω σε φίλμ, στην αυτόματη καταμέτρηση αντικειμένων σε βιομηχανίες παραγωγής κλπ.

ΠΙΝΑΚΑΣ 8.10.1.

Βασικό υλικό	Περιοχή φάσματος	Ρεύμα σικτούς σε Amp	Μέγιστη τάση λειτουργίας Volts	Απόκριση σε συχνότητα C/sec	Ευαισθησία μΑ/Lux
Ge	ορατό υπέρυθρο μέγιστο γύρω στο 1,5 μ.	$10^{-5}$	30	$5 \times 10^4$	50 ως 200
Si	ορατό υπέρυθρο υπεριώδες μέγιστο γύρω στα 0,9 μ.	$10^{-7}$	50	$10^6$	50 ως 1000

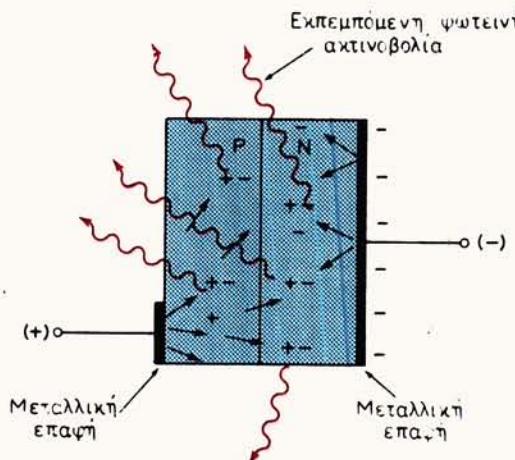
### 8.11 Δίοδος φωτοεκπομπής (Light Emitting Diode, LED).

Για τη διάσπαση ενός δεσμού και τη δημιουργία έτσι μιας οπής και ενός ηλεκτρονίου σ' ένα ημιαγωγό απαιτείται ενέργεια. Αντίθετα, όταν επανασυνδέονται ωπές με ηλεκτρόνια (φαινόμενο επανασυνδέσεως), αποδίδεται ενέργεια. Στο Ge και το Si η ενέργεια αυτή εκλύεται κυρίως υπό μορφή θερμότητας. Το ποσοστό που μετατρέπεται σε φωτεινή ακτινοβολία είναι πολύ μικρό. Σε άλλους όμως ημιαγωγούς, όπως το GaAsP GaP, που ο μηχανισμός επανασυνδέσεως διαφέρει από αυτόν του Ge και του Si, το ποσοστό της ενέργειας επανασυνδέσεως που μετατρέπεται σε φως είναι αρκετά μεγάλο. Με βάση τα παραπάνω κατασκευάζονται οι δίοδοι φωτοεκπομπής. Αυτές είναι δίοδοι που όταν πολωθούν κατά την ορθή φορά εκπέμπουν φως. Το φως αυτό προέρχεται από τις επανασυνδέσεις που γίνονται κατά τη δίοδο του ρεύματος μέσα από όλη τη μάζα της επαφής P-N, αλλά κυρίως κοντά στην περιοχή απογυμνώσεως (σχ. 8.11a). Από την ιδιότητά τους άλλωστε αυτή πήραν και την ονομασία LED, που είναι τα αρχικά του αγγλικού όρου Light Emitting Diode, δηλαδή δίοδος που εκπέμπει φως.

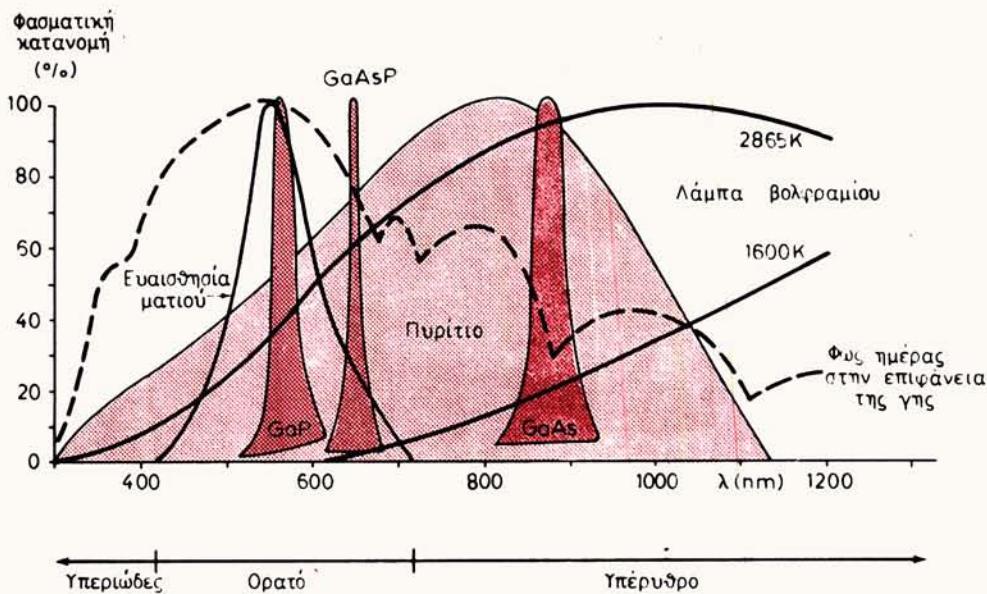
Στο σχήμα σημειώνεται ενδεικτικά η επιφάνεια του ακροδέκτη της επαφής P σχετικά μικρή. Αυτό δίνει μια ένδειξη της δομής της LED, που επιτρέπει την έξοδο των εκπεμπομένων φωτονίων από την πλευρά αυτή.

Το χρώμα που εκπέμπει μια δίοδος φωτοεκπομπής εξαρτάται από το υλικό κατασκευής της και την πυκνότητα των προσμίξεων. Στο σχήμα 8.11β φαίνονται οι περιοχές του φωτεινού φάσματος που εκπέμπουν διάφορες δίοδοι.

Η ένταση του φωτός που εκπέμπεται είναι ανάλογη με το ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο κατά την ορθή φορά. Με ανάστροφη πόλωση η δίοδος δεν εκπέμπει φως. Στο σχήμα 8.11γ φαίνεται μια τυπική χαρακτηριστική δίοδου φωτοεκπομπής και ο συμβολισμός της.



**Σχ. 8.11α.**  
Παράσταση του τρόπου παραγωγής φωτός σε μια LED.

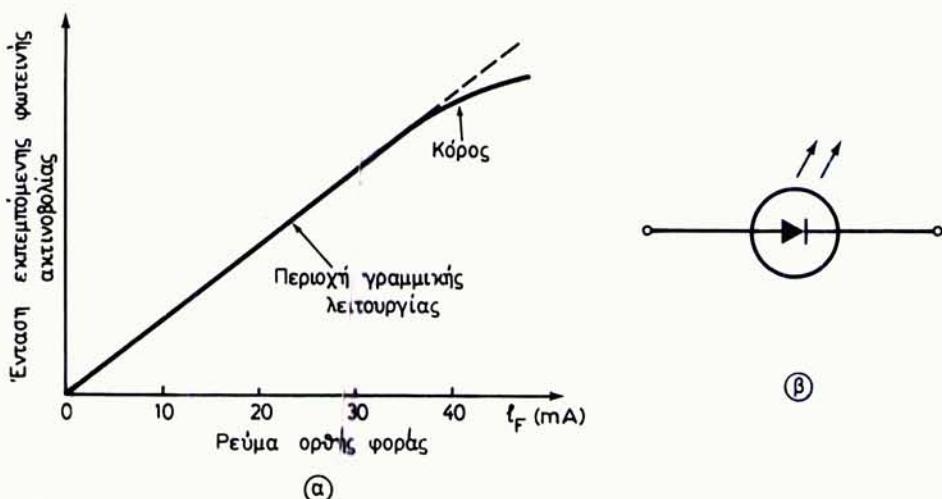


**Σχ. 8.11β.**

Φασματικές περιοχές εκπεμπόμενης ενέργειας ως συνάρτηση του μήκους κύματος.

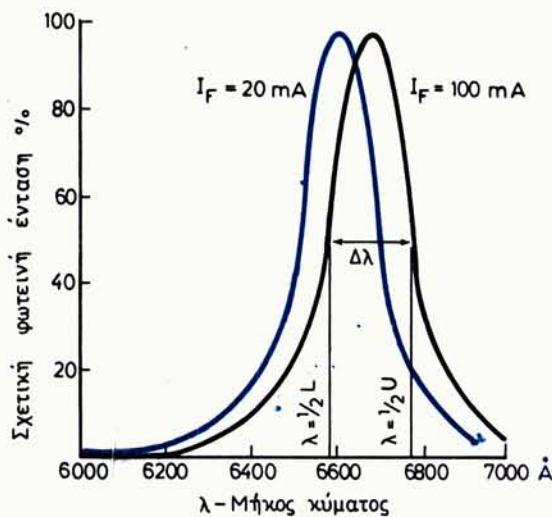
Από αυτή φαίνεται ότι από μια τιμή ρεύματος καὶ πέρα η ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας τείνει να πάρει σταθερή τιμή, δύσο κι αν αυξάνεται το ρεύμα. Φυσικά ο κατασκευαστής δίνει το μέγιστο επιτρεπόμενο ρέύμα για κάθε δίοδο.

Στο σχήμα 8.11δ φαίνεται η καμπύλη φασματικής εκπομπής μιας LED GaAsP. Αυτή εκφράζει τη σχετική ένταση του εκπεμπόμενου φωτός σε συνάρτηση με το μήκος κύματος. Από τη μορφή της καμπύλης φαίνεται ότι η ένταση του φωτός που εκπέμπεται έχει ενα μέγιστο μήκος κύματος. Το μήκος κύματος αυτό μεταβάλλεται



Σχ. 8.11γ.

α) Καμπύλη μεταβολής της φωτεινής εντάσεως LED σε συνάρτηση με το ρεύμα ορθής φοράς που τη διαρρέει. β) Συμβολισμός διόδου LED.



Σχ. 8.11δ.

Καμπύλες φασματικής εκπομπής LED GaAsP.

ελαφρά, όταν αλλάζει η ένταση του ρεύματος κατά την ορθή φορά της διόδου. Στην περίπτωση της LED αυτής το εκπεμπόμενο φως είναι στην περιοχή του κόκκινου.

Για το ορατό φωτεινό φάσμα υπάρχουν στο εμπόριο LED που εκπέμπουν φως κίτρινο, πράσινο, πορτοκαλί και κόκκινο κυρίως στις περιοχές των  $6350 \text{ Å}$  και των  $6550 \text{ Å}$ . Τα τυπικά ρεύματα λειτουργίας τους είναι από  $10$  ως  $50 \text{ mA}$  και η κατανάλωσή τους γύρω στα  $20 \text{ mW}$ .

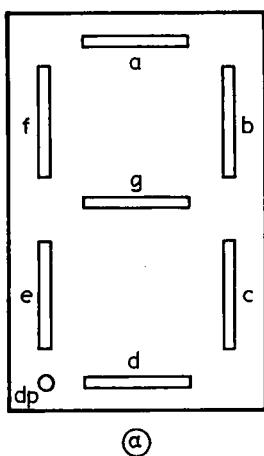
Η ακτινοβολούμενη ισχύς είναι περίπου  $2 \text{ } \mu\text{W/S}_r$  (μικροβάτ ανά στερακτίνιο),

για το πράσινο,  $4 \mu\text{W}/\text{S}_r$  στο κίτρινο και  $20 \mu\text{W}/\text{S}_r$  στο κόκκινο ( $6350 \text{ \AA}$ ).

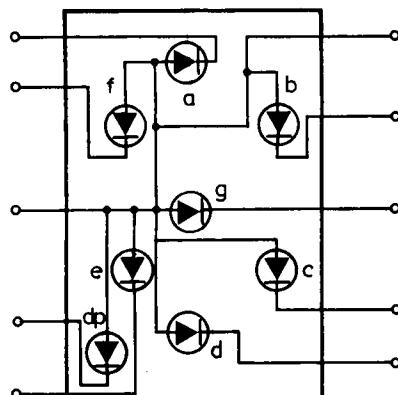
Αν λάβομε υπόψη ότι αυτό το φως εκπέμπεται σε μια κωνική δέσμη με γωνία  $\pm 45^\circ$ , δηλαδή δύο στερεακτινών, η ολική ισχύς ακτινοβολίας μιας LED κόκκινου χρώματος θα είναι  $40 \mu\text{W}$  στην περιοχή των  $6350 \text{ \AA}$ .

Οι δίοδοι φωτοεκπομπής χρησιμοποιούνται σήμερα ως ενδεικτικές λυχνίες σε πλήθος από ηλεκτρονικές συσκευές. Μια πολύ συνηθισμένη εφαρμογή τους είναι στο σχηματισμό π.χ. φωτεινών αριθμών.

Στο σχήμα 8.11ε(α) φαίνεται η αρχή της κατασκευής μιας τέτοιας διατάξεως. Αυτή αποτελείται από 7 φωτεινά τμήματα [σχ. 8.11ε(α)] και μια τελεία (dp) ειδικά κατασκευασμένα έτσι που να φωτίζονται από LED και τοποθετημένα όπως φαίνεται στο σχήμα.



Ⓐ



Ⓑ

Σχ. 8.11ε.

Διάταξη: α) Ενδείξεων με LED 7 φωτεινών τμημάτων (a, b, c, d, e, f, g). β) Των αντίστοιχων LED.

Οι αντίστοιχες θέσεις των LED που τα φωτίζουν φαίνονται στο σχήμα 8.11ε(β). Με την εφαρμογή καταλλήλων τάσεων φωτίζονται κάθε φορά τα τμήματα που χρειάζονται για να σχηματισθεί ένα ψηφίο από το 0 ως το 9 ή και η τελεία.

Το σύνολο μπορεί να πάρει πάρα πολύ μικρές διαστάσεις. Οι τάσεις που χρησιμοποιούνται για κάθε τμήμα είναι από 1,7 ως 3,3 V. Σαν ενδεικτικές λυχνίες οι LED πλεονεκτούν απέναντι στις λυχνίες πυρακτώσεως, εκτός από τον δύκο και το βάρος, και στην κατανάλωση. Για μια ενδεικτική λυχνία πυρακτώσεως, π.χ. 6,3 V, 150 mA, χρειαζόμαστε ισχύ 945 mW. Με μια LED μπορεί να παραχθεί φως αρκετά ισχυρό με 20 mA στα 1,52 V, δηλαδή 30,4 mW. Άλλωστε ακόμη και με 2 mA μια τέτοια δίοδος δίνει αρκετό φως.

Παρουσιάζουν επίσης ταχύτητα λειτουργίας και ευκρίνεια στην ανάγνωση. Ο χρόνος ζωής τους είναι πάνω από 100000 ώρες.

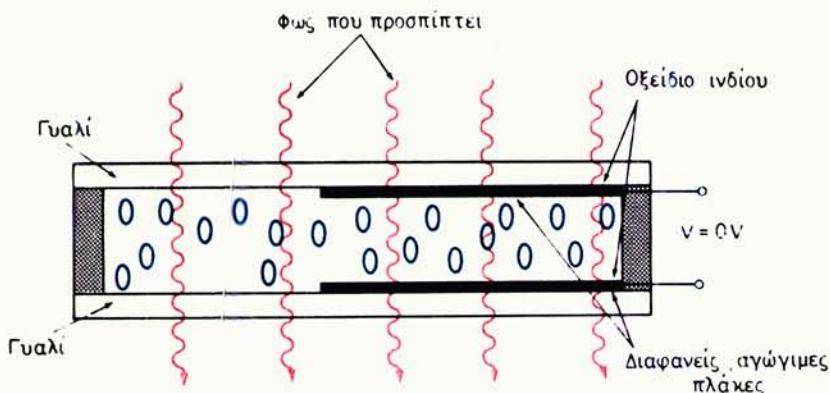
Ενδεικτικές LED χρησιμοποιούνται στους υπολογιστές ταύτης, στα ρολόγια, στα όργανα μετρήσεων και σε πολλές άλλες περιπτώσεις.

Χρήσιμο είναι επίσης να σημειώσουμε ότι, κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις, η δίοδος φωτοεκπομπής μπορεί να εκπέμπει μονοχρωματική δέσμη. Μια τέτοια δίοδος λέγεται **δίοδος Λέιζερ** (Laser). Τέτοιες δίοδοι χρησιμοποιούνται σε μοντέρνα συστήματα τηλεπικοινωνιών με οπτικές ίνες.

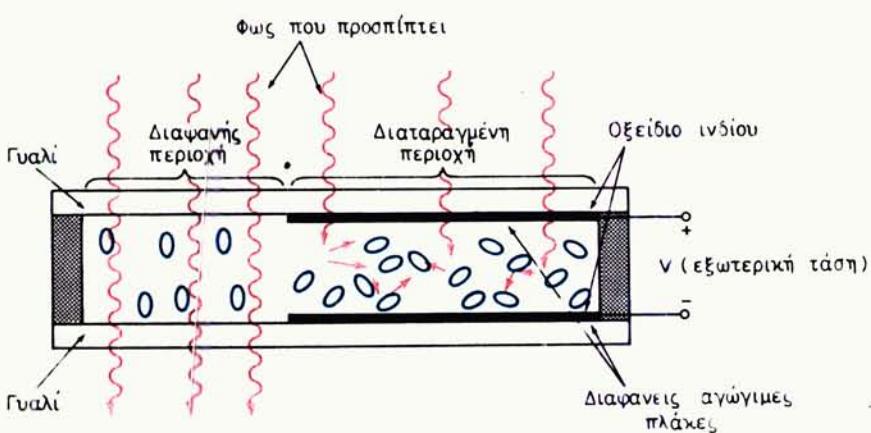
### Διατάξεις υγρού κρυστάλλου.

Στις ενδεικτικές συσκευές χρησιμοποιούνται εκτός από τις LED και διατάξεις με υγρούς κρυστάλλους Liquid Crystal Display (LCD). Οι υγροί κρύσταλλοι είναι υλικά, συνήθως οργανικά, ρευστά σαν υγρά, που δύναται να μοριακή τους δομή εμφανίζει αρκετές ιδιότητες όμοιες με αυτές των στρεψών. Η λειτουργία ενδεικτικών διατάξεων με υγρούς κρυστάλλους βασίζεται στη διάχυση ή στην πόλωση φωτός που περνάει μέσα από τον υγρό κρύσταλλο.

Στις διατάξεις με διάχυση υπάρχει ένα δοχείο με γυάλινα τοιχώματα που έχει δύο παράλληλες πλάκες από αγώγιμο υλικό (π.χ. οξείδιο του ινδίου). Οι πλάκες αυτές είναι διαφανείς (σχ. 8.11στ.).

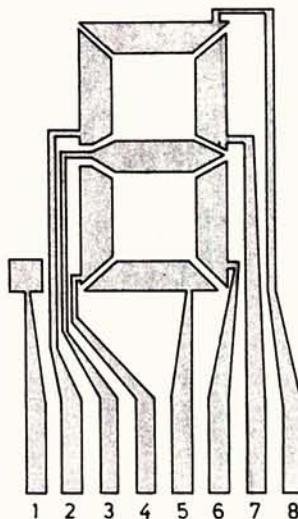


**Σχ. 8.11στ.**  
Παράσταση νηματικού κρυστάλλου χωρίς εξωτερική πόλωση.



**Σχ. 8.11ζ.**  
Παράσταση νηματικού κρυστάλλου με εξωτερική πόλωση.

Μέσα στο δοχείο υπάρχει υγρός νηματικός κρύσταλλος. Τα μόρια του κρυστάλλου είναι έτσι προσανατολισμένα και τακτοποιημένα ώστε το φως μπορεί και περνάει με τρόπο που το σύνολο να είναι διαφανές. Αν τώρα συνδεθεί μια τάση στις



Σχ. 8.11η.

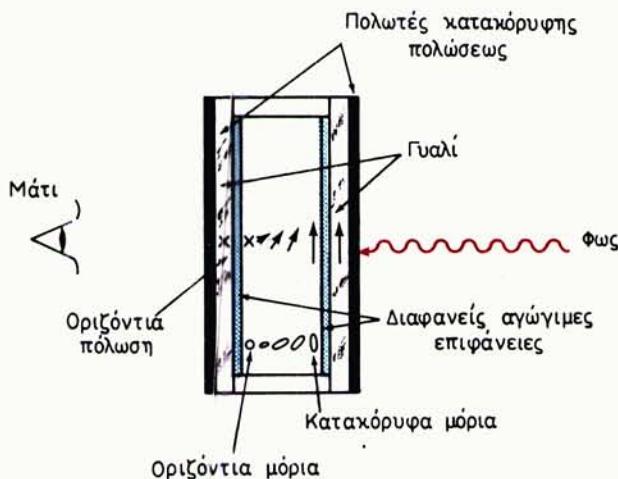
παράλληλες πλάκες, ή τάξη των μορίων που είναι ανάμεσά τους διαταράσσεται (σχ. 8.11ζ), με αποτέλεσμα σ' αυτήν την περιοχή να αλλάζει ο δείκτης διαθλάσσεως, το φως να διαχέεται και η όψη του κρυστάλλου να αλλάζει. Το φαινόμενο αυτό εκμεταλλεύδημαστε στη δημιουργία π.χ. ενδείξεων με ψηφία.

Στο σχήμα 8.11η φαίνεται ενα σύνολο από αγώγιμες πλάκες που καταλήγουν σε διαφανή τμήματα.

Έχοντας δυο σύνολα διαφανειών αγώγιμων πλακών, όπως αυτό το σύνολο που φαίνεται στο σχήμα 8.11η, μπορούμε τοποθετώντας το ένα σύνολο απέναντι από το άλλο και βάζοντας ανάμεσά τους υγρό κρύσταλλο, να σχηματίσουμε διάφορα ψηφία, συνδέοντας τάσεις στους κατάλληλους ακροδέκτες. Ήτσι π.χ. αν θέλομε να σχηματίσουμε το 3, συνδέομε τάση στα ζεύγη 8,7,3,6,5.

Στις διατάξεις με πόλωση του φωτός το δοχείο, εκτός από τις αγώγιμες επιφάνειες, έχει και εξωτερικά δύο πολωτές (σχ. 8.11θ). Και οι δύο πολωτές μπορεί να είναι κατακόρυφης πολώσεως. Το φως μπαίνει από δεξιά και πολώνεται κατακόρυφα. Τα μόρια του κρυστάλλου, μέσα στο δοχείο, όταν δεν υπάρχει εξωτερική τάση, με τη βοήθεια κατάλληλου επιχρίσματος των αγώγιμων πλακών, είναι στην πλευρά που μπαίνει το φως, κατακόρυφα προσανατολισμένα και στην απέναντι που βγαίνει οριζόντια. Υπάρχει δηλαδή από τη μια πλευρά στην άλλη μια σταδιακή στροφή της θέσεως των μορίων από 0 σε 90°. Το κατακόρυφα πολωμένο φως διασχίζοντας τον υγρό κρύσταλλο στρέφει και αυτό το επίπεδο πολώσεως του και έτσι όταν φθάνει στην απέναντι πλευρά το επίπεδο πολώσεως του έχει στραφεί κατά 90°, με συνέπεια να μην μπορεί να περάσει από τον απέναντι κατακόρυφο πολωτή.

Αν τώρα ανάμεσα στις αγώγιμες πλάκες τεθεί μια διαφορά δυναμικού, τότε ο προσανατολισμός των μορίων γίνεται ομοιόμορφος, το φως δεν αλλάζει επίπεδο πολώσεως και περνά από τον απέναντι πολωτή. Με συνδυασμούς των επιπέδων πολώσεως των μορίων και των πολωτών μπορούμε να έχουμε φωτεινά ψηφία, σε σκοτεινό φόντο ή το αντίθετο.



**Σχ. 8.11θ.**  
Ενδείκτης με πόλωση του φωτός.

Ο σχηματισμός των ψηφίων γίνεται δύμοια με την περίπτωση της λειτουργίας διατάξεων με βάση τη διάχυση.

Οι διατάξεις με υγρούς κρυστάλλους καταναλώνουν πολύ μικρότερη ισχύ από τις LED. Π.χ. με διατάξεις LED που θα χρειάζονταν ισχείς της τάξεως των mW οι ισοδύναμες με υγρούς κρυστάλλους εργάζονται με ισχείς της τάξεως των μW.

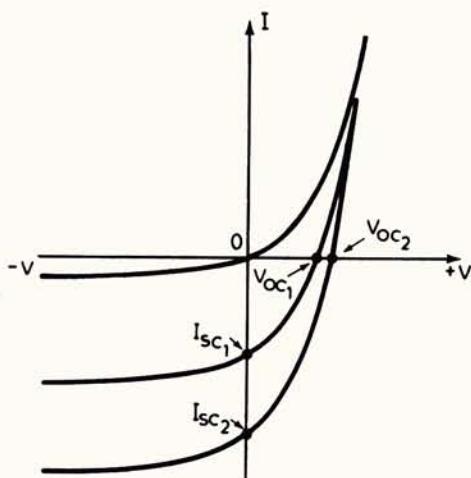
Απαιτούν όμως εξωτερικές ή εσωτερικές πηγές φωτός και οι θερμομετρικές περιοχές σωστής λειτουργίας τους είναι μόνο μεταξύ 0° και 60°C.

## 8.12 Ηλιακά στοιχεία.

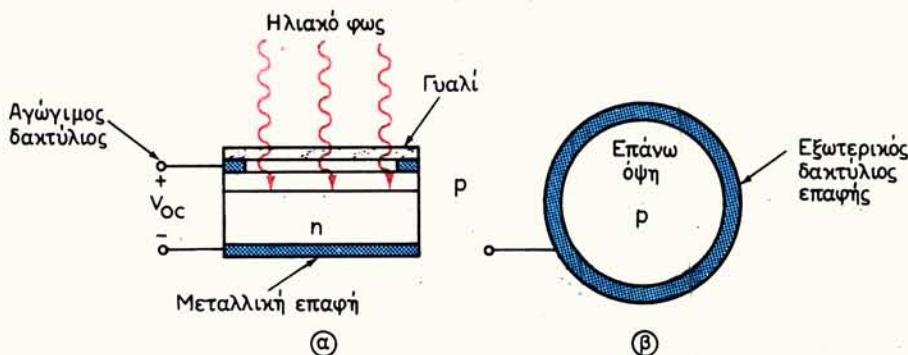
Είναι γνωστό ότι ο ήλιος στέλνει στη Γη ποσά ενέργειας που σ' ένα έτος είναι γύρω στα  $2 \times 10^{18}$  kWh. Για τη μετατροπή της ενέργειας αυτής σε εκμεταλλεύσιμες μορφές, γίνονται τεράστιες προσπάθειες τα τελευταία χρόνια. Περισσότερο ενδιαφέρον τώρα παρουσιάζει η απευθείας μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε θερμική ή ηλεκτρική. Μία μέθοδος της απευθείας μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική στηρίζεται στο **φωτοβολταϊκό φαινόμενο**. Με τη μέθοδο αυτή η ενέργεια των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας που πέφτουν πάνω σε μια κατάλληλη δομή από ημιαγωγούς μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.

Είδαμε ότι σε μια επαφή P - N το ανάστροφο ρεύμα ελαττώνεται όσο ελαττώνεται η ανάστροφη τάση και όταν αυτή γίνει μηδέν το ρεύμα μηδενίζεται για να αρχίσει να άγει κατά την ορθή φορά όταν η τάση γίνει τάση κατά την ορθή φορά (σχ. 8.12a).

Αν όμως προσφέρουμε κάποια μορφή ενέργειας, στην περίπτωσή μας φως, τότε είναι δυνατόν με την ενέργεια των φωτονίων να αποσπασθούν ηλεκτρόνια από τους δεσμούς του αυτοτελούς ημιαγωγού και να δημιουργηθούν ζεύγη όπων και ηλεκτρονίων. Οι οπές και τα ηλεκτρόνια που θα δημιουργηθούν μέσα στην περιοχή απογυμνώσεως θα κινηθούν αντίθετα προς την ορθή φορά, με συνέπεια, την αυξηση του ανάστροφου ρεύματος. Έτσι τώρα, ακόμα και αν η ανάστροφη τάση γί-



Σχ. 8.12α.

Σχ. 8.12β.  
Ηλιακό στοιχείο. α) Τομή. β) Επάνω όψη.

νει τάση κατά την ορθή φορά, θα εξακολουθεί να υπάρχει ανάστροφο ρεύμα. Το ρεύμα αυτό για να μηδενιστεί πρέπει η τάση κατά την ορθή φορά να πάρει κάποια τιμή  $V_{oc}$  πάνω από το μηδέν (σχ. 8.12α). Η τιμή αυτή εξαρτάται από την ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας. Την τάση αυτή λέμε **φωτοβολταϊκό δυναμικό**.

Μια διάταξη που με βάση το φωτοβολταϊκό φαινόμενο μετατρέπει την ηλιακή φωτονική ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική είναι το ηλιακό στοιχείο (Solar cell ή Solar battery).

Τυπική δομή ενός ηλιακού στοιχείου εικονίζεται στο σχήμα 8.12β(α)/(β). Αυτό αποτελείται από μια επαφή P-N. Το τμήμα P είναι λεπτότατο και επιτρέπει έτσι στα φωτόνια να φθάνουν ως την περιοχή απογυμνώσεως της επαφής. Πάνω από το τμήμα P υπάρχει ένας μεταλλικός δακτύλιος και κάτω από το P μια μεταλλική πλάκα. Το πρώτο χρησιμεύει για να πάρομε το θετικό πόλο του στοιχείου και το δεύτερο για να πάρομε τον αρνητικό.

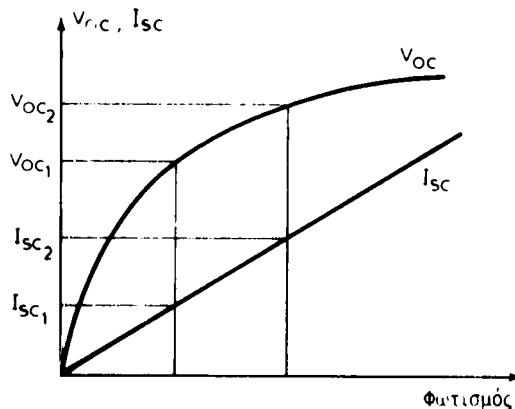
Πάνω από το δακτύλιο υπάρχει μια γυάλινη πλάκα. Τα φωτόνια που πέφτουν πάνω στην πλάκα αυτή τη διαπερνούν όπως διαπερνούν και το λεπτό στρώμα P και φθάνουν ως την περιοχή απογυμνώσεως. Εκεί απορροφούνται, με συνέπεια

τη δημιουργία οπων και ηλεκτρονίων, που κινούνται με την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου της περιοχής απογυμνώσεως, οι οπές προς το τμήμα P και τα ηλεκτρόνια προς το τμήμα N. Αυτό έχει ως συνέπεια την εμφάνιση μιας ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως στους ακροδέκτες του φωτοκυττάρου. Η ΗΕΔ αυτή είναι ίση με τη φωτοβολταϊκή τάση  $V_{oc}$  του στοιχείου.

Αν βραχυκυκλώσουμε τους ακροδέκτες του στοιχείου, τότε θα κυκλοφορήσει ένα ρεύμα  $I_{sc}$ , το ρεύμα βραχυκυκλώματος.

Από τις χαρακτηριστικές του σχήματος 8.12a βλέπουμε πως η σχέση μεταξύ εντάσεως του φωτός και του ρεύματος βραχυκυκλώματος είναι γραμμική. Όταν δηλαδή διπλασιάσουμε την ένταση του φωτός, διπλασιάζεται το  $I_{sc}$ . Δεν υπάρχει όμως η ίδια σχέση και με την  $V_{oc}$ . Αυτή στην αρχή αυξάνει όσο αυξάνει η φωτεινή ένταση, αλλά κατόπιν παραμένει σχεδόν σταθερή έστω και αν η φωτεινή ένταση αυξάνει.

Στο σχήμα 8.12γ εικονίζονται καμπύλες μεταβολής της τάσεως  $V_{oc}$  και του ρεύματος  $I_{sc}$  σε συνάρτηση με το φωτισμό.



Σχ. 8.12γ.

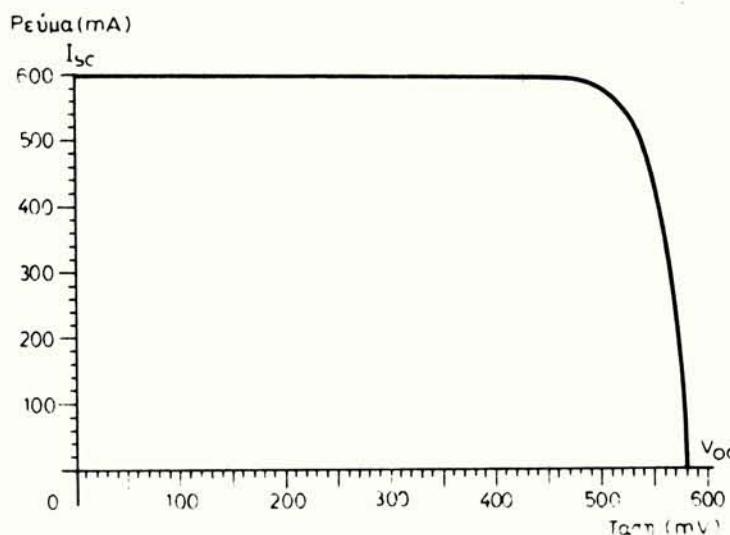
Το σελήνιο και το πυρίτιο είναι τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνηθέστερα για την κατασκευή ηλιακών στοιχείων. Εκτός απ' αυτά χρησιμοποιείται και αρσενικούχο γάλλιο, αρσενικούχο ίνδιο ή θειούχο κάδμιο. Τα φθηνότερα ηλιακά στοιχεία είναι κατασκευασμένα από πυρίτιο.

Χαρακτηριστικά μεγέθη για τα ηλιακά στοιχεία είναι η ΗΕΔ τους, το ρεύμα βραχυκυκλώματος, η ισχύς που μπορεί να δώσει, η εσωτερική αντίστασή του και η φασματική απόκριση.

Όσο μικρότερη είναι η εσωτερική αντίσταση ενός ηλιακού στοιχείου τόσο η παρεχόμενη ισχύς είναι μεγαλύτερη. Η αντίσταση αυτή μπορεί να είναι από μικρό κλάσμα του  $\Omega$  ως μερικά  $\Omega$ .

Στο σχήμα 8.12δ φαίνεται μια τυπική χαρακτηριστική τάσεως - ρεύματος ενός ηλιακού στοιχείου με  $I_{sc} = 600 \text{ mA}$  και  $V_{oc} = 580 \text{ mV}$ .

Γενικά για ένα στοιχείο πυριτίου η ΗΕΔ είναι της τάξεως των  $600 \text{ mV}$  ενώ μια συνηθισμένη πυκνότητα ρεύματος βραχυκυκλώματος  $I_{sc}$  είναι  $30 \text{ mA/cm}^2$ . Όπως είπαμε και προηγουμένως, το ρεύμα βραχυκυκλώματος εξαρτάται από την ένταση και από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που προσπίπτει.



**Σχ. 8.126.**  
Τυπική χαρακτηριστική τάσεως-ρεύματος ηλιακού στοιχείου.

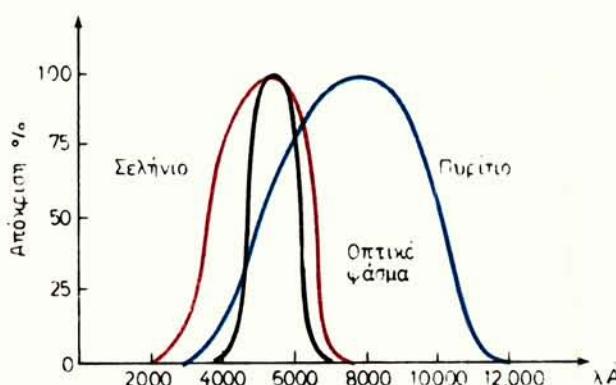
Η απόδοση η ενός ηλιακού στοιχείου δίνεται από το πηλίκο της ηλεκτρικής ισχύος  $P_0$  που δίνει προς την ισχύ της ακτινοβολίας  $P$  που προσπίπτει.

Δηλαδή:

$$\eta = \frac{P_0}{P_i}$$

Τα πιο αποδοτικά είναι τα στοιχεία αρσενικούχου γαλλίου (GaAs). Η απόδοσή τους είναι γύρω στα 23%. Τα στοιχεία πυριτίου έχουν απόδοση 10-15%.

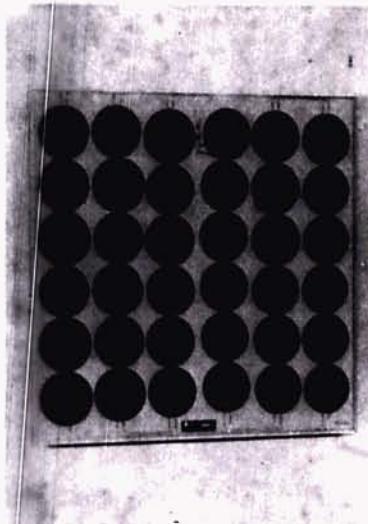
Η απόδοση των στοιχείων εξαρτάται και από τη συχνότητα της ακτινοβολίας που προσπίπτει. Στο σχήμα 8.12ε φαίνεται η ευαισθησία στοιχείων με σελήνιο και πυρίτιο, σε σύγκριση με την ευαισθησία του ανθρώπινου ματιού. Βλέπομε ότι τα



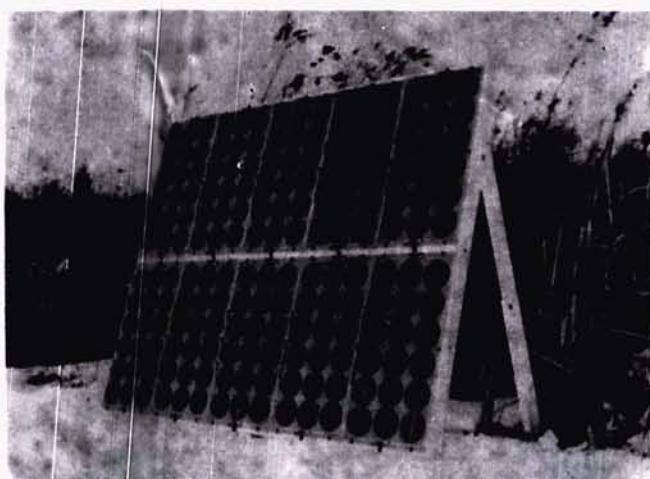
στοιχεία με σελήνιο προσαρμόζονται καλύτερα στην περιοχή του ορατού φάσματος, ενώ τα στοιχεία πυριτίου έχουν μεγαλύτερη ευαισθησία στην περιοχή των 8000 Å, στην περιοχή δηλαδή του υπέρυθρου.

Για τον υπολογισμό της αποδόσεως παίρνομε συνήθως ως ένταση αναφοράς τη φωτεινή ένταση  $100 \text{ mW/cm}^2$ .

Με τη σύνδεση πολλών στοιχείων σε σειρά ή παράλληλα (σχ. 8.12στ) μπορούμε να επιτύχουμε μεγαλύτερες τάσεις ή εντάσεις και φυσικά αυξημένη ισχύ. Αν π.χ. έχουμε ηλιακά στοιχεία με ΗΕΔ 0,45 V το καθένα μπορούμε συνδέοντας 30 από αυτά στη σειρά να επιτύχουμε τάση πάνω από 12 V αρκετή για τη φόρτιση μιας συμβατικής μπαταρίας 12 V.



**Σχ. 8.12στ.**  
Σύστημα 36 στοιχείων με ολική ισχύ W.



**Σχ. 8.12ζ.**  
Πίνακας με ηλιακά στοιχεία εγκαταστημένος στο ύπαιθρο.

Τα στοιχεία τοποθετούνται πάνω σε μια επίπεδη βάση που μπορεί να πάρει κατάλληλη θέση για να συλλέγει όσο γίνεται περισσότερη ηλιακή ενέργεια.

Μια εταιρία δίνει για ένα τέτοιο συνδυασμό τον πίνακα του σχήματος 8.12ζ.

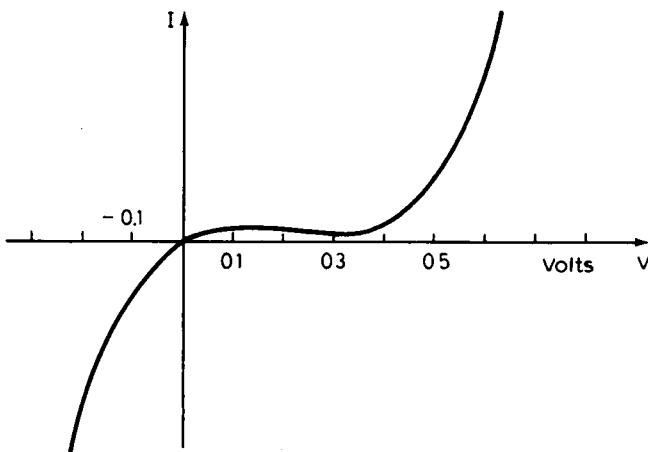
Τα ηλιακά στοιχεία βρίσκονται σήμερα στην κορυφή του ενεργειακού ενδιαφέροντος. Χρησιμοποιούνται τόσο σε διαστημικές συσκευές όσο και σε επίγειες. Έχουν κατασκευασθεί ηλεκτρικές γεννήτριες χαμηλής ισχύος για περιοχές που δε φθάνει το ηλεκτρικό δίκτυο. Επίσης τροφοδοτούνται φάροι, ραδιοφάροι, συστήματα αντλήσεως νερού, αναμεταδότες τηλεοράσεως, συστήματα προστασίας κλπ.

Ο χρόνος ζωής των ηλιακών στοιχείων είναι μερικές δεκαδες χρόνια.

Η λειτουργία τους πολλές φορές συνδυάζεται με τη φόρτιση παράλληλα συνδεμένων μπαταριών που τροφοδοτούν τις συσκευές όταν δεν υπάρχει φως για να προσβάλλει τα ηλιακά στοιχεία.

### 8.13 Δίοδος Backward.

Η δίοδος backward είναι ειδική περίπτωση διόδου tunnel. Είναι έτσι κατασκευασμένη, ώστε οι τάσεις κορυφής  $V_p$  και κοιλάδας  $V_v$  να είναι σχεδόν ίσες (σχεδόν μηδενικές). Η χαρακτηριστική μιας τέτοιας διόδου φαίνεται στο σχήμα 8.13.



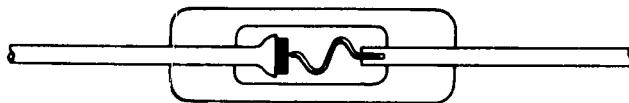
Σχ. 8.13.  
Χαρακτηριστική διόδου Backward.

Η χαρακτηριστική της, κατά την ορθή φορά, διαφέρει από τη χαρακτηριστική μιας συνηθισμένης διόδου. Στην ανάστροφη πόλωση όμως το ρεύμα αυξάνει απότομα για πολύ μικρές τιμές ανάστροφης τάσεως. Εδώ ακριβώς είναι και το ενδιαφέρον σημείο των διόδων backward. Αφού με πάρα πολύ μικρή (ανάστροφη) τάση το ρεύμα παίρνει μεγάλες τιμές, η δίοδος, με ανάστροφη πόλωση, έχει μεγάλη ταχύτητα λειτουργίας.

Οι δίοδοι αυτές χρησιμοποιούνται για ανδριθωση πολύ μικρών σημάτων αφού μπορούν και άγουν σημαντικά σε πολύ μικρότερη τάση απ' ό,τι οι συνηθισμένες δίοδοι. Χρησιμοποιούνται επίσης ως ανορθώτριες σε μεγάλες συχνότητες και τα χαρακτηριστικά τους δεν επηρεάζονται εύκολα από μεταβολές της θερμοκρασίας.

### 8.14 Δίοδοι ακίδας (Point contact diodes).

Οι δίοδοι αυτές είναι οι παλιότερες κρυσταλλοδίοδοι. Αποτελούνται από μια μεταλλική ακίδα που βρίσκεται σε επαφή μ' ένα δισκίο από ημιαγωγό (σχ. 8.14). Το σύνολο είναι κλεισμένο σε μια γυάλινη ή πολλές φορές κεραμική θήκη. Ο ημιαγωγός είναι κυρίως Ge ή Si αλλά χρησιμοποιούνται και άλλα υλικά όπως π.χ. αρσενικούχο γάλλιο (GaAs). Στις διόδους με Si η επαφή ακίδας ημιαγωγού είναι συνήθως μηχανική. Η ακίδα είναι από βολφράμιο ή κράμα βολφραμίου και το Si είναι τύπου P.



Σχ. 8.14.  
Δίοδος ακίδας Ge.

Οι περισσότερες δίοδοι ακίδας είναι τώρα δίοδοι Ge τύπου N σε επαφή με ακίδα τιτανίου. Η επαφή P-N δημιουργείται όταν από το σύστημα Ge-ακίδα διαβιβάσομε ένα ισχυρό παλμό ρεύματος. Στο σημείο της επαφής γίνεται σύντηξη μετάλλου-ημιαγωγού και δημιουργείται μία επαφή P-N με πολύ μικρή επιφάνεια.

Εξαιτίας άλλωστε της πολύ μικρής επιφάνειας επαφής και η χωρητικότητα επαφής  $C_T$  είναι πολύ μικρή. Αυτό δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιούνται οι δίοδοι ακίδας σε πάρα πολύ υψηλές συχνότητες (μέχρι 30 GHz του πυριτίου και 100 MHz του Ge).

Σε ακόμη υψηλότερες συχνότητες φθάνουν οι δίοδοι με GaAs. Υπάρχουν και δίοδοι που έχουν ακίδα από χρυσό.

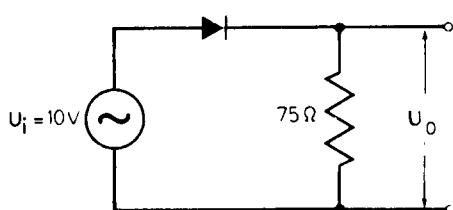
Στις διόδους αυτές ο άνοδος, που κατά την ορθή φορά συνδέεται με το θετικό πόλο της πηγής, είναι η ακίδα, και η κάθοδος τό δισκίο από ημιαγωγό. Η κάθοδος σημειώνεται στο περίβλημα της διόδου συνήθως με ένα χρωματιστό δακτύλιο.

Μειονεκτήματα των διόδων ακίδας είναι η μικρή ισχύς, η μηχανική αστάθεια στην επαφή χωρίς σύντηξη, το μεγάλο ανάστροφο ρεύμα, η αστάθεια της αντιστάσεώς της και η ευκολία με την οποία καταστρέφεται.

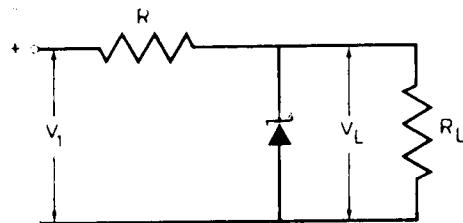
Οι δίοδοι ακίδας έχουν σε μεγάλο μέρος αντικατασταθεί από διόδους επαφής P-N, ειδικής κατασκευής για υψηλές συχνότητες.

### 8.15 Ασκήσεις.

- Μια δίοδος επαφής όταν πολωθεί κατά την ορθή φορά με τάση 1 Volt διαρρέεται από ρεύμα  $I_D$ , στους 300°K. Πόση πρέπει να γίνει η τάση πολώσεως κατά την ορθή φορά για να διπλασιασθεί το ρεύμα που θα της διαρρέει;
- Δίοδος πυριτίου έχει ανάστροφο ρεύμα κόρου  $I_0 = 30 \mu A$ . Πόσο θα είναι το ρεύμα που θα την διαρρέει αν σε θερμοκρασία 125°C πολωθεί κατά την ορθή φορά με τάση 0,8 V;
- Δίοδος πυριτίου καταναλώνει 3 W όταν διαρρέεται από ρεύμα 2 A, με πόλωση κατά την ορθή φορά. Ποιά είναι η τάση ιστα άκρα της;
- Στο κύκλωμα του σχήματος 8.15a η τάση  $U_i$  είναι ημιτονική με πλάτος 10 V. Η δίοδος είναι γερμανίου με αντίσταση  $r_{ac}$  κατά την ορθή φορά 25 Ω. Σχεδιάστε τη μορφή της τάσεως εξόδου  $U_o$  σε άξονες τάσεως-χρόνου. Πόση θα είναι η μέγιστη τιμή που θα πάρει η  $U_o$ ;
- Στο κύκλωμα του σχήματος 8.15b η  $V_i = 40$  V και η  $R = 50 \Omega$ . Η δίοδος Zenner έχει μέγιστη ισχύ 3 W και τάση  $V_z = 20$  V. Η εσωτερική της αντίσταση  $r_z$  να θεωρηθεί αμελητέα. Ανάμεσα σε



Σχ. 8.15α.



Σχ. 8.15β.

ποιές τιμές μπορεί να μεταβάλλεται η  $R_L$  χωρίς να αλλάζει η  $V_L$ ;

6. Αν στο κύκλωμα του σχήματος 8.15β  $R = 3 \Omega$ ,  $R_L = 10 \Omega$ ,  $V_z = 10 \text{ V}$  και η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς  $P_{\max} = 20 \text{ W}$ , ποιά είναι η μέγιστη και ποιά η ελάχιστη τιμή που πρέπει να πάρνει η  $V_1$ ;
7. Να καθορίσετε την τιμή της χωρητικότητας  $C_T$  σε μια δίοδο με διάχυση, όταν η τιμή της χωρητικότητας χωρίς εξωτερική τάση  $C_{T(0)}$  είναι  $80 \text{ pF}$ , η τάση φραγμού  $V_0 = 0,7 \text{ V}$  και η ανάστροφη τάση  $V_r = 4,2 \text{ V}$ .
8. Δίοδος πυριτίου έχει ρεύμα  $100 \text{ mA}$ , όταν πολώνεται με τάση ορθής φοράς  $0,7 \text{ V}$ . Ποιά θα είναι η θερμοκρασία στην επαφή της, αν η θερμική αντίσταση του περιβάλλοντάς της είναι  $0,4^\circ\text{C}/\text{mW}$  και η θερμοκρασία του περιβάλλοντός της επίσης  $25^\circ\text{C}$ ;

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΑΤΟ

### ΑΝΟΡΘΩΤΕΣ

#### 9.1 Γενικά.

Σχεδόν όλες οι ηλεκτρονικές συσκευές για να λειτουργήσουν, χρειάζονται πηγές συνεχούς τάσεως. Για συσκευές που απαιτούν μικρή ισχύ ή για φορητές συσκευές χρησιμοποιούνται συνήθως ως πηγές συνεχούς τάσεως μπαταρίες. Στις συσκευές όμως που δεν είναι φορητές ή απαιτούν μεγάλη ισχύ, χρησιμοποιούνται διατάξεις που μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή.

Οι συσκευές που μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή λέγονται **τροφοδοτικά**.

Οι βασικές λειτουργίες ενάς τροφοδοτικού είναι οι παρακάτω.

#### α) Ο μετασχηματισμός της τάσεως.

Η αλλαγή δηλαδή της τιμής των εναλλασσόμενης τάσεως που έχουμε στη διάθεσή μας, σε μια τιμή τέτοια, ώστε να μπορούμε να δημιουργήσουμε την κατάλληλη συνεχή. Η εναλλασσόμενη τάση που διαθέτομε συνήθως είναι η τάση του δικτύου. Π.χ., για την Ελλάδα 220 V. Η χρησιμοποίηση του μετασχηματιστή είναι αναγκαία ακόμα και αν δεν πρόκειται να μετατρέψουμε την τιμή της τάσεως (λόγος μετασχηματισμού 1:1) για λόγους προστασίας από ηλεκτροπληξίες.

#### β) Η ανόρθωση.

Κάθε ηλεκτρική διάταξη που παρουσιάζει μικρή αντίσταση στο ηλεκτρικό ρεύμα κατά την πόλωσή της κατά μια φορά και μεγάλη κατά την πόλωσή της αντίθετα, λέγεται **ανορθωτής**. Ο ανορθωτής μπορεί να μετατρέψει ένα εναλλασσόμενο ρεύμα σε ρεύμα το οποίο θα περιέχει μια συνεχή συνιστώσα που προσπαθούμε να εκμεταλλευθούμε. Τέτοιες διατάξεις είναι π.χ. οι κρυσταλλοδίοδοι, οι δίοδοι ηλεκτρονικές λυχνίες, οι ανορθιωτές σεληνίου κ.ά.

#### γ) Φίλτρα.

Η τάση που βγαίνει μετά την ανόρθωση, εκτός από τη συνεχή συνιστώσα, περιέχει και πλήθος από εναλλασσόμενες συνιστώσες που έχουν συχνότητα ίση και πολλαπλάσια της συχνότητας της τάσεως του δικτύου αλλά με πλάτη που μικραίνουν όσο πηγαίνουμε προς αρμονικές μεγαλύτερης συχνότητας. Την επίδραση αυτών των αρμονικών υποβιβάζομε χρησιμοποιώντας ειδικά κυκλώματα τα οποία ονομάζονται **φίλτρα**. Τα πιο συνηθισμένα φίλτρα κατασκευάζονται με συνδυασμούς πυκνωτών, αντιστάσεων και πηνίων με τρόπους που θα δούμε παρακάτω.

#### δ) Σταθεροποίηση.

Σε πολλά τροφοδοτικά υπάρχουν ειδικά κυκλώματα που κρατούν σταθερή την

τάση που δίνει το τροφοδοτικό όταν μεταβάλλεται το ρεύμα του φορτίου του ή η τάση του δικτύου.

## 9.2 Δίοδοι ανορθώτριες.

Όπως έχομε αναφέρει σε προηγούμενα κεφάλαια οι δίοδοι (ηλεκτρονικές ή κρυσταλλοδίοδοι) παρουσιάζουν ανορθωτικές ιδιότητες.

Παρουσιάζουν δηλαδή μικρή αντίσταση όταν είναι πολωμένες κατά τη μια φορά και μεγάλη όταν είναι πολωμένες κατά την αντίθετη.

Βασική λειτουργική διαφορά ανάμεσα στα δύο είδη λυχνιών είναι ότι στις ηλεκτρονικές λυχνίες το ανάστροφο ρεύμα είναι πρακτικά μηδενικό, ενώ στις κρυσταλλοδίδους είναι μικρό αλλά όχι μηδενικό για ορισμένα όρια τάσεως και μπορεί να γίνει πολύ μεγάλο όταν υπερβούμε τα όρια αυτά.

Στις ηλεκτρονικές λυχνίες κενού εμφανίζεται επίσης κόρος στο ανοδικό τους ρεύμα, ενώ στις κρυσταλλοδίδους το ρεύμα δεν παρουσιάζει κόρο στην περίπτωση πολώσεως κατά την ορθή φορά.

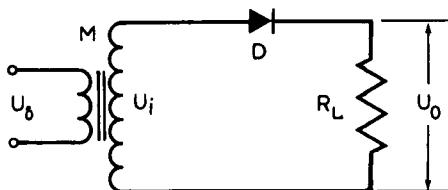
Για τη μελέτη της ανορθώσεως θα θεωρήσουμε ότι εργαζόμαστε με κρυσταλλοδίδους των οποίων η τάση  $V_y$ , όπου το ρεύμα κατά την ορθή φορά γίνεται απότομα μεγάλο, είναι μηδέν. Θα θεωρήσουμε επίσης ότι το ανάστροφο ρεύμα είναι μηδέν και η αντίσταση της διόδου κατά την ορθή φορά  $R_f$  είναι πολύ μικρότερη από την αντίσταση φόρτου του κυκλώματος ανορθώσεως και την αμελούμε. Επίσης θα θεωρήσουμε την αντίσταση φόρτου καθαρά ωμική αντίσταση και το μετασχηματιστή ίδιανικό. Θα θεωρούμε επίσης ότι οι τάσεις που συνδέονται για ανόρθωση είναι ημιτονικές της μορφής  $U_i = U_m \sin \omega t$  όπου  $U_i$  είναι η στιγμιαία τιμή και  $U_m$  η μέγιστη. Αντίστοιχα θα ισχύουν και για το ρεύμα που θα θεωρούμε ότι είναι της μορφής  $I_m = I_m \sin \omega t$  (Ι στιγμιαία τιμή και  $I_m$  μέγιστη).

### 9.2.1 Ημιανόρθωση.

Ας θεωρήσουμε το κύκλωμα του σχήματος 9.2α, που είναι πρακτικό κύκλωμα ανορθωτή με δίοδο. Το κύκλωμα αποτελείται από ένα μετασχηματιστή  $M$  που μετατρέπει την τάση του δικτύου  $U_d$  στην επιθυμητή τάση για ανόρθωση  $U_i$ . Επίσης από μια δίοδο  $D$ , και από την αντίσταση φόρτου  $R_L$  από τα άκρα της οποίας παίρνομε την τάση εξόδου  $U_o$ . Έστω ότι η τάση  $U_i$  είναι ημιτονική (σχ. 9.2β) Δηλαδή:

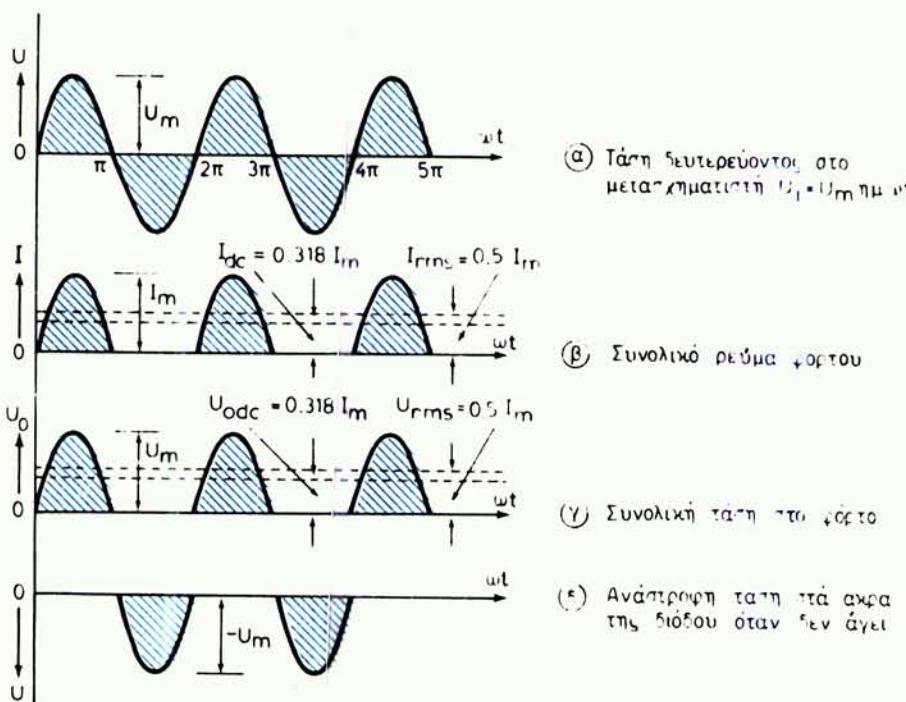
$$U_i = U_m \sin \omega t$$

και η δίοδος εργάζεται με τις προϋποθέσεις που θέσαμε στην προηγούμενη παραγραφο. Δηλαδή:  $R_f < < R_L$ , τάση  $V_y = 0$  και ανάστροφο ρεύμα μηδενικό.



Σχ. 9.2α.

Κύκλωμα απλής ανορθώσεως με δίοδο.



Σχ. 9.2β.

Μορφές τάσεως και ρεύματος σε απλή ανόρθωση.

Κατά τη θετική ημιπερίοδο ( $0 \leq \omega t \leq \pi$ ) η δίοδος άγει και το κύκλωμα διαρρέεται από ένα ρεύμα  $I$  που δημιουργεί πτώση τάσεως  $U_0$  στα άκρα της αντιστάσεως  $R_L$ .

Όσο η τάση  $U_1$  είναι θετική, η δίοδος άγει και συνεπώς έχουμε πτώση τάσεως στα άκρα της  $R_L$ . Όταν όμως η  $U_1$  γίνεται αρνητική  $\pi \leq \omega t \leq 2\pi$ , η δίοδος παύει να άγει και η  $U_0$  γίνεται μηδέν, αφού το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση  $R_L$  γίνεται μηδέν. Θα έχουμε δηλαδή για το ρεύμα  $I$ :

$$I \simeq \frac{U_m}{R_L} \eta \mu \omega t \quad 0 \leq \omega t \leq \pi \quad (9.2.1)$$

$$I = 0 \quad \pi \leq \omega t \leq 2\pi \quad (9.2.2)$$

Αντίστοιχα ισχύουν και για την τάση στα άκρα του φόρτου  $U_0$  (τάση εξόδου).

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι ρεύμα, και συνεπώς τάση στην έξοδο, έχουμε μόνο στη μισή περίοδο. Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι έχουμε **ημιανόρθωση** η απλή ανόρθωση του ρεύματος (ή της τάσεως). Από την ανάλυση κατά Fourier της ημιανόρθωμένης κυματομορφής του ρεύματος προκύπτει ότι το ρεύμα  $I$  στην έξοδο θα είναι:

$$I = \frac{I_m}{\pi} + \frac{I_m}{2} \eta \mu \omega t - \frac{2 I_m}{3 \pi} \text{ συν } 2 \omega t - \frac{2 I_m}{15 \pi} \text{ συν } 4 \omega t \dots \quad (9.2.3)$$

Από την ανάλυση αυτή προκύπτει επίσης ότι το ημιανόρθωμένο ρεύμα αποτε-

λείται από μια σταθερή συνιστώσα  $I_m/\pi$  και από πλήθος εναλλασσόμενες συνιστώσες από τις οποίες η μια, η θεμελιώδης, έχει την ίδια συχνότητα με την αρχική και οι άλλες άρτια πολλαπλάσιά της. Αυτές τις εναλλασσόμενες συνιστώσες προσπαθούμε να απομακρύνουμε με το φιλτράρισμα.

Η συνιστώσα  $I_m/\pi$  είναι η συνεχής συνιστώσα  $I_{dc}$  του ημιανορθωμένου ρεύματος, και είναι η μέση τιμή του ρεύματος που διαρέει το κύκλωμα. Θα είναι λοιπόν:

$$I_{dc} = \frac{I_m}{\pi} \quad (9.2.4)$$

όπου  $I_m$  είναι η μέγιστη τιμή που παίρνει το ρεύμα που διαρέει το κύκλωμα. Τα αμπερόμετρα συνεχούς μετρούν τη μέση τιμή του ημιανορθωμένου ρεύματος.

Φυσικά, η μέση τιμή της τάσεως στην έξοδο  $U_{odc}$  θα είναι:

$$U_{odc} = \frac{I_m}{\pi} R_L \Rightarrow U_{odc} = \frac{U_m}{\pi} \quad \text{ή} \quad U_{odc} \approx 0,318 U_m \quad (9.2.5)$$

Η ενεργός τιμή του ημιανορθωμένου ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα  $I_{rms}$  είναι:

$$I_{rms} = \frac{I_m}{2} \quad (9.2.6)$$

Αντίστοιχα η ενεργός τιμή της τάσεως εξόδου είναι:

$$U_{orms} = \frac{U_m}{2} \quad (9.2.7)$$

Η ενεργός τιμή του ρεύματος ή της τάσεως μετριέται με αμπερόμετρο ή βολτόμετρο εναλλασσόμενου.

### **α) Βαθμός κυματώσεως.**

Με τον όρο **κυμάτωση** εννοούμε το πόσο έντονη είναι η παρουσία των αρμονικών στο ρεύμα που διαρρέει στο φόρτο. Πόσο δηλαδή καθαρό από αρμονικές είναι το ρεύμα.

Ως μέτρο της κυματώσεως χρησιμοποιείται ο βαθμός **κυματώσεως  $r$**  (ripple factor) και ορίζεται:

$$r = \frac{\text{Ενεργός τιμή των αρμονικών συνιστωσών του ρεύματος } (I_{krms})}{\text{Tιμή της συνεχούς συνιστώσας του ρεύματος } (I_{dc})} \quad (9.2.8)$$

Η ενεργός τιμή των αρμονικών  $I_{krms}$  είναι:

$$I_{krms} = \sqrt{I_{rms}^2 - I_{dc}^2} \quad (9.2.9)$$

Στην ημιανόρθωση ο  $r$  έχει τιμή 1,21 (121%).

Άυτό σημαίνει ότι η παρουσία των αρμονικών είναι έντονη στην περίπτωση της ημιανορθώσεως.

### **β) Απόδοση στην ημιανόρθωση.**

Η ισχύς συνεχούς  $P_{DC}$  στο φόρτο, σύμφωνα και με τη σχέση 9.2.4 θα είναι:

$$P_{dc} = I_{dc}^2 R_L \quad \text{ή} \quad P_{dc} = \frac{I_m^2}{\pi^2} R_L \quad (9.2.10)$$

Η ισχύς εναλλασσόμενου  $P_{ac}$  που παρέχεται από το δευτερεύον του μετασχηματιστή στο κύκλωμα του σχήματος 9.2a σύμφωνα και με τη σχέση 9.2.6, θα είναι:

$$P_{ac} = I_{rms}^2 R_L \quad \text{ή} \quad P_{ac} = \frac{I_m^2}{4} R_L \quad (9.2.11)$$

Ο βαθμός αποδόσεως η στην ανόρθωση ορίζεται ως το πηλίκο της ισχύος συνεχούς  $P_{dc}$  στο φόρτο προς την ισχύ εναλλασσόμενου  $P_{ac}$  που παρέχεται στο κύκλωμα.

Για την περίπτωση της ημιαναρθρώσεως ο βαθμός αποδόσεως η, σύμφωνα με τις σχέσεις 9.2.10 και 9.2.11 θα είναι:

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} \Rightarrow \eta = \frac{\frac{I_m^2}{\pi^2} R_L}{\frac{I_m^2}{4} R_L} = \frac{\frac{1}{\pi^2} R_L}{\frac{1}{4} R_L} = \frac{4}{\pi^2} \quad (9.2.12)$$

δηλαδή:  $\eta = 0,406$  ή  $\eta = 40,6\%$

Στην πραγματικότητα, όταν ληφθούν υπόψη η απώλεια πάνω στη δίοδο, οι απώλειες στο μετασχηματιστή, και το μικρό ανάστροφο ρεύμα στη δίοδο, η απόδοση που προκύπτει είναι μικρότερη.

### γ) Μέγιστη ανάστροφη τάση.

Ως μέγιστη ανάστροφη τάση (Peak Inverse Voltage, PIV) ορίζεται η μέγιστη τάση που εφαρμόζεται στα άκρα της διόδου όταν αυτή δεν άγει.

Η μέγιστη ανάστροφη τάση που μπορεί να εφαρμοσθεί σε μια δίοδο χωρίς τον κίνδυνο καταστροφής είναι ένα από τα κύρια λειτουργικά χαρακτηριστικά της διόδου και πρέπει να δίνεται από τον κατασκευαστή. Πρέπει επίσης να δίνεται και η μέγιστη τιμή του συνεχούς ρεύματος  $I_{dc,max}$  το οποίο επιτρέπεται να περάσει από τη δίοδο.

Στην περίπτωση του κυκλώματος του σχήματος 9.2a, η μέγιστη ανάστροφη τάση στα άκρα της διόδου θα είναι  $U_m$ .

### Παράδειγμα.

Στον ανορθωτή του σχήματος 9.2a η δίοδος θεωρείται ιδανική (μηδενική αντίσταση κατά την ορθή φορά, άπειρη κατά την ανάστροφη και  $V_y = 0$ ) και ο μετασχηματής ιδανικός. Η αντίσταση  $R_L = 200 \Omega$  και η τάση  $U_i$  στο δευτερεύον του μετασχηματιστή είναι  $U_i = 34$  ημιωτ Volt. Να υπολογισθούν:

- α) Η συνεχής τάση στο φόρτο  $R_L$ .
- β) Η συνεχής συνιστώσα του ρεύματος.
- γ) Ο βαθμός κυματώσεως.
- δ) Η μέγιστη ανάστροφη τάση στη δίοδο.
- ε) Η ισχύς εναλλασσόμενου που παρέχεται στο κύκλωμα.

### Απάντηση.

- α) συνεχής τάση  $U_{odc}$  στο φόρτο θα είναι (σχέση 9.2.5)  $U_{odc} = U_m / \pi$ . Η

μέγιστη τάση  $U_m$  εδώ είναι ίση με 34V. Άρα:

$$U_{odc} = \frac{34}{\pi} V \approx 10.8 V$$

β) Η συνεχής συνιστώσα του ρεύματος  $I_{dc}$  θα είναι:

$$I_{dc} = \frac{U_{odc}}{R_L} = \frac{10.8}{200} \frac{V}{\Omega} = 0.054 A \quad \text{ή} \quad I_{dc} = 54 mA$$

γ) Η ενεργός τιμή της τάσεως κυματώσεως  $U_{krms}$  δίνεται από το γινόμενο της ενεργού τιμής του ρεύματος κυματώσεως επί την αντίσταση  $R_L$ .

Θα είναι δηλαδή:  $U_{krms} = I_{krms} \cdot R_L$ ,

αλλά είναι:  $I_{krms} = r \cdot I_{dc}$

Ο βαθμός κυματώσεως  $r$  στην ημιανόρθωση είναι 1,21. Άρα:

$$I_{krms} = 1.21 \times 54 mA = 65.34 mA$$

και συνεπώς:  $U_{krms} = 65.34 \times 10^{-3} A \times 2 \times 10^2 \Omega \approx 13.1 V$

δ) Αφού η μέγιστη τάση στο δευτερεύον είναι 34V, η μέγιστη ανάστροφη τάση (PIV) στα άκρα της διόδου θα είναι 34V.

ε) Η ισχύς εναλλασσόμενου  $P_{ac}$  που παρέχεται στο κύκλωμα, σύμφωνα με τη σχέση 9.2.12, θα είναι:

$$P_{ac} = \frac{P_{dc}}{\eta}$$

όπου  $P_{dc}$  η ισχύς συνεχούς που καταναλώνεται στο φόρτο και η ο βαθμός αποδόσεως.

Η  $P_{dc}$  θα είναι:

$$P_{dc} = I_{dc}^2 R_L = (54 \times 10^{-3})^2 \times 2 \times 10^2 \Omega \approx 583 mW$$

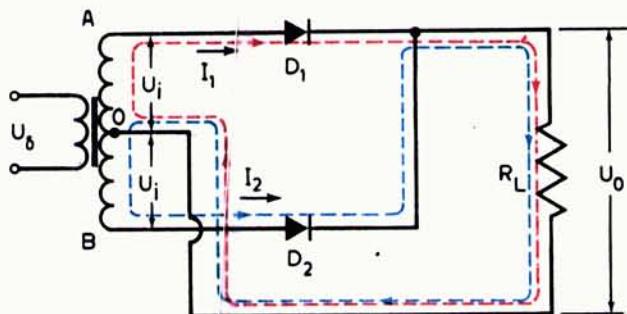
$$P_{ac} = \frac{583 mW}{0.406} \Rightarrow P_{ac} \approx 1.45 W$$

### 9.2.2 Πλήρης ανόρθωση.

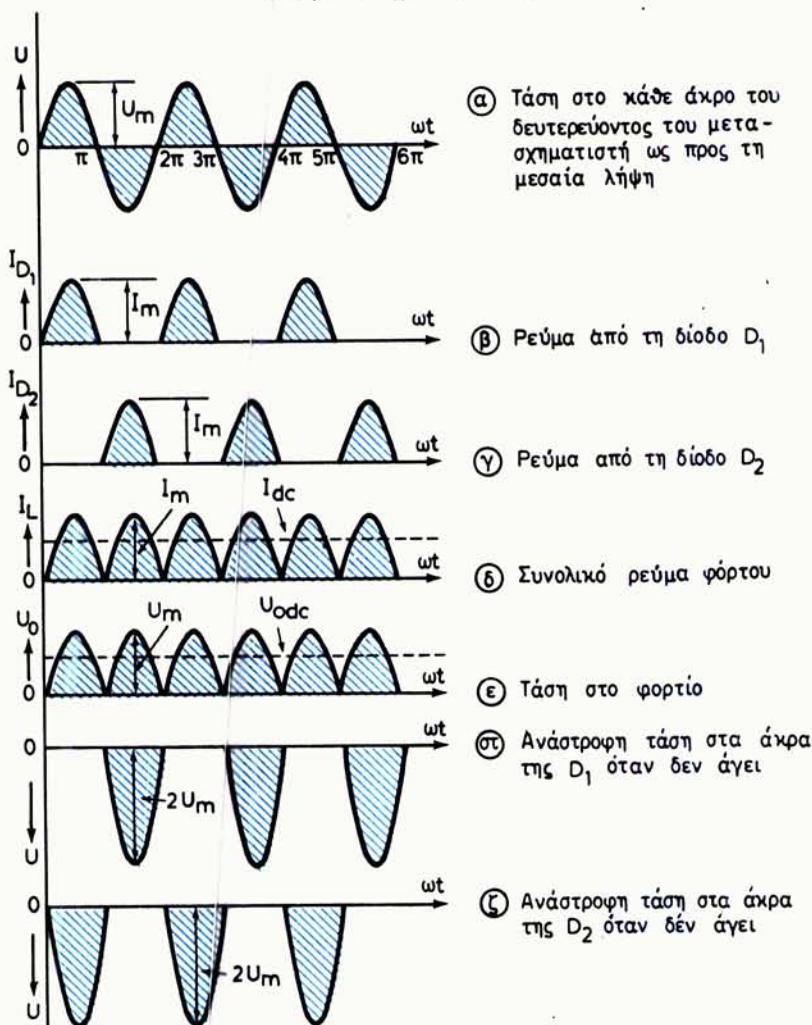
Πλήρη ανόρθωση έχουμε όταν στο φόρτο κυκλοφορεί ρεύμα της ίδιας φοράς και στις δύο ημιπεριόδους της εναλλασσόμενης τάσεως. Αυτό μπορούμε να το επιτύχουμε με τη χρησιμοποίηση, αντί μιας, δύο διόδων σε διάταξη όπως στο σχήμα 9.2γ.

Στο πρωτεύον του μετασχηματιστή συνδέεται η τάση του δικτύου (σχ. 9.2δ). Το δευτερεύον έχει μια μεσαία λήψη που το χωρίζει έστι σε δυο ίσα τμήματα. Η τάση στο δευτερεύον μοιράζεται εξίσου στα δύο αυτά τμήματα. Θεωρούμε τις διόδους και το μετασχηματιστή ιδανικά. Η τάση στο κάθε ήμισυ του δευτερεύοντος θα είναι  $U_i = U_m$  ημιωτ με τις πολικότητες όπως παρακάτω.

Έστω ότι στην πρώτη ημιπερίοδο το άκρο A είναι θετικό και το B αρνητικό. Τότε το άκρο A θα είναι θετικότερο από τη μεσαία λήψη O και το άκρο B αρνητικότερο από το O. Άγει λοιπόν η δίοδος  $D_1$ , και δεν άγει η δίοδος  $D_2$ . Από το φόρτο περνάει το ρεύμα  $I$ , της διόδου  $D_1$ . Όταν αναστραφεί η πολικότητα, το άκρο B γίνεται



Σχ. 9.2γ.  
Κύκλωμα διπλής ανορθώσεως.



Σχ. 9.2δ.  
Μορφή τάσεων και ρευμάτων στην πλήρη ανόρθωση.

Θετικό και το Α αρνητικό. Το σημείο Β έτσι είναι θετικότερο από το Ο, ενώ το Α είναι αρνητικότερο. Άγει έτσι η δύος  $D_2$  και δεν άγει η δύος  $D_1$ . Η φορά όμως του ρεύματος στο φόρτο είναι η ίδια. Έτσι και στις δύο ημιπεριόδους περνάει ρεύμα από το φόρτο της ίδιας φοράς. Και η τάση φυσικά που θα αναπτύσσεται κάθε φορά θα είναι της ίδιας φοράς. Μετατρέψαμε έτσι πάλι την εναλλασσόμενη τάση σε τάση μιας φοράς. Κάνομε έτσι ανόρθωση αλλά αυτή τη φορά **πλήρη ή διπλή ανόρθωση**.

Από την ανάλυση κατά Fourier της κυματομορφής του ρεύματος στην πλήρη ανόρθωση προκύπτει ότι το ρεύμα I στο φόρτο θα είναι:

$$I = \frac{2 I_m}{\pi} - \frac{4 I_m}{3\pi} \sin 2wt - \frac{4 I_m}{15\pi} \sin 4wt - \frac{4 I_m}{35\pi} \sin 6wt \dots \quad (9.2.13)$$

Το ρεύμα I δηλαδή αποτελείται από μια σταθερή συνιστώσα  $2 I_m / \pi$  και ένα πλήθος αρμονικών. Η σταθερή συνιστώσα  $2 I_m / \pi$  είναι η συνεχής συνιστώσα του ημιανορθωμένου ρεύματος  $I_{dc}$ , η μέση δηλαδή τιμή του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα. Όστε:

$$I_{dc} = \frac{2 I_m}{\pi} \quad (9.2.14)$$

$I_m$  είναι η μέγιστη τιμή που παίρνει το ρεύμα στο φόρτο, το ρεύμα  $I_{dc}$  το μετρούμε με αμπερόμετρο συνεχούς. Παρατηρούμε ότι η συνεχής συνιστώσα στην πλήρη ανόρθωση του ρεύματος είναι διπλάσια από τη συνεχή συνιστώσα στην απλή.

Φυσικά η συνεχής συνιστώσα (μέση τιμή) τις τάσεως στην έξοδο  $U_{odc}$  θα είναι:

$$U_{odc} = I_{dc} R_L = \frac{2 I_m}{\pi} \cdot R_L \Rightarrow U_{odc} = \frac{2 U_m}{\pi} \quad (9.2.15)$$

Η ενεργός τιμή του ολικού ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα στην πλήρη ανόρθωση είναι:

$$I_{rms} = I_m / \sqrt{2}$$

Αντίστοιχα η ενεργός τιμή τάσεως στην έξοδο  $U_{orms}$  θα είναι:

$$U_{orms} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad (9.2.16)$$

### α) Βαθμός κυματώσεως.

Η τιμή του βαθμού κυματώσεως r που ορίζεται και στην περίπτωση αυτή όπως και στην ημιανόρθωση, είναι διαφορετική. Η τιμή εδώ είναι:

$$r = 0,482 \quad \text{ή} \quad r = 48,2\% \quad (9.2.17)$$

### β) Απόδοση.

Η ισχύς συνεχούς στο φόρτο θα είναι:

$$P_{dc} = I_{dc}^2 R_L \quad \text{ή} \quad P_{dc} = \left( \frac{2 I_m}{\pi} \right)^2 R_L \quad \text{ή} \quad P_{dc} = \frac{4 I_m^2}{\pi^2} R_L \quad (9.2.18)$$

Η ισχύς εναλλασσόμενου στο φόρτο θα είναι:

$$P_{ac} = I_{rms}^2 R_L \quad \text{ή} \quad P_{ac} = \left( \frac{I_m}{\sqrt{2}} \right)^2 R_L \quad \text{ή} \quad P_{ac} = \frac{I_m^2}{2} R_L \quad (9.2.19)$$

Ο βαθμός αποδόσεως η θα είναι:

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} \Rightarrow \eta = \frac{\frac{4I_m^2}{\pi^2} R_L}{\frac{I_m^2}{2} R_L} = \frac{8}{\pi^2} \quad \text{οπότε } \eta = 0,812 \quad \text{ή} \quad \eta = 81,2\% \quad (9.2.20)$$

Αυτός φυσικά είναι ο ιδανικός βαθμός αποδόσεως. Στην πράξη είναι μικρότερος.

### γ) Μέγιστη ανάστροφη τάση (PIV).

Η μέγιστη ανάστροφη τάση στα άκρα κάθε διόδου του κυκλώματος του σχήματος 9.2γ είναι κάθε φορά διπλάσια από της μέγιστη τάση στα άκρα του μισού δευτερεύοντος, γιατί όταν η δίοδος δεν άγει στα άκρα της εφαρμόζεται ανάστροφα η τάση που επικρατεί στα άκρα ολόκληρου του δευτερεύοντος.

### 9.2.3 Ανόρθωση με συνδεσμολογία γέφυρας.

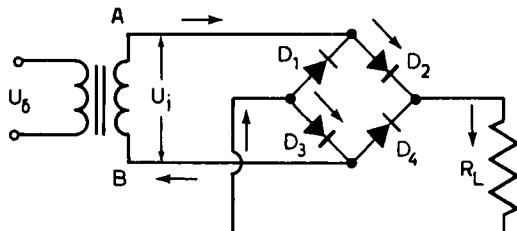
Το κύκλωμα διπλής ανορθώσεως του σχήματος 9.2γ παρουσιάζει δύο βασικά μειονεκτήματα. Το ένα είναι ότι χρειάζεται μεσαία λήψη στο μετασχηματιστή και αυτό επιβαρύνει το κόστος του. Το άλλο είναι η εμφάνιση στη δίοδο ανάστροφης τάσεως διπλάσιας από τη μέγιστη. Αυτό μας αναγκάζει να χρησιμοποιούμε διόδους ειδικά επιλεγμένες, ώστε να αντέχουν στις αυξημένες ανάστροφες τάσεις.

Με το κύκλωμα γέφυρας (σχ. 9.2ε) αποφεύγομε αυτές τις δυσκολίες. Σ' αυτό χρησιμοποιούμε τέσσερις διόδους συνδεσμολογημένες όπως ακριβώς φαίνεται στο σχήμα. Έστω πως η τάση στο δευτερεύοντος μετασχηματιστή είναι της μορφής:

$$U_i = U_m \eta \mu \omega t$$

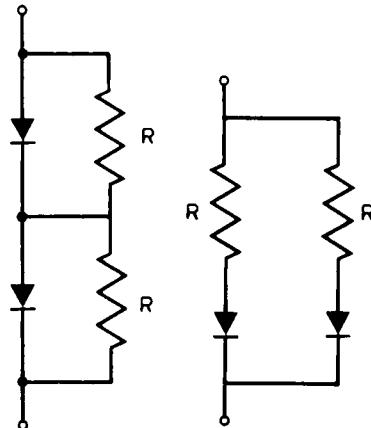
Ας θεωρήσουμε ότι στην πρώτη ημιπερίοδο, το σημείο A είναι θετικότερο από το B. Τότε θα άγουν οι δίοδοι D<sub>2</sub> και D<sub>3</sub> οι δίοδοι D<sub>1</sub> και D<sub>4</sub> θα είναι στην αποκοπή. Όταν αναστραφεί η πολικότητα στο δευτερεύοντος, θα αποκοπούν οι D<sub>2</sub> και D<sub>3</sub> και θα άγουν οι D<sub>1</sub> και D<sub>4</sub>. Και στις δύο όμως περιπτώσεις το ρεύμα στην αντίσταση φόρτου R<sub>L</sub> θα είναι της ίδιας φοράς, άρα και η τάση στα άκρα της δε θα αλλάζει φορά. Έχομε έτσι πάλι διπλή ανόρθωση. Στο κύκλωμα γέφυρας δε χρειαζόμαστε μεσαία λήψη στο μετασχηματιστή. Επίσης σημαντικό είναι ότι η μέγιστη ανάστροφη τάση σε κάθε δίοδο είναι U<sub>m</sub> και όχι 2U<sub>m</sub> όπως ήταν στο κύκλωμα του σχήματος 9.2γ. Το κύκλωμα γέφυρας είναι κατάλληλο για ανόρθωση υψηλών τάσεων, αλλά γενικά χρησιμοποιείται σήμερα σ' όλες σχεδόν τις περιπτώσεις διπλής ανορθώσεως.

Παρόλο που στο κύκλωμα γέφυρας χρησιμοποιούνται 4 δίοδοι αντί για 2, το κύκλωμα αυτό είναι φθηνότερο από ισότιμο, σε επιδόσεις, με κύκλωμα με δύο διόδους.



Σχ. 9.2ε.

Ανόρθωση με σύστημα γέφυρας.



Σχ. 9.2στ.

Σχ. 9.2ζ.

Χρήσιμο είναι εδώ να σημειώσουμε ότι αν θέλουμε να ανορθώσουμε τάσεις, που στην ανάστροφη φάση η τιμή τους θα είναι μεγαλύτερη από την ανάστροφη τάση που αντέχει η μία δίοδος, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε δύο ή και περισσότερες διόδους στη σειρά, ανάλογα με την τάση που πρόκειται να ανορθώσουμε. Αν π.χ. η μέγιστη ανάστροφη τάση είναι  $2U_m$  και η μία δίοδος αντέχει σε ανάστροφη τάση  $U_m$ , μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε δύο τέτοιες διόδους στη σειρά ή καλύτερα, για ασφάλεια, διόδους που να αντέχουν σε τάση κάτι παραπάνω από  $U_m$ .

Πολλές φορές δυο διόδοι του ίδιου τύπου μπορεί να μην έχουν απόλυτα ίδια λειτουργικά χαρακτηριστικά και να παρουσιάζουν διαφορετικές αντιστάσεις στην ανάστροφη πόλωση, με αποτέλεσμα να μην ισοκατανέμεται η ανάστροφη τάση δύμοια στις δύο διόδους. Έτσι είναι δυνατό, η ανάστροφη τάση στη μία να υπερβεί την επιτρεπόμενη τιμή, με αποτέλεσμα την καταστροφή της. Για την αποφυγή αυτής της άνισης κατανομής συνιστάται η χρησιμοποίηση ίσων μεταξύ τους αντιστάσεων, που συνδέονται παράλληλα με τις διόδους. Στα άκρα αυτών των αντιστάσεων ισομοιράζεται η ανάστροφη τάση και φυσικά ισομοιράζεται και στις διόδους. Η τιμή των αντιστάσεων αυτών εκλέγεται τέτοια, ώστε ο παράλληλος συνδυασμός τους με την αντίσταση ανάστροφης φοράς της διόδου να δίνει αντίσταση περίπου ίση με την τιμή της αντιστάσεως που συνδέομε παράλληλα (σχ. 9.2στ.).

Έτσι εξασφαλίζομε ισοκατανομή της ανάστροφης τάσεως στα άκρα των διόδων ανεξάρτητα από τις τυχόν διαφορές των χαρακτηριστικών τους. Η λύση βέβαια αυτή είναι μια λύση ανάγκης, που οδηγεί στη μείωση των ανορθωτικών ικανοτήτων των διόδων μια που μειώνεται η ανάστροφη αντίσταση που παρουσιάζει το σύστημα. Χονδρικά οι παράλληλες αντιστάσεις υπολογίζονται με τον πολλαπλασιασμό  $0,5 \text{ k}\Omega$  επί την αριθμητική τιμή της μέγιστης ανάστροφης τάσης.

Επίσης, αν το ρεύμα σε μία ανορθωτική διάταξη είναι μεγαλύτερο από το ρεύμα που επιτρέπεται να περάσει από μια μόνη δίοδο, μπορούμε να συνδέσουμε παράλληλα άλλες όμοιες διόδους. Στο σχήμα 9.2ζ φαίνεται μια τέτοια σύνδεση. Σε σειρά με τις διόδους έχουν συνδεθεί αντιστάσεις  $R$  μικρής τιμής που προστατεύουν τις διόδους από υπερβολικά ρεύματα.

### 9.2.4 Σύγκριση της απλής με τη διπλή ανόρθωση.

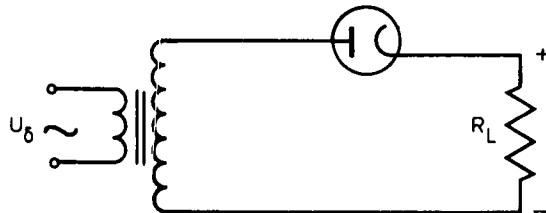
Η διπλή ανόρθωση παρουσιάζει απέναντι στην απλή τα παρακάτω πλεονεκτήματα.

- 1) Διπλάσια συνεχή τάση.
- 2) Μικρότερο συντελεστή κυματώσεως.
- 3) Διπλάσιο συντελεστή αποβόσεως.
- 4) Διπλάσια συχνότητα κυματώσεως. Αυτό διευκολύνει το φίλτρισμα.
- 5) Δεν δίνει συνεχές ρεύμα μαγνητίσεως στον πυρήνα.

Αντίθετα η διπλή ανόρθωση μειονεκτεί στο ότι χρειάζεται τουλάχιστον δύο διόδους. Επίσης πολλές φορές απαιτεί μεσαία λήψη στο δευτερεύον του μετασχηματιστή ενώ μπορεί να παρουσιάζει και διπλάσια ανάστροφη τάση στις διόδους.

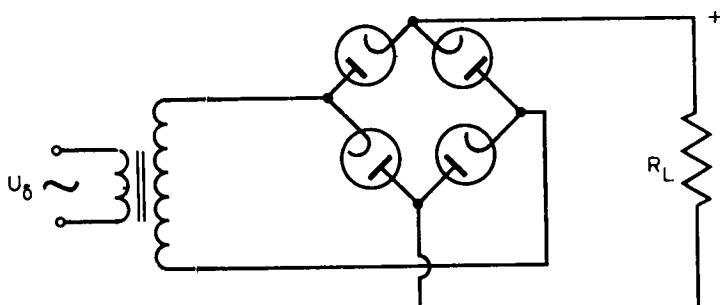
### 9.2.5 Κυκλώματα με ηλεκτρονικές διόδους.

Στα σχήματα 9.2η και 9.2θ δίνονται, δειγματοληπτικά, δυο συνδεσμολογίες, απλής και διπλής ανορθώσεως με ηλεκτρονικές λυχνίες. Οι λειτουργίες είναι όμοιες με τις κρυσταλλοδιόδους και όσα έχουμε πει ως τώρα ισχύουν και για τις λυχνίες κενού. Κυκλώματα ανορθωτών με ηλεκτρονικές διόδους μπορεί να συναντήσουμε σήμερα σε περιπτώσεις ανορθώσεως πολύ υψηλών τάσεων. Συνήθως στα ανορθωτικά συστήματα χρησιμοποιούνται κρυσταλλοδιόδοι.



Σχ. 9.2η.

Συνδεσμολογία διόδου κενού σε κύκλωμα απλής ανορθώσεως.

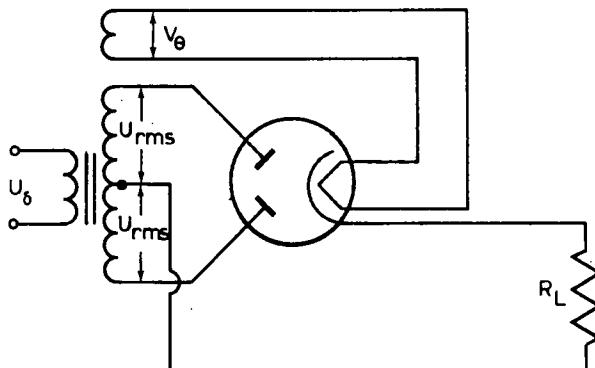


Σχ. 9.2θ.

Συνδεσμολογία διόδων κενού σε κύκλωμα διπλής ανορθώσεως γεφύρας.

#### Παράδειγμα.

Μονοφασικός ανορθωτής πλήρους ανορθώσεως χρησιμοποιεί μια διπλή δίοδο



Σχ. 9.2i.

κενού όπως στο κύκλωμα του σχήματος 9.2i. Η εσωτερική αντίσταση κάθε τμήματος της διόδου αυτής θεωρείται σταθερή και ίση με  $r_p = 500 \Omega$ . Η τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή τροφοδοσίας (από τη μεσαία λήψη σε κάθε άνοδο) είναι 300 V ενεργού τιμής. Η αντίσταση φόρτου  $R_L$  είναι 2 kΩ. Να βρεθούν:

- α) Η μέση τιμή του ρεύματος του φόρτου.
- β) Η ενεργός τιμή του εναλλασσόμενου ρεύματος φόρτου.
- γ) Η ισχύς συνεχούς στην  $R_L$ .
- δ) Η ισχύς εναλλασσόμενου που παρέχεται στο κύκλωμα.
- ε) Η απόδοση του ανορθωτή.
- στ) Η ενεργός τιμή των αρμονικών συνιστωσών του ρεύματος στο φόρτο.
- ζ) Ο βαθμός κυματώσεως.

#### Απάντηση.

α) Μέση τιμή ρεύματος:  $I_{dc} = \frac{2 U_{rms} \sqrt{2}}{\pi (R_L + r_p)} = 108 \text{ mA}$

β) Ενεργός τιμή ρεύματος:

$$I_{rms} = \frac{U_{rms}}{R_L + r_p} = \frac{300 \text{ V}}{2,5 \times 10^{-3} \Omega} = 120 \text{ mA}$$

γ) Ισχύς συνεχούς:  $P_{dc} = I_{dc}^2 \times R_L = (108 \times 10^{-3})^2 \text{ A}^2 \times 2 \times 10^3 \Omega = (108)^2 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^3 \Omega = 23,3 \text{ W}$

δ) Ισχύς εναλλασσόμενου που παρέχεται στο κύκλωμα:

$$P_{ac} = I_{rms}^2 (R_L + r_p) = (120 \times 10^{-3} \text{ A})^2 (2 \text{ k}\Omega + 0,5 \text{ k}\Omega) = 36 \text{ W}$$

ε) Απόδοση ανορθωτή:  $\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} = \frac{23,3 \text{ W}}{36 \text{ W}} \simeq 64,7\%$

στ) Η ενεργός τιμή των αρμονικών συνιστωσών του ρεύματος:

$$\text{Θα είναι: } I_{\text{krms}} = \sqrt{I_{\text{rms}}^2 - I_{\text{dc}}^2}$$

$$\text{δηλαδή: } I_{\text{krms}} = \sqrt{(120 \text{ mA})^2 - (108 \text{ mA})^2} = 52,3 \text{ A}$$

$$\zeta) \text{ Βαθμός κυματώσεως: } r = \frac{I_{\text{krms}}}{I_{\text{rms}}} = \frac{52,3}{108} \frac{\text{mA}}{\text{mA}} = 48,4\%$$

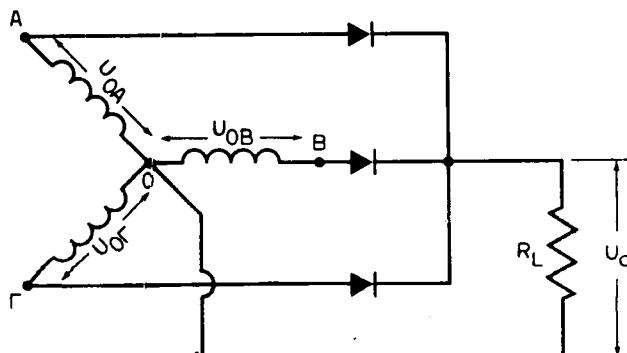
**Σημείωση.** Όπως φαίνεται στους παραπάνω υπολογισμούς λάβαμε υπόψη και την εσωτερική αντίσταση της λυχνίας.

### 9.2.6 Πολυφασική ανόρθωση.

Όσα είπαμε ως τώρα αφαρούσαν την ανόρθωση μονοφασικών ρευμάτων. Ρευμάτων δηλαδή που προκαλούνται από τάσεις μιας φάσεως του δικτύου. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις, όπως αυτές που χρησιμοποιούμε μεγάλη ισχύ και πρέπει να ανορθώσουμε τριφασικά ρεύματα. Σ' αυτές τις περιπτώσεις κάνομε **τριφασική ανόρθωση**.

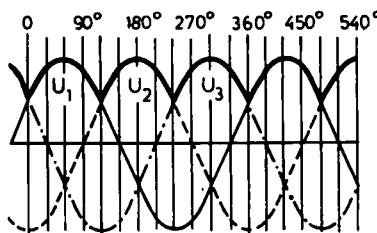
#### a) Απλή τριφασική ανόρθωση.

Ένα απλό κύκλωμα τριφασικής ανορθώσεως φαίνεται στο σχήμα 9.2ια. Σ' αυτό φαίνεται το δευτερεύον ενός τριφασικού μετασχηματιστή. Οι τάσεις  $U_{OA}$ ,  $U_{OB}$  και  $U_{OC}$  στα άκρα των τριών τυλιγμάτων είναι ίσες, είναι της μορφής  $U_i = U_m \sin \omega t$  και έχουν μεταξύ τους διαφορά φάσεως  $120^\circ$ . Η τάση  $U_o$  στα άκρα της  $R_L$  θα έχει τη μορφή της παχιάς γραμμής του σχήματος 9.2ιβ. Θα έχει δηλαδή μια κυμάτωση με χαμηλότερη συχνότητα, τριπλάσια της συχνότητας της μιας φάσεως.



Σχ. 9.2ια.

Κύκλωμα απλής τριφασικής ανορθώσεως.



Σχ. 9.2ιβ.

Τάση στα άκρα του φόρτου απλού τριφασικού ανορθωτή.

Η μέγιστη τιμή της τάσεως στα άκρα του καθενός από τα δευτερεύοντα του τριφασικού μετασχηματιστή είναι  $U_m$ , οπότε:

$$U_{dc} = 0,826 U_m \quad (9.2.21)$$

Η διαφορα από τη μονοφασική απλή ανόρθωση όπου  $U_{dc} = 0,318 U_m$  είναι χαρακτηριστική.

Ο συντελεστής κυματώσεως  $r$  είναι 18%.

Η μέγιστη ανάστροφη τάση  $U_{rm}$  σε κάθε δίοδο θα είναι:

$$U_{rm} \approx 1,73 U_m \quad (9.2.22)$$

Το συνεχές ρεύμα  $I_{dc}$  στο φόρτο θα είναι:

$$I_{dc} = \frac{U_{dc}}{R_L} = \frac{0,826 U_m}{R_L} = 0,826 I_m$$

Το συνεχές ρεύμα από κάθε δίοδο θα είναι:

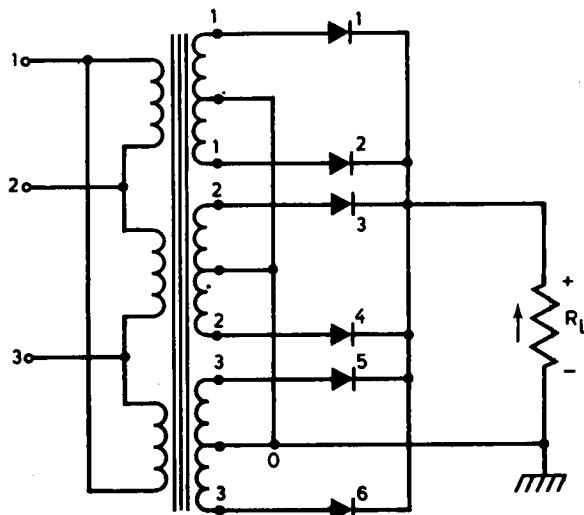
$$I_{D_{dc}} = \frac{I_{dc}}{3} \quad (9.2.23)$$

Η ενεργός τιμή του ρεύματος  $I_{D_{rms}}$  για κάθε δίοδο θα είναι:

$$I_{D_{rms}} = \frac{I_{dc}}{\sqrt{3}} \quad \text{ή} \quad I_{D_{rms}} = 0,57 I_{dc} \quad (9.2.24)$$

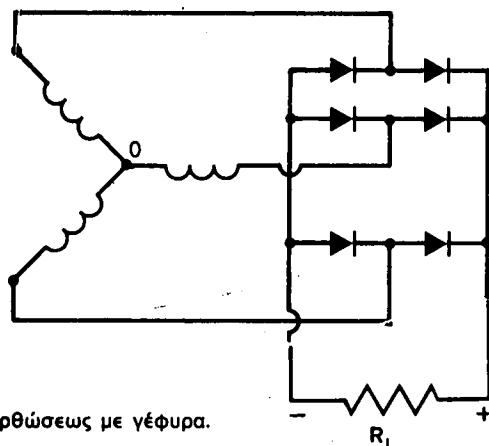
### Πλήρης τριφασική ανόρθωση.

Ένα κύκλωμα πλήρους τριφασικής ανορθώσεως εικονίζεται στο σχήμα 9.2ιγ. Στο καθένα από τα τρία (1-1, 2-2, 3-3) δευτερεύοντα τυλίγματα του τριφασικού μετασχηματιστή υπάρχει μεσαία λήψη. Οι τρεις λήψεις είναι ενωμένες στο σημείο O.

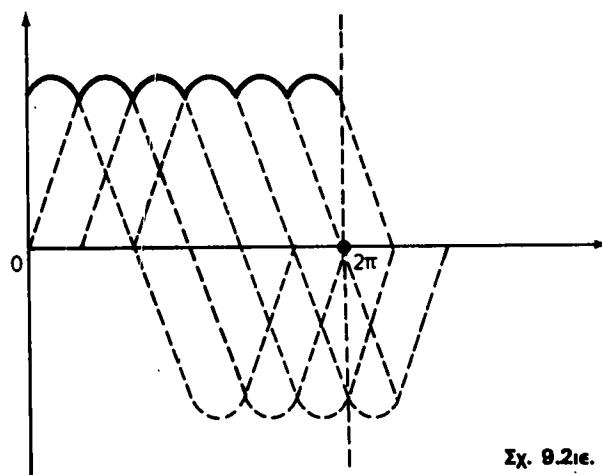


Σχ. 9.2ιγ.

Κύκλωμα πλήρους τριφασικής ανορθώσεως.



Σχ. 9.2ιδ.  
Κύκλωμα πλήρους τριφασικής ανορθώσεως με γέφυρα.



Σχ. 9.2ιε.

Άλλο κύκλωμα πλήρους τριφασικής ανορθώσεως φαίνεται στο σχήμα 9.2ιδ. Είναι κύκλωμα γέφυρας. Η κυματομορφή του ρεύματος στο φόρτο θα έχει τη μορφή της παχιάς γραμμής του σχήματος 9.2ιε. Η μικρότερη συχνότητα κυματώσεως και στα δύο κυκλώματα είναι εξαπλάσια της συχνότητας της μιας φάσεως.

Η συνεχής τάση στο φόρτο θα είναι:

$$U_{dc} = 0,955 U_m \quad (9.2.25)$$

όπου  $U_m$  πάλι η μεγίστη τάση στα άκρα του καθενός από τα δευτερεύοντα του μετασχηματιστή.

Ο συντελεστής κυματώσεως είναι 4%.

Η μέγιστη ανάστροφη τάση σε κάθε δίοδο θα είναι:

$$U_{rm} \approx 1,73 U_m \quad (9.2.26)$$

Το συνεχές ρεύμα  $I_{dc}$  στο φόρτο θα είναι:

$$I_{dc} = 1,65 I_m \quad (9.2.27)$$

Ενώ το συνεχές ρεύμα για κάθε δίοδο:

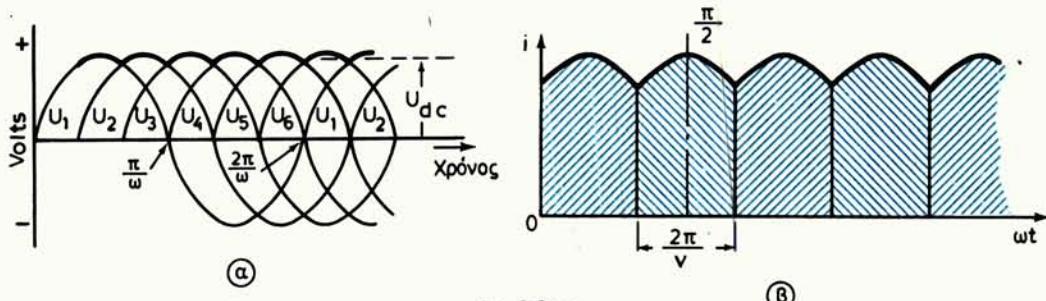
$$I_{D_{dc}} = \frac{I_{dc}}{3} \quad (9.2.28)$$

Η ενεργός τιμή του ρεύματος  $I_{D_{rms}}$  για κάθε δίοδο είναι:

$$I_{D_{rms}} = 0,816 I_{dc} \quad (9.2.29)$$

### γ) Εξαφασική και πάνω ανόρθωση.

Πέρα από την τριφασική ανόρθωση είναι δυνατό να κάνομε ανόρθωση π.χ. ενός εξαφασικού ρεύματος. Το ρεύμα αυτό μπορεί να προέρχεται από τάσεις που αναπτύσσονται στο δευτερεύοντα ενός μετασχηματιστή, με τρία ξεχωριστά πρωτεύοντα που στο καθένα αντιστοιχούν δύο ξεχωριστά δευτερεύοντα. Οι τάσεις αυτές έχουν μεταξύ τους διαφορά φάσεως  $60^\circ$  και εφαρμόζονται σε διόδους κατάλληλα συνδεσμολογημένες για απλή η πλήρη ανόρθωση. Τέτοιες τάσεις παριστάνονται στο σχήμα 9.2ιστ(α). Και σε ρεύματα με περισσότερες φάσεις μπορούμε φυσικά να κάνομε ανόρθωση. Οι περισσότερες φάσεις οδηγούν σε ρεύματα με μικρότερο, βαθμό κυματώσεως. Η μικρότερη συχνότητα κυματώσεως αυξάνει δύο αυξάνουν οι φάσεις του ρεύματος που θέλουμε να ανορθώσουμε. Αυτό, όπως θα δούμε, βοηθάει στο φίλτραρισμα του συνεχούς ρεύματος. Επίσης ο μεγαλύτερος αριθμός φάσεων βελτιώνει την απόδοση του ανορθωτή.



Σχ. 9.2ιστ.

- α) Μορφή τάσεων στα δευτερεύοντα εξαφασικού μετασχηματιστή.  
β) Μορφή ρεύματος στο φόρτο ανορθωτή στη φάσην.

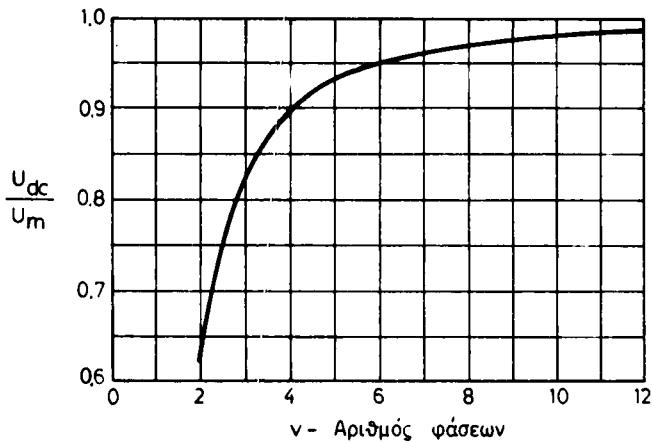
Κατάσκευάζονται ανορθωτές για 6, 12, 18 ή και περισσότερες φάσεις. Γενικά η ανόρθωση με n φάσεις απαιτεί τη χρησιμοποίηση n διόδων που η καθεμία άγει επί  $2\pi/n$  ακτίνια ανά κύκλο. Έτσι γενικά το ρεύμα στο φόρτο θα είναι της μορφής του σχήματος 9.2ιστ (β). Σύμφωνα με αυτά, στο μονοφασικό ανορθωτή διπλής ανορθώσεως, θα είναι  $n = 2$ .

Γενικά η τιμή του συνεχούς ρεύματος στο φόρτο  $R_L$ ,  $I_{DC}$ , ενός ανορθωτή με n φάσεις δίνεται από τη σχέση:

$$I_{dc} = \frac{U_m}{R_L} \cdot \frac{n}{\pi} \cdot \eta \mu \frac{\pi}{n} \quad (9.2.30)$$

όπου  $U_m$  η μέγιστη τιμή τάσεως σε κάθε άνοδο της διόδου ως προς τον κοινό αγωγό στο δευτερεύοντα. Η ενεργός τιμή του ρεύματος που θα διαρρέει κάθε δίοδο θα είναι:

$$I_{D_{rms}} = \frac{U_m}{R_L} \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \left( \frac{\pi}{n} + \eta \mu \frac{\pi}{n} \cdot \sin \frac{\pi}{n} \right) \quad (9.2.31)$$



Σχ. 9.2ιζ.

Μεταβολή του λόγου  $U_{dc}$  προς  $U_m$  σε συνάρτηση με τον αριθμό φάσεων  $v$ .

Η ισχύς συνεχούς  $P_{dc}$  θα είναι σύμφωνα και με τη σχέση 9.2.30:

$$P_{dc} = I_{dc}^2 R = \frac{U_m^2}{i R_L} \left( \frac{v}{\pi} \cdot \eta \mu \frac{\pi}{v} \right)^2 \quad (9.2.32)$$

Η ισχύς εναλλασσόμενου που θα παρέχεται από το μετασχηματιστή σε όλο το κύκλωμα, θα είναι:  $P_{ac} = I_{rms}^2 R_L$ . Σύμφωνα με τη σχέση 9.2.31, θα είναι:

$$P_{ac} = \frac{v U_m^2}{2 \pi R_L} \left( \frac{\pi}{v} + \eta \mu \frac{\pi}{v} \cdot \sin \frac{\pi}{v} \right) \quad (9.2.33)$$

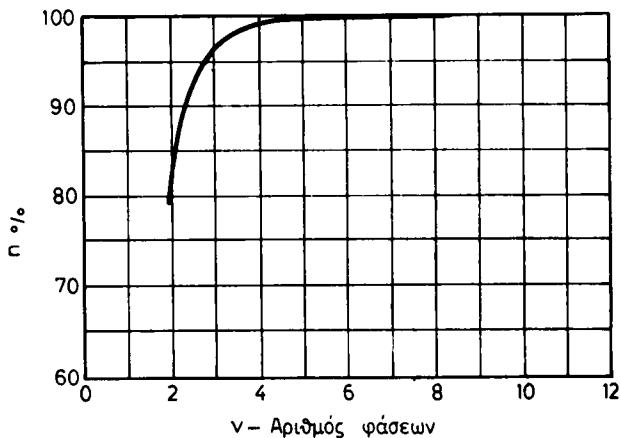
Από το συνδυασμό των σχέσεων 9.2.32 και 9.2.33 προκύπτει η απόδοση  $\eta$ , που είναι:

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} = \frac{\frac{2v}{\pi} \cdot \eta \mu^2 \frac{\pi}{v}}{\frac{\pi}{v} + \eta \mu \frac{\pi}{v} \cdot \sin \frac{\pi}{v}} \quad (9.2.34)$$

Ο βαθμός κυματώσεως μπορεί να καθορισθεί σύμφωνα με τη σχέση 9.2.8.

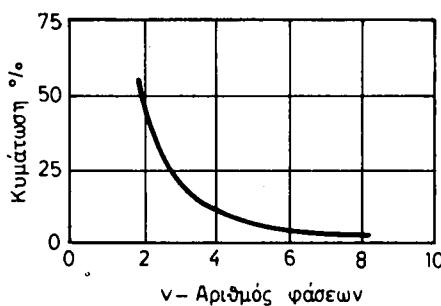
Στα διαγράμματα των σχημάτων 9.2ιζ, 9.2ιη, 9.2ιθ δίνονται οι μεταβολές του λόγου  $U_{dc}/U_m$  της συνεχούς τάσεως στο φόρτο προς τη μέγιστη τιμή της τάσεως στις ανόδους των διόδων, της αποδόσεως  $\eta$  του ανορθωτή και του βαθμού κυματώσεως σε συνάρτηση με τον αριθμό φάσεων  $v$ .

Από τα διαγράμματα αυτά φαίνεται ότι ελάχιστη είναι η βελτίωση πάνω από τις 6 φάσεις σ' αυτά τα μεγέθη.



Σχ. 9.2iη.

Μεταβολή της αποδόσεως σε συνάρτηση με τον αριθμό των φάσεων v.



Σχ. 9.2iθ.

Μεταβολή του συντελεστού κυμάτωσεων σε συνάρτηση με τον αριθμό των φάσεων.

### 9.3 Φίλτρα ανορθώσεως.

Είδαμε στα προηγούμενα ότι σε όλες τις περιπτώσεις ανορθώσεως, η ανορθωμένη τάση αποτελείται από μια συνεχή συνιστώσα και από ένα πλήθος εναλλασσομένων. Δεν είναι δηλαδή τελείως σταθερή αλλά παρουσιάζει κυμάτωση. Η κυμάτωση αυτή στις περισσότερες εφαρμογές είναι ενοχλητική. Μπορεί π.χ. να δημιουργήσει βόρβο σ' έναν ενισχυτή ή σ' ένα δέκτη.

Η κυμάτωση αυτή μπορεί να ελαττωθεί με την τοποθέτηση στην έξοδο του ανορθωτή καταλλήλων φίλτρων. Τα φίλτρα είναι κυκλώματα με κατάλληλους συνδυασμούς πυκνωτών, πηνίων και αντιστάσεων, που παρεμποδίζουν τη διέλευση από την αντίσταση φόρτου των εναλλασσομένων συνιστωσών ρεύματος, υποβιβάζοντας έτσι την κυμάτωση.

Οι συνθησιμένες μορφές φίλτρων είναι:

- Πυκνωτής παράλληλα συνδεμένος με την αντίσταση φόρτου.
- Πηνίο σε σειρά με το φόρτο.

— Συνδυασμοί δύο πυκνωτών και πηνίου ή αντιστάσεως σε διάταξη π.

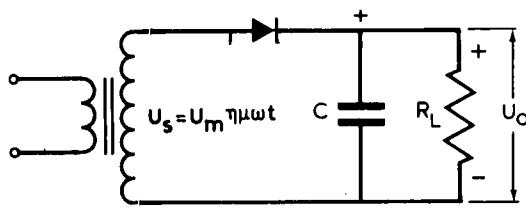
Εξομάλυνση βέβαια μπορεί να γίνει με πολυπλοκότερους συνδυασμούς των παραπάνω στοιχείων ή και με ειδικά ηλεκτρονικά κυκλώματα όπως στην περίπτωση των ηλεκτρονικών σταθεροποιητών.

Παρακάτω θα εξετάσουμε τις πιο συνηθισμένες μορφές απλών φίλτρων, θεωρώντας αμελητέες τις αντιστάσεις των τυλιγμάτων του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή, την αντίσταση των διόδων καθώς και την αντίσταση του πρωτεύοντος που ανάγεται στο δευτερεύον.

### 9.3.1 Φίλτρο με πυκνωτή.

#### a) Απλή ανόρθωση.

Στο κύκλωμα του σχήματος 9.3α έχουμε μια διάταξη απλής ανορθώσεως που έχει έναν πυκνωτή  $C$  παράλληλα με την αντίσταση φόρτου  $R_L$ . Ο συνδυασμός αυτός  $C, R_L$  είναι μια απλή μορφή φίλτρου.



Σχ. 9.3α.

Το γινόμενο της χωρητικότητας ενός πυκνωτή επί την τιμή μιας ωμικής αντιστάσεως  $CR$  έχει διαστάσεις χρόνου και λέγεται **σταθερά χρόνου**. Στην πράξη αυτό εκφράζεται ως εξής: αν συνδέσουμε έναν πυκνωτή σε σειρά με μια αντίσταση και συνδέσουμε στη συνέχεια το σύνολο με μια πηγή τάσεως  $V$ , η τάση στα άκρα του πυκνωτή θα γίνει ίση με  $0,3321 V$  σε χρόνο  $RC$  από τη στιγμή που θα συνδέσουμε την πηγή. Ή αν έχουμε φορτίσει έναν πυκνωτή σε μια τάση  $V$ , και συνδέσουμε στα άκρα του μιάν αντίσταση  $R$ , ο πυκνωτής θα εκφορτισθεί μέσω της αντιστάσεως  $R$ . Κατά την εκφόρτιση η τάση στα άκρα του θα πέσει στα  $0,3672 V$  σε χρόνο  $RC$  από τη στιγμή που θα συνδέσουμε την αντίσταση.

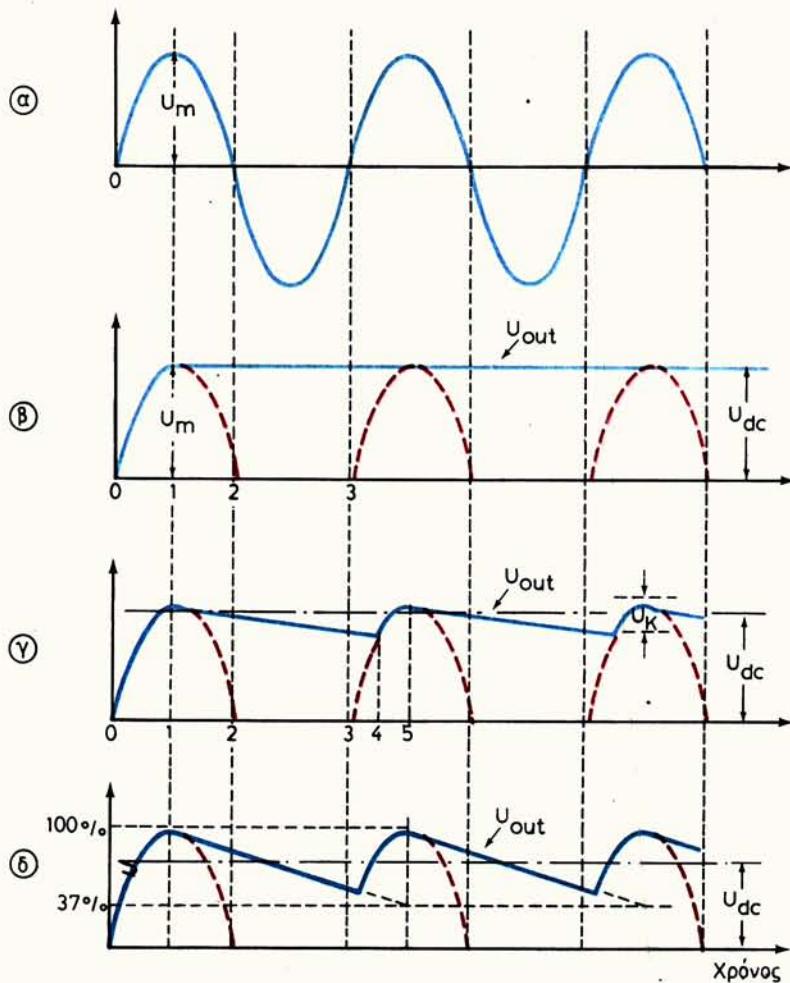
Στη φόρτιση και εκφόρτιση του πυκνωτή στηρίζεται η λειτουργία του φίλτρου  $RC$ . Ας εξετάσουμε την επίδραση του φίλτρου στην τάση εξόδου  $U_o$  στα άκρα του φόρτου για διάφορες περιπτώσεις  $R_L$ . Στο σχήμα 9.3β φαίνεται: η τάση στο δευτερεύον (α), η ανορθωμένη μορφή (β) και οι αντίστοιχες μορφές σε περιπτώσεις φόρτου  $R_L$  πολύ μεγάλη (γ) και  $R_L$  μικρότερή (δ).

Στο διάγραμμα του σχήματος 9.3β(β) οι διακοπόμενες γραμμές παριστάνουν την ημιανορθωμένη τάση. Είναι η τάση στα άκρα του φορτίου  $R_L$  όταν δεν υπάρχει πυκνωτής και το κύκλωμα είναι ιδανικό (αμελητέες αντιστάσεις των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή και της διόδου κατά την ορθή φορά).

Αφού τώρα συνδέσουμε τον πυκνωτή  $C$  παράλληλα με την αντίσταση φόρτου  $R_L$  όπως στο σχήμα 9.3α θα εξετάσουμε τις παρακάτω περιπτώσεις.

#### 1. Η αντίσταση $R_L$ έχει πάρα πολύ μεγάλη τιμή, πρακτικά άπειρη.

Τότε στο χρονικό διάστημα 0 ως 1 [σχ. 9.3β(β)], η τάση στα άκρα της  $R_L$  θα



Σχ. 9.3β.

ακολουθήσει τη μορφή της τάσεως 9.3β(α). Ο πυκνωτής θα φορτισθεί και η τάση στα άκρα του θα φθάσει την τιμή  $U_m$ , τη μέγιστη δηλαδή τιμή της εναλλασσόμενης. Στο χρονικό διάστημα 1 ως 3, ο πυκνωτής δεν μπορεί να εκφορτισθεί (ιδανική περίπτωση), γιατί η δύοδος στην ανάστροφη φορά παρουσιάζει πρακτικά άπειρη αντίσταση και η  $R_L$  είναι άπειρη. Έτσι, θεωρητικά, ο πυκνωτής παραμένει διαρκώς φορτισμένος στην τάση  $U_m$  που είναι και η συνεχής τάση εξόδου του ανορθωτή με άπειρη αντίσταση φόρτου. Σε κενό, δημοσίευση.

## 2. Η αντίσταση $R_L$ είναι μεγάλη, αλλά όχι άπειρη.

Αυτό σημαίνει ότι η σταθερά χρόνου  $CR_L$  είναι πολύ μεγάλη [σχ. 9.3β(γ)]. Στο χρονικό διάστημα 0 ως 1, η τάση στα άκρα του πυκνωτή και συνεπώς και του φόρτου  $R_L$  θα ακολουθήσει την τάση του δευτερεύοντος. Στο χρονικό διάστημα 1

ως 2, η τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή πέφτει προς το μηδέν. Και η τάση στα áκρα του πυκνωτή αρχίζει επίσης να πέφτει, αλλά, επειδή η σταθερά χρόνου  $CR_L$  είναι πολύ μεγάλη, η τάση στα áκρα του πυκνωτή πέφτει με πολύ αργό ρυθμό. Έτσι και στο διάστημα 2 ως 3 που είναι αρνητική ημιπερίοδος, ο πυκνωτής θα εξακολουθήσει να εκφορτίζεται. Στη χρονική στιγμή 3 αρχίζει πάλι να αυξάνει με θετικές τιμές η τάση στο δευτερεύον, αλλά μέχρι τη χρονική στιγμή 4 η τάση αυτή μένει μικρότερη από την τάση στα áκρα του πυκνωτή. Από τη χρονική στιγμή 4 αρχίζει και φορτίζεται πάλι ο πυκνωτής ως τη χρονική στιγμή 5 που η τάση παίρνει τη μεγαλύτερη τιμή και επαναλαμβάνονται πάλι τα ίδια από την αρχή.

Η τάση εξόδου έχει τώρα μια κυμάτωση αλλά φυσικά πολύ μικρότερη από αυτήν που θα είχε αν δεν υπήρχε πυκνωτής. Τη μορφή της τάσεως εξόδου εικονίζει η παχιά γραμμή στο σχήμα 9.3β(γ). Εξαιτίας του ότι η κυμάτωση είναι μικρή, η μέση τιμή της τάσεως εξόδου είναι πολύ μεγαλύτερη από την τιμή  $0,318 \text{ U}_m$  που θα ήταν χωρίς πυκνωτή.

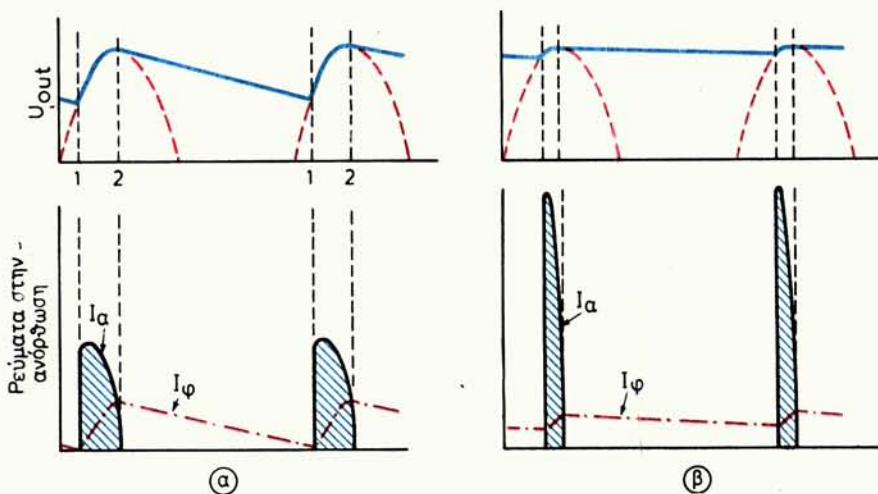
Όσο η αντίσταση φόρτου μικραίνει, η σταθερά χρόνου μικραίνει. Ο πυκνωτής εκφορτίζεται γρηγορότερα και η τάση στα áκρα του φθάνει σε χαμηλότερες τιμές. Η κυμάτωση αυξάνει και η μέση τιμή του ρεύματος μικραίνει [σχ. 9.3β(δ)]. Φυσικά η μέση τιμή της τάσεως στην έξοδο εξακολουθεί να είναι μεγαλύτερη από αυτή που θα ήταν χωρίς πυκνωτή. Όσο λοιπόν μικραίνει η σταθερά χρόνου, τόσο μεγαλώνει η κυμάτωση. Η σταθερά χρόνου θα μπορούσε για μια δεδομένη αντίσταση φόρτου να αυξηθεί με τη χρησιμοποίηση πυκνωτών με μεγαλύτερη χωρητικότητα. Θα μπορούσαμε δηλαδή έτσι να ελαπτώσουμε την κυμάτωση και να αυξήσουμε τη συνεχή συνιστώσα της τάσεως στο φόρτο. Η χρησιμοποίηση όμως πυκνωτών με μεγάλη χωρητικότητα περιορίζεται κυρίως από το ότι οι πυκνωτές αυτοί είναι ογκώδεις, βαριοί και ακριβοί.

Όσο επίσης η σταθερά χρόνου είναι μεγαλύτερη, τόσο η τιμή του ρεύματος που περνά από τη δίοδο είναι μεγαλύτερη. Σ' ένα καλό φίλτρο με πυκνωτή, η τιμή της χωρητικότητας σπάνια υπερβαίνει τα  $40 \text{ } \mu\text{F}$ .

Μια άλλη παρατήρηση που μπορούμε να κάνομε στο φίλτρο αυτό είναι ότι κατά την ορθή φορά πολώσεως της δίοδου ο πυκνωτής φορτίζεται έτσι, ώστε η κάθοδός της να φθάσει στη θετική τιμή  $\text{U}_m$  (σχ. 9.3α). Όταν αναστραφεί η πολικότητα, η άνοδός της θα γίνει  $-\text{U}_m$ . Τότε, αν η δράση του φίλτρου είναι καλή και έτσι ο πυκνωτής εκφορτίζεται ελαφρά, η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην κάθοδο και την άνοδο της διόδου φθάνει περίπου την τιμή  $2\text{U}_m$  ανάστροφα. Αυτό πρέπει να το υπολογίζουμε στην εκλογή της διόδου.

### **Επίδραση του πυκνωτή στο ρεύμα της διόδου.**

Στα σχήματα 9.3γ(α) και 9.3γ(β) φαίνεται η επίδραση της χωρητικότητας του πυκνωτή στο ρεύμα που περνά από τη δίοδο. Στο σχήμα 9.3γ(α), μόλις η τάση του μετασχηματιστή γίνει μεγαλύτερη από την τάση στα áκρα του πυκνωτή (χρονική στιγμή 1), η δίοδος άγει και μάλιστα, επειδή υπάρχει ο πυκνωτής, το ρεύμα που περνάει από αυτή μεγαλώνει απότομα. Όσο φορτίζεται ο πυκνωτής, το ρεύμα ελαττώνεται μέχρι τη χρονική στιγμή 2 που η τάση στα áκρα του πυκνωτή γίνεται ίση με τη μέγιστη τάση της πηγής  $\text{U}_m$ , οπότε σταματάει το ρεύμα που περνά από τη δίοδο. Το κύκλωμα τότε στο δευτερεύον του μετασχηματιστή διακόπτεται, μέχρις ότου συμπληρωθεί ο κύκλος και η τάση πάλι στο δευτερεύον γίνει πιο μεγάλη από την τάση στα áκρα του πυκνωτή, οπότε ξαναρχίζει και περνά ρεύμα από τη



Σχ. 9.3γ.

Επίδραση της χωρητικότητας του φίλτρου στο ρεύμα που περνά από τη δίοδο ( $I_a$  γραμμοσκι-ασμένο) και το φόρτο ( $I_\phi$  διακοπόμενη γραμμή) σε περίπτωση μικρού (α) και μεγάλου (β) πυκνωτή.

**δίοδο.** Το ρεύμα που περνά από το φόρτο στο διάστημα της διακοπής οφείλεται στην εκφόρτιση του πυκνωτή, μέσω της αντιστάσεως φόρτου.

Φυσικά και κατά τη διάρκεια που άγει η δίοδος, περνάει ρεύμα από το φόρτο. Στο σχήμα το ρεύμα αυτό παριστάνεται με τη διακοπόμενη γραμμή.

Στο σχήμα 9.3γ(β) φαίνεται η περίπτωση όπου όλα τα στοιχεία του ανορθωτικού συστήματος έμειναν τα ίδια με την προηγούμενη περίπτωση εκτός από τη χωρητικότητα του πυκνωτή που αυξήθηκε. Η αγωγιμότητα της διόδου τώρα διαρκεί μικρότερο χρόνο αλλά το ρεύμα είναι μεγαλύτερο. Όσο λοιπόν η χωρητικότητα γίνεται μεγαλύτερη τόσο και η μέγιστη τιμή του ρεύματος από τη δίοδο γίνεται μεγαλύτερη.

Ο χρόνος ανάμεσα στις δύο χρονικές στιγμές 1 και 2 που άγει η δίοδος, αντιστοιχεί σε γωνία που είναι τμήμα του κύκλου των  $360^\circ$  της εναλλαγής. Αν αυτή τη γωνία την ονομάσομε  $\phi^\circ$ , τότε το μέγιστο ρεύμα που θα περάσει από τη δίοδο  $I_{D_{max}}$ , θα δίνεται κατά προσέγγιση από τη σχέση:

$$I_{D_{max}} = \frac{360^\circ}{\phi^\circ} \cdot I_{dc} \quad (9.3.1)$$

όπου  $I_{dc}$  είναι το συνεχές ρεύμα στο φόρτο.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι, αν αυξήσουμε τη χωρητικότητα, μπορεί το ρεύμα από τη δίοδο να γίνει τόσο μεγάλο που να την καταστρέψει.

Το φίλτρο με πυκνωτή συνιστάται στις περιπτώσεις που έχομε μεγάλες αντιστάσεις φόρτου και όχι στις μικρές που ο πυκνωτής εκφορτίζεται γρήγορα και έτσι η τάση στην έξοδο παρουσιάζει κυμάτωση.

Αν  $U_k$  είναι η τιμή της τάσεως κυματώσεως από κορυφή σε κορυφή [σχ. 9.3β(γ)], τότε για τη συνεχή τάση στα άκρα του φόρτου  $U_{dc}$  θα έχομε:

$$U_{dc} = U_m - \frac{U_k}{2} \quad (9.3.2)$$

Η ενεργός τιμή της τάσεως κυματώσεως  $U_{k(rms)}$  θα είναι:

$$U_{k(rms)} = \frac{U_k}{2\sqrt{3}} \quad (9.3.3)$$

Την τάση  $U_k$  θεωρούμε προσεγγιστικά πριονωτή παρόλο που η φόρτιση και η εκφόρτιση του πυκνωτή δε γίνεται γραμμικά.

Πρέπει να διευκρινίσουμε ότι όταν αναφερόμαστε σε μεγάλη ή μικρή σταθερά χρόνου  $R_L C$ , εννοούμε πάντα την τιμή της συγκριτικά με την περίοδο της τάσεως που θέλουμε να ανορθώσουμε. Για την τάση του δικτύου στην Ελλάδα η περίοδος είναι 20 msec.

Εύκολα επίσης φαίνεται ότι η συχνότητα της πριονωτής τάσεως στην απλή ανόρθωση είναι ίση με τη συχνότητα της τάσεως που ανορθώνομε.

### β) Διπλή ανόρθωση.

Ο μηχανισμός της εξομαλύνσεως της τάσεως και στην περίπτωση της διπλής ανόρθωσεως με φίλτρο πυκνωτή είναι ο ίδιος. Οι διαφορές, όπου υπάρχουν, φαίνονται στα παρακάτω (σχ. 9.3δ).

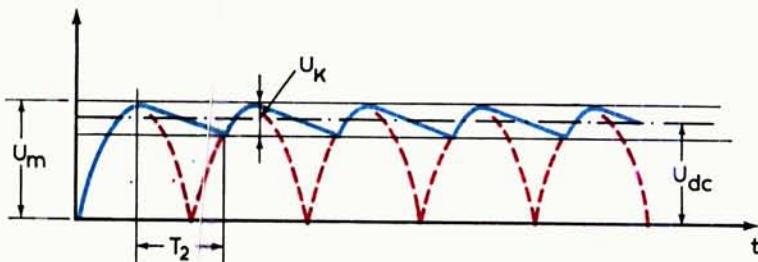
- Η συνεχής τάση εξόδου  $U_{dc}$  είναι:

$$U_{dc} = U_m - \frac{U_k}{2} \quad (9.3.4)$$

- Η τάση  $U_k$  αποδεικνύεται ότι για μικρά πλάτη κυματώσεως είναι:

$$U_k = \frac{I_{dc} \cdot T_2}{C} \quad (9.3.5)$$

όπου  $I_{dc}$  η συνεχής συνιστώσα του ρεύματος,  $T_2$  ο χρόνος εκφορτίσεως του πυκνωτή και  $C$  η χωρητικότητά του.



Σχ. 9.3δ.

Μπορούμε σε μεγάλη προσέγγιση να θεώρησομε ότι  $T_2 = T/2 = 1/2f$ , όπου  $T$  η περίοδος της εναλλασσόμενης τάσεως που ανορθώνομε, οπότε η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$U_k = \frac{I_{dc} T}{2C} \quad \text{ή} \quad U_k = \frac{I_{dc}}{2fC} \quad (9.3.6)$$

όπου  $f$  είναι η συχνότητα της τάσεως που ανορθώνομε:

Η ενεργός τιμή της τάσεως κυματώσεως  $U_{k(rms)}$  είναι:

$$U_{k(rms)} \approx \frac{I_{dc}}{4\sqrt{3fC}} \quad (9.3.7)$$

Ένας χρήσιμος τύπος για την πράξη, όταν η συχνότητα της τάσεως που ανορθώνομε είναι 50 c/s, είναι:

$$U_{k(rms)} = \frac{2.9 I_{dc}}{C} = \frac{2.9 U_{dc}}{R_L C} \quad (9.3.8)$$

όπου:  $I$  σε mA,  $C$  σε  $\mu F$  και  $R_L$  σε  $k\Omega$ .

Η συνεχής τάση  $U_{dc}$  στα άκρα του φόρτου, σύμφωνα με τις 9.3.4 και 9.3.6, θα είναι:

$$U_{dc} = U_m - \frac{I_{dc}}{4fC} \quad (9.3.9)$$

όπου:  $I_{dc}$  σε mA και  $C$  σε  $\mu F$ .

Από τη σχέση 9.3.9 έχομε:

$$U_m = U_{dc} + \frac{I_{dc}}{4fC} \Rightarrow U_m = U_{dc} + \frac{U_{dc}}{4fCR_L} \Rightarrow U_{dc} = \frac{U_m}{1 + \frac{1}{4fCR_L}} \quad (9.3.10)$$

όπου οι μονάδες είναι ίδιες όπως στους ανάλογους προηγούμενους και επόμενους τύπους.

Ο βαθμός κυματώσεως  $r$  είναι:

$$r = \frac{U_{k(rms)}}{U_{dc}} = \frac{1}{4\sqrt{3fC}} \frac{I_{dc}}{U_{dc}} \quad \text{ή} \quad r \approx \frac{2.9 I_{dc}}{C U_{dc}} \quad (9.3.11)$$

ή, αφού:

$$I_{dc} = \frac{U_{dc}}{R_L} \Rightarrow r = \frac{1}{4\sqrt{3fR_L C}} \quad \text{ή} \quad r \approx \frac{2.9}{R_L C} \quad (9.3.12)$$

Μια σχέση που συνδέει την  $U_m$  και  $U_{dc}$  με το βαθμό κυματώσεως  $r$  και που βγαίνει από συνδυασμό της 9.3.5 και της 9.3.11 είναι η:

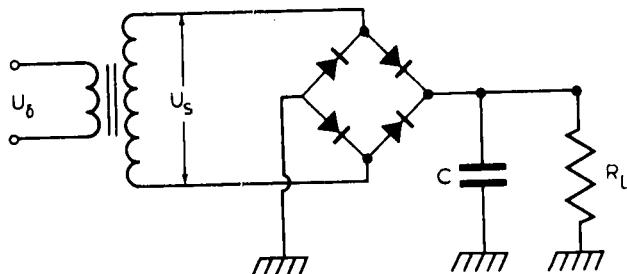
$$\frac{U_m}{U_{dc}} = 1 + r\sqrt{3} \quad (9.3.13)$$

### Παράδειγμα.

Για το ανορθωτικό σύστημα γέφυρας (σχ. 9.3ε) να σχεδιασθεί φίλτρο RC έτσι, ώστε η συνεχής τάση στο φόρτο να είναι 18 V με ρεύμα 100 mA και βαθμό κυματώσεως μικρότερο από 5%.

### Απάντηση.

Από τη σχέση 9.3.13 για  $r = 0.05$ , θα είναι:  $\frac{U_m}{U_{dc}} \approx 1.086$  οπότε  $U_m \approx 19.6$  V.



Σχ. 9.3ε.

Η ενεργός τιμή της τάσεως στο δευτερεύον θα είναι:

$$U_{\text{srms}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{19,6 \text{ V}}{\sqrt{2}} \Rightarrow U_{\text{srms}} \approx 13,8 \text{ V}$$

Η αντίσταση φόρτου θα είναι:  $R_L = \frac{U_{\text{dc}}}{I_{\text{dc}}} = \frac{18 \text{ V}}{100 \text{ mA}} \Rightarrow R_L = 180 \Omega$

Από τη σχέση 9.3.12 θα έχουμε αν  $R_L = 180 \times 10^{-3} \text{ k}\Omega$  και  $r = 0,05$ :

$$C = \frac{2,9}{rR_L} \approx 322 \mu\text{F}$$

Με λίγο μεγαλύτερο πυκνωτή θα επιτύχουμε βαθμό κυματώσεως <5%.

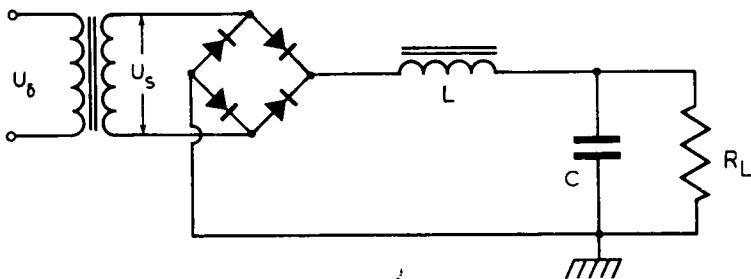
### 9.3.2 Φίλτρο με είσοδο πηνίο.

Το φίλτρο αυτό λέγεται και φίλτρο τύπου L. Είναι συνδυασμός πηνίου L και πυκνωτή C. Το πηνίο παρουσιάζει μεγάλη επαγγεική αντίσταση ( $L_w$ ) στις εναλλασσόμενες συνιστώσεις του ρεύματος τις οποίες εμποδίζει να φθάσουν στην έξοδο. Ο πυκνωτής C παρουσιάζει αντίθετα μικρή αντίσταση ( $1/C_w$ ) στις συνιστώσεις αυτές τις οποίες διευκολύνει να διαρρεύσουν στη γη και να μην περάσουν από το φόρτο  $R_L$ . Ο συνδυασμός των δύο, δηλαδή του πηνίου και του πυκνωτή, οδηγεί σε πολύ καλή εξομάλυνση της τάσεως και οπωσδήποτε καλύτερη από το φίλτρο με πυκνωτή μόνο. Παρακάτω θα θεωρήσουμε τις ωμικές αντιστάσεις του πηνίου και του τυλίγματος του μετασχηματιστή αμελητέες και τις διόδους Ιδανικές. Στην είσοδο του φίλτρου LC του κυκλώματος του σχήματος 9.3στ (διπλή ανόρθωση) θα έχουμε:

$$U_{\text{dc}} = \frac{2U_m}{\pi} \quad \text{ή} \quad U_{\text{dc}} = 0,636 U_m \quad (9.3.14)$$

Η ενεργός τιμή της διεύτερης αρμονικής είναι:

$$U_{\text{krms}} = \frac{4}{3\pi\sqrt{2}} \cdot U_m$$



Σχ. 9.3στ.

Όλες οι άλλες αρμονικές θεωρούνται αμελητέες.

Ο συντελεστής κυματώσεως είναι:

$$r = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{X_C}{X_L} \quad \text{ή} \quad r = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{1}{LC\omega^2} \quad \text{ή} \quad r = \frac{\sqrt{2}}{12\pi^2 f^2 LC} \quad (9.3.15)$$

$$\text{αφού} \quad X_L = \frac{1}{C\omega} \quad \text{και} \quad X_L = L\omega$$

και όπου  $f$  η συχνότητα της δεύτερης αρμονικής.

Παρατηρούμε ότι ο βαθμός κυματώσεως είναι ανεξάρτητος από την αντίσταση φόρτου  $R_L$ . Εξαρτάται για την ίδια συχνότητα μόνο από τις τιμές των  $L$  και  $C$ .

Για τη συχνότητα του δικτύου της Ελλάδας 50 c/s, η τιμή του  $r$  στην περίπτωση της πλήρους ανορθώσεως είναι:

$$r = \frac{1,19}{LC} \quad \text{όπου } L \text{ σε Henry και } C \text{ σε } \mu F \quad (9.3.15)$$

Η ένεργος τιμή της τάσεως κυματώσεως είναι:

$$U_{k(rms)} = \frac{\sqrt{2}}{12\pi^2 f^2 LC} \quad (9.3.16)$$

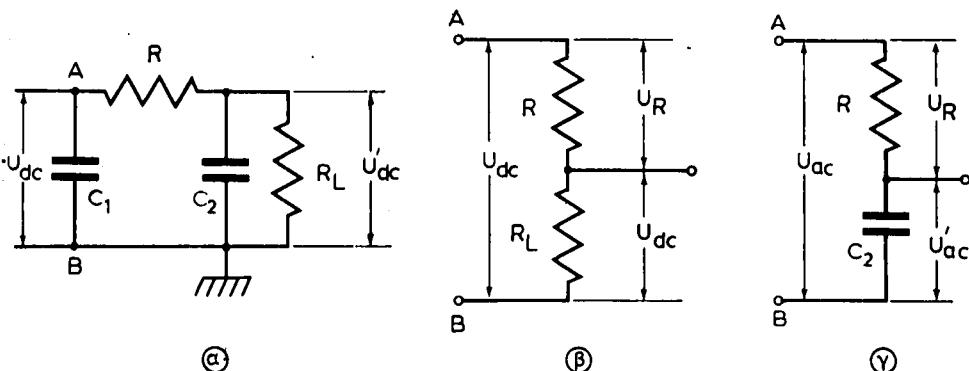
### **Κρίσιμη αυτεπαγωγή.**

Στην περίπτωση του φίλτρου με πυκνωτή (RC) είδαμε ότι η δίοδος διαρρέεται από ρεύμα μόνο σ' ένα μικρό τμήμα της περιόδου που το μέγεθός του εξαρτάται από το γινόμενο  $R_L C \omega$ , (όπου  $\omega$  η κυκλική συχνότητα της τάσεως που ανορθώνεται). Ας υποθέσουμε ότι σε σειρά με τη δίοδο τοποθετούμε ένα πηνίο με μικρή αρχικά αυτεπαγωγή και τέτοια, ώστε να μεγαλώνει η διάρκεια αγωγιμότητας της διόδου, χωρίς όμως και να γίνεται συνεχής. Αυξάνοντας την τιμή της αυτεπαγωγής θα υπάρξει κάποια στιγμή που η ροή του ρεύματος από τη δίοδο προς το φόρτο θα είναι συνεχής. Η τιμή αυτή της αυτεπαγωγής στην οποία η ροή αρχίζει να γίνεται συνεχής λέγεται **κρίσιμη αυτεπαγωγή  $L_C$** .

Το φίλτρο που περιγράφεται παραπάνω δε πολυχρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια που κυριαρχούν μικρές, φθηνές, ελαφρές συσκευές με σταθεροποιητές τάσεως τρανζίστορ.

### 9.3.3 Φίλτρο τύπου π με πυκνωτές και αντίσταση.

Όπως ειδαμε στο φίλτρο με πυκνωτή, η κυμάτωση είναι πολύ μικρότερη από αυτή χωρίς τον πυκνωτή, ιδιαίτερα για μεγάλες αντιστάσεις φόρτου  $R_L$ . Ωστόσο η κυμάτωση εξακολουθεί να είναι αρκετά υπολογίσιμη. Η κατάσταση βελτιώνεται αν μετά τον πυκνωτή προσθέσουμε αντίσταση  $R$  στη σειρά με την αντίσταση φόρτου και παράλληλα με την αντίσταση φόρτου άλλον ένα πυκνωτή. Δημιουργείται έτσι το φίλτρο τύπου π του σχήματος 9.3ζ(α) με πυκνωτές και αντίσταση.



Σχ. 9.3ζ.

Ο πρώτος πυκνωτής  $C_1$  παίζει τον ίδιο ρόλο που παίζει ο πυκνωτής στο απλό φίλτρο  $RC$ . Υποβιβάζει δηλαδή την κυμάτωση της τάσεως που δημιουργείται από τη δίοδο και αυξάνει τη συνεχή συνιστώσα. Η προσθήκη κατόπιν του τμήματος  $RC_2$  υποβιβάζει ακόμη περισσότερο την κυμάτωση. Άς εξετάσουμε αναλυτικότερα την επίδραση του τμήματος  $RC_2$  πάνω στη συνεχή συνιστώσα  $U_{dc}$  και πάνω στις εναλλασσόμενες συνιστώσες της τάσεως στα άκρα  $AB$  του κυκλώματος του σχήματος 9.3ζ(β).

Έστω  $U_{dc}$  η συνεχής συνιστώσα της τάσεως στα άκρα  $AB$ . Για τη συνεχή συνιστώσα του ρεύματος, ο πυκνωτής  $C_2$  παρουσιάζει άπειρη αντίσταση. Η τάση  $U'_{dc}$  στα άκρα του φόρτου  $R_L$  θα είναι βέβαια μικρότερη από την  $U_{dc}$ . Θα έχομε δηλαδή, όπως φαίνεται και από το ισοδύναμο κύκλωμα, για τη συνεχή, συνιστώσα στο σχήμα 9.3ζ(β).

$$U'_{dc} = U_{dc} \frac{R_L}{R + R_L} \quad (9.3.17)$$

Αυτό άλλωστε είναι και το μειονέκτημα του φίλτρου αυτού που μπορεί να εξουδετερωθεί εν μέρει αν προβλέψουμε αυξημένη τάση  $U_{dc}$  στα άκρα  $B$ .

Για τις εναλλασσόμενες συνιστώσες θα έχομε το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 9.3ζ(γ). Ο πυκνωτής  $C_2$  έχει εκλεγεί έτσι ώστε να παρουσιάζει πολύ μικρή αντίσταση στη μικρότερη από τις αρμονικές συνιστώσες στην έξοδο. Έτσι οι εναλλασσόμενες συνιστώσες περνούν από τον πυκνωτή  $C_2$ , που έχει πολύ μικρότερη αντίσταση γι' αυτές, από την αντίσταση φόρτου  $R_L$ , οπότε στο ισοδύναμο κύκλωμα η  $R_L$  μπορεί να παραλειφθεί. Έχομε έτσι ένα διαιρέτη τάσεως για τις εναλλασσόμενες συνιστώσες που αποτελείται από την αντίσταση  $R$  και τον πυ-

κνωτή  $C_2$ . Το μέτρο κάθε εναλλασσόμενης συνιστώσας στην έξοδο είναι:

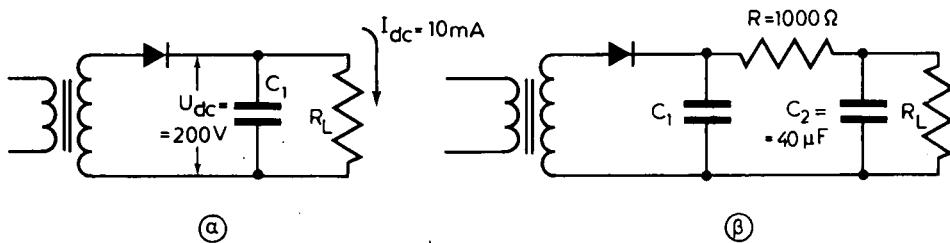
$$U'_{ac} = U_{ac} \frac{X_{C_2}}{Z} \quad \text{όπου} \quad X_{C_2} = \frac{1}{C_2 \omega} \quad \text{καὶ} \quad Z = \sqrt{R^2 + X_{C_2}^2} \quad (9.3.18)$$

Αν η  $R$  είναι πολύ μεγάλη σε σύγκριση με την  $X_{C_2}$ , τότε το μεγαλύτερο ποσοστό της τάσεως θα είναι στα άκρα της  $R$  και ένα μικρό υπόλοιπο στα άκρα του  $C_2$ , δηλαδή στα άκρα του φόρτου. Αυτό σημαίνει ότι στα άκρα του φόρτου θα έχουν υποβιβασθεί οι εναλλασσόμενες συνιστώσες. Θα έχουμε δηλαδή μικρότερη κυμάτωση από αυτή που είχαμε στην είσοδο του φίλτρου [άκρα  $AB$ , σχ. 9.3ζ(α)].

### Παράδειγμα.

Η τάση στην έξοδο ενός ανορθωτή με απλή ανόρθωση και φίλτρο τύπου RC (σχ. 9.3η) έχει συνεχή συνιστώσα 200 V και ενεργό τιμή αρμονικών 40 V. Το συνεχές ρεύμα στο φόρτο είναι 10 mA. Η τάση που ανορθώνει έχει συχνότητα 50 c/s:

- α) Να βρεθεί ο βαθμός κυματώσεως.
- β) Να βρεθεί η συνεχής τάση στην έξοδο και ο βαθμός κυματώσεως αν στο παραπάνω κύκλωμα προστεθεί, σε σειρά με τον ανορθωτή, μια ωμική αντίσταση  $R = 1000 \Omega$  και ένας πυκνωτής  $40 \mu F$  παράλληλα με την αντίσταση φόρτου  $R_L$ . Νά δημιουργηθεί δηλαδή μαζί με τον πυκνωτή που υπήρχε ένα φίλτρο RC τύπου π.



Σχ. 9.3η.

### Απάντηση.

- α) Ο βαθμός κυματώσεως θα είναι:

$$r = \frac{U_{k(rms)}}{U_{dc}} = \frac{40 \text{ V}}{200 \text{ V}} = 0,20 \quad \text{ή} \quad 20\%$$

- β) 1. Η αντίσταση φόρτου θα είναι:

$$R_L = \frac{U_{dc}}{I_{dc}} = \frac{200 \text{ V}}{10 \times 10^{-3} \text{ A}} = 20 \text{ k}\Omega$$

- 2. Η συνολική ωμική αντίσταση θα είναι:

$$R_{oλ} = R + R_L = 1000 \Omega + 20000 \Omega = 21 \text{ k}\Omega$$

- 3. Η συνεχής συνιστώσα στην έξοδο τώρα  $U'_{dc}$  θα είναι:

$$U'_{dc} = U_{dc} \frac{R_L}{R + R_L} = 200 \text{ V} \frac{20000 \Omega}{21000 \Omega} = 190,5 \text{ V}$$

4. Η χαμηλότερη συχνότητα εναλλασσόμενης συνιστώσας στην απλή ανόρθωση είδαμε ότι ήταν η συχνότητα της τάσεως που ανορθώνομε. Εδώ αυτή είναι 50 c/s. Η αντίσταση του πυκνωτή (μέτρο) θα είναι:

$$X_{C_2} = \frac{1}{2\pi f C_2} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 40 \times 10^{-6}} \frac{\text{sec}}{\text{Farad}} \approx 79,6 \Omega$$

5. Το μέτρο της συνολικής αντιστάσεως για το εναλλασσόμενο της R σε σειρά με τον C<sub>2</sub> θα είναι:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_{C_2}^2} \approx \sqrt{1000^2 + (79,6)^2} \approx 1000 \Omega$$

(Το αποτέλεσμα αυτό θα μπορούσε να προβλεφθεί και χωρίς αυτή την πράξη αφού  $R > 10X_{C_2}$ ).

6. Αν θεωρήσουμε τη χειρότερη περίπτωση, όλες δηλαδή οι συνιστώσες να έχουν συχνότητα f = 50 c/s, τότε η ενεργός τιμή της τάσεως κυματώσεως στην έξοδο θα είναι:

$$U'_{\text{rms}} = U_{\text{ac}} \frac{X_{C_2}}{Z} = 40 \text{ V} \times \frac{79,6 \Omega}{1000 \Omega} \Rightarrow U'_{\text{rms}} = 3,18 \text{ V}$$

7. Ο βαθμός κυματώσεως θα είναι:

$$r := \frac{U'_{\text{rms}}}{U'_{\text{dc}}} = \frac{3,18 \text{ V}}{190,5 \text{ V}} \Rightarrow r = 1,66\%$$

Στην παραπάνω διάταξη παρατηρούμε ότι η δημιουργία του φίλτρου π με RC είχε ως αποτέλεσμα τον υποβιβασμό του βαθμού κυματώσεως από 20% σε 1,66%.

Η πτώση τάσεως των 9,5 V στα άκρα της R για τα 10 mA συνεχούς ρεύματος στο φόρτο δεν είναι σχετικά σημαντική. Αν όμως αυξηθεί το συνεχές ρεύμα αρκετά, θα γίνει σημαντική (λαν π.χ. γίνει 100 mA, η πτώση τάσεως θα είναι 100 V). Θα μπορούσαμε βέβαια να ελιγμώσουμε την αντίσταση R. Τότε όμως θα αυξάνονταν η κυμάτωση στην έξοδο. Η αποτελεσματικότητα του φίλτρου επηρεάζεται επίσης και από την αντίσταση φόρτου.

Γενικά ο τύπος αυτός του φίλτρου χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις μικρών ρευμάτων φόρτου.

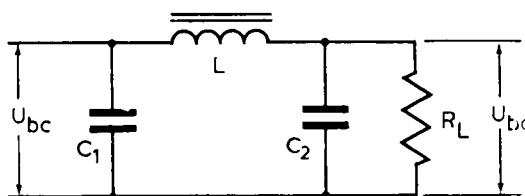
### 9.3.4 Φίλτρο τύπου π με πηνίο και πυκνωτές.

Στο προηγούμενο φίλτρο π με RC είδαμε πόσο επηρεάζει η σειρά αντίσταση R τη συνεχή τάση εξόδου. Μπορούμε στη θέση της αντιστάσεως να βάλομε ένα πηνίο και να δημιουργήσουμε έτσι ένα φίλτρο τύπου π με πηνίο και πυκνωτές (σχ. 9.3θ). Το πηνίο, όπως ξέρομε, παρουσιάζει αντίσταση Lw στις εναλλασσόμενες συνιστώσες. Αν το σύρμα του τυλίγματός του έχει κατάλληλες διαστάσεις, τότε μπορεί να παρουσιάζει μικρή ωμική αντίσταση στο συνεχές ρεύμα. Με κατάλληλη λοιπόν κατασκευή του πηνίου, μπορούμε να επιτύχουμε μεγάλη αντίσταση στις εναλλασσόμενες συνιστώσες του ανορθωμένου ρεύματος και μικρή στη συνεχή συνιστώσα πάνω στο πηνίο, με αποτέλεσμα η συνεχής τάση εξόδου να διαφέρει λίγο από τη συνεχή τάση στην είσοδο του φίλτρου.

Ας επαναλάβομε τους υπολογισμούς του προηγούμενου φίλτρου π με R-C σε ένα φίλτρο π με L-C.

### Παράδειγμα.

Έστω ότι η συνεχής τάση συστήματος απλής ανορθώσεως με φίλτρο με πυκνωτή είναι 200 V και η ενεργός τιμή των αρμονικών 40 V. Το συνεχές ρεύμα στο φόρτο 10 mA. Η τάση που ανορθώνεται έχει συχνότητα 50 c/s. Στο σύστημα προσθέτομε ένα πηνίο L και έναν πυκνωτή  $C_2$  έτσι, ώστε μαζί με τον πυκνωτή  $C_1$ , που υπήρχε να δημιουργηθεί ένα φίλτρο π με L-C (σχ. 9.3θ). Το πηνίο έχει συντελεστή αυτεπαγωγής  $L = 30 \text{ Henry}$  και ωμική αντίσταση  $R_L = 90 \Omega$ , ενώ ο πυκνωτής  $C_2 = 40 \mu\text{F}$ .



Σχ. 9.3θ.

Φίλτρο τύπου Π με πηνίο και πυκνωτή.

Να βρεθεί η συνεχής τάση στην έξοδο και ο βαθμός κυματώσεως.

### Λύση.

- a) Η πτώση τάσεως  $U_\pi$  για το συνεχές πάνω στην ωμική αντίσταση  $R_L$  του πηνίου θα είναι:

$$U_\pi = I_{dc} R_L = 10 \times 10^{-3} \text{ A} \times 90 \Omega = 0,9 \text{ V}$$

- β) Η συνεχής τάση στην έξοδο  $U'_{dc}$  θα είναι:

$$U'_{dc} = 200 \text{ V} - 0,9 \text{ V} = 199,1 \text{ V}$$

- γ) Η αντίσταση  $X_L$  στο εναλλασσόμενο του πηνίου θα είναι:

$$X_L = 2\pi f L = 2\pi \times 50 \text{ sec}^{-1} \times 30 \text{ H} = 9420 \Omega$$

Όπου  $f = 50 \text{ Hz}$ , η μικρότερη συχνότητα αρμονικής στην απλή ανόρθωση. Το μέτρο της αντιστάσεως εναλλασσόμενου του πυκνωτή θα είναι:

$$X_{C_2} = \frac{1}{2\pi f C_2} = \frac{1}{2\pi \times 50 \text{ sec}^{-1} \times 40 \times 10^{-6} \text{ Farad}} = 79,6 \Omega$$

- δ) Το μέτρο της συνολικής αντιστάσεως  $Z$  του συστήματος L-R<sub>L</sub>-C<sub>2</sub> στη σειρά, όπου  $R_L$  είναι η αντίσταση του σύρματος του πηνίου ( $90 \Omega$ ) θα είναι:

$$Z = \sqrt{\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2 + R_L^2} \approx L\omega - \frac{1}{C\omega}$$

$$\text{Επειδή} \quad R_i \ll \left( L_{\omega} - \frac{1}{C\omega} \right)$$

$$Z = 9420 \Omega - 79,6 \Omega \approx 9340 \Omega$$

ε) Η ενεργός τιμή της τάσεως κυματώσεως  $U'_{\text{k rms}}$  στην έξοδο (άκρα του  $C_2$ ) δίνεται από τη σχέση:

$$U'_{\text{k rms}} = U_{\text{k rms}} \cdot \frac{X_{C_1}}{Z} = 40 \text{ V} \cdot \frac{80}{9340} = 0,342 \text{ V}$$

στ) Ο βαθμός κυματώσεως θα είναι:

$$r = \frac{U'_{\text{k rms}}}{U_{\text{dc}}} = \frac{0,342 \text{ V}}{199} = 0,17\%$$

Συγκρίνοντας τα εξαγόμενα αυτά με τα εξαγόμενα του προηγούμενου παραδείγματος που είχαμε φίλτρο π με  $RC$ , παρατηρούμε τις σημαντικές βελτιώσεις που έγιναν με την αντικατάσταση της ωμικής αντιστάσεως από πηνίο. Ας σημειωθεί επίσης ότι π με  $LC$  φίλτρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για μεγάλα ρεύματα φόρτου, αφού η ωμική αντίσταση του πηνίου είναι μικρή.

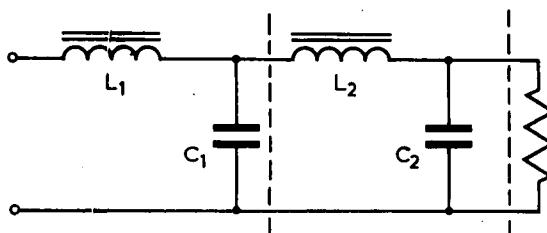
Μειονεκτήματα βέβαια παρουσιάζει και το φίλτρο αυτό. Αυτά είναι το κόστος, το βάρος και ο όγκος του. Η μέγιστη τιμή του ρεύματος στη δίοδο είναι πιο μεγάλη από το ρεύμα φόρτου. Έτσι όταν θέλουμε μεγάλα ρεύματα στο φόρτο πρέπει να χρησιμοποιούμε διπλή ανδρθωση, για να υποβιβάζεται η μέγιστη τιμή του ρεύματος από τη λυχνία στο μισό, αυξάνοντας έτσι τη δυνατότητα λειτουργίας με μεγαλύτερα ρεύματα στο φόρτο. Η ποιότητα του φίλτραρισματος πάλι εξαρτάται από το φόρτο, όπως επίσης από το φόρτο εξαρτάται και η συνεχής τάση στην έξοδο.

Καλό είναι όπου μεταβάλλεται η τιμή της αντιστάσεως φόρτου να αποφεύγεται η χρησιμοποίηση τέτοιου φίλτρου.

### 9.3.5 Πολλαπλό φίλτρο τύπου L.

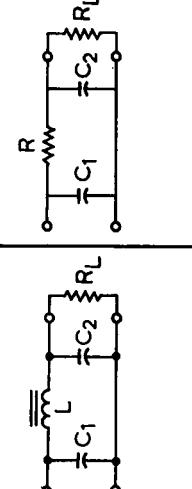
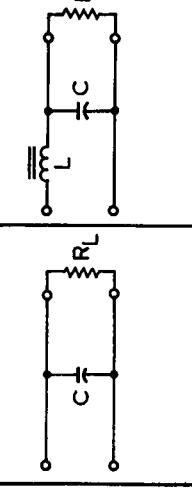
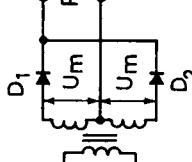
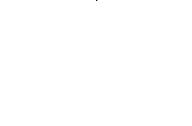
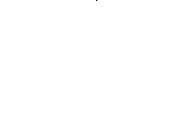
Όπως φαίνεται από τις σχέσεις που παραθέσαμε στα προηγούμενα, ο βαθμός κυματώσεως μικραίνει οσο αυξάνονται οι τιμές των  $L$  και  $C$ . Καλύτερα όμως αποτέλεσμα έχουμε όταν συνδέσουμε στη σειρά δυο ή περισσότερα φίλτρα, σχηματίζοντας έτσι ένα πολλαπλό φίλτρο (σχ. 9.3i). Το κόστος βέβαια είναι μεγαλύτερο, αλλά ο βαθμός κυματώσεως μικραίνει μ' ένα συντελεστή  $K/(LC)$  όπου  $K$  σταθερά και η ο αριθμός των φίλτρων.

Στον πίνακα 9.3.1 δίνονται οι πιο συνηθισμένες μορφές φίλτρων με λειτουργικά χαρακτηριστικά τους.



Σχ. 9.3i.

**ΤΙΜΑΚΑΣ 9.3.1**  
**Πίνακας Χαρακτηριστικών ανορθόδοξων με διάφορα φλίγρα**

Χωρίς φίλτρο	Με είσοδο πυκνωτή	Με είσοδο πηνίο	Τύπου-Π με πηνίο	Τύπου-Π με αντίσταση
				
Κύκλωμα				
$U_{dc}$ Χωρίς φόρτο	$\frac{2U_m}{\pi}$ 0,636 $U_m$	$U_m$	$U_m$	$U_m$
$U_{dc}$ Με φόρτο	$\frac{2U_m}{\pi}$ 0,636 $U_m$	$\frac{U_m}{1 + \frac{1}{4fR_L C}}$	$2U_m/\pi$	$\frac{U_m}{1 + \frac{1}{4fR_L C_1}}$
Συντετροτής κυματώσεως	0,48	$\frac{1}{4\sqrt{3} f R_L C}$	$\frac{\sqrt{2}}{3} \frac{X_c}{X_L}$	$\sqrt{2} \frac{X_c}{R_L X_L} \frac{X_c}{R_L R}$

### 9.3.6 Γενικές παρατηρήσεις.

Στις μεγάλες ανορθωτικές εγκαταστάσεις, η επιλογή για το κύκλωμα που θα χρησιμοποιηθεί βασίζεται στο βαθμό κυματώσεως και στο είδος του μετασχηματιστή που θα χρησιμοποιήσουμε. Το κόστος του μετασχηματιστή βαρύνει πολύ σε μια τέτοια απόφαση, π.χ. για να αποφύγομε το μαγνητικό κόρο απαιτείται ειδικό τύλιγμα που μεγαλώνει το κόστος. Η αύξηση του αριθμού των φάσεων οδηγεί στη μειώση της κυματώσεως αλλά και πάλι αυξάνει το κόστος. Γενικά, όπως πάντα, ο συγκερασμός του κόστους με την ποιότητα είναι το βασικό πρόβλημα και εδώ.

Ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να λάβομε υπόψη μας είναι τα χαρακτηριστικά της διόδου, και κυρίως τη μέση τιμή του ρεύματος στην άνοδο, τη μέγιστη τιμή του, όπως και τη μέγιστη ανάστροφη τάση.

Από τα κυκλώματα που εκθέσαμε, τα μονοφασικά έχουν μεγάλο βαθμό κυματώσεως και χαμηλή συχνότητα αρμονικής. Αυτά απαιτούν δαπανηρά φίλτρα για εξομάλυνση της τάσεως, στις μεγάλες ισχείς. Τα τριφασικά κυκλώματα απλής ανορθώσεως επίσης χρειάζονται μετασχηματιστές με ειδικά κυκλώματα που κοστίζουν. Τα τριφασικά κυκλώματα πλήρους ανορθώσεως έχουν καλή απόδοση στο μετασχηματιστή, χαμηλές ανάστροφες τάσεις, υποβιβασμένη κυμάτωση και γι' αυτό χρησιμοποιούνται συχνά όπου απαιτούνται υψηλές τάσεις και μέσα ρεύματα.

Τα εξαφασικά κυκλώματα δε χρησιμοποιούνται πολύ συχνά.

### 9.4 Ασκήσεις.

- Εναλλασσόμενη ημιτονική τάση με ενεργό τιμή 115 V, συνδέεται σε σειρά με ιδανικό ανορθωτή και ωμική αντίσταση 500 Ω.
  - Ποια θα είναι η τιμή κορυφής του ρεύματος που θα διαρρέει την αντίσταση των 500 Ω.
  - Ποια θα είναι η ένδειξη αμπερόμετρου συνεχούς, αν συνδεθεί στη σειρά με την αντίσταση αυτή;
  - Πόσα W το λιγότερο πρέπει να είναι η αντίσταση;
- Στο κύκλωμα ανορθώσεως του σχήματος 9.2ε η αντίσταση φόρτου  $R_L$  είναι 3 kΩ και διαρρέεται από ρεύμα με συνεχή συνιστώσα 50 mA. Θεωρώντας τις πτώσεις τάσεως στις διόδους αμελητέες, να βρεθούν:
  - Η ενεργός τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή.
  - Η τάση κυματώσεως.
  - Η μέγιστη ανάστροφη τάση σε κάθε δίοδο.
- Στο ανορθωτικό κύκλωμα του σχήματος 9.3a, ο πυκνωτής  $C = 40 \mu F$ . Η συνεχής συνιστώσα της τάσεως στα άκρα του φόρτου  $R_L$  είναι  $U_{dc} = 60 V$  και η συνεχής συνιστώσα του ρεύματος στην  $R_L I_{dc} = 100 mA$ .  
Να υπολογισθούν:
  - Η μέγιστη τιμή της τάσεως στο δευτερεύον του μετασχηματιστή.
  - Ο συντελεστής κυματώσεως.
- Η μέγιστη τάση στην είσοδο του φίλτρου του σχήματος (9.3στ) είναι 420 V. Η συχνότητα του δικτύου είναι 50 c/sec. Ο συντελεστής αυτεπαγωγής του πηνίου είναι  $L = 10 H$  και η χωρητικότητα του πυκνωτή  $C = 20\mu F$ . Η αντίσταση φόρτου  $R_L$  είναι καθαρά ωμική και ίση με 750 Ω. Να υπολογιστεί:
  - Τη συνεχή τάση στα άκρα του φόρτου.
  - Το συνεχές ρεύμα που θα τον διαρρέει.
  - Το συντελεστή κυματώσεως.
  - Τη χαμηλότερη συχνότητα κυματώσεως της τάσεως στο φόρτο.
- Η τάση κορυφής σε κάθε φάση του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή του σχήματος 9.2ιδ είναι 100 V. Η αντίσταση φόρτου είναι ωμική και ίση με 100 Ω. Ποια θα είναι η τιμή του συνεχούς ρεύματος στο φόρτο;

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ

### ΘΥΡΙΣΤΟΡ (THYRISTOR)

#### 10.1 Γενικά.

Τα Θυρίστορ είναι εξαρτήματα από ημιαγωγούς P και N σε διαδοχικές στρώσεις. Αυτά μπορεί να είναι δύο ή περισσότερων επαφών και να έχουν δύο, τρεις ή και τέσσερις ακροδέκτες.

Είναι συστήματα δύο καταστάσεων (αγωγιμότητα-διακοπή). Η κατάσταση στην οποία θα βρίσκεται ένα Θυρίστορ ελέγχεται εξωτερικά. Η λειτουργία και η δράση τους μοιάζει με τη λειτουργία και τη δράση των Θύρατρον. Ωστόσο υπάρχουν και μεταξύ τους διαφορές. Έτσι π.χ. το Θύρατρο λειτουργεί με μικρά ρεύματα και υψηλές τάσεις και διεγείρεται σε λειτουργία από μικρές σχετικά τάσεις. Τα Θυρίστορ λειτουργούν με υψηλά ρεύματα και χαμηλές τάσεις και διεγείρονται με μικρά ρεύματα. Είναι πιο αξιόπιστα στη λειτουργία τους και η αντίσταση τους κατά την ορθή φορά όταν άγουν είναι κλάσμα του  $\Omega$ , πολύ χαμηλότερη δηλαδή από τα Θύρατρον. Δεν απαιτούν θέρμανση, έχουν πολύ μικρότερο όγκο και βάρος. Ισχείς δεκάδων kW μπορούν εύκολα να ελεγχθούν με ένα σχετικά μικρό Θυρίστορ. Μερικές από τις εφαρμογές τους είναι στη φόρτιση μπαταριών, στη μετατροπή συνεχούς σε εναλλασσόμενη τάση ή συνεχούς σε συνεχή άλλης τιμής, στη σταθεροποίηση συνεχούς ή εναλλασσόμενης τάσεως, στον έλεγχο λειτουργίας κινητήρων και γεννητριών, στον έλεγχο φωτισμού, στη σταθεροποίηση θερμοκρασίας κλπ.

Οι κυριότεροι τύποι Θυρίστορ είναι:

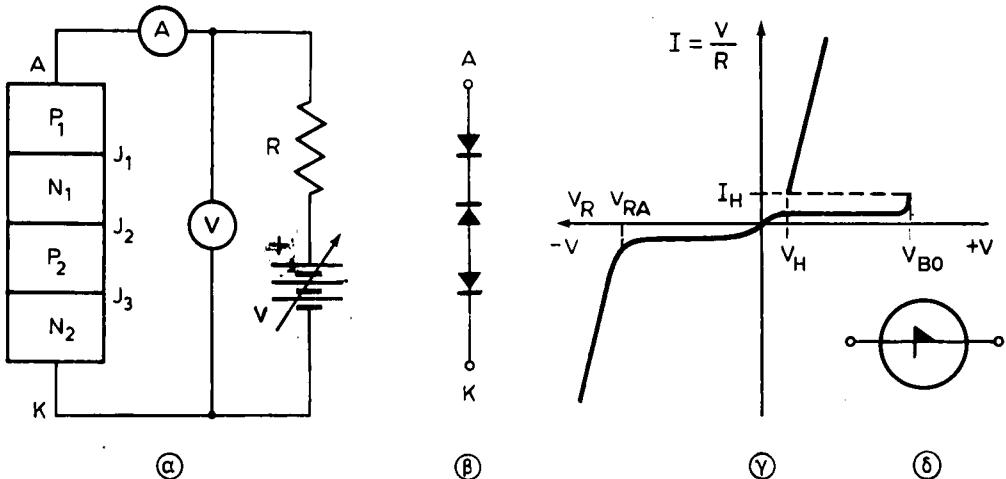
- Ο ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου SCR (Silicon Controlled Rectifier).
- Η αμφίδρομη διόδος THYRISTOR (DIAC).
- Ο αμφίδρομος Ελεγχόμενος Ανορθωτής Πυριτίου TRIAC).
- Ο ελεγχόμενος διακόπτης πυριτίου SCS (Silicon Controlled Switch).

Υπάρχουν βέβαια και άλλοι τύποι Θυρίστορ.

#### 10.2 Δίοδος τεσσάρων στρώσεων ή δίοδος Shockley.

Πριν αναπτύξιμε τη λειτουργία των Θυρίστορ είναι χρήσιμο να μάθομε τη λειτουργία της διόδου τεσσάρων στρώσεων που αποτελεί και τη βάση τους.

Η δίοδος αποτελείται από τέσσερα στρώματα εναλλακτικά P και N όπως φαίνεται στο σχήμα 10.2(a). Όταν η άνοδος A έχει θετικό δυναμικό ως προς την κάθοδο K, οι επαφές J<sub>1</sub> και J<sub>3</sub> είναι πολωμένες κατά την ορθή φορά, ενώ η επαφή J<sub>2</sub> είναι πολωμένη κατά την ανάστροφη. Το σύνολο έτσι παρουσιάζει πολύ μεγάλη αντίσταση. Από τη δίοδο N<sub>1</sub>-P<sub>2</sub> για σχετικά μικρές τάσεις, θα περνά πολύ μικρό ρεύμα. Όσο είναι το ρεύμα μιας διόδου πολωμένης ανάστροφα με τάσεις πιο μικρές από την τάση Zener.



Σχ. 10.2α.

Διόδος Shockley.

α,β) Συγκρότηση. γ) Χαρακτηριστική. δ) Συμβολισμός.

Αν όμως αυξήσουμε την πόλωση αυτή κατά την ορθή φορά, από μια τάση και πέρα το ρεύμα παίρνει απότομα μεγάλες τιμές. Αυτό οφείλεται στο ότι η τάση στην επαφή  $J_2$  έχει υπερβεί την τάση  $Zener$ . Η τιμή της τάσεως στα άκρα της διόδου στην οποία εμφανίζεται το μεγάλο αυτό ρεύμα είναι κατασκευαστικό χαρακτηριστικό της διόδου. Η τάση αυτή λέγεται τάση εκκινήσεως συμβολίζεται με  $V_{BO}$  [Break-over Voltage, σχ. 10.2α(γ)]. Στο σχήμα αυτό φαίνεται η μεταβολή του ρεύματος της διόδου σε συνάρτηση με την τάση στα άκρα της. Όπως φαίνεται, αυξάνοντας την τάση κατά την ορθή φορά, το ρεύμα  $I$  αυξάνεται πολύ λίγο στην αρχή. Όταν η τάση γίνει ίση με  $V_{BO}$ , το ρεύμα αυξάνεται απότομα λόγω εκκενώσεως στην επαφή  $J_2$  και η τάση στα άκρα της διόδου πέφτει στην πολύ μικρότερη τιμή  $V_H$  που μένει σχεδόν σταθερή, ανεξάρτητα από το ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο. Η τάση αυτή λέγεται τάση συγκρατήσεων (Holding Voltage).

Η αντίσταση της διόδου, ενώ πριν από την τάση  $V_{BO}$  ήταν πολύ μεγάλη (περίπου  $100 \text{ M}\Omega$ ) μετά την τάση αυτή η τιμή της γίνεται πολύ μικρή: γύρω στα  $10 \Omega$ . Το ρεύμα  $I$  μπορεί να πάρει μεγάλες τιμές. Περιορίζεται όμως από αντίσταση που συγδέεται στη σειρά με τη δίοδο για να εμποδίσει το ρεύμα να πάρει τιμές που θα την κατάστρεφαν. Οι τιμές τις τάσεως εκκινήσεως  $V_{BO}$  κυμαίνονται από μερικές δεκάδες μέχρι μερικές εκατοντάδες βόλτες ανάλογα με τον τύπο της διόδου. Το ρεύμα  $I_{BO}$  που διαρρέει τη δίοδο τη στιγμή που η τάση έχει γίνει ίση με  $V_{BO}$ , είναι περίπου μερικές εκατοντάδες mA.

Για να επανέλθει η δίοδος στην αρχική της κατάσταση, πρέπει η τάση στα άκρα της να πάρει τιμές μικρότερες από την τιμή  $V_H$  ή το ρεύμα  $I$  να γίνει μικρότερο από μια τιμή  $I_H$ . Οι τιμές των  $V_H$  κυμαίνονται από  $0,5V$  ως  $20V$  περίπου. Τα ρεύματα  $I_H$  κυμαίνονται από μερικά mA ως μερικές εκατοντάδες mA, ανάλογα με τον τύπο της διόδου.

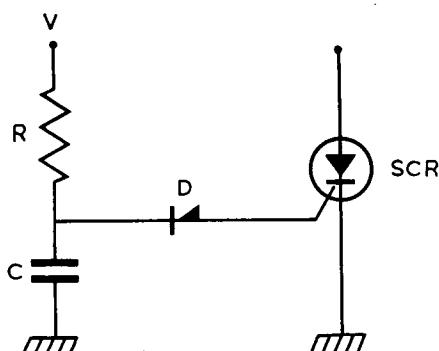
Αν πολώσουμε τη δίοδο ανάστροφα, δηλαδή αν συνδέσουμε το P με τον αρνητικό πόλο της πηγής και το N με το θετικό, τότε αυξάνοντας την τάση το ρεύμα θα παίρνει στην αρχή πολύ μικρές τιμές και κατόπιν σε μια τιμή τάσεως  $V_{RA}$  θα πάρει

απότομα μεγάλες τιμές. Αυτό οφείλεται στην εκκένωση που γίνεται στις επαφές  $J_1$  και  $J_3$ .

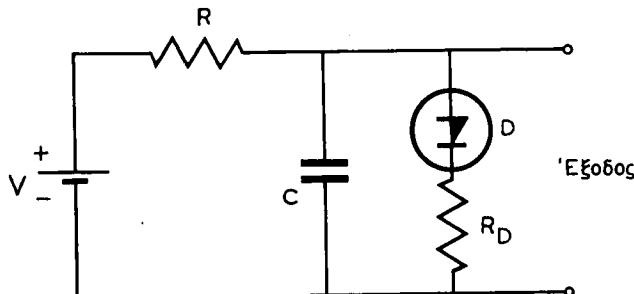
Η δίοδος τεσσάρων στρώσεων με πόλωση κατά την ορθή φορά αποτελεί στην ουσία ένα διακόπτη που επιτρέπει τη διέλευση του ρεύματος προς μια κατεύθυνση δταν η τάση στα άκρα του υπερβεί την τιμή  $V_{BO}$ .

Το κύκλωμα του σχήματος 10.2β είναι ένα απλό κύκλωμα χρησιμοποιήσεως μιας δίοδου τεσσάρων στρώσεων (D) ως διακόπτη στη διεγέρση ενός SCR.

Όταν συνδεθεί η τάση V, ο πυκνωτής C αρχίζει να φορτίζεται μέσω της αντιστάσεως R και η τάση στα άκρα της τείνει να γίνει ίση με V. Κάποια στιγμή η τάση στα άκρα του πυκνωτή θα γίνει ίση με την  $V_{BO}$  της δίοδου, οπότε αυτή θα αρχίσει να άγει με μεγάλο σχετικά ρεύμα, με συνέπεια να διεγερθεί ο ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου (SCR).



Σχ. 10.2β.



Σχ. 10.2γ.

### Παράδειγμα.

Διαθέτομε μια δίοδο τεσσάρων στρώσεων με  $V_{BO} = 100V$ , ρεύμα λειτουργίας  $I = 20A$  και ρεύμα συγκρατήσεως  $I_H = 20mA$ . Με τη δίοδο αυτή θέλομε να κατασκευάσουμε ένα κύκλωμα παραγωγής πριονωτής τάσεως με συχνότητα 500Hz.

### Απάντηση.

Κατασκευάζομε ένα κύκλωμα όπως στο σχήμα 10.2 γ Στο κύκλωμα αυτό ο πυκνωτής C θα τείνει να φορτισθεί ως την τάση V. Όταν δμως η τάση στα άκρα του

γίνει  $V = V_{BO}$ , τότε θα γίνει ισχυρά αγώγιμη η D και ο πυκνωτής θα εκφορτισθεί μέσα από αυτήν και την αντίσταση  $R_D$ .

Για σωστή λειτουργία πρέπει  $V > V_{BO}$ . Ας πούμε ότι καθορίζομε  $V = 3V_{BO}$ . Στην περίπτωσή μας, δηλαδή όπου  $V_{BO} = 100V$ , θα έχομε  $V = 3 \times 100V = 300V$ .

Για να είναι βέβαιο ότι θα διακοπεί η λειτουργία της δίοδου θα πρέπει:

$$\frac{V}{R} < I_H \quad (10.2.1)$$

δηλαδή:  $R > \frac{V}{I_H} \Rightarrow R > \frac{300V}{20 \times 10^{-3}A} \Rightarrow R > 15k\Omega$

Έστω ότι ορίζομε  $R = 25k$ .

Η στιγμιαία τάση στα άκρα του πυκνωτή U δίνεται από τον τύπο της φορτίσεώς του:

$$U = V \left( 1 - e^{-\frac{t_1}{RC}} \right) \Rightarrow 1 - e^{-\frac{t}{RC}} = \frac{U}{V} \quad (10.2.2)$$

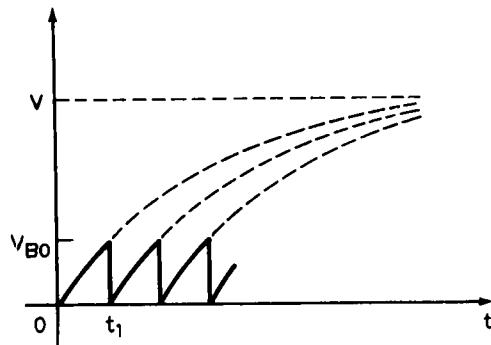
Όταν γίνει η εκκίνηση, η IJ θα είναι ίση με  $V_{BO}$ , ίση δηλαδή με 100V. Θα είναι λοιπόν:

$$1 - e^{-\frac{t_1}{RC}} = \frac{100V}{300V} \quad (10.2.3)$$

Από τη σχέση αυτή μπορούμε να βρούμε την τιμή που εκθέτη:

$$\frac{t_1}{RC} \approx 0,4 \quad (10.2.4)$$

Στη σχέση αυτή ο χρόνος  $t_1$  είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να γίνει η τάση στα άκρα του πυκνωτή από 0 ίση προς  $V_{BO}$ . Αν θεωρήσουμε το χρόνο εκφορτίσεως του πυκνωτή αμελητέο, τότε ο χρόνος  $t_1$  είναι ίσος με την περίοδο της πριονωτής τάσεως T (σχ. 10.2δ). Αφού  $T = 1/f$  (όπου f η συχνότητα της πριο-



Σχ. 10.26.

νωτής τάσεως) η σχέση (10.2.4) μπορεί να γραφεί ως εξής:

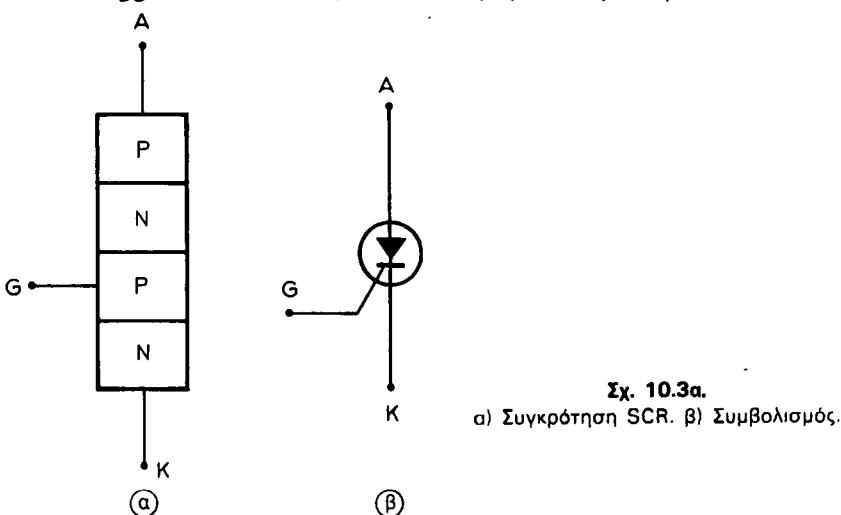
$$\frac{t_1}{RC} = \frac{1}{RCf} \simeq 0,4 \Rightarrow C = \frac{1}{0,4 \cdot Rf} = 0,2 \mu F \quad (10.2.5)$$

$$\text{Για } I = 20 \text{ A θα είναι: } R_D = \frac{V_{BO}}{I} = \frac{100V}{20A} = 5\Omega \quad (10.2.6)$$

Στο σχήμα 10.2δ δίνεται η μορφή της πριονωτής τάσεως στην έξοδο του κυκλώματος.

### 10.3 Ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου (SCR).

Ο SCR είναι ένα θυρίστορ που γίνεται με την προσθήκη ενός τρίτου ηλεκτροδίου στη δίοδο τεσσάρων στρώσεων. Το τρίτο αυτό ηλεκτρόδιο που συνδέεται συνήθως στο εσωτερικό τμήμα P της διόδου (σχ. 10.3α) λέγεται πύλη (gate). Με τη διοχετεύση κατάλληλου παλμού ρεύματος από την πύλη G μπορούμε να τροποποιήσουμε την τάση  $V_{BO}$  στην οποία θα γίνει η εκκίνηση του θυρίστορ.



Ο SCR είναι δηλαδή μια τρίοδος με άνοδο, κάθοδο και την πύλη. Είναι δυνατό ο ακροδέκτης της πύλης να είναι συνδεμένος στο εσωτερικό τμήμα N της διόδου.

Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι έχομε πύλη από την άνοδο, ενώ στην προηγούμενη περίπτωση (ακροδέκτης από το P) λέμε ότι έχομε πύλη από την κάθοδο.

#### 10.3.1 Λειτουργία του SCR.

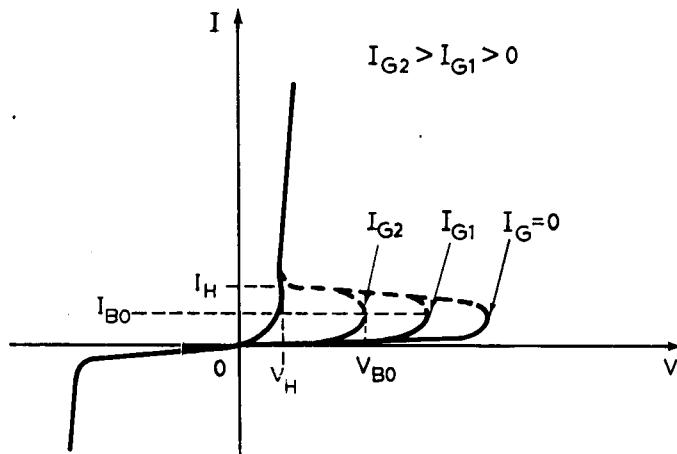
Είδαμε στη δίοδο τεσσάρων στρώσεων ότι αυξάνοντας την τάση ανάμεσα στην κάθοδο και την άνοδο (με θετική την άνοδο) θα φθάσουμε σε κάποια τιμή τάσεως  $V_{BO}$  στην οποία το ρεύμα της διόδου θα αυξηθεί απότομα. Δηλαδή θα έχομε **εκκίνηση**. Στο SCR μπορούμε, όπως είπαμε, διοχετεύοντας ένα ρεύμα  $I_G$  στον ακροδέκτη της πύλης να ρυθμίζουμε σε ποια τάση  $V_{BO}$  θα έχομε εκκίνηση.

Θα έχομε δηλαδή και εδώ, αυξάνοντας την ανοδική τάση, μικρό ρεύμα που θα αυξάνεται αργά ώσπου να φθάσουμε στην τάση  $V_{BO}$ , άποτε θα αυξηθεί απότομα το

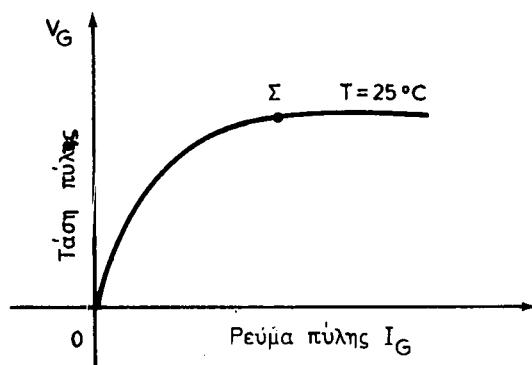
ρεύμα και η τάση στά άκρα του SCR θα γίνει  $V_H$ .

Και εδώ μετά την εκκίνηση απαιτείται ένα ελάχιστο ανοδικό ρεύμα  $I_H$  για να μείνει ο SCR στην κατάσταση υψηλής αγωγιμότητας. Αξιοσήμειωτο είναι ότι το ρεύμα μετά την εκκίνηση είναι περίπου 1000 φορές μεγαλύτερο από το ρεύμα  $I_{B_0}$  λίγο πριν από την εκκίνηση.

Όσο αυξάνεται το ρεύμα  $I_G$ , τόσο μικράνει η τάση  $V_{BO}$ . Όταν μάλιστα το ρεύμα πύλης  $I_G$  γίνει πολύ μεγάλο, η τάση  $V_{BO}$  γίνεται τόσο μικρή που το Θυρίστορ συμπεριφέρεται ως απλή δίοδος. Στο σχήμα 10.3β φαίνονται οι χαρακτηριστικές ενός SCR για διάφορα ρεύματα πύλης  $I_G$ . Μια άλλη ενδιαφέρουσα χαρακτηριστική είναι αυτή που εκφράζει τη μεταβολή του ρεύματος πύλης  $I_G$  σε συνάρτηση με την τάση πύλης-καθόδου  $V_G$  (σχ. 10.3γ). Κάποιο σημείο της χαρακτηριστικής αυτής ορίζει το συνδυασμό  $V_G - I_G$  για τον οποίο γίνεται η εκκίνηση του SCR. Οι χαρακτηριστικές  $V_G - I_G$ , και φυσικά το σημείο εκκινήσεως, μεταβάλλονται με την θερμοκρασία.



Σχ. 10.3β.  
Χαρακτηριστική SCR για διάφορα ρεύματα πύλης.



Σχ. 10.3γ.

Για να μεταπέσει ο SCR στην αρχική κατάσταση του πολύ μικρού ρεύματος, πρέπει το ανοδικό ρεύμα να γίνει μικρότερο από  $I_H$  ή η ανοδική τάση μικρότερη από  $V_H$ . Αν θελήσουμε να επιτύχουμε το ίδιο, κρατώντας την ανοδική τάση σταθερή και διοχετεύοντας ρεύμα ανάστροφης φοράς, θα πρέπει το ρεύμα αυτό να είναι περίπου ίσο με το ανοδικό, δηλαδή πολύ μεγάλο. Αυτό όμως ιδιαίτερα στην περίπτωση θυρίστορ ισχύος δε συμφέρει. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι μετά την εκκίνηση, το ρεύμα πύλης δεν παίζει ουσιαστικά ρυθμιστικό ρόλο.

Η αποκοπή του θυρίστορ γίνεται συνήθως μόνο με υποβιβασμό της ανοδικής τάσεως κάτω από την τάση  $V_H$  ή του ανοδικού ρεύματος κάτω από το ρεύμα  $I_H$ .

Αν δώσουμε ανάστροφη τάση στο θυρίστορ (άνοδος αρνητική ως προς την κάθοδο), τότε για χαμηλές τάσεις θα κυκλοφορεί πολύ μικρό ανάστροφο ρεύμα, ενώ από μια ανάστροφη τάση και πέρα θα έχουμε πάλι απότομη αύξηση του ρεύματος που θα οφείλεται στο φαινόμενο *Zener* στις επαφές  $J_1$  και  $J_3$ .

### **10.3.2 Χρόνος εκκινήσεως και αποκοπής.**

Η εκκίνηση μπορεί να δοθεί σ' ένα SCR με μια τάση που εφαρμόζεται στον ακροδέκτη της πύλης. Η τάση αυτή μπορεί να προέρχεται από πηγές συνεχούς, ή από γεννήτρια παλμών ή από πηγές εναλλασσόμενης τάσεως.

Σε κάθε περίπτωση όμως, για κάθε ανοδική τάση, θα πρέπει το ρεύμα  $I_G$  της πύλης που θα προκληθεί να είναι τέτοιας διάρκειας, ώστε να σταθεροποιηθεί η κατάσταση αγωγιμότητας μετά την εκκίνηση. Η πρώτη διακοπή του ρεύματος πύλης θα ξαναφέρει το θυρίστορ στην κατάσταση αποκοπής.

Ο χρόνος που απαιτείται από τη στιγμή που θα τεθεί η τάση στην πύλη μέχρις ότου σταθεροποιηθεί η κατάσταση αγωγιμότητας είναι ο **χρόνος εκκινήσεως**.

Ο χρόνος αυτός ελαττώνεται όσο αυξάνεται το ρεύμα της πύλης και αυξάνεται όσο μεγαλύτερο γίνεται το ανοδικό ρεύμα ή όσο αυξάνεται η θερμοκρασία.

Επομένως, αν η διέγερση στην πύλη δίνεται με παλμούς, οι παλμοί πρέπει να έχουν αρκετό πλάτος και διάρκεια, ώστε το θυρίστορ να σταθεροποιηθεί στην κατάσταση λειτουργίας.

Για τη σταθερή αποκοπή επίσης (επάνοδο στο μικρό ρεύμα) του θυρίστορ, απαιτείται ένας χρόνος παραμονής της ανοδικής του τάσεως κάτω από την τιμή  $V_H$ .

Ο χρόνος αυτός ονομάζεται χρόνος αποκοπής. Ο χρόνος αποκοπής είναι αρκετά μεγαλύτερος από το χρόνο εκκινήσεως.

### **10.3.3 Λειτουργικά χαρακτηριστικά.**

Υπάρχουν SCR που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο ισχύων 10MW περίπου και με δυνατότητες λειτουργίας με ρεύματα 2000A σε τάση 1800V. Οι συχνότητες στις οποίες μπορούν να λειτουργήσουν είναι μέχρι περίπου 50 KHz.

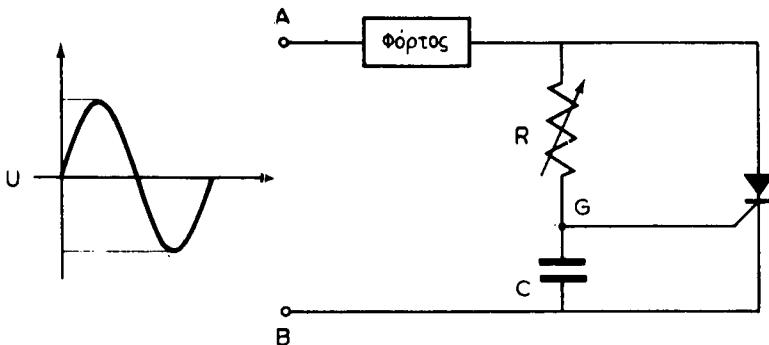
Με SCR σε συνήθη μεγέθη, με παλμούς στην πύλη μερικών mA (π.χ. 50) που δυνατό να προέρχονται από τάσεις λίγων V (π.χ. 1-2), μπορούμε να ελέγχουμε ρεύματα της τάξεως των 100A.

Για χρόνους εκκινήσεως γύρω στο 1ms, η μέση ισχύς στην πύλη με τα παραπάνω δεδομένα είναι παρα πολύ μικρή.

#### 10.3.4 Ρεύματα και τάσεις στους SCR.

Σύμφωνα με τα όσα έχομε πει ως τώρα, ένας SCR θα άγει όταν η τάση (ή το ρεύμα) στο κύκλωμα της πύλης θα πάρει κατάλληλη τιμή, σε συνδυασμό με την τάση που θα επικρατεί ανάμεσα στην κάθοδο και την άνοδο.

Ας θεωρήσουμε π.χ. το απλό κύκλωμα του σχήματος 10.3δ με το οποίο μπορούμε να ελέγξουμε την ισχύ σ' ένα φόρτο. Μπορούμε δηλαδή να ελέγξουμε το χρόνο που ο φόρτος θα διαρρέεται από ένα ρεύμα επικ υμητής τιμής.

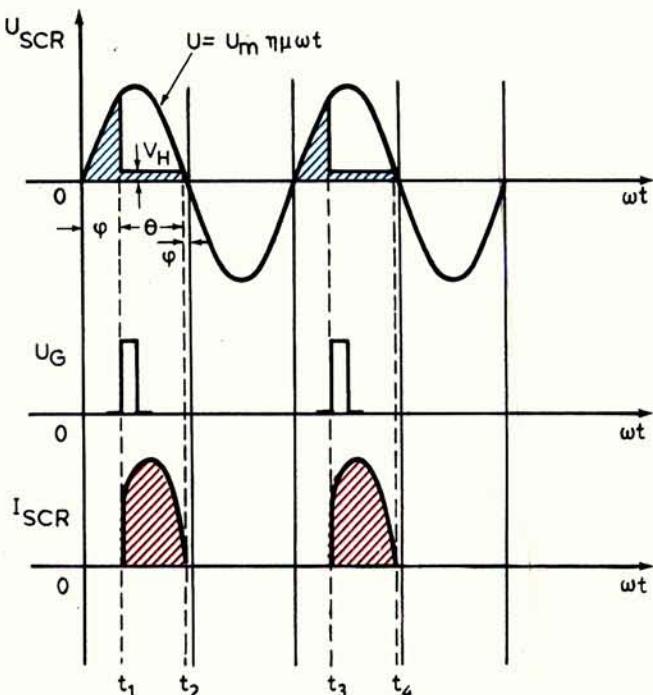


Σχ. 10.36.

Έστω ότι στα άκρα AB συνδέομε μια τάση  $U = U_m \sin \omega t$ . Κατά την εφαρμογή της τάσεως αυτής ο SCR βρίσκεται στην κατάσταση διακοπής. Ο πυκνωτής C θα αρχίσει να φορτίζεται μέσω της αντιστάσεως του φόρτου και της μεταβλητής αντιστάσεως R. Όταν η τάση στα άκρα του πυκνωτή γίνει ίση με  $V_{GT}$ , τότε ο SCR γίνεται απότομα αγώγιμος, με συνέπεια να περνά μέσα από αυτόν, και φυσικά μέσα από το φόρτο, μεγάλο ρεύμα. Η τάση στα άκρα του SCR πέφτει στην τιμή  $V_H$ , και κρατείται εκεί μέχρι ότου η τιμή της U γίνει μικρότερη από  $V_H$ , οπότε ο SCR παύει να άγει και η τάση στα άκρα του SCR είναι η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα AB.

Στις χαρακτηριστικές του σχήματος 10.3ε φαίνεται πώς θα είναι η τάση  $U_{SCR}$  στα άκρα του SCR, όταν η τάση εναύσεως  $U_G$  είναι παλμός της μορφής του σχήματος. Φαίνεται επίσης και η ταυτόχρονη μορφή του ρεύματος από το SCR και φυσικά και από το φόρτο. Βλέπομε ότι μέχρι μια γωνία φ της φάσεως της εναλλασσόμενης τάσεως U, ο SCR είναι σε διακοπή. Στη χρονική στιγμή  $t_1$  που αντιστοιχεί στην γωνία αυτή, η πύλη δέχεται τον παλμό  $U_G$ , οπότε ο SCR άγει και η τάση στα άκρα του πέφτει στην τάση συγκρατήσεως  $V_H$ , στην οποία μένει μέχρι τη χρονική στιγμή  $t_2$  που η τάση U γίνεται μικρότερη από την  $V_H$ . Οπότε ο SCR σταματά να άγει. Ο SCR θα αρχίσει να άγει στη χρονική στιγμή  $t_3$  που η πύλη δέχεται πάλι παλμό. Οπότε ο κύκλος επαναλαμβάνεται.

Η γωνία φ στην οποία θα γίνει η εκκίνηση του SCR εξαρτάται από τη χρονική στιγμή που θα τεθεί ο κατάλληλος παλμός στην πύλη. Αυτό ρυθμίζεται με τη μεταβλητή αντίσταση R. Η γωνία θ που αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα από  $t_1$  ως  $t_2$  που να άγει ο SCR λέγεται και γωνία αγωγιμότητας ή γωνία διελεύσεως.



Σχ. 10.3ε.

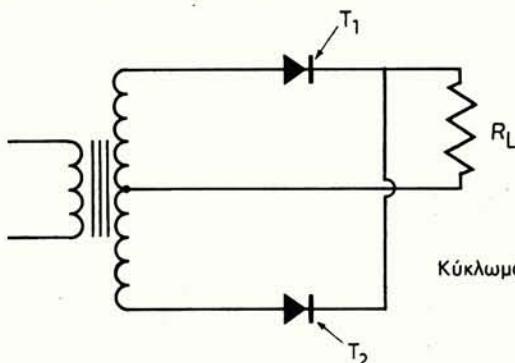
Αν ο λόγος της τάσεως συγκρατήσεως  $V_H$  προς την μέγιστη τάση  $U_m$  ( $V_H/U_m$ ) είναι πολύ μικρός, τότε η μέση τιμή του ρεύματος που θα διαρρέει τον SCR θα είναι:

$$I_{dc} \approx \frac{U_m}{2\pi R_L} (1 + \sin \phi) = \frac{U_m}{2\pi R_L} (1 - \sin \theta) \quad (10.3.1)$$

Η μέση τιμή της τάσεως στα άκρα του φόρτου θα είναι:

$$U_{dc} \approx \frac{U_m}{2\pi} (1 + \sin \phi) = \frac{U_m}{2\pi} (1 - \sin \theta) \quad (10.3.2)$$

Στο σχήμα 10.3στ εικονίζεται η αρχή ενός κυκλώματος διπλής ανορθώσεως με thyristor, με φόρτο αωμική αντίσταση.



Σχ. 10.3στ.  
Κύκλωμα διπλής ανορθώσεως με Θυρίστορ

Η συνεχής τάση στο φόρτο για τάση σε κάθε δευτερεύον  $U = U_m$  ημωτ, θα είναι:

$$U_{dc} \approx \frac{U_m}{\pi} (1 + \text{συνφ}) \quad (10.3.3)$$

Η τάση αυτή μεταβάλλεται με μεταβολή της τάσεως της πύλης στα δύο θυρίστορ  $T_1$  και  $T_2$ .

## 2. Παράδειγμα.

Στο κύκλωμα του σχήματος 10.3δ το πλάτος  $U_m$  της εναλλασσόμενης τάσεως που εφαρμόζεται στα άκρα AB είναι 200V. Η αντίσταση φόρτου  $R_L = 10\Omega$ .

α) Να καθορισθεί ή μέση τιμή του ρεύματος και η ισχύς στο φόρτο για γωνία διελεύσεως  $\theta = 120^\circ$ .

β) Αν η τάση  $U_{AK}$  στα άκρα του SCR όταν άγει με  $\theta = 120^\circ$  είναι 1V, πόση θα είναι η ισχύς που καταναλώνεται πάνω στον SCR.

### Απάντηση:

α) Η μέση τιμή του ρεύματος για  $\theta = 120^\circ$  μπορεί να βρεθεί από τη σχέση 10.3.1 όταν τεθεί  $U_m = 200V$  και  $\theta = 120^\circ$ .

$$\text{Το } \sigma_{uv} 120^\circ = - \frac{1}{2}$$

$$\text{Οπότε: } I_{dc} = \frac{200V}{2\pi \times 10\Omega} \left(1 + \frac{1}{2}\right) = 4,77A$$

Η ισχύς στο φόρτο  $R_L$  θα είναι:  $R_L = I_{dc}^2 \cdot R_L = (4,77A)^2 (10\Omega) \approx 228W$

β) Η ισχύς  $P_S$  που καταναλώνεται πάνω στον SCR θα είναι:

$$P_S = V_{AK} I_{dc} = 1V \times 4,77A = 4,77 W.$$

## 10.3.5 Δίοδος με αγωγιμότητα και στις δύο κατευθύνσεις (DIAC).

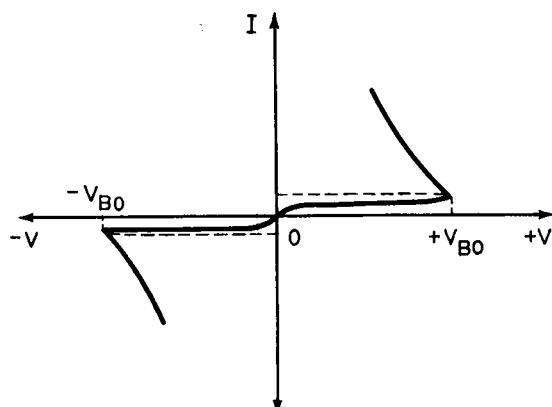
Όπως είδαμε, η δίοδος τεσσάρων στρώσεων (PNPN) λειτουργεί όπως ένας διακόπτης που επιτρέπει να περνά ρεύμα μόνο κατά τη μια φορά. Αν παράλληλα σε μια τέτοια δίοδο συνδέσουμε μια άλλη, αλλά ανάστροφα (σχ. 10.3ζ), δημιουργείται μια δίοδος που μπορεί να άγει και κατά τη μια και κατά την άλλη φορά.

Έτσι, ανάλογα με τη φορά πολώσεως που έχουμε κάθε φορά, θα άγει το ένα ή το άλλο τμήμα της DIAC. Η χαρακτηριστική του είναι η σύνθεση δύο διόδων που πολώνονται όμως αντίθετα (σχ. 10.3η).

Η DIAC χρησιμοποιείται συνήθως στην εκκίνηση του αμφίδρομου ελεγχόμενου ανορθωτή πυριτίου (TRIAC), για τον οποίο θα μιλήσουμε στη συνέχεια.

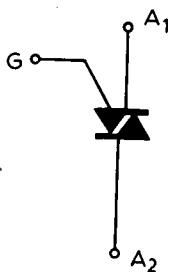
## 10.3.6 Αμφίδρομος ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου (TRIAC).

Ο TRIAC είναι συνδυασμός SCR και DIAC. Είναι δηλαδή ένας DIAC που όμως έχει ένα ακροδέκτη πύλης από τον οποίο, συνδέοντας κατάλληλη τάση (ή διοχετεύοντας ρεύμα κατάλληλης τιμής), μπορούμε να ελέγχουμε τη στιγμή εκκινήσεως (σχ. 10.3θ). ·

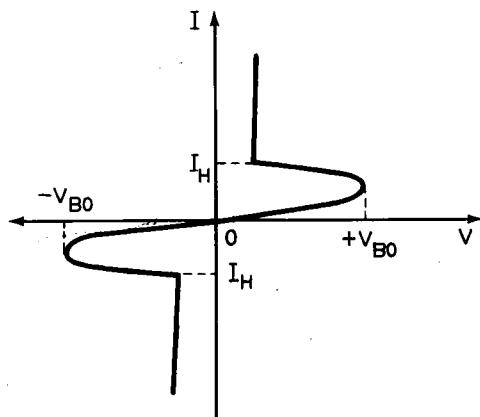


**Σχ. 10.3ζ.**  
Συμβολισμός DIAC.

**Σχ. 10.3η.**  
Χαρακτηριστική DIAC.



**Σχ. 10.3θ.**  
Συμβολισμός TRIAC.



**Σχ. 10.3ι.**  
Χαρακτηριστική TRIAC.

Στο παραπάνω σχήμα, ανάλογα με τη φορά της τάσεως που συνδέομε στα άκρα, το ρόλο ανόδου παίζει ο ακροδέκτης  $A_1$  ή  $A_2$ .

Η λειτουργία του TRIAC ελέγχεται από την πύλη τόσο με θετικούς όσο και με αρνητικούς παλμούς.

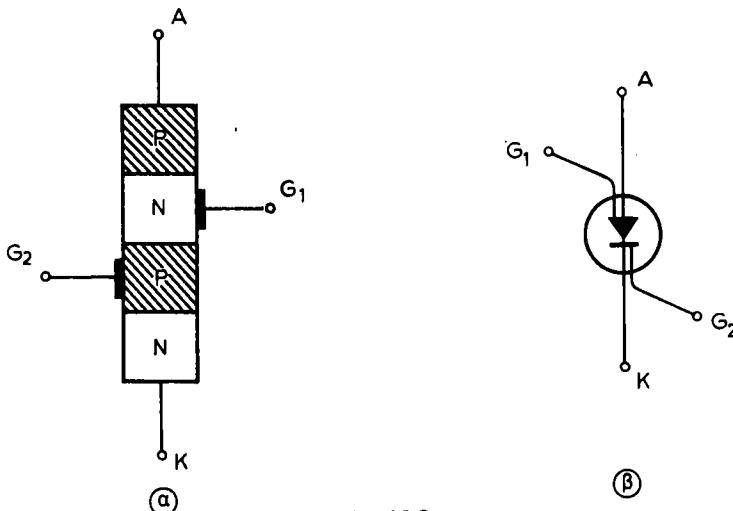
Η χαρακτηριστική ενός TRIAC φαίνεται στο σχήμα 10.3ι. Από αυτή φαίνεται ότι ο TRIAC άγει και κατά τη μια φορά πολώσεως και κατά την αλλη. Έτσι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν κλασικός ανορθωτής.

Επίσης με θετικές ή αρνητικές τάσεις  $V_G$  στην πύλη, ελέγχεται η αγωγιμότητα κατά τη μια φορά ή κατά την άλλη. Έτσι μπορεί να ελέγχεται η ισχύς εναλλασσόμενου ρεύματος που θα περνά από αυτόν, με τον έλεγχο της γωνίας αγωγιμότητας.

Η γωνία αυτή ελέγχονταν στον SCR μόνο κατά τη μια ημιπερίοδο, ενώ εδώ μπορεί να ελεχθεί και κατά τις δύο ημιπεριόδους.

### 10.3.7 Ελεγχόμενος διακόπτης πυριτίου (Silicon controlled switch ή SCS).

Έχει τέσσερις ακροδέκτες. Οι δύο A, K (σχ. 10.3ια) είναι η άνοδος και η κάθοδος αντίστοιχα, της διόδου τεσσάρων στρώσεων. Οι άλλοι δύο αντίστοιχούν σε δύο πύλες  $G_1$ ,  $G_2$ . Η πύλη  $G_1$ , που είναι τοποθετημένη κοντά στην άνοδο, έχει αυξημένη ωμική αντίσταση και απαιτεί μεγαλύτερο ρεύμα για εκκίνηση από την πύλη  $G_2$ , που είναι συνδεμένη κοντά στην κάθοδο και που έχει μικρή αντίσταση και απαιτεί μικρό ρεύμα για εκκίνηση.



Σχ. 10.3ια.

Ελεγχόμενος διακόπτης πυριτίου.  
α) Συγκρότηση. β) Συμβολισμός.

Τυπικές τιμές ρεύματος εκκίνησεως είναι για την πύλη  $G_1$ , 1,5 mA και αντίστοιχα για την πύλη  $G_2$ , 1 μΑ. Οι τιμές των ρευμάτων αυτών επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, η τάση ανάμεσα στην κάθοδο και την άνοδο, ή θέση του φόρτου, ο τρόπος που συνδέεται η πύλη ανάδου ( $G_1$ ) με την άνοδο ή η πύλη καθόδου ( $G_2$ ) με την κάθοδο (αν δηλαδή υπάρχει βραχυκύκλωμα, αν το κύκλωμα είναι ανοικτό, αν υπάρχει πηγή πολώσεως, αν υπάρχει αντίσταση φόρτου κλπ.).

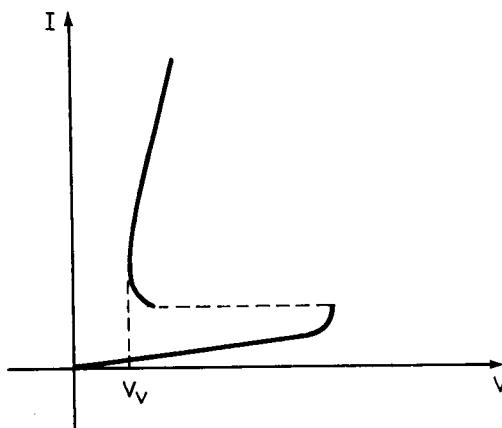
Οι κατασκευαστές δίνουν πίνακες με τις κατάλληλες τιμές τάσεων και ρευμάτων, όπως και χαρακτηριστικές καμπύλες.

Η χαρακτηριστική του SCS είναι όμοια με του SCR (σχ. 10.3ιβ). Ο SCS πλεονεκτεί στο χρόνο αποκοπής σε σύγκριση με τον SCR. Ο χρόνος αποκοπής ενός τυπικού SCS είναι περίπου 1-10 μsec, ενώ ο αντίστοιχος χρόνος ενός τυπικού SCR είναι 5-30 μsec.

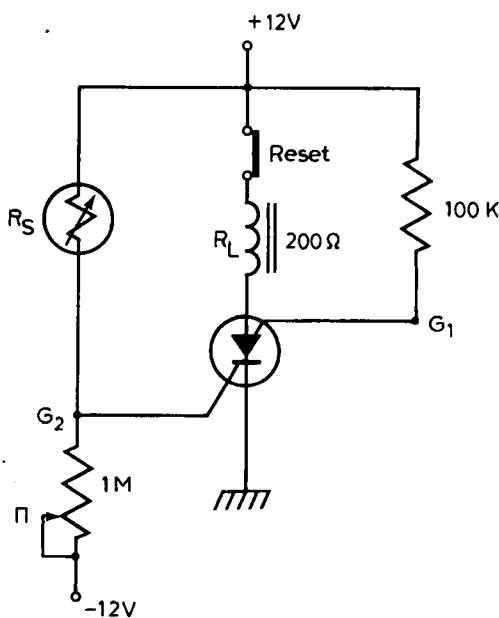
Οι τιμές του αναδικού ρεύματος στους τυπικούς SCS κυμαίνονται από 100 ως 300 mA, και οι επιτρεπόμενες ισχείς από 100 ως 500 mW.

Οι κυριότερες εφαρμογές των SCS είναι στα κυκλώματα των ηλεκτρονικών υπολογιστών (computers), σε γεννήτριες παλμών, σε ταλαντωτές, σε συστήματα συναγερμού κ.ά.

Ένα παράδειγμα χρησιμοποίησεως SCS δίνεται στο κύκλωμα του σχήματος 10.3ιγ.



Σχ. 10.3ιβ.  
Χαρακτηριστική SCR.



Σχ. 10.3ιγ.  
Σύστημα συναγερμού με SCR.

Είναι ένα σύστημα συναγερμού. Η  $R_S$  είναι μια αντίσταση που μπορεί να μεταβάλλεται είτε όταν φωτίζεται είτε όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία του περιβάλλοντός της, ή όταν προσβάλλεται από μία οποιαδήποτε ακτινοβολία. Η αντίσταση αυτή μαζί με το ποτενσιόμετρο π ρυθμίζουν την πόλωση της πύλης καθόδου  $G_2$ . Όταν μεταβάλλεται η αντίσταση  $R_S$ , μεταβάλλεται και η πόλωση την πύλης  $G_2$ . Με κατάλληλη ρύθμιση η μεταβολή της  $R_S$  μπορεί να δώσει τέτοια τάση στην πύλη, ώστε ο SCS να τεθεί σε λειτουργία. Το ρεύμα που θα περάσει τότε από τον ηλεκτρομαγνήτη  $RL$  μπορεί να του δώσει τη δυνατότητα να θέσει σε λει-

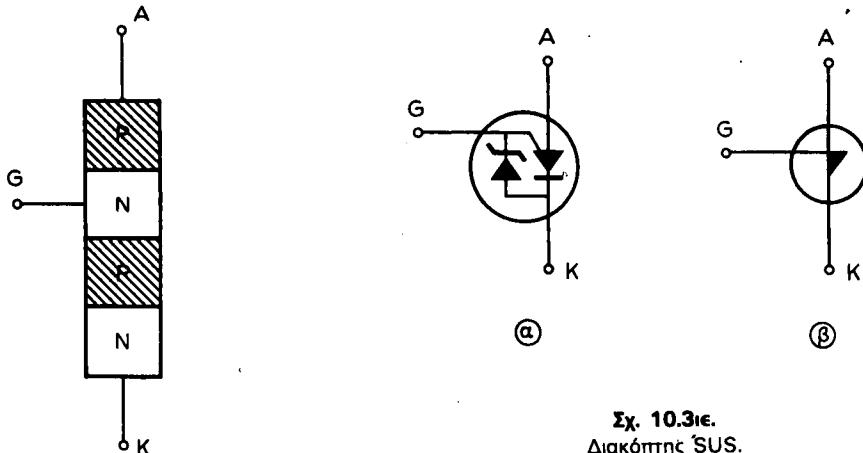
τουργία ενα κουδούνι π.χ. ή να ανάψει ένα φως ή να ενεργοποιήσει ένα άλλο κύκλωμα. Έτσι μια άνοδος π.χ. της θερμοκρασίας σ' ενα χώρο μπορεί να γίνει αντιληπτή μ' ένα τέτοιο σύστημα.

#### 10.3.8 Άλλα είδη Thyristor.

Στην οικογένεια των Thyristor, εκτός από τα προηγούμενα, ανήκουν και οι παρακάτω τύποι:

**a) Ο συμπληρωματικός ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου (Complementary Silicon Controlled Rectifier, CSCR).**

Διαφέρει από τον κοινό SCR ως προς το ότι η πύλη είναι τόποθετημένη στο στρώμα N κοντά στην άνοδο (σχ. 10.3ιδ).



Σχ. 10.3ie.

Διακόπτης SUS.

α) Συγκρότηση. β) Συμβολισμός.

Σχ. 10.3ιδ.

Συγκρότηση CSCR.

**β) Ο Διακόπτης πυριτίου μιας κατευθύνσεως (Silicon Unilateral Switch, SUS).**

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του είναι οτι ανάμεσα στην κάθοδο και την άνοδο του είναι συνδεμένη εσωτερικά μια δίοδος Ζενερ [σχ. 10.3ιε(α)] χαμηλής τάσεως.

Στο σχήμα 10.3ιε(β) φιλίνεται και το σύμβολο ενός τέτοιου διακόπτη. Χρησιμοποιείται κυρίως σε κυκλώματα σκανδάλης. Η χαρακτηριστική του είναι όμοια με αυτή τη του SCR.

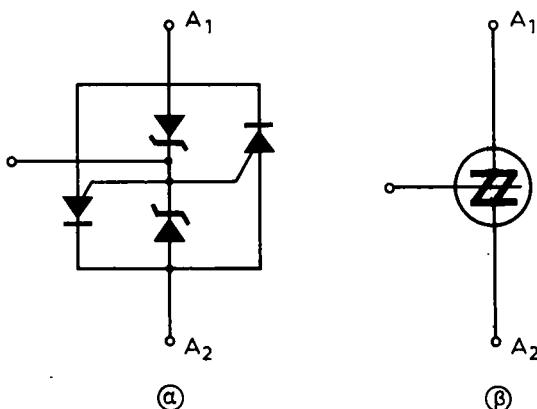
**γ) Αμφίδρομος διακόπτης πυριτίου (Silicon Bilateral Switch, SBS).**

Αποτελείται, στην ουσία, από δύο διακόπτες μιας κατευθύνσεως συνδεμένους ανάστροφα (σχ. 10.3ιστ). Στο σχήμα 10.3ιστ(α), παρίσταται το ισοδύναμο ενός τέτοιου διακόπτη και στο σχήμα 10.3ιστ(β) το σύμβολό του.

Η χαρακτηριστική του είναι όμοια με τη χαρακτηριστική του TRIAC.

Εκτός από τα παραπάνω, υπάρχουν:

- Ο ασύμετρος διακόπτης σκανδάλης (Assymetrical Triggering Switch, ATS).
- Ο διακόπτης ελεγχόμενης πύλης (Gate Controlled Switch (GCS)).

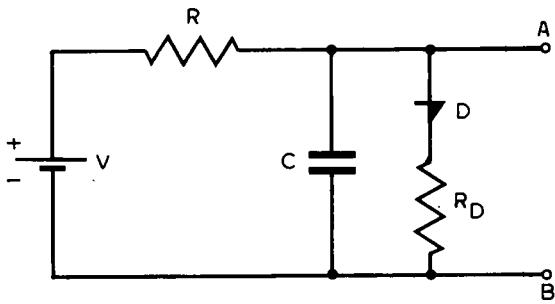


**Σχ. 10.3ιστ.**  
**Διακόπτης SBS.**

- Το προγραμματιζόμενο transistor μιας επαφής (Programmed Unijunction Transistor (PUT)).
  - Ο φωτοδιεγέρμενος ελεγχόμενος ανορθωτής πυρίτου (Light Activated Silicon Controlled Rectifier, (LASCR) κ.ά.

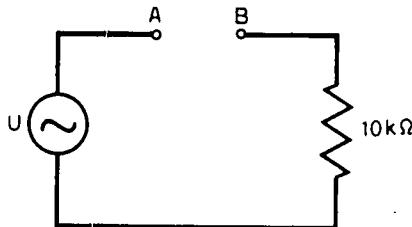
#### **10.4 Ασκήσεις.**

1. Η τάση  $V$  στο κύκλωμα του σχήματος 10.4a είναι  $200\text{ V}$ , η αντίσταση  $R = 10\text{ k}\Omega$  και η χωρητικότητα  $C = 0,5\mu\text{F}$ . Αν η τάση εκκινήσεως της δίδου  $D$  είναι  $V_{B0} = 50\text{ V}$ , ποιά θα είναι ήμορφή και η συχνότητα της τάσεως στα άκρα  $AB$  του κυκλώματος. Σχεδιάστε τη μορφή της τάσεως αυτής με άξονες βαθμολογημένους σε χρόνο και τάση.



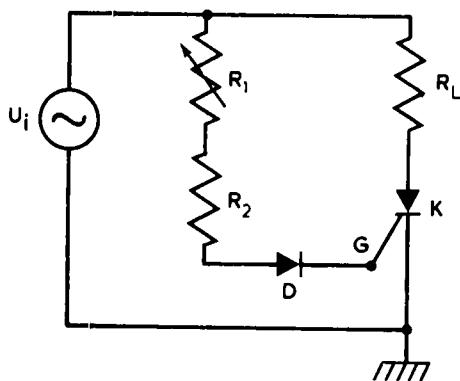
**Σχ. 10.4α.**

- Στους ακροδέκτες AB του κυκλώματος του σχήματος 10.4β συνδέεται μια δίόδος τεσσάρων στρώσεων. Η δίοδος αυτή έχει τάση εκκίνησεως  $V_{BO} = 30$  V και ανάστροφη τάση εκκενώσεως  $V_{RA} = 200$  V. Αν η τάση U είναι ημιτονική με ενεργό τιμή 117 V, σχεδιάστε τη μορφή της τάσεως στα άκρα της αντιστάσεως των 10 kΩ.
  - Να επαναληφθεί η εργασία της προηγούμενης άσκησης αλλά στους ακροδέκτες AB να εχει συνδεθεί μια δίοδος με αγωγιμότητα και κατά τις δυο κατευθύνσεις (DIAC), με  $V_{BO} = 30$  V και  $V_{RA} = 200$  V.



Σχ. 10.4β.

4. Ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου (SCR) είναι συνδεμένος σε σειρά με αντίσταση φόρτου  $R_L = 1000\Omega$ . Στα άκρα του συστήματος εφαρμόζεται ημιτονική τάση με ενεργό τιμή  $142,8 \text{ V}$ . Η τάση στα άκρα του SCR, όταν άγει κατά την ορθή φορά, είναι  $1 \text{ V}$ . Να βρεθεί το ρεύμα στο φόρτο για γωνίες εκκινήσεως  $\phi = 0^\circ, 45^\circ$  και  $135^\circ$ .
5. Ο ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου στο κύκλωμα του σχήματος 10.4γ έχει ρεύμα εκκινήσεως πύλης  $I_G$  ίσο με  $0,1 \text{ mA}$  και τάση εκκινήσεως πύλης  $V_G = 0,5 \text{ V}$ . Η  $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$  και η δίοδος D είναι πυριτίου. Αν η τάση  $U_i$  είναι εναλλασσόμενη ημιτονική με πλάτος  $24 \text{ V}$ , σε ποια σπιγματιά τιμή της θα αρχίσει η εκκένωση για τιμές αντιστάσεως  $R_1$ : a)  $100 \text{ k}\Omega$  και b)  $10 \text{ k}\Omega$ . Να βρεθούν και οι γωνίες εκκινήσεως για κάθε τιμή από τις παραπάνω της  $R_1$ .



Σχ. 10.4γ.

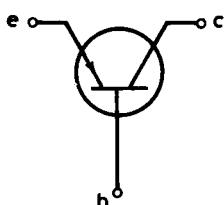
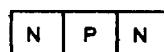
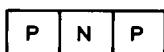
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΔΕΚΑΤΟ

### ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡΣ

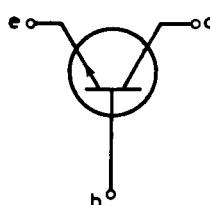
#### 11.1 Γενικά.

Τα πρώτα τρανζίστορ (στα ελληνικά η λέξη τρανζίστορ έχει αποδοθεί με τον όρο **κρυσταλλοτρίοδος** που πολύ σπάνια χρησιμοποιείται σήμερα) αποτελούνταν από δύο μεταλλικές ακίδες που βρίσκονταν σε επαφή με επιφάνεια ημιαγωγού. Αργότερα κατασκευάσθηκαν τα τρανζίστορ επαφής. Τα τρανζίστορ επαφής αναφέρονται πολλές φορές και ως διπολικά τρανζίστορ (Bipolar Junction Transistors) και συμβολίζονται με BJT. Ένα τρανζίστορ επαφής αποτελείται από τρία διαδοχικά τμήματα P, N. Είτε δύο τμήματα P που ανάμεσά τους περιέχεται ένα τμήμα N, οπότε λέμε ότι έχομε τρανζίστορ τύπου P-N-P (σχ. 11.1α) ή αντίθετα, δύο τμήματα N που ανάμεσά τους υπάρχει ένα τμήμα P, οπότε λέμε ότι έχομε τρανζίστορ N-P-N (σχ. 11.1β). Το σύνολο είναι ερμητικά κλεισμένο σε μεταλλικό ή πλαστικό περίβλημα για να προστατεύεται από την υγρασία. Το τρανζίστορ επίσης χαρακτηρίζεται και από το βασικό υλικό από το οποίο έχουν γίνει τα τμήματα P, N. Έτσι έχουμε τρανζίστορ γερμανίου ή πυριτίου.

Από τα εξωτερικά τμήματα του τρανζίστορ το ένα λέγεται **εκπομπός** (emitter) και το άλλο **συλλέκτης** (collector). Το τμήμα που είναι ανάμεσά τους και που είναι πολύ λεπτότερο και συνήθως με πολύ λιγότερα άτομα προσμίζεως στη μονάδα του όγκου, λέγεται **βάση** (base). Στα περισσόμερα ο εκπομπός και ο συλλέκτης διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τη μορφή και το μέγεθος. Ο ρόλος φυσικά του κάθε



Σχ. 11.1α.  
Τρανζίστορ τύπου P-N-P.



Σχ. 11.1β.  
Τρανζίστορ τύπου N-P-N.

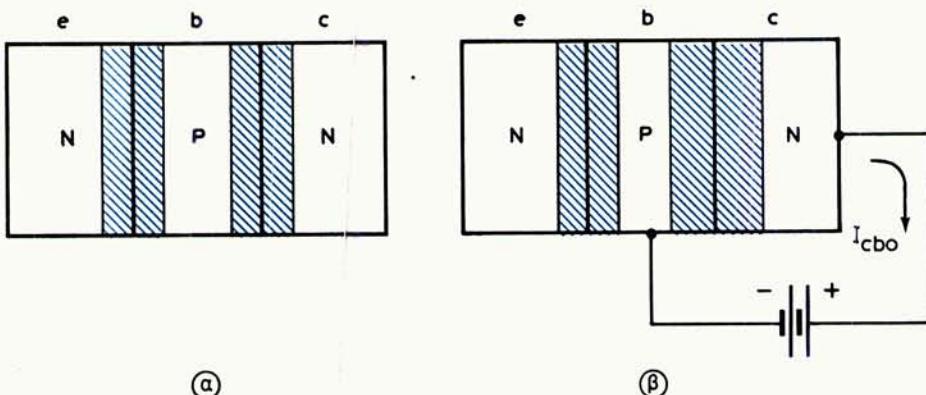
τμήματος είναι διαφορετικός. Παρακάτω, όπου χρειάζεται, θα συμβολίζομε τον εκπομπό με  $e$ , το συλλέκτη με  $c$  και τη βάση με  $b$ .

'Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, το τρανζίστορ έχει δύο επαφές P-N. Μια εκπομπού-βάσεως και μια βάσεως-συλλέκτη.

## 11.2 Λειτουργία του τρανζίστορ.

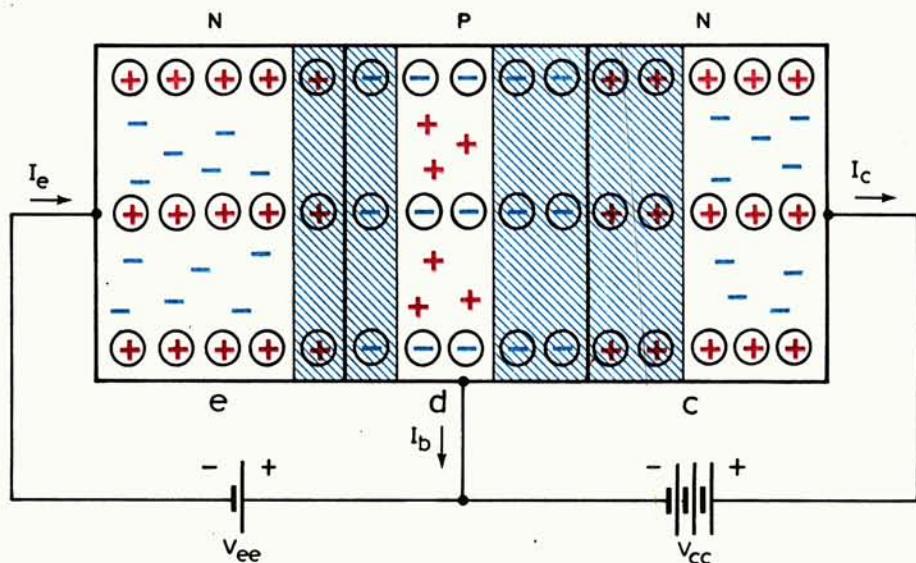
Θα εξετάσουμε τη λειτουργία ενός τρανζίστορ N-P-N. Άλλωστε η λειτουργία ενός P-N-P είναι εντελώς ανάλογη.

'Εστω ότι στην αρχή στις επαφές εκπομπού-βάσεως και βάσεως-συλλέκτη δεν έχουμε συνδέσει καμιά πηγή [σχ. 11.2α(α)]. Θα έχουμε τότε σε καθεμιά από αυτές τις επαφές μια περιοχή απογυμνώσεως. Αν τώρα συνδέσουμε μια πηγή ανάστροφα στην επαφή βάσεως-συλλέκτη  $b$  [σχ. 11.2α(β)] (το + στο συλλέκτη, το - στη βάση) η περιοχή απογυμνώσεως αιυτής της επαφής θα διευρυνθεί και στο κύκλωμα θα κυκλοφορήσει ρεύμα μικρό που θα είναι το ανάστροφο ρεύμα της επαφής συλλέκτη-βάσεως και που θα το συμβολίζουμε παρακάτω με  $I_{cbo}$ . Υπογραμμίζουμε ότι στην επαφή εκπομπού-βάσεως δεν υπάρχει συνδεμένη πηγή.



Σχ. 11.2α.

Αν όμως και στην επαφή αυτή συνδέσουμε μια πηγή και μάλιστα κατά την ορθή φορά (το - στον εκπομπό και το + στο συλλέκτη, σχ. 11.2β) η περιοχή απογυμνώσεως θα στενέψει και από τον εκπομπό άφθονα ηλεκτρόνια θα περάσουν μέσα στην περιοχή της βάσεως. Μερικά από τα ηλεκτρόνια αυτά θα επανασυνδεθούν με οπές στη βάση. Έτσι σχηματίζεται το ρεύμα της βάσεως  $I_b$ , που είναι στα συνθησμένα transistors ρεύμα της τάξεως των  $\mu\text{A}$ . Τα υπόλοιπα ηλεκτρόνια, που είναι και τα πολύ περισσότερα, θα κινηθούν μέσα στη βάση, **λόγω διαχύσεως**, προς το συλλέκτη. Όταν βρεθούν μέσα στην περιοχή απογυμνώσεως της επαφής συλλέκτη-βάσεως θα ασκηθεί σ' αυτά μια δύναμη από το ηλεκτρικό πεδίο που επικρατεί σ' αυτή και που τα διευκολύνει να συνεχίσουν την κίνησή τους. Όταν τελικά βρεθούν μέσα στο μη απογυμνωμένο τμήμα του συλλέκτη, θα επανασυνδεθούν με οπές του τμήματος αυτού. Οι οπές που επανασυνδέθηκαν θα αναπληρωθούν από άλλες οπές που θα στείλει η πηγή  $V_{cc}$  προς το συλλέκτη. Η κίνηση όμως



Σχ. 11.2β.

Συνδεσμολογία τρανζίστορ με κοινή βάση.

των οπών από την πηγή στο συλλέκτη ισοδυναμεί με κίνηση ηλεκτρονίων αντίθετα, από το συλλέκτη δηλαδή προς την πηγή. Είναι σαν τα ηλεκτρόνια που μπήκαν από τον εκπομπό να συνεχίζουν την κίνησή τους προς την πηγή  $V_{cc}$ . Αυτό είναι και το ρεύμα του συλλέκτη  $I_c$ , που οφείλεται σε φορείς από τον εκπομπό. Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, το ρεύμα του εκπομπού  $I_e$ , διχάζεται στο μικρό ρεύμα της βάσεως  $I_b$  και σε ένα πολύ μεγαλύτερο ρεύμα του συλλέκτη  $I_c$ . Έχουμε έτσι:

$$I_e = I_b + I_c \quad (11.2.1)$$

Το ρεύμα των ηλεκτρονίων που φθάνει στο συλλέκτη, και που είναι ουσιαστικά το ρεύμα του συλλέκτη, είναι γύρω στο 0,99 του ρεύματος του εκπομπού. Αυτό σημαίνει πως το ρεύμα της βάσεως θα είναι γύρω στο 0,01 του ρεύματος του εκπομπού.

Στο κύκλωμα όμως του συλλέκτη, εκτός από το ρεύμα που προέρχεται από τα ηλεκτρόνια του εκπομπού, κυκλοφορεί ομόρροπα και το ανάστροφο ρεύμα της επαφής βάσεως-συλλέκτη  $I_{cbo}$  που είδαμε στην αρχή. Έτσι το ολικό ρεύμα του συλλέκτη  $I'_c$  θα είναι:

$$I'_c = I_c + I_{cbo} \quad (11.2.2)$$

Το ρεύμα  $I_{cbo}$  μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία. Από τη μεταβολή αυτή προέρχεται κυρίως και η μεταβολή του ρεύματος του συλλέκτη με τη θερμοκρασία, που δημιουργεί προβλήματα πολλές φορές στη λειτουργία των κυκλωμάτων με τρανζίστορ.

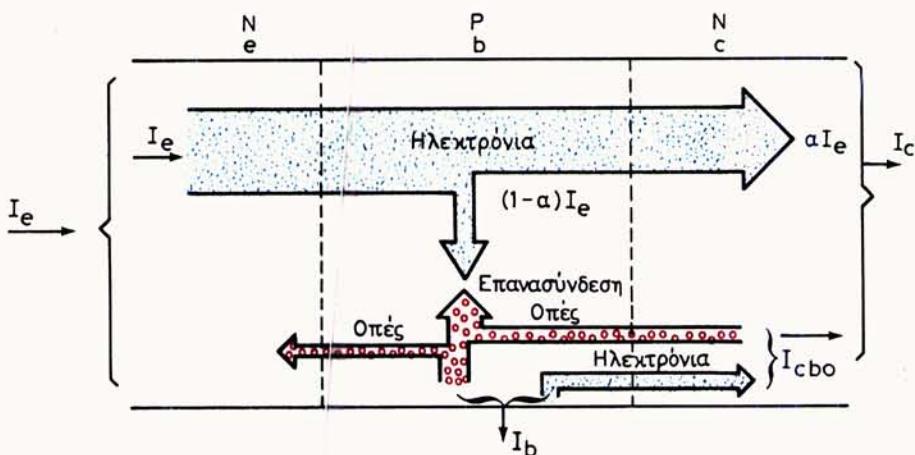
Στα όσα είπαμε μέχρι τώρα για τη λειτουργία του transistor έχομε να παρατηρήσουμε τα εξής.

Για την κανονική λειτουργία του transistor πρέπει η επαφή εκπομπού-βάσεως

να είναι πολωμένη ανάστροφα. Η τάση πολώσεως εκπομπού βάσεως για κανονική λειτουργία στα συνηθισμένα transistors είναι περίπου 0,2-0,5 V, ενώ η τάση βάσεως συλλέκτη κυμαίνεται από μερικά ως μερικές δεκάδες βολτ.

Αξιοσημείωτο είναι επίσης ότι η κίνηση των φορέων μέσα στη μη απογυμνωμένη περιοχή της βάσεως γίνεται με διάχυση, ενώ η κίνηση μέσα στην απογυμνωμένη περιοχή βάσεως-συλλέκτη γίνεται με την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου που επικρατεί μέσα σ' αυτή.

Με την κίνηση επίσης των ηλεκτρονίων ή των οπών ως φορέων πλειονότητας στα τρανζίστορ υπάρχει παράλληλα και μια αντίθετη κίνηση των φορέων μειονότητας (σχ. 11.2γ). Η ταυτόχρονη κίνηση αυτών των φορέων δημιουργεί τα διάφορα ρεύματα που θεωρούμε ότι κυκλοφορούν στο τρανζίστορ.



Σχ. 11.2γ.  
Παράσταση κινήσεων των φορέων μέσα στο τρανζίστορ.

Σημαντικό χαρακτηριστικό επίσης είναι ότι το ρεύμα του συλλέκτη μπορεί να μεταβληθεί με μεταβολή του ρεύματος του εκπομπού ή του ρεύματος της βάσεως. Γι' αυτό και τα τρανζίστορ χαρακτηρίζονται ως διατάξεις ρεύματος.

### 11.2.1 Παράμετρος α του τρανζίστορ.

Η συνδεσμολογία του transistor, όπως φαίνεται στο σχήμα 11.2β λέγεται **συνδεσμολογία με κοινή (ή) προσγειωμένη βάση**. Θα συμβολίζομε την τάση που επικρατεί ανάμεσα στους ακροδέκτες του συλλέκτη και της βάσεως με  $V_{cb}$ . Αν, κρατώντας την τάση αυτή σταθερή, δώσομε μια μικρή μεταβολή  $\Delta I_e$  στο ρεύμα του εκπομπού, θα προκληθεί μια μεταβολή  $\Delta I_c$  στο ρεύμα του συλλέκτη. Το πηλικό  $\Delta I_c / \Delta I_e$ , με  $V_{cb}$  σταθερό, είναι μια σημαντική παράμετρος που δίνεται με το ελληνικό γράμμα  $\alpha$ . Η παράμετρος αυτή λέγεται και **απολαβή ρεύματος**.

**Έχομε:**

$$\alpha = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} / V_{cb} = \text{σταθερό} \quad (11.2.3)$$

Για στατικές συνθήκες λειτουργίας μπορούμε να θεωρήσομε με μεγάλη προσέγγιση ως:

$$\alpha \approx \frac{I_c}{I_e} / V_{cb} = \text{σταθερό} \quad (11.2.4)$$

Από την παραπάνω σχέση μπορούμε να γράψουμε προσεγγιστικά:

$$I_c = \alpha I_e \quad (11.2.5)$$

Η παράμετρος α είναι κατασκευαστικό χαρακτηριστικό του transistor. Εξαρτάται κυρίως από το φυσικό εύρος της βάσεως και η τιμή της επηρεάζεται από τη θερμοκρασία. Η τιμή της κυμαίνεται από 0,90 ως 0,998 και εκφράζει το ποσοστό των φορέων πλειονότητας που περνάει από τον εκπομπό στο συλλέκτη.

Με συνδυασμό των σχέσεων 11.2.2 και 11.2.5, μπορούμε να γράψουμε:

$$I'_c = I_c + I_{cbo} \Rightarrow I'_c = \alpha I_e + I_{cbo} \quad (11.2.6)$$

Επειδή  $I_{cbo}$  είναι πολύ μικρό σχετικά με το  $\alpha I_e$ , μπορούμε να πούμε ότι  $I'_c \approx I_c$ .

### 11.2.2 Συνθήκη κόρου.

Είδαμε προηγούμενα ότι για τις συνθήκες κανονικής λειτουργίας του transistor πρέπει η επαφή εκπομπού-βάσεως να είναι πολωμένη κατά την ορθή φορά, ενώ η επαφή συλλέκτη-βάσεως κατά την ανάστροφη. Αν δώμας και η επαφή βάσεως-συλλέκτη βρεθεί πολωμένη κατά την ορθή φορά τότε, στην περίπτωση του τρανζίστορ N-P-N, άφθονα ηλεκτρόνια από το συλλέκτη θα περνούν στη βάση όπως περνούν από τον εκπομπό. Η παρουσία αυτών των ηλεκτρονίων μέσα στη βάση από την πλευρά του συλλέκτη εμποδίζει τη διάχυση των ηλεκτρονίων που προέρχονται από τον εκπομπό και μπορεί να οδηγήσει μέχρι το μηδενισμό του ρεύματος του εκπομπού. Η συνθήκη λειτουργίας έτσι του τρανζίστορ λέγεται **συνθήκη κόρου** (ανάλογα φυσικά ισχύουν και για το τρανζίστορ P-N-P).

Αν οι τάσεις ορθής φοράς υπερβούν τις συνηθισμένες τιμές (γύρω στα 0,5 V), τότε, επειδή οι φραγμοί δυναμικού στις επαφές καταργούνται, το τρανζίστορ συμπεριφέρεται ως κοινός αγωγός. Για να μην καταστραφεί το τρανζίστορ από υψηλά ρεύματα, πρέπει να συνδέονται εξωτερικές αντιστάσεις στη σειρά με τον εκπομπό και το συλλέκτη.

### 11.2.3 Συνθήκη αποκοπής.

Λέμε ότι το τρανζίστορ λειτουργεί σε συνθήκες αποκοπής όταν και οι δύο επαφές του τρανζίστορ είναι πολωμένες κατά την ανάστροφη φορά. Στην περίπτωση αυτή τα μόνα ρεύματα που θα κυκλοφορούν στο κύκλωμα θα είναι πρακτικά τα ανάστροφα ρεύματα  $I_{co}$  των επαφών εκπομπού-βάσεως και συλλέκτη-βάσεως.

### 11.2.4 Συνθήκη με αντεστραμμένους άκροδέκτες.

Αν υπάρχει περίπτωση, κυρίως από λάθος, ο εκπομπός να συνδεθεί ως συλλέκτης (ανάστροφη πόλωση) και ο συλλέκτης ως εκπομπός (ορθή πόλωση) το τρανζίστορ μέσα σε ορισμένα όρια τάσεως θα λειτουργήσει ως τρανζίστορ, αλλά με

αλλοιωμένα χαρακτηριστικά.

Χρήσιμο είναι να προσθέσουμε ότι πρέπει να τηρούμε τα δρια τάσεων και ρευμάτων που μας δίνονται τόσο για τις ορθές, όσο και για τις ανάστροφες πολώσεις, για να αποφεύγομε την καταστροφή του τρανζίστορ.

### 11.3 Βασικές συνδεσμολογίες των τρανζίστορ.

#### 11.3.1 Γενικά.

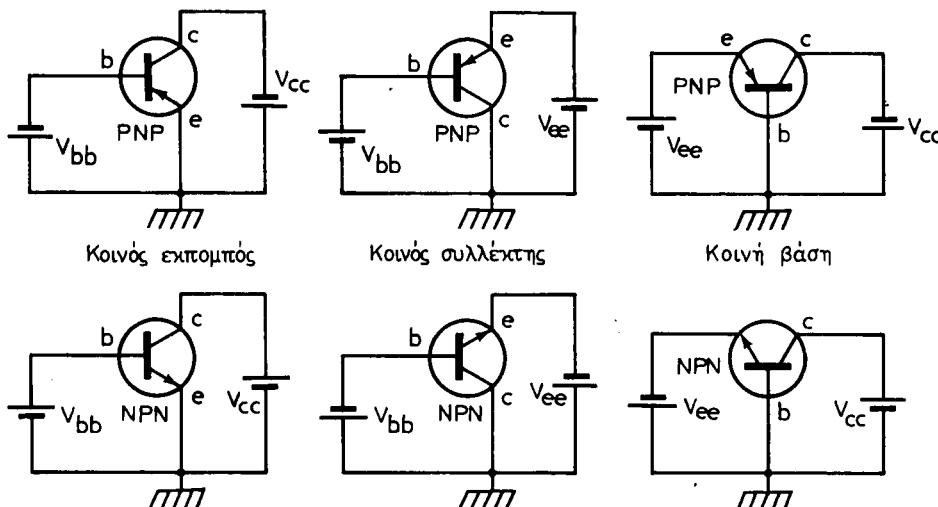
Τρεις είναι οι βασικοί τρόποι με τους οποίους ένα τρανζίστορ μπορεί να συνδεθεί σ' ένα κύκλωμα. Αυτοί είναι:

- Με κοινή βάση.
- Με κοινό εκπομπό.
- Με κοινό συλλέκτη.

Παρακάτω θα συμβολίζομε το ρεύμα του εκπομπού με  $I_e$ , το ρεύμα του συλλέκτη με  $I_c$  και το ρεύμα της βάσεως με  $I_b$ . Την τάση ανάμεσα στους ακροδέκτες εκπομπού-βάσεως με  $V_{eb}$  και συλλέκτη-βάσεως με  $V_{cb}$  για το κύκλωμα κοινής βάσεως. Για το κύκλωμα κοινού εκπομπού με  $V_{be}$  και  $V_{ce}$  και για το κύκλωμα κοινού συλλέκτη με  $V_{bc}$  και  $V_{ec}$ .

Με  $V_{bb}$ ,  $V_{bb}$ ,  $V_{cc}$  θα συμβολίζομε τις τάσεις των πηγών που τροφοδοτούν κυκλώματα εκπομπού, βάσεως και συλλέκτη αντίστοιχα.

Στο σχήμα 11.3α φαίνονται οι βασικές αυτές συνδεσμολογίες για τρανζίστορ N-P-N και P-N-P.



Σχ. 11.3α.  
Βασικές συνδεσμολογίες τρανζίστορ.

Στα επόμενα θα εξετάσουμε τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται οι διάφορες τάσεις και τα ρεύματα στο τρανζίστορ.

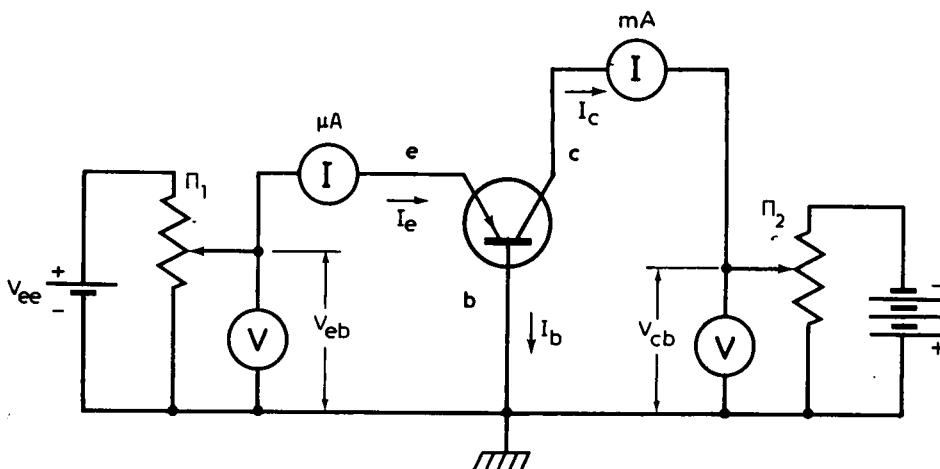
Θα διακρίνομε σε κάθε συνδεσμολογία το κύκλωμα εισόδου και το κύκλωμα ε-

ξόδου και θα δούμε πως επηρεάζεται η λειτουργία του ενός από τη λειτουργία του άλλου. Θα χρησιμοποιούμε πάντοτε τρανζίστορ N-P-N. Άλλωστε ανάλογα, όπως έχομε πει, συμβαίνουν και στη συνδεσμολογία με P-N-P.

### 11.3.2 Κύκλωμα με κοινή βάση.

Το κύκλωμα ονομάζεται έτσι γιατί ο ακροδέκτης της βάσεως είναι κοινός και στις δυο πηγές τροφοδοσίας. Στο σχήμα 11.3β φαίνεται μια διάταξη με την οποία μπορούμε να μελετήσουμε τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του κυκλώματος με προσγειωμένη βάση. Τα όργανα I είναι αμπερόμετρα και τα όργανα V βολτόμετρα.

Ο βρόχος που περιλαμβάνει τη βάση και τον εκπομπό είναι το κύκλωμα εισόδου της συνδεσμολογίας αυτής. Το κύκλωμα εξόδου της είναι αυτό που περιλαμβάνει τη βάση και το συλλέκτη.



Σχ. 11.3β.  
Κύκλωμα μετρήσεων σε τρανζίστορ P-N-P.

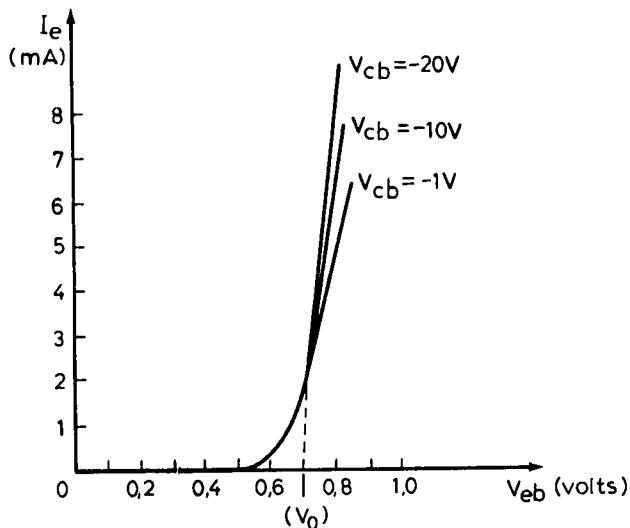
#### α) Κύκλωμα εισόδου.

Μεταβάλλοντας την τάση  $V_{eb}$ , με το ποτενσιόμετρο  $\Pi_1$ , μπορούμε να μεταβάλλομε το ρεύμα  $I_e$ . Αν σε όλη τη διάρκεια της μεταβολής αυτής κρατούμε σταθερή την τάση  $V_{cb}$  θα πάρομε τιμές τάσεως  $V_{eb}$  και αντίστοιχες τιμές ρευμάτων  $I_e$ , με τις οποίες μπορούμε να χαράξομε μια καμπύλη που θα εκφράζει τη συνάρτηση:

$$I_e = F(V_{cb}) / V_{cb} = \text{σταθερό}$$

Θα παριστάνει δηλαδή πώς μεταβάλλεται το ρεύμα εισόδου (ρεύμα εκπομπού)  $I_e$  όταν μεταβάλλομε την τάση εισόδου  $V_{eb}$  (τάση εκπομπού-βάσεως) κρατώντας την τάση συλλέκτη-βάσεως  $V_{cb}$  σταθερή. Την καμπύλη αυτή λέμε χαρακτηριστική εισόδου.

Δίνοντας μια άλλη τιμή στην τάση  $V_{cb}$  και κρατώντας την σταθερή, μπορούμε να χαράξομε μια άλλη καμπύλη τάσεως εισόδου ρεύματος εισόδου. Έτσι με διάφορες σταθερές τιμές της  $V_{cb}$  μπορούμε να χαράξομε διάφορες χαρακτηριστικές,



Σχ. 11.3γ.  
Χαρακτηριστικές εισόδου ενός τρανζίστορ P-N-P με κοινή βάση.

που δλες μαζί τις λέμε σμήνος χαρακτηριστικών εισόδου. Τέτοιες φαίνονται στο σχήμα 11.3γ. Κάθε μια από αυτές μοιάζει και είναι πράγματι, χαρακτηριστική διόδου πολωμένης κατά την ορθή φορά. Είναι της διόδου που σχηματίζει η επαφή εκπομπού-βάσεως. Βέβαια το ρεύμα εδώ επηρεάζεται ελαφρά από την τάση  $V_{cb}$ .

Αξιοσημείωτο είναι ότι η τάση  $V_{eb}$  είναι της τάξεως των mV. Επίσης το ρεύμα γίνεται μεγάλο από μια τάση περίπου 0,7 V στο σχήμα μας. Η τάση αυτή είναι χαρακτηριστική για τα τρανζίστορ Si. Για τα τρανζίστορ Ge η τάση αυτή είναι περίπου 0,3 V.

### β) Κύκλωμα εξόδου.

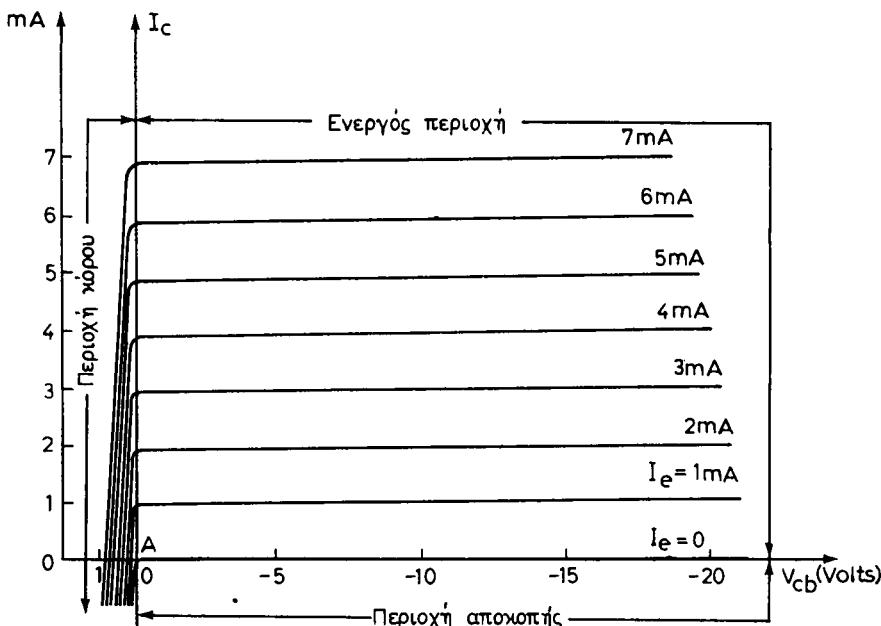
Εδώ μεταβάλλοντας την τάση συλλέκτη-βάσεως  $V_{cb}$  με το ποτενσιόμετρο  $\Pi_2$  μεταβάλλεται το ρεύμα  $I_c$  του συλλέκτη. Αν στη διάρκεια της μεταβολής αυτής κρατούμε το ρεύμα εισόδου  $I_e$  σταθερό, θα πάρομε τιμές τάσεως  $V_{cb}$  και αντίστοιχες τιμές ρευμάτων  $I_c$  με τις οποίες μπορούμε να χαράξομε μια καμπύλη. Η καμπύλη αυτή εκφράζει τώρα τη συνάρτηση:

$$I_c = F(V_{cb}) / I_e = \text{σταθερό}$$

Θα παριστάνει δηλαδή τη μεταβολή του ρεύματος εξόδου  $I_c$  (ρεύμα συλλέκτη) όταν μεταβάλλεται η τάση εξόδου (τάση  $V_{cb}$ ). Κρατώντας έτσι κάθε φορά το  $I_e$  σταθερό, μπορούμε να χαράξομε διάφορες χαρακτηριστικές μεταβολής του ρεύματος του συλλέκτη  $I_c$  σε συνάρτηση με τη μεταβολή της τάσεως  $V_{cb}$ .

Όλες μαζί οι χαρακτηριστικές αυτές αποτελούν το σμήνος των χαρακτηριστών εξόδου με κοινή βάση (σχ. 11.3δ).

Από τη μορφή των χαρακτηριστικών φαίνεται ότι για μια μεγάλη σχετικά περιοχή τάσεων  $V_{cb}$  το ρεύμα του συλλέκτη παραμένει σταθερό όσο και αν αυξάνομε την τάση αυτή, όταν κρατούμε το  $I_e$  σταθερό. Για να αλλάξει το  $I_c$ , πρέπει να αλλάξει το ρεύμα εισόδου  $I_e$ . Βέβαια δεν πρέπει να ξεχνούμε ότι η τάση  $V_{cb}$  είναι



**Σχ. 11.36.**  
Χαρακτηριστικές εξόδου τρανζίστορ P-N-P με κοινή βάση.

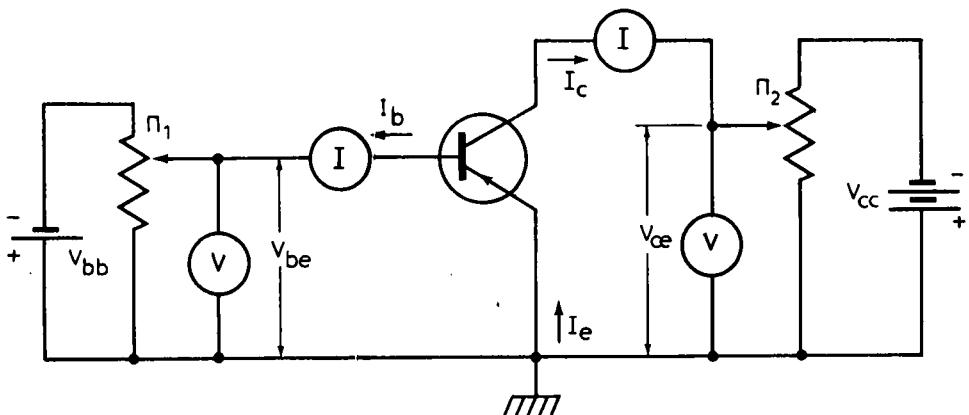
μια ανάστροφη τάση την οποία αν επιμείνομε να την αυξάνομε θα φθάσουμε κάποια στιγμή στην τάση Zener που εδώ συμβολίζεται με  $BV_{cbo}$ . Στην τάση αυτή το ρεύμα του συλλέκτη θα γίνει απότομα μεγάλο, με όλες τις συνέπειες για το τρανζίστορ και το κύκλωμά του.

Βλέπομε επίσης ότι ακόμη και για τάσεις  $V_{cb} = 0$  ή ελαφρά μικρότερες, υπάρχει κάποιο ρεύμα συλλέκτη. Αυτό οφείλεται στο ότι για την περιοχή αυτή των τάσεων, ηλεκτρόνια από τον εκπομπό μπορούν και φθάνουν λόγω διαχύσεως στην περιοχή του συλλέκτη. Για να μηδενισθεί το ρεύμα σ' αυτή τη συνδεσμολογία, πρέπει να πολώσουμε την επαφή βάσεως-συλλέκτη ελαφρά κατά την ορθή φορά. Η περιοχή αριστερά από τον άξονα  $I_c$  του σχήματος 11.3δ λέγεται **περιοχή κόρου**. Επίσης η περιοχή κάτω από τη χαρακτηριστική που έχει χαραχθεί για  $I_e = 0$ , είναι η **περιοχή αποκοπής** του τρανζίστορ. Η υπόλοιπη περιοχή είναι η ενεργός περιοχή. Είναι δηλαδή η περιοχή όπου το τρανζίστορ εργάζεται κανονικά. Αν μηδενίσουμε το ρεύμα του εκπομπού, το ρεύμα που θα κυκλοφορεί στο κύκλωμα του συλλέκτη θα είναι το ανάστροφο ρεύμα της επαφής συλλέκτη-βάσεως  $I_{cbo}$ . Το ρεύμα αυτό σημειώνεται στις χαρακτηριστικές του σχήματος 11.3δ με το σημείο A.

Για την παράμετρο α που σχετίζεται με τη συνδεσμολογία αυτή, όπως και για τη σχέση των ρευμάτων που κυκλοφορούν, έχομε ήδη μιλήσει σε προηγούμενη παράγραφο.

### 11.3.3 Κύκλωμα με κοινό εκπομπό.

Εδώ ο ακροδέκτης του εκπομπού είναι κοινός και στις δύο πηγές. Στο σχήμα



Σχ. 11.3ε.

Κύκλωμα μετρήσεων σε τρανζίστορ P-N-P με κοινό εκπομπό.

11.3 Ε φαίνεται διάταξη με την οποία μπορούμε να μελετήσουμε τα χαρακτηριστικά λειτουργίας αυτού του κυκλώματος.

Και εδώ ο βρόχος, που περιλαμβάνει τη βάση και τον εκπομπό, είναι το κύκλωμα εισόδου. Το κύκλωμα εξόδου είναι αυτό που περιλαμβάνει τον εκπομπό και τον συλλέκτη.

#### *α) Κύκλωμα εισόδου.*

Μεταβάλλοντας την τάση  $V_{be}$  (ποτενσιόμετρο) μπορούμε να μεταβάλλομε το ρεύμα  $I_b$ . Αν σ' όλη τη διάρκεια της μεταβολής αυτής κρατούμε την τάση  $V_{ce}$  σταθερή, θα πάρομε για διάφορες τιμές τάσεων  $V_{be}$ , αντίστοιχες τιμές ρεύματος βάσεως  $I_b$ . Με τις τιμές αυτές μπορούμε να χαράξουμε μια καμπύλη που θα εκφράζει την συνάρτηση:

$$I_b = F(V_{(be)}) / V_{ce} = \text{σταθερό}$$

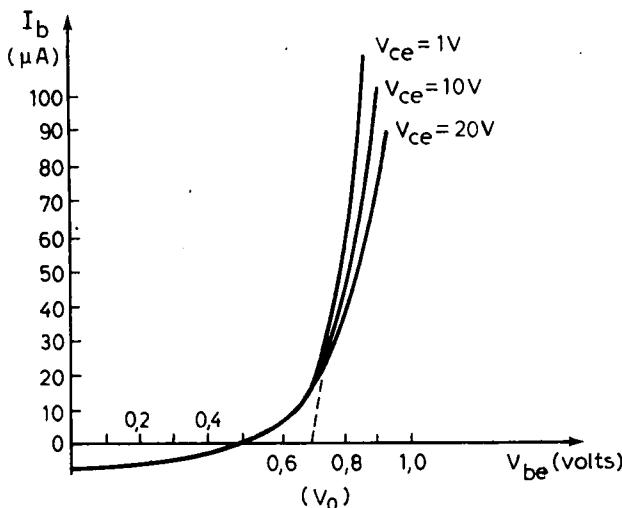
Θα παριστάνει δηλαδή τη μεταβολή του ρεύματος εισόδου (ρεύμα βάσεως)  $I_b$ , όταν μεταβάλλομε την τάση εισόδου  $V_{be}$  και κρατούμε σταθερή την τάση συλλέκτη-εκπομπού  $V_{ce}$ .

Επαναλαμβάνοντας την ίδια εργασία για διάφορες σταθερές τάσεις  $V_{ce}$  κάθε φορά, θα χαράξουμε πάλι ένα σμήνος από χαρακτηριστικές μεταβολής του ρεύματος εισόδου  $I_b$ , όταν μεταβάλλεται η τάση εισόδου  $V_{be}$ . Αυτό είναι το σμήνος χαρακτηριστικών εισόδου του κυκλώματος με κοινό εκπομπό. Στο σχήμα 11.3στ φαίνεται ένα τέτοιο σμήνος. Και αυτές είναι πάλι οι χαρακτηριστές της διόδου επαφής βάσεως εκπομπού με πόλωση ορθής φοράς. Το ρεύμα της βέβαια επηρεάζεται και εδώ ελαφρά από την τάση  $V_{ce}$ .

Από τη σχέση 11.2.1 προκύπτει ότι:

$$I_b = I_e - I_c \quad (11.3.1)$$

ἀλλά  $I'_c = aI_e + I_{cbo} \approx I_c$  (σχέση 11.2.6)



Σχ. 11.3στ.  
Χαρακτηριστικές εισόδου τρανζίστορ με κοινό εκπομπό.

αντικαθιστώντας στην 11.3.1, παίρνομε

$$I_b \approx I_e - a I_{cbo} \Rightarrow I_b \approx (1 - a) I_e - I_{cbo} \quad (11.3.2)$$

Από τη σχέση αυτή φαίνεται πως το ρεύμα της βάσεως εδώ αποτελείται από δυο συνιστώσες: την  $(1 - a) I_e$  που οφείλεται στους φορείς που προέρχονται από τον εκπομπό και την  $-I_{cbo}$  που προέρχεται από το ανάστροφο ρεύμα της επαφής συλλέκτη-βάσεως. Οι δύο αυτές συνιστώσες είναι αντίρροπες, γι' αυτό και το ρεύμα εισόδου  $I_b$  δε μηδενίζεται για  $V_{be} = 0$  αλλά για κάποια τιμή του  $V_{be} \neq 0$ . Οι τιμές της  $V_{be}$  για την οποία μηδενίζεται το ρεύμα είναι περίπου 100mV για τρανζίστορ Ge και 400mV για τρανζίστορ Si.

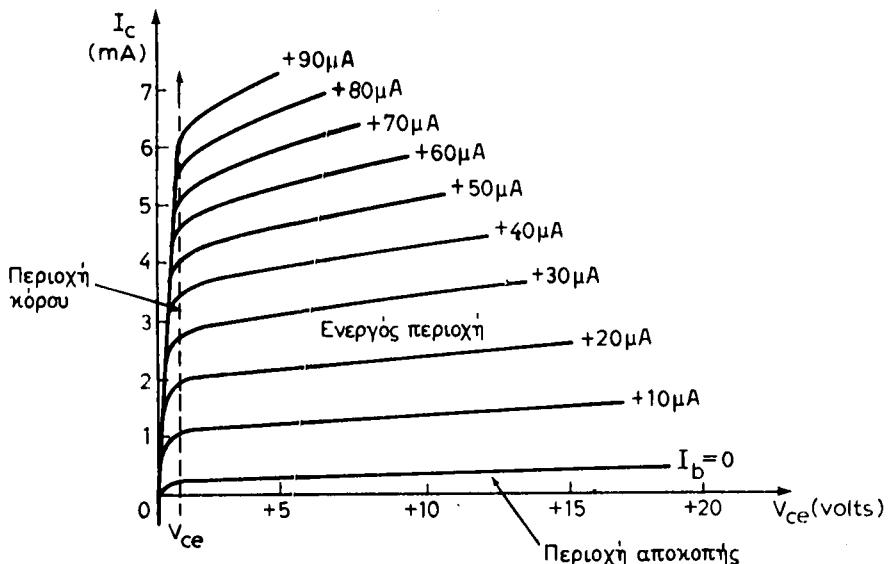
Πάντως είναι χαρακτηριστικό οτι το ρεύμα της βάσεως  $I_b$ , δηλαδή το ρεύμα εισόδου, σ' αυτό το κύκλωμα είναι πολύ μικρό.

### β) Κύκλωμα εξόδου.

Στο κύκλωμα εξόδου μεταβάλλοντας την τάση συλλέκτη εκπομπού  $V_{ce}$  με το ποτενσιόμετρο  $\Pi_2$  (σχ. 11.3ε) θα μεταβληθεί και το ρεύμα  $I_c$  του συλλέκτη. Αν στη διάρκεια της μεταβολής αυτής κρατούμε το ρεύμα εισόδου  $I_b$  σταθερό, τότε με τις τιμές του  $I_c$  που θα πάρομε, για τις διάφορες τιμές  $V_{ce}$  μπορούμε να σχεδιάσουμε μια καμπύλη που εκφράζει τη συνάρτηση:

$$I_c = F(V_{ce}) / I_b = \text{σταθερό}$$

Η καμπύλη αυτή είναι μια χαρακτηριστική εξόδου του κυκλώματος με κοινό εκπομπό. Αλλάζοντας την τιμή του  $I_b$  και κρατώντας την πάλι σταθερή μπορούμε να σχεδιάσουμε άλλη χαρακτηριστική. Έτσι με διαφορετικό κάθε φορά ρεύμα εισόδου  $I_b$ , μπορούμε να χαράξουμε ένα σμήνος από χαρακτηριστικές εξόδου που καθεμιά τους θα αντιστοιχεί σε διαφορετικό ρεύμα βάσεως  $I_b$  (σχ. 11.3ζ). Από το διάγραμμα αυτό φαίνεται οτι όσο αυξάνομε την τάση  $V_{ce}$  τόσο αυξάνεται και το



Σχ. 11.3ζ.

Χαρακτηριστικές εξόδου τρανζίστορ P-N-P με κοινό εκπομπό.

ρεύμα του συλλέκτη  $I_c$ . Κάπως απότομα στην αρχή, αλλά με βραδύτερο ρυθμό αργότερα. Φαίνεται επίσης πως όσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα της βάσεως, τόσο και το ρεύμα του συλλέκτη  $I_c$  είναι μεγαλύτερο για την ίδια  $V_{ce}$ .

Διακρίνομε στο διάγραμμα αυτό δύο χαρακτηριστικές περιοχές: Την περιοχή αποκοπής, που ορίζεται από την καμπύλη  $I_c - V_{ce}$  για  $I_b = 0$ . (Το ρεύμα του συλλέκτη για  $I_b = 0$  είναι το ανάστροφο ρεύμα). Τη χαρακτηριστική περιοχή που είναι η περιοχή κόρου. Η περιοχή δηλαδή όπου το ρεύμα του συλλέκτη  $I_c$  αρχίζει να πέφτει απότομα όταν η τάση  $V_{ce}$  πάρει πολύ μικρές τιμές. Σε τυπικά τρανζίστορ η τάση αυτή είναι περίπου 0,5V.

Αν κρατώντας σταθερή την τάση  $V_{ce}$ , δώσουμε μια μεταβολή  $\Delta I_b$  στο ρεύμα εισόδου, τότε το ρεύμα του συλλέκτη θα μεταβληθεί κατά  $\Delta I_c$ . Το πολύκο  $\Delta I_c / \Delta I_b$  όταν η τάση  $V_{ce}$  είναι σταθερή, ορίζει την παράμετρο  $\beta$  του τρανζίστορ θα είναι δηλαδή:

$$\beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} / V_{ce} = \text{σταθερό} \quad (11.3.3)$$

Από την παραπάνω σχέση μπορούμε να γράψουμε προσεγγιστικά ότι:

$$\beta = \frac{I_c}{I_b} / V_{ce} = \text{σταθερό} \quad (11.3.4)$$

Αυτή είναι η τιμή για στατικές συνθήκες λειτουργίας και είναι περίπου ίση με την τιμή της σχέσεως 11.3.3.

Οι τυπικές τιμές του  $\beta$  σε διάφορα τρανζίστορ κυμαίνονται από 20-600.

**γ) Ανάστροφο ρεύμα στο κύκλωμα κοινού εκπομπού.**

Από το συνδυασμό των σχέσεων 11.2.1 και 11.2.5 προκύπτει ότι:

$$I_e = I_c + I_b \Rightarrow I_b = I_e - I_c \Rightarrow I_b = I_e - a I_e \Rightarrow I_b = (1-a) I_e \quad (11.3.5)$$

Αντικαθιστώντας την τιμή του  $I_b$  στην 11.3.4, παίρνομε:

$$\beta = \frac{I_c}{(1-a) I_e} \quad \text{αλλά} \quad \frac{I_c}{I_e} \simeq a$$

$$\text{Οπότε} \quad \beta = \frac{a}{1-a} \quad \text{ή} \quad a = \frac{\beta}{\beta+1} \quad (11.3.6)$$

Από τη σχέση 11.2.6 έχομε:

$$\begin{aligned} I_c &\simeq a I_e + I_{cbo} \Rightarrow I_c \simeq a (I_c + I_b) + I_{cbo} \Rightarrow \\ &\Rightarrow I_c (1-a) \simeq a I_b + I_{cbo} \Rightarrow I_c \simeq \frac{a I_b}{1-a} + \frac{I_{cbo}}{1-a} \end{aligned} \quad (11.3.6a)$$

Αν το  $I_b$  γίνει ίσο με μηδέν τότε:

$$I_c \simeq \frac{1}{1-a} \cdot I_{cbo} \quad (11.3.7)$$

Αυτό είναι το ανάστροφο ρεύμα που κυκλοφορεί στο συλλέκτη.

$$\text{Επειδή} \quad \frac{1}{1-a} = \beta + 1$$

$$\text{Θα έχομε} \quad I_c \simeq (\beta + 1) I_{cbo} = I_{ceo} \quad (11.3.7a)$$

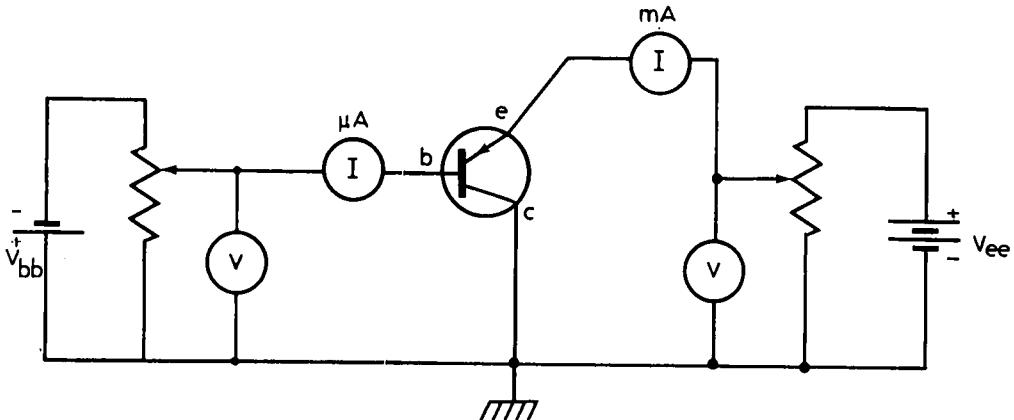
Το ανάστροφο ρεύμα που κυκλοφορεί στο συλλέκτη για  $I_b = 0$ , σε ένα κύκλωμα με προσγειωμένο εκπομπό, συμβολίζεται συνήθως με  $I_{ceo}$ .

Το ρεύμα αυτό είναι  $\beta + 1$  φορές το ανάστροφο ρεύμα με προσγειωμένη βάση,  $I_{cbo}$ . Αυτό είναι ένα μειονέκτημα του κυκλώματος με προσγειωμένο εκπομπό, γιατί η επίδραση της θερμοκρασίας στη λειτουργία του τρανζίστορ είναι πιο αισθητή. Ωστόσο, το ανάστροφο ρεύμα και εδώ εξακολουθεί να είναι πολύ μικρό σχετικά με το  $I_c$ .

Το κύκλωμα με προσγειωμένο εκπομπό είναι το πιο συνηθισμένο στις ηλεκτρονικές διατάξεις. Γι' αυτό και στα περισσότερα εγχειρίδια ή φύλλα που δίνουν στοιχεία, συνήθως δίνονται οι χαρακτηριστικές με προσγειωμένο εκπομπό. Άλλωστε χρησιμοποιώντας τις σχέσεις που δώσαμε παραπάνω για τα ρεύματα και τις τάσεις, μπορούμε από αυτές τις χαρακτηριστικές να βρούμε στοιχεία και για τους άλλους τρόπους συνδεσμολογίας (κοινή βάση ή κοινό συλλέκτη).

#### 11.3.4 Κύκλωμα με κοινό συλλέκτη.

Στο κύκλωμα αυτό ο ακροδέκτης του συλλέκτη είναι κοινός και στις δύο πηγές τροφοδοσίας. Στο κύκλωμα του σχήματος 11.3η φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο μπορούμε να βρούμε τα χαρακτηριστικά αυτού του κυκλώματος. Το κύκλωμα εισό-



Σχ. 11.3η.

Κύκλωμα μετρήσεων σε τρανζίστορ P-N-P με κοινό συλλέκτη.

δου περιλαμβάνει το συλλέκτη και τη βάση. Ενώ το κύκλωμα εξόδου τον εκπομπό και το συλλέκτη.

Το κύκλωμα αυτό χρησιμοποιείται κυρίως ως κύκλωμα προσαρμογής. Όπως είναι γνωστό, για να έχουμε τη μέγιστη μεταφορά ενέργειας από ένα κύκλωμα σε άλλο πρέπει οι αντίσταση εισόδου του προηγούμενου κυκλώματος να είναι κατά το δυνατό ίση με την αντίσταση εισόδου του επόμενου κυκλώματος, οπότε λέμε ότι έχουμε συνθήκες προσαρμογής. Αυτό δύμας δε συμβαίνει πάντοτε. Αντίθετα συμβαίνει πολλές φορές το προηγούμενο κύκλωμα να έχει μεγάλη αντίσταση εισόδου και το επόμενο μικρή. Σ' αυτή την περίπτωση, ανάμεσα στο προηγούμενό κύκλωμα και στο επόμενο παρεμβάλλομε ένα τρίτο κύκλωμα που έχει μεγάλη αντίσταση εισόδου (και προσαρμόζεται στην αντίσταση εισόδου του πρώτου) και μικρή αντίσταση εισόδου (που προσαρμόζεται στην αντίσταση εισόδου του δεύτερου). Έτσι μπορούμε να δημιουργήσουμε συνθήκες προσαρμογής.

Σαν ένα τέτοιο κύκλωμα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το κύκλωμα με προσγειωμένο συλλέκτη που έχει πράγματι μεγάλη αντίσταση εισόδου και μικρή αντίσταση εισόδου.

Οι χαρακτηριστικές εισόδου και εισόδου είναι όμοιες με τις χαρακτηριστικές του κυκλώματος με προσγειωμένο εκπομπό. Μόνο που στις χαρακτηριστικές εισόδου στον δύοντα των τάσεων θα πρέπει να αντιστρέψουμε το πρόσημο των τάσεων, αφού  $V_{ec} = -V_{ce}$  και στον δύοντα των ρευμάτων να βάλομε αντί τίς τιμές του  $I_c$  τις τιμές του  $I_e$  που ώστόσθ, όπως ξέρομε, λίγο διαφέρουν μεταξύ τους.

Η ενίσχυση ρεύματος θα είναι για στατικές συνθήκες:

$$h_{fc} = \frac{I_e}{I_b} / V_{ce} = \text{σταθερό} \quad (11.3.8)$$

Η ενίσχυση αυτή εκφράζεται εδώ από την παράμετρο  $h_{fc}$ . Τι σημαίνει αυτή θα δούμε παρακάτω. Ωστόσο λέμε ότι έχει την ίδια σημασία που έχει η α για το κύκλωμα κοινής βάσεως και η β για το κύκλωμα κοινού εκπομπού.

Είναι επίσης:

$$h_{fc} = \beta + 1 \quad (11.3.9)$$

Δηλαδή:

$$I_e = (\beta + 1) I_b \quad (11.3.10)$$

### 11.3.5 Γενικά χαρακτηριστικά των κυκλωμάτων.

Από τον πίνακα 11.3.1 μπορεί να γίνει μια σύγκριση των χαρακτηριστικών των κυκλωμάτων με κοινή βάση, κοινό εκπομπό και κοινό συλλέκτη. Το πιο χαρακτηριστικό είναι οι αντιστάσεις εισόδου και εξόδου σε κάθε περίπτωση, όπως και οι ενισχύσεις τάσεως και ρεύματος.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 11.3.1**

**Σύγκριση τυπικών χαρακτηριστικών λειτουργίας των τριών συνδεσμολογίων τρανζίστορ**

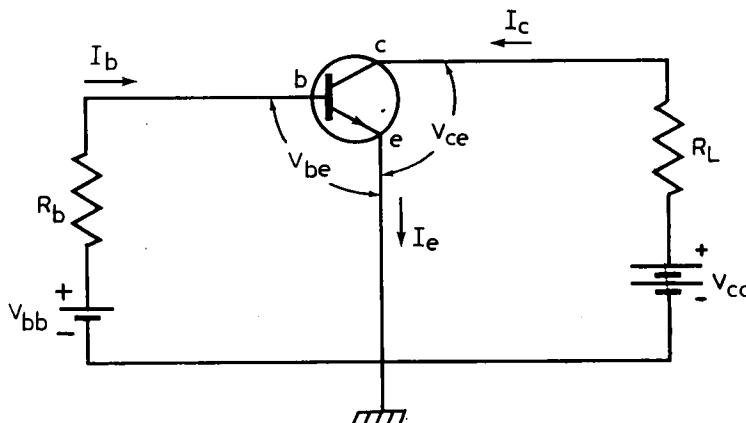
	Κοινή βάση	Κοινός εκπομπός	Κοινός συλλέκτης
Αντίσταση εισόδου	Χαμηλή( $\sim 50\Omega$ )	Μέση( $\sim 1\text{ k}\Omega$ )	Μεγάλη( $300\text{ k}\Omega$ )
Ενίσχυση ρεύματος	Χαμηλή( $< 1$ )	Μεγάλη( $50$ )	Μεγάλη( $50$ )
Ενίσχυση τάσεως	Τυπική( $20$ )	Μεγάλη( $200$ )	Χαμηλή( $< 1$ )
Ενίσχυση ίσχυος	Τυπική τιμή( $20$ )	Μεγάλη( $10\,000$ )	Μέση( $50$ )
Αντίσταση εξόδου	Μεγάλη( $\sim 500\text{ k}\Omega$ )	Μέση( $50\text{ k}\Omega$ )	Χαμηλή( $\sim 300\Omega$ )
Αναστροφή φάσεως	Όχι	Ναι	Όχι

Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι οι αντιστάσεις εισόδου και εξόδου επηρεάζονται από τις αντιστάσεις φόρτου και πηγής αντίστοιχα.

### 11.4 Συνεχή ρεύματα, τάσεις και ισχείς στα κυκλώματα των τρανζίστορ.

#### 11.4.1 Παράδειγμα κυκλώματος κοινού εκπομπού με φόρτο.

Στο κύκλωμα του σχήματος 11.4.a η  $R_L$  είναι η αντίσταση φόρτου και η  $R_b$  η αντίσταση στο κύκλωμα της βάσεως.



**Σχ. 11.4a.**

Συνεχή ρεύματα και τάσεις σε κύκλωμα τρανζίστορ.

Η τάση  $V_{be}$  είναι η τάση στην επαφή εκπομπού βάσεως και είναι περίπου ίση με το δυναμικό φραγμού της επιφάνειας αυτής. Η τάση αυτή υπολογίζεται γραφικά και από τις χαρακτηριστικές εισόδου του κυκλώματος. Υπενθυμίζομε ότι η τάση  $V_{be}$  είναι περίπου 0,7V για το γερμάνιο (Ge) και 0,3 για το πυρίτιο (Si).

Εφαρμόζοντας τον κανόνα του Kirchoff στο κύκλωμα εισόδου θα έχομε:

$$V_{bb} = I_b R_b + V_{be} \quad (11.4.1)$$

$$\text{από την οποία: } I_b = \frac{V_{bb} - V_{be}}{R_b} \quad (11.4.2)$$

Από τη σχέση αυτή φαίνεται ότι αφού η τάση  $V_{be}$  είναι σταθερή, το ρεύμα της βάσεως  $I_b$  θα ρυθμίζεται από την πηγή  $V_{bb}$  και την αντίσταση  $R_b$ .

Γνωρίζομε επίσης ότι:  $I_c = \beta I_b$

Η τάση ανάμεσα στο συλλέκτη και τον εκπομπό  $V_{ce}$  μπορεί πάλι να βρεθεί με την εφαρμογή του κανόνα του Kirchoff στο κύκλωμα εξόδου.

$$\text{Έτσι θα έχομε: } V_{cc} = I_c R_L + V_{ce} \quad (11.4.3)$$

$$\text{ή } V_{ce} = V_{cc} - I_c R_L \quad (11.4.4)$$

Η παραπάνω διαδικασία υπολογισμού των τάσεων και των ρευμάτων μπορεί ανάλογα να εφαρμοσθεί και στις περιπτώσεις κοινής βάσεως και κοινού συλλέκτη. Το ανάστροφο ρεύμα θεωρήθηκε αμελητέο.

### Εφαρμογή.

Στο σχήμα 11.4α το τρανζίστορ είναι πυριτίου με  $\beta = 20$ . Επίσης  $V_{bb} = 2V$ ,  $V_{cc} = 12V$ ,  $R_b = 10k\Omega$  και  $R_L = 3 k\Omega$ . Να υπολογισθούν τα συνεχή ρεύματα και οι συνεχείς τάσεις.

### Λύση.

Αφού το τρανζίστορ είναι πυριτίου,  $V_{be} = 0,7V$ .

Από τη σχέση 11.4.2 θα έχομε:

$$I_b = \frac{V_{bb} - V_{be}}{R_b} = \frac{2V - 0,7V}{10k\Omega} = 130\mu A$$

Αφού το  $\beta = 20$ , θα έχομε:  $I_c = \beta I_b = 20 \times 130 \mu A = 2,6 mA$

και  $I_e = I_b + I_c = 130\mu A + 2,6 mA = 2,73 mA$

Η τάση ανάμεσα στο συλλέκτη και τον εκπομπό  $V_{ce}$  θα είναι (σχέση 11.4.4):

$$V_{ce} = V_{cc} - I_c R_L = 12V - (2,6 mA \times 3 k\Omega) = 4,2 V$$

### 11.4.2 Μέγιστη ισχύς τρανζίστορ.

Το οποιοδήποτε βιβλίο ή φυλλάδιο με χαρακτηριστικά τρανζίστορ περιέχει τουλάχιστον τρία δεδομένα:

– Το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα συλλέκτη  $I_{c,max}$ .

– Τη μέγιστη τάση συλλέκτη προς εκπομπό ή βάση ανάλογα με την περίπτωση

$V_{cmax}$  και τη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ ή απώλεια, στο συλλέκτη  $P_{cmax}$ .

Η απώλεια στο συλλέκτη  $P_c$  είναι το γινόμενο  $V_c \times I_c$ .

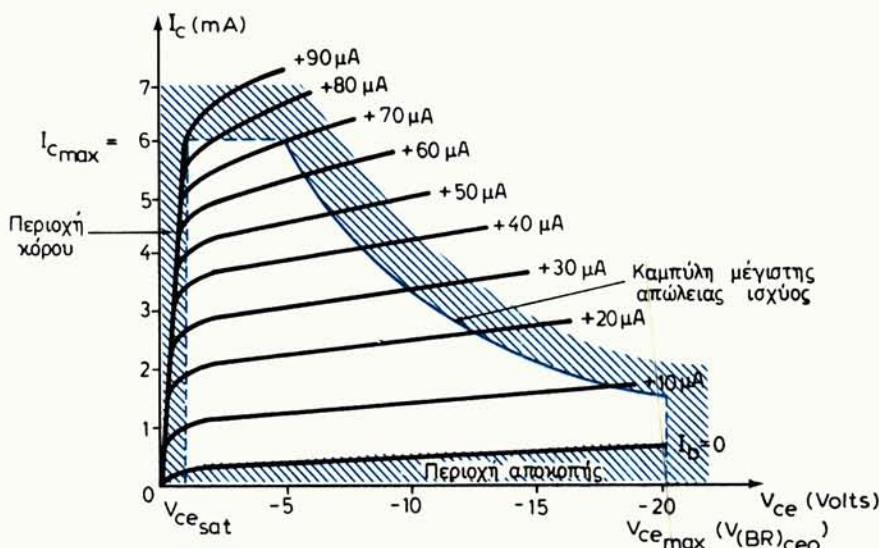
Δηλαδή

$$P_c = V_c I_c \quad (11.4.5)$$

Στο σχήμα 11.4.β φαίνονται οι χαρακτηριστικές ενός τρανζίστορ συνδεμένου σε κύκλωμα με κοινό εκπομπό.

Για το τρανζίστορ αυτό δίνονται:

$$P_{cmax} = 30 \text{ mW} \quad \text{και} \quad I_{cmax} = 6 \text{ mA} \quad \text{και} \quad V_{ce_{max}} = 20 \text{ V}$$



Σχ. 11.4.β.

Χαρακτηριστικός transistor με προσγειωμένο εκπομπό. Η ενεργός περιοχή λειτουργίας είναι αυτή που περικλείεται από τη γραμμοσκίαση.

Δεν πρέπει δηλαδή στο τρανζίστορ αυτό το ρεύμα του συλλέκτη  $I_c$  να γίνεται μεγαλύτερο από 6mA ή η τάση συλλέκτη εκπομπού  $V_{ce}$  μεγαλύτερη από 20V και οπωσδήποτε το γινόμενο  $I_c V_{ce}$  να υπερβαίνει τα 30mW.

Έτσι π.χ. αν η τάση  $V_{ce}$  γίνει 6V, τότε το ρεύμα  $I_c$  δεν πρέπει να γίνει μεγαλύτερο από:

$$I_c = \frac{P_{cmax}}{V_{ce}} = \frac{30}{6} \frac{\text{mW}}{\text{V}} = 5 \text{ mA}$$

Για κάθε τιμή τάσεως  $V_{ce}$  μπορούμε να βρούμε το ρεύμα  $I_c$  το οποίο όταν πολλαπλασιασθεί με την τάση  $V_{ce}$  αυτή θα δώσει ισχύ  $P_{cmax}$ . Μπορούμε έτσι με αυτούς τους συνδυασμούς τάσεων  $V_{ce}$  και ρευμάτων  $I_c$  να σχεδιάσουμε την καμπύλη μέγιστης απώλειας συλλέκτη.

Χαράζοντας και τα δρια του μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος και της μέγιστης τάσεως, ορίζομε την περιοχή τάσεων και ρευμάτων μέσα στην οποία πρέπει να

λειτουργεί αυτό το τρανζίστορ, αφού λάβομε υπόψη μας ότι για σωστή λειτουργία του τρανζίστορ θα πρέπει να αποφεύγεται η περιοχή κόρου και η περιοχή αποκοπής.

Αν πρόκειται για κύκλωμα προσγειωμένης βάσεως, η ισχύς στο συλλέκτη υπολογίζεται από το γινόμενο  $I_c$  επί  $V_{cb}$ .

Δηλαδή:

$$P_c = V_{cb} I_c$$

## 11.5 Ισοδύναμα κυκλώματα τρανζίστορ.

Με δυο τρόπους μπορούμε να μελετήσουμε τη συμπεριφορά των τρανζίστορ στα ενισχυτικά κυκλώματα.

Ο ένας είναι ο γραφικός, με τη χρησιμοποίηση δηλαδή των χαρακτηριστικών του τρανζίστορ σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά των στοιχείων του κυκλώματος.

Ο άλλος τρόπος είναι η μαθηματική ανάλυση με τη βοήθεια ισοδυνάμων κυκλωμάτων.

Ο γραφικός τρόπος αναλύσεως εφαρμόζεται συνήθως στις περιπτώσεις που τα κυκλώματα στα οποία ανήκουν τα τρανζίστορ λειτουργούν με μεγάλα σήματα. Π.χ. σ' έναν ενισχυτή ισχύος που στην είσοδό του οι μεταβολές των ρευμάτων (ή των τάσεων) είναι σχετικά μεγάλες.

Στα ισοδύναμα κυκλώματα των τρανζίστορ θεωρούμε τα σήματα πολύ μικρά και τη λειτουργία του τρανζίστορ γραμμική. Δηλαδή το σήμα στην έξοδό του να είναι απευθείας ανάλογο πρως το σήμα στην είσοδό του και να μεταβάλλεται συνεχώς όπως αυτό.

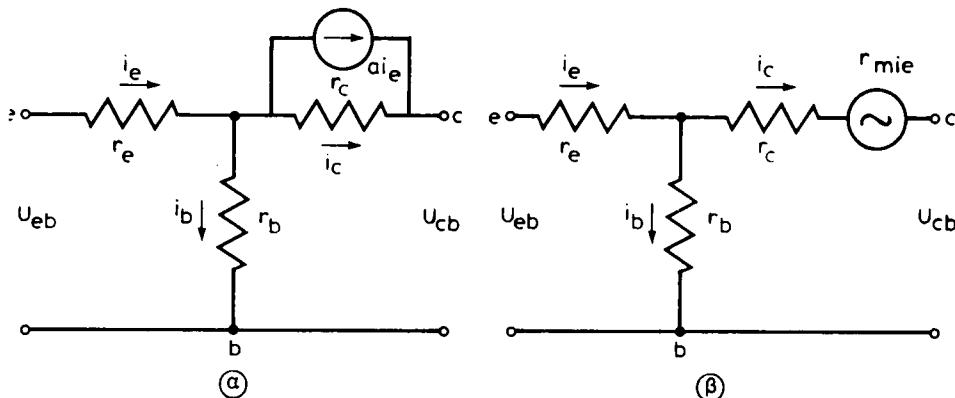
Παρακάτω θα ασχοληθούμε αρχικά με δύο τύπους ισοδυνάμων κυκλωμάτων. Ο ένας τύπος είναι με παραμέτρους που αντιστοιχούν στη φυσική συμπεριφορά των συστατικών του τρανζίστορ. Αυτός είναι ο τύπος του ισοδύναμου-Τ.

Ο άλλος τύπος είναι τιμή τετραπόλου που άπο τους ακροδέκτες του μπορούμε να προσδιορίσουμε, με μετρήσεις, ορισμένα είδη παραμέτρων χωρίς αναγκαστικά να γνωρίζουμε τη φυσική συμπεριφορά κάθε στοιχείου στο έσωτερικό του. Το τετράπολο αυτό, μια συσκευή δηλαδή με δύο ακροδέκτες στην είσοδο και δύο στην έξοδο, ονομάζεται διεθνώς **μπλάκ μποξ** (Black-box), το οποίο, σε ευρύτερη ερμηνεία έχει τη σημασία του σφραγισμένου κουτιού. Από τις παραμέτρους που περιγράφουν τη συμπεριφορά του τετραπόλου θα ασχοληθούμε ειδικά με τις υβριδικές. Σε όλη την παρακάτω ανάλυση θα θεωρούμε τη λειτουργία του τρανζίστορ ως ανεξάρτητη από τη συχνότητα. Θα περιοριστούμε δηλαδή στη λειτουργία σε χαμηλές συχνότητες, όπου οι ενδοχωρητικότητες του τρανζίστορ θα είναι αμελητέες και οι αντιστάσεις του καθαρά ωμικές.

### 11.5.1 Ισοδύναμο Τ.

Ας πάρουμε ένα τρανζίστορ σε κύκλωμα με κοινή βάση (σχ. 11.3a). Το ισοδύναμο Τ του κυκλώματος αυτού με μεταβολές τάσεων και ρευμάτων που εδώ για ευκολία θα θεωρήσουμε ημιτονικές δίνεται στο σχήμα 11.5a(α) και μια παραλλαγή του δίνεται επίσης στο σχήμα 11.5a(β).

Στα κυκλώματα αυτά, η  $r_e$  είναι, κατά μεγάλη προσέγγιση, η δυναμική αντί-



**Σχ. 11.5α.**

Ισοδύναμα κυκλώματα τρανζίστορ επαφής σε συνδεσμολογία με κοινή βάση.

σταση της επαφής εκπομπού βάσεως, που είναι πολωμένη κατά την ορθή φορά.

Μπορούμε έτσι να την ορίσουμε ως:

$$r_e = \frac{\Delta V_{eb}}{\Delta I_e} / Q \quad 11.5.1$$

Όμοια σχέση ισχύει και για την έκφραση της δυναμικής αντιστάσεως διόδου πολωμένης κατά την ορθή φορά.

Για το σημείο ηρεμίας και στη θερμοκρασία δωματίου, αυτή μπορεί να υπολογι- σθεί από τη γνωστή σχέση:

$$r_e = \frac{25\text{mV}}{I_{e0}} \quad 11.5.2$$

Η  $r_b$  στο ισοδύναμο κύκλωμα είναι το άθροισμα δυο αντιστάσεων. Η μια είναι η αντίσταση του υλικού της βάσεως και η άλλη η αντίσταση μέσω της οποίας οι μεταβολές στην έξοδο επιδρούν στην είσοδο του τρανζίστορ.

Η  $r_c$  είναι η αντίσταση της ανάστροφα πολωμένης επαφής συλλέκτη βάσεως.

Στο κύκλωμα 11.5α(β) υπάρχει η αντίσταση  $r_m$ . Αυτή υπολογίζεται από τη σχέση:

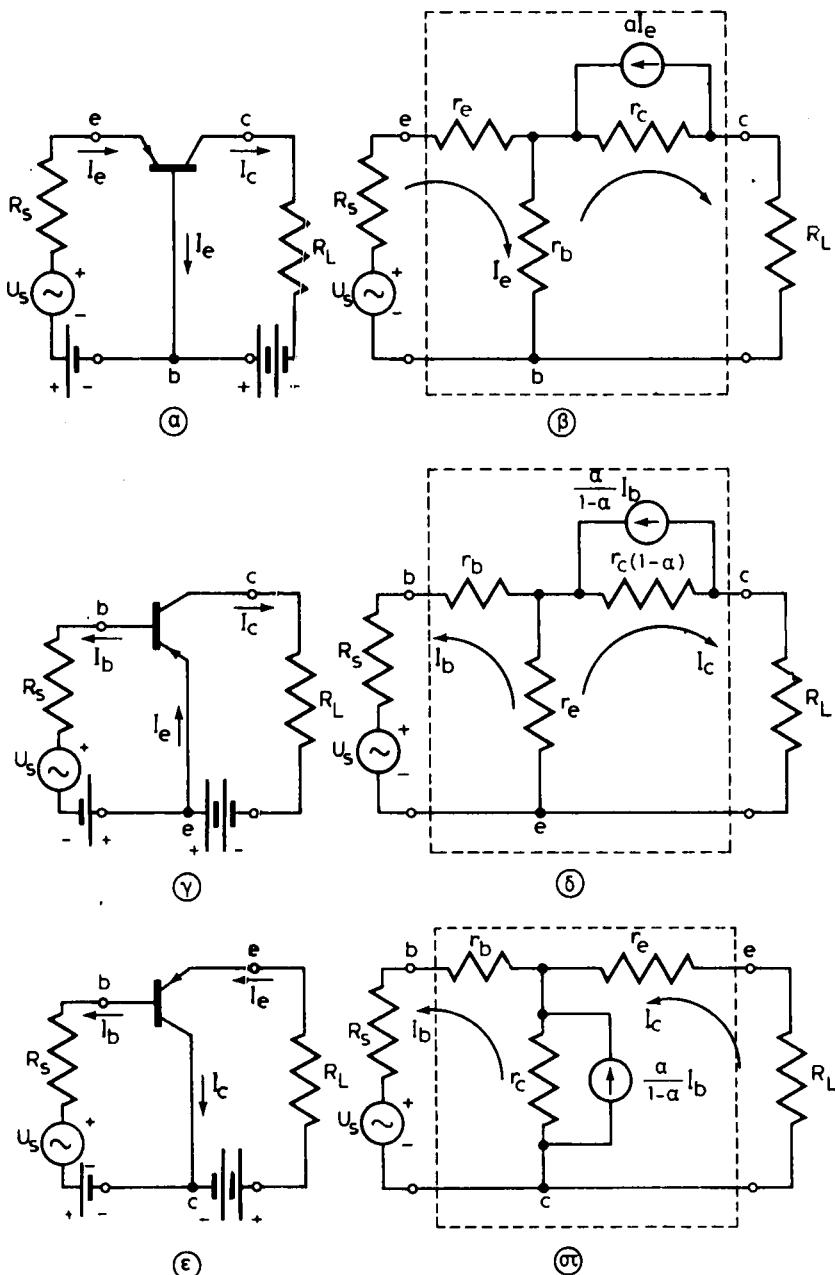
### 11.5.3

Οι αντιστάσεις  $r_e$ ,  $r_b$ ,  $r_c$  και  $r_m$  ονομάζονται και παράμετροι γ του τρανζίστορ. Είναι δυναμικά μέγεθη που έχαρτώνται από την κατασκευή του τρανζίστορ, αλλά επηρέαζονται και από τη θερμοκρασία.

Τυπικές τιμές των παραμέτρων αυτών δίνονται στον πίνακα 11.5.1.

Στο ισοδύναμο Τ η πηγή  $a_i$  (ή  $r_m i_e$ ) εκφράζει την εξάρτηση του ρεύματος του συλλέκτη από το ρεύμα του εκπομπού.

Στο σχήμα 11.5β δίνονται οι τρεις βασικές συνδεσμολογίες του τρανζίστορ σε ενισχυτικά κυκλώματα, όπου  $u_s$  και  $R_s$  είναι η τάση και η εσωτερική αντίσταση της πηγής στην είσοδο του τρανζίστορ και  $R_L$  ο φόρτος στους ακροδέκτες εξόδου.



Σχ. 11.5β.

Βασικά κυκλώματα ενισχυτών με τρανζίστορ και τα Τ ισοδύναμά τους στο εναλλασσόμενο.  
 α) Κύκλωμα κοινής βάσης. β) Ισοδύναμο Τ κυκλώματος κοινής βάσης. γ) Κύκλωμα κοινού εκπομπού.  
 δ) Ισοδύναμο Τ κυκλώματος με κοινό εκπομπό. ε) Κύκλωμα κοινού συλλέκτη. στ) Ισοδύναμο Τ κυκλώματος με κοινό συλλέκτη.

ΠΙΝΑΚΑΣ 11.5.1

Σύμβολο	Τυπικές τιμές
$r_b$	100 Ω ως 500 Ω
$r_e$	20 Ω ως 50 Ω
$r_c$	1 MΩ ως 5 Ω
$r_a$	0,95 Ω ως 0,998 Ω

του. Στα κυκλώματα αυτά έχουν σημειωθεί μόνο τα έναλλασδόμενα μεγέθη τάσεων υ και ρευμάτων. Με  $i_c, i_e, i_b$  σημειώνονται οι στιγμιαίες τιμές της έναλλασδόμενης συνιστώσας των ρευμάτων συλλέκτη, εκπομπού και βάσεως αντίστοιχα.

Στον πίνακα 11.5.2 δίνονται λειτουργικά χαρακτηριστικά των τριών συνδεσμολογιών από τα οποία μπορεί να γίνει εύκολα σύγκριση των προτερημάτων και των μειονεκτημάτων της καθεμίας συνδεσμολογίας για τρανζίστορ μέσης ισχύος. Πρέπει να σημειώσουμε ότι οι τιμές του πίνακα 11.5.2 εξαρτώνται από την τιμή αντιστάσεως της πηγής που συνδέεται στην είσοδο του τρανζίστορ και της τιμής της αντιστάσεως φόρτου του.

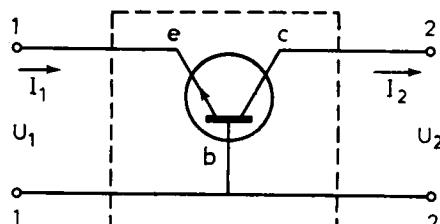
ΠΙΝΑΚΑΣ 11.5.2

	Κοινή βάση	Κοινός εκπομπός	Κοινός συλλέκτης
Αντίσταση εισόδου	30-150 Ω	500-1,500 Ω	20 kΩ-500 kΩ
Αντίσταση εξόδου	300kΩ-500 kΩ	30 kΩ-50 kΩ	50-1,000 Ω
Ενίσχυση τάσεως	500-1,500	300-1,000	Μικρότερη από 1
Ενίσχυση ρεύματος	Μικρότερη από 1	25-50	25-50
Ενίσχυση ισχύος			

## 11.6 Βασικές παράμετροι των τρανζίστορς.

### 11.6.1 Το τρανζίστορ ως τετράπολο.

Άλλος τρόπος για να μελετήσουμε τη συμπεριφορά τρανζίστορ είναι να θεωρήσουμε ότι αποτελεί το εσωτερικό ενός τετράπολου, που οι ακροδέκτες 1,1 (σχ.



Σχ. 11.6a.

Ισοδύναμο τετράπολο τρανζίστορ.

σομε ότι αποτελεί το εσωτερικό ενός τετράπολου, που οι ακροδέκτες 1,1 (σχ. 11.6α είναι οι ακροδέκτες εισόδου και οι ακροδέκτες 2,2 οι ακροδέκτες εξόδου. Στην περίπτωση του κυκλώματος του σχήματος 11.6α, το τρανζίστορ είναι με κοινή βάση. Οι ακροδέκτες εισόδου θα είναι οι ακροδέκτες εκπομπού-βάσεως και οι ακροδέκτες εξόδου, οι ακροδέκτες συλλέκτη-βάσεως.

Μπορεί όμως στο εσωτερικό του τετραπόλου να υπάρχει και συνδεσμολογία κοινού εκπομπού ή κοινού συλλέκτη.

Όποια όμως συνδεσμολογία και αν υπάρχει, για τη μελέτη της συμπεριφοράς του κυκλώματος μπορεί να εφαρμοσθεί ο τρόπος που χρησιμοποιείται στην περίπτωση ενός τετραπόλου **black - box**.

Από μετρήσεις δηλαδή των τάσεων και των ρευμάτων στους ακροδέκτες εισόδου και εξόδου υπολογίζονται διάφορα χαρακτηριστικά μεγέθη για το κύκλωμα από τα οποία εξάγονται συμπεράσματα για τη λειτουργία του.

**Τα μεταβλητά μεγέθη εδώ, που μπορούν να μετρηθούν απευθείας, είναι τα  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ .** Είναι δηλαδή αντίστοιχα η ολική τάση στην είσοδο ( $U_1$ ), το ολικό ρεύμα στην είσοδο ( $I_1$ ), η τάση στην έξοδο ( $U_2$ ) και το ολικό ρεύμα στην έξοδο  $I_2$ .

#### a) Παράμετροι τετραπόλου (μενικά).

Μπορούμε να κάνουμε διάφορους συνδυασμούς των τάσεων και των ρευμάτων, έτσι ώστε μεταβάλλοντας δύο από αυτά να μεταβάλλεται ένα τρίτο.

Οι συνηθέστεροι συνδυασμοί σε ένα τετράπολο είναι:

Να μεταβάλλομε τα ρεύματα  $I_1$ ,  $I_2$ , και να παρατηρούμε πώς μεταβάλλονται οι τάσεις εισόδου  $U_1$ , και εξόδου  $U_2$ . Αυτό εκφράζεται με το ζεύγος των συναρτήσεων.

$$U_1 = f_1(I_1, I_2) \quad (11.6.1)$$

$$U_2 = f_2(I_1, I_2)$$

Μπορούμε επίσης να μεταβάλλομε τις τάσεις  $U_1$ , και  $U_2$  και να παρατηρούμε πώς μεταβάλλονται τα ρεύματα  $I_1$ , και  $I_2$ . Έτσι ορίζεται το ζεύγος.

$$I_1 = f_3(U_1, U_2) \quad (11.6.2)$$

$$I_2 = f_4(U_1, U_2)$$

Και η τρίτη περίπτωση είναι να μεταβάλλομε το ρεύμα εισόδου  $I_1$ , και την τάση εξόδου  $U_2$  και να παρατηρούμε πώς μεταβάλλεται η τάση εισόδου  $U_1$ , και το ρεύμα εξόδου  $I_2$ . Αυτό εκφράζει το ζεύγος

$$U_1 = f_5(I_1, U_2) \quad (11.6.3)$$

$$I_2 = f_6(I_1, U_2)$$

Με  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $I_1$ , και  $I_2$  συμβολίζομε της συνολικές τάσεις και τα ολικά ρεύματα πού μπορεί να επικρατούν σε ένα τετράπολο.

Θεωρώντας πάντα τη λειτουργία του τετραπόλου γραμμική, μπορούμε από μεταβολές των μεγεθών κάθε ζεύγους των παραπάνω συναρτήσεων να υπολογίσουμε παραμέτρους πολύ χρήσιμες για τον καθορισμό των κυριοτέρων λειτουργικών χαρακτηριστικών ενός τρανζίστορ.

Για ευκολία θα θεωρούμε ότι οι μεταβολές των τάσεων  $U_1$ ,  $U_2$  και των ρευμά-

των  $I_1, I_2$  είναι ημιτονικές εναλλαγές μικρού πλάτους και χαμηλής, σχετικά, συχνότητας γύρω από το σημείο ηρεμίας. Πριν προχωρήσουμε επίσης είναι χρήσιμο να διευκρινήσουμε ότι τα ρεύματα και οι τάσεις στον τρανζίστορ έχουν και συνεχή συνιστώσα. Στα παρακάτω θα πάρνομε υπόψη μόνο την εναλλασσόμενη συνιστώσα των τάσεων και των ρευμάτων, θεωρώντας ότι το τετράπολο έχει δυναμική λειτουργία.

Με βάση τις σχέσεις 11.6.1, 11.6.2 και 11.6.3 μπορούμε να σχηματίσουμε τα παρακάτω υυστήματα εξισώσεων εναλλασσόμενων μεγεθών για κάθε περίπτωση παραμέτρων. Θα θεωρούμε μάλιστα ότι οι μικρές μεταβολές των συνολικών τάσεων  $U_1, U_2$  και ρευμάτων  $I_1, I_2$  συμπίπτουν με τις στιγμιαίες τιμές των εναλλασσόμενων μεταβολών που θα συμβολίσουμε με  $u_1, u_2$  για τις εναλλασσόμενες συνιστώσες των τάσεων εισόδου και  $i_1, i_2$  για τις εναλλασσόμενες συνιστώσες των ρευμάτων εισόδου και εξόδου αντίστοιχα.

$$u_1 = z_{11}i_1 + z_{12}i_2 \quad (11.6.4)$$

$$\begin{aligned} u_2 &= z_{21}i_1 + z_{22}i_2 \\ i_1 &= y_{11}u_1 + y_{12}u_2 \end{aligned} \quad (11.6.5)$$

$$\begin{aligned} i_2 &= y_{21}u_1 + y_{22}u_2 \\ u_1 &= h_{11}i_1 + h_{12}i_2 \end{aligned} \quad (11.6.6)$$

$$i_2 = h_{21}i_1 + h_{22}u_2$$

Αν οι παράμετροι είναι ανεξάρτητες από τις τάσεις και τα ρεύματα τότε οι παραπόνω σχέσεις είναι γραμμικές.

### 1. Παράμετροι $Z$ .

Από το υπόλοιπο των εξισώσεων 11.6.4 ορίζονται οι παράμετροι  $Z$ , ενός τετραπόλου όπως παρακάτω:

$$Z_{11} = \frac{u_1}{i_1} / i_2 = 0$$

Ο λόγος της εναλλασσόμενης τάσεως στην είσοδο προς το αντίστοιχο εναλλασσόμενο ρεύμα στην είσοδο, όταν το ρεύμα  $i_2$  στην έξοδο είναι μηδέν. (Είναι όπως λέμε η έξοδος ανοικτή). Στην περίπτωση αυτή η  $Z_{11}$  είναι η αντίσταση εισόδου του τετραπόλου.

$$Z_{12} = \frac{u_1}{i_2} / i_2 = 0$$

Ο λόγος της εναλλασσόμενης τάσεως στην είσοδο προς το αντίστοιχο εναλλασσόμενο ρεύμα στην έξοδο όταν η είσοδος είναι ανοικτή. Η  $Z_{12}$  λέγεται και αντίσταση ανάστροφης μεταφοράς.

$$Z_{21} = \frac{u_2}{i_1} / i_2 = 0$$

Ο λόγος της εναλλασσόμενης τάσεως στην έξοδο προς το αντίστοιχο εναλλασσόμενο ρεύμα στην είσοδο με ανοικτή την έξοδο. Η  $Z_{21}$  λέγεται αντίσταση ορθής μεταφοράς.

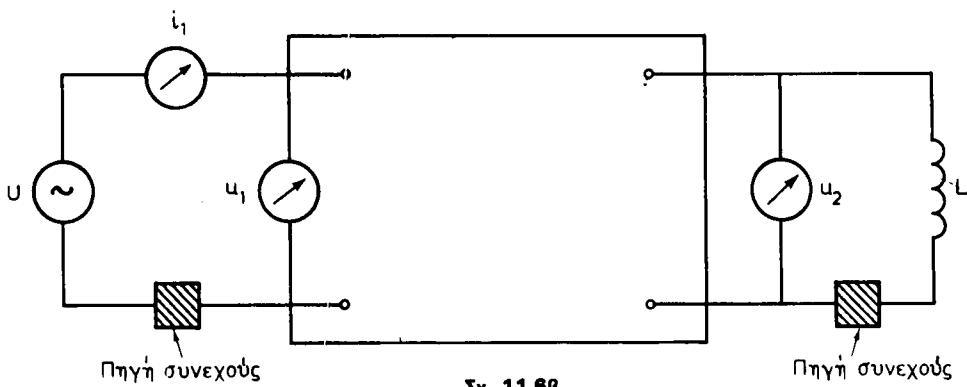
$$Z_{22} = \frac{u_2}{i_2} / i_2 = 0$$

Ο λόγος της εναλλασσόμενης τάσεως προς το αντίστοιχο εναλλασσόμενο ρέύμα στην έξοδο, με την είσοδο ανοικτή. Η  $Z_{22}$  είναι η αντίσταση εξόδου με ανοικτή την είσοδο.

Οι παράμετροι αυτές σε γραμμική λειτουργία και χαμηλές συχνότητες θεωρούνται καθαρά ωμικές αντιστάσεις. Γι' αυτό και πολλές φορές συμβολίζονται με  $r_{11}, r_{12}, r_{21}, r_{22}$ .

Κάθε φορά που λέμε ότι το κύκλωμα είναι αν ικτό, εννοούμε ότι παρουσιάζει πάρα πολύ μεγάλη αντίσταση (πρακτικά άπειρη) στο εναλλασσόμενο ρεύμα. Αυτό φυσικά δεν αποκλείει τη διέλευση συνεχούς ρεύματος. Οι παράμετροι  $Z$  λέγονται και παράμετροι ανοικτού κυκλώματος.

Ένα απλό κύκλωμα μετρήσεως της παραμέτρου  $Z_{11}$  δίνεται για παράδειγμα στο σχήμα 11.6β.



Σχ. 11.6β.

Απλό κύκλωμα μετρήσεως της  $Z_{11}$  σε τετράπολο.

Σ' αυτό, η αυτεπαγωγή του πηνίου  $L$  έχει τέτοια τιμή, ώστε στη συχνότητα της πηγής εναλλασσόμενου υ να παρουσιάζει άπειρη αντίσταση, στην εναλλασσόμενη συνιστώσα του ρεύματος στην έξοδο. Έτσι, ενώ η συνεχής συνιστώσα του ρεύματος θα περνά από το πηνίο στην έξοδο, η εναλλασσόμενη συνιστώσα  $i_1$  θα είναι μηδέν. Μετρώντας λοιπόν την εναλλασσόμενη τάση  $u_1$ , και το αντίστοιχο εναλλασσόμενο ρεύμα  $i_1$ , και διαιρώντας, υπολογίζομε την  $Z_{11}$ . Με τρόπο ανάλογο μπορούμε να υπολογίσομε και τις άλλες  $Z$  παραμέτρους, βραχυκυκλώνοντας για το εναλλασσόμενο την έξοδο ή την είσοδο κατά περίπτωση. Συνηθέστερος συμβολισμός των παραμέτρων  $Z$  είναι  $Z_i, Z_r, Z_f, Z_0$  με αντιστοιχία:

$$Z_{11} \equiv Z_i, \quad Z_{12} \equiv Z_r, \quad Z_{21} \equiv Z_f \quad \text{και} \quad Z_{22} \equiv Z_0$$

## 2. Παράμετροι $Y$ .

Από το συστήμα των εξισώσεων 11.6.5 ορίζονται οι παράμετροι  $Y$ , όπως παρακάτω:

$$y_{11} = \frac{i_1}{u_1} / u_2 = 0$$

Η  $y_{11}$  δηλαδή είναι ο λόγος του εναλλασσόμενου ρεύματος  $i_1$ , στην είσοδο, προς την εναλλασσόμενη τάση  $u_1$ , στην είσοδο όταν η τάση στην έξοδο  $u_2$  είναι μηδέν. Αυτή εκφράζει την αγωγιμότητα εισόδου, όταν η έξοδος είναι βραχυκυκλωμένη.

$$\gamma_{12} = \frac{i_1}{u_2} / u_1 = 0$$

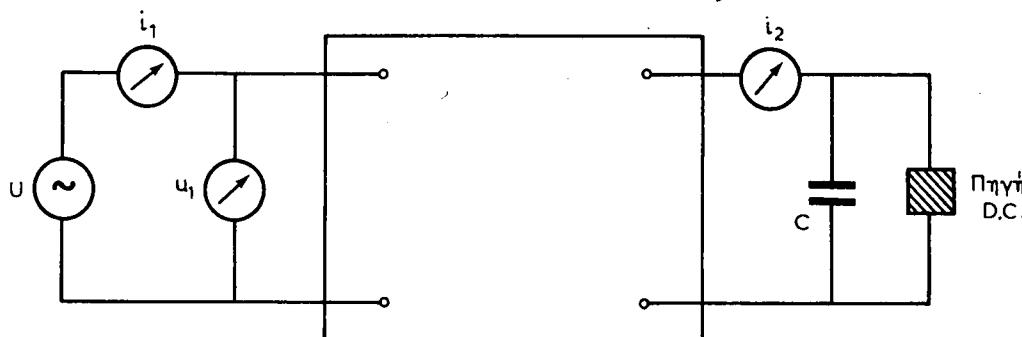
Αυτή είναι ο λόγος του εναλλασσόμενου ρεύματος  $i_1$  στην είσοδο όταν στην έξοδο υπάρχει τάση  $u_2$  και η είσοδος είναι βραχυκυκλωμένη, προς την τάση  $u_2$ . Αυτή μπορεί να αποδοθεί ως αγωγιμότητα ανάστροφης μεταφοράς.

$$\gamma_{21} = \frac{i_2}{u_1} / u_2 = 0$$

Είναι ο λόγος του εναλλασσόμενου ρεύματος στην έξοδο  $i_2$  προς την εναλλασσόμενη τάση στην είσοδο  $u_1$ , όταν η έξοδος είναι βραχυκυκλωμένη. Αυτή είναι η αγωγιμότητα ορθής μεταφοράς.

$$\gamma_{22} = \frac{i_2}{u_2} / u_2 = 0$$

Ο λόγος δηλαδή του ρεύματος εξόδου  $i_2$  προς την τάση εξόδου  $u_2$ , όταν η είσοδος είναι βραχυκυκλωμένη. Φυσικά αυτή είναι η αγωγιμότητα εξόδου.



Σχ. 11.6γ.

Απλό κύκλωμα μετρήσεως της  $\gamma_{11}$  σε τετράπολο.

Ένα απλό κύκλωμα μετρήσεως π.χ. της  $\gamma_{11}$  φαίνεται στο σχήμα 11.6ε.

Σ' αυτό, η χωρητικότητα  $C$  έχει τέτοια τιμή, ώστε στη συχνότητα της πηγής εναλλασσόμενου  $u$ , η αντίσταση της να είναι πρακτικά μηδέν. Η έξοδος δηλαδή είναι βραχυκυκλωμένη.

Με παρόμοιο τρόπο μετρούμε και τις άλλες για παραμέτρους, βραχυκυκλώνοντας, ανάλογα με την περίπτωση, την είσοδο ή την έξοδο. Και για τις παραμέτρους για έχομε το συμβολισμό  $\gamma_i$ ,  $\gamma_r$ ,  $\gamma_f$ ,  $\gamma_0$ , που είναι σε αντιστοιχία:

$$\gamma_{11} \equiv \gamma_i, \quad \gamma_{12} \equiv \gamma_r, \quad \gamma_{21} \equiv \gamma_f \quad \text{και} \quad \gamma_{22} \equiv \gamma_0$$

Οι παράμετροι για λέγονται και παράμετροι κλειστού κυκλώματος. Έχουν διαστάσεις αγωγιμότητας και χρησιμοποιούνται κυρίως σε υπολογισμούς στις υψηλές συχνότητες.

### 3. Υβριδικές παράμετροι (παραμέτροι $h$ ).

Από το σύστημα των εξισώσεων (11.6.6) μπορούμε να ορίσουμε τις υβριδικές παραμέτρους ενός τετραπόλου. Οι παραμέτροι αυτές λέγονται και **μικτές παραμέτροι** ή **παράμετροι  $h$**  από το αρχικό γράμμα της λέξεως hybrid, που είναι η ελληνική λέξη **υβρίδιο** στα αγγλικά.

Για τις παραμέτρους  $h$  έχουμε τις σχέσεις:

$$h_{11} = \frac{u_1}{i_1} / u_2 : 0$$

Είναι ο λόγος της εναλλασσόμενης τάσεως στην είσοδο  $u_1$ , προς το αντίστοιχο εναλλασσόμενο ρεύμα στην είσοδο  $i_1$ , όταν η έξοδος είναι βραχυκυκλωμένη. Η παράμετρος αυτή εκφράζει την αντίσταση εισόδου με βραχυκυκλωμένη έξοδο.

$$h_{12} = \frac{u_1}{u_2} / i_1 = 0$$

Είναι ο λόγος της εναλλασσόμενης τάσεως στην είσοδο  $u_1$ , προς την εναλλασσόμενη τάση στην έξοδο  $u_2$ , όταν η είσοδος είναι ανοικτή. Ο λόγος αυτός είναι το αντίστροφο της ενισχύσεως τάσεως με ανοικτή την είσοδο. Και φυσικά είναι μέγεθος χωρίς διαστάσεις.

$$h_{21} = \frac{i_2}{i_1} / u_2 = 0$$

Ο λόγος του εναλλασσόμενου ρεύματος στην έξοδο  $i_2$  προς το εναλλασσόμενο ρεύμα στην είσοδο  $i_1$ , όταν η έξοδος είναι βραχυκυκλωμένη. Είναι δηλαδή η ενίσχυση ρεύματος με βραχυκυκλωμένη έξοδο. Μέγεθος πάλι χωρίς διαστάσεις.

$$h_{22} = -\frac{i_2}{u_2} / i_1 = 0$$

Εδώ έχομε το λόγο του εναλλασσόμενου ρεύματος στην έξοδο  $i_2$  προς την εναλλασσόμενη τάση στην έξοδο  $u_2$ , όταν η είσοδος είναι ανοικτή. Η παράμετρος αυτή δίνει την αγωγιμότητα έξόδου (αντίστροφο αντιστάσεως έξόδου) όταν η είσοδος είναι ανοικτή.

Οι παράμετροι  $h$  μετρούνται με κυκλώματα ανάλογα με αυτά που αναφέραμε για τις προηγούμενες παραμέτρους. Χρησιμοποιούνται πολύ συχνά γιατί δίνουν άμεσα τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός τετραπόλου. Και για το συμβολισμό των παραμέτρων  $h$  έχομε:

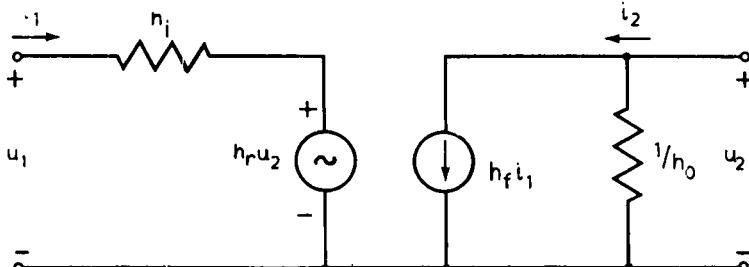
$$h_{11} \equiv h_i, \quad h_{12} \equiv h_r, \quad h_{21} \equiv h_f \quad \text{και} \quad h_{22} \equiv h_o$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω οι εξισώσεις (11.6.6) μπορούν να γραφούν έτσι:

$$u_1 = h_i i_1 + h_r u_2$$

$$i_2 = h_f i_1 + h_o u_2 \quad (11.6.6a)$$

Χρησιμοποιώντας την πρώτη εξίσωση για το πρώτο του μέρος και τη δεύτερη για το δεύτερο μπορούμε να σχεδιάσομε ένα ισοδύναμο κύκλωμα για το τετράπο-



Σχ. 11.66.

Υβριδικό ισοδύναμο τετραπόλου.

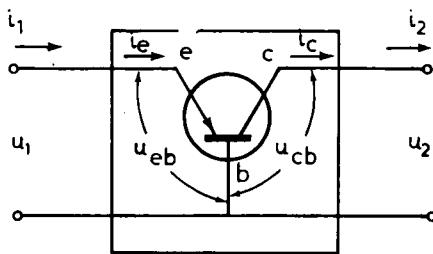
λο. Το ισοδύναμο αυτό λέγεται **υβριδικό ισοδύναμο** (σ. 11.6δ) και ισχύει, όπως ορίσαμε για μικρά σήματα και χαμηλές συχνότητες. Το υβριδικό ισοδύναμο είναι πάρα πολύ χρήσιμο στους υπολογισμούς.

### β) Υβριδικό ισοδύναμο τρανζίστορ.

Σύμφωνα με όσα έχομε πει για τις παραμέτρους και τα ισοδύναμα κυκλώματα των τετραπόλων, μπορούμε, παίρνοντας το τρανζίστορ σαν τετράπολο, να σχεδιάσουμε τα υβριδικά ισοδύναμα του για κάθε περίπτωση συνδεσμολογίας [κοινή βάση (C.B.), κοινός εκπομπός (C.E.), κοινός συλλέκτης (C.C.)].

Για να καθορίσουμε κάθε φορά το είδος της συνδεσμολογίας στο οποίο αναφέρεται η παράμετρος, βάζομε επίπλέον στο δείκτη που την καθορίζει, άλλο ένα δείκτη που αφορά στο είδος της συνδεσμολογίας. Έτσι π.χ.  $h_{ie}$  σημαίνει την παράμετρο  $h_i$  του τρανζίστορ σε κύκλωμα κοινού εκπομπού. Αντίστοιχα θα έχουμε  $h_{ib}$  για κύκλωμα κοινής βάσεως και  $h_{ic}$  για κύκλωμα κοινού συλλέκτη. Ο δεύτερος δείκτης δηλαδή αναφέρεται στον ακροδέκτη του τρανζίστορ, που είναι κάθε φορά κοινός στη συνδεσμολογία.

Ας θεωρήσουμε το τετράπολο του σχήματος 11.6ε που στο εσωτερικό του ύπαρχε ένα τρανζίστορ με κοινή βάση.



Σχ. 11.6ε.

Ισοδύναμο τετραπόλου τρανζίστορ με τα ρεύματα και τις τάσεις στο τρανζίστορ.

Σύμφωνα με όσα είπαμε για τον ορισμό των υβριδικών παραμέτρων του τετραπόλου και το υβριδικό ισοδύναμο του (σχ. 11.6δ) μπορούμε, έχοντας για την εναλλασσόμενη συνιστώσα της τάσεως εισόδου  $u_1 \equiv u_{eb}$  που είναι η εναλλασσόμενη συνιστώσα της τάσεως εκπομπού-βάσεως, την εναλλασσόμενη τάση εξόδου  $u_2 \equiv u_{cb}$  (εναλλασσόμενη τάση συλλέκτη-βάσεως), τις εναλλασσόμενες συνιστώσες του ρεύματος εισόδου  $i_1 \equiv i_e$  (εναλλασσόμενο ρεύμα εκπομπού) και του ρεύματος εξόδου  $i_2 \equiv i_c$  (εναλλασσόμενο ρεύμα συλλέκτη) να καθορίσουμε τις υβριδικές παραμέτρους για τα τρανζίστορ σε συνδεσμολογία με κοινή βάση του τετραπόλου του σχήματος 11.6ε.

Θα έχουμε εποιηθεί τις παραμέτρους:

$$h_{ib} = \frac{u_{eb}}{i_e} / \quad u_{cb} = 0 \quad \text{Είναι η παράμετρος που δίνει την αντίσταση εισόδου του τρανζίστορ σε συνδεσμολογία με κοινή βάση, όταν οι ακροδέκτες συλλέκτη-βάσεως είναι βραχυκυκλωμένοι. Αποδεικνύεται ότι είναι } h_{ib} = r_e + (1 - a) r_b.}$$

$$h_{rb} = \frac{u_e}{u_{cb}} / i_e = 0$$

Είναι η παράμετρος που δίνει το αντίστροφο της ενισχύσεως τάσεως στην περίπτωση που το κύκλωμα εκπομπού βάσεως είναι ανοικτό. Είναι αδιάστατο μέγεθος. Είναι:  $h_{rb} \approx r_b / r_c$ .

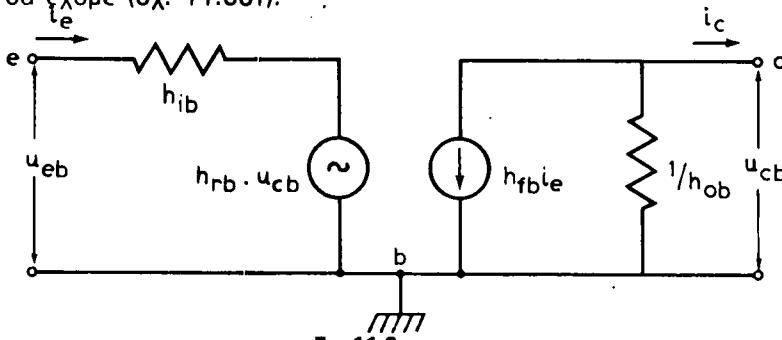
$$h_{fb} = \frac{i_c}{i_e} / u_{cb} = 0$$

Εκφράζει την απολαβή ρεύματος του τρανζίστορ, όταν είναι βραχυκυκλωμένοι οι ακροδέκτες συλλέκτη βάσεως. Η παράμετρος αυτή είναι αριθμητικά ίση πρός την παραμέτρο  $a$  του τρανζίστορ, αλλά με αρνητικό πρόσαγμο, που προέρχεται από τη διαφορετική φορά του ρεύματος  $i_2$  που έχει καθορισθεί στο αρχικό τετράπολο και της πραγματικής φοράς του  $i_c$ . Είναι και αυτή χωρίς διαστάσεις.

$$h_{ob} = \frac{i_c}{u_{cb}} / i_e = 0$$

Εκφράζει την αγωγιμότητα εξόδου του τρανζίστορ, όταν η είσοδός του είναι ανοικτή. Είναι:  $h_{ob} \approx 1/r_c$ .

Μπορούμε τώρα να σχεδιάσουμε το υβριδικό ισοδύναμο του τετραπόλου του σχήματος 11.6ε χρησιμοποιώντας τις τάσεις, τα ρεύματα και τις παραμέτρους  $h$  όπως ορίσθηκαν παραπάνω για το τρανζίστορ σε συσχετισμό με τις εξισώσεις 11.6.6 θα έχουμε (σχ. 11.6στ.).



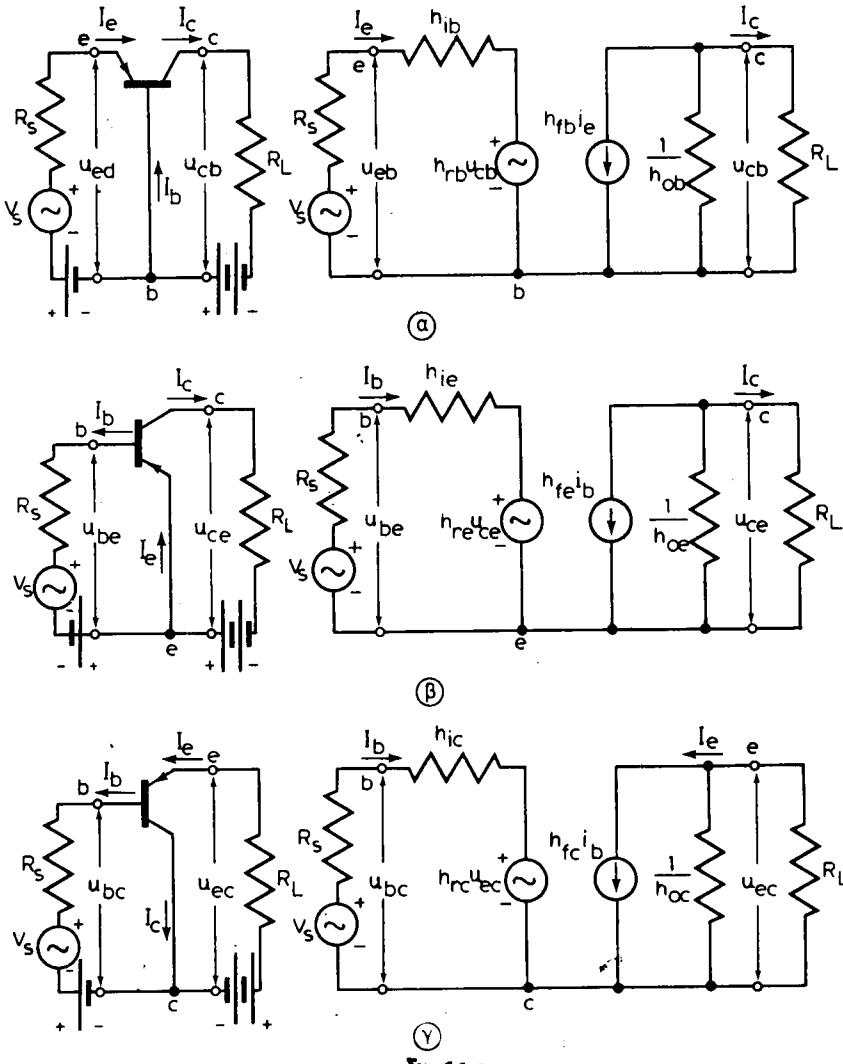
Σχ. 11.6στ.

Υβριδικό ισοδύναμο τρανζίστορ σε συνδεσμολογία κοινής βάσεως.

Ανάλογα με τα παραπάνω μπορούμε να ορίσουμε τις παραμέτρους  $h$  για κυκλώματα με προσγειωμένα εκπομπό και προσγειωμένο συλλέκτη και να σχεδιάσουμε τα αντίστοιχα ισοδύναμα κυκλώματα. Στον πίνακα 11.6.1 δίνονται οι συμβολικές ονομασίες των παραμέτρων  $h$ .

**Συμβολισμός, παραμέτρων  $h$ , εναλλασσομένων τάσεων και ρευμάτων για τις διάφορες συνδεσμολογίες τρανζίστορ επαφής**

Μέγεθος	Κοινή βάση	Κοινός εκπομπός	Κοινός συλλέκτης
$h_i$	$h_{ib}$	$h_{ie}$	$h_{ic}$
$h_r$	$h_{rb}$	$h_{re}$	$h_{rc}$
$h_f$	$h_{fb}$	$h_{fe}$	$h_{fc}$
$h_o$	$h_{ob}$	$h_{oe}$	$h_{oc}$
$u_1$	$u_{eb}$	$u_{be}$	$u_{bc}$
$u_2$	$u_{cb}$	$u_{ce}$	$u_{ec}$
$i_1$	$i_e$	$i_b$	$i_b$
$i_2$	$i_c$	$i_c$	$i_e$



Σχ. 11.66ζ

Αντίστοιχα υβριδικά κυκλώματα των διαφόρων συνδεσμολογιών τρανζίστορ.

α) Κοινή βάση. β) Κοινός εκπομπός. γ) Κοινός συλλέκτης.

σμοί των παραμέτρων και των εναλλασσομένων τάσεων και ρευμάτων για τα κυκλώματα με κοινή βάση, κοινό εκπομπό και κοινό συλλέκτη, τα αντίστοιχα με αυτά ενός τετραπόλου.

Με απλή αντικατάσταση των αντιστοίχων μεγεθών στις σχέσεις των παραμέτρων  $h$  του τετραπόλου, μπορούν να καθορισθούν οι παράμετροι για την κάθε συνδεσμολογία του τρανζίστορ. Επίσης αν γίνει το ίδιο και στο ισοδύναμο του σχήματος 11.66 μπορούμε να έχομε το υβριδικό ισοδύναμο για κάθε περίπτωση.

Στο σχήμα 11.66ζ δίνονται οι συνδεσμολογίες μετα αντίστοιχα υβριδικά κυκλώματα. Στην είσοδο κάθε κυκλώματος συνδέεται μια γεννήτρια με ηλεκτρεγερτική

τική δύναμη  $u_s$  και εσωτερική αντίσταση  $r_s$ , ενώ στην έξοδο συνδέεται μια αντίσταση φόρτου  $R_L$ .

Στο τέλος του βιβλίου υπάρχει πίνακας στον οποίο φαίνονται οι σχέσεις ανάμεσα στις παραμέτρους  $h$  των διαφόρων συνδεσμολογιών στα τρανζίστορ όπως και των παραμέτρων  $h$  με τις παραμέτρους του ισοδύναμου  $T$  του ίδιου τρανζίστορ. Χρήσιμο είναι να σημειώσουμε ότι στο κύκλωμα με κοινό εκπομπό η παράμετρος  $h_{fe}$  είναι ίση με την παράμετρο  $\beta$  του τρανζίστορ, και θετική, όπως είναι όλες οι παράμετροι  $h$ , εκτός από τις παραμέτρους,  $h_{fb}$  και  $h_{fc}$  που είναι αρνητικές.

Στο κύκλωμα με κοινό συλλέκτη η  $h_{fc}$  συμβολίζεται και με το γράμμα  $\gamma$ .

Πολλές φορές χρησιμοποιείται και η παράμετρος  $g_m$  που ορίζεται ως το πηλίκο μιας μεταβολής του ρεύματος του συλλέκτη προς την αντίστοιχη μεταβολή της τάσεως εκπομπού βάσεως που την προκάλεσε, με βραχυκυκλωμένη την έξοδο.

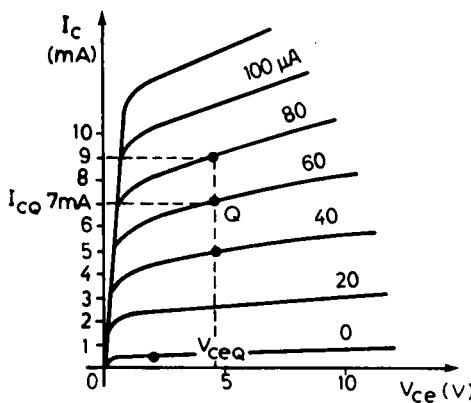
$$g_m \simeq \frac{\Delta I_c}{\Delta V_{eb}} / V_{cb} = 0$$

Όσα είπαμε παραπάνω, αφορούσαν σε τάσεις και ρεύματα εναλλασσόμενα. Σε δυναμική δηλαδή λειτουργία του τρανζίστορ. Στη λειτουργία αυτή οι δείκτες των παραμέτρων γράφονται με πεζά ψηφία. Όταν οι τάσεις και τα ρεύματα είναι συνεχή (στατική λειτουργία) οι δείκτες αυτοί γράφονται με κεφαλαία. Έτσι π.χ.  $h_{fb}$  είναι η παράμετρος σε δυναμική λειτουργία και  $h_{FB}$  σε στατική λειτουργία.

### Γραφικός υπολογισμός των παραμέτρων $h$ τρανζίστορ.

Μπορούμε χονδρικά να υπολογίσουμε τις παραμέτρους  $h$  από τις χαρακτηριστικές εισόδου και εξόδου του τρανζίστορ.

Ένα παράδειγμα δίνεται με τη βοήθεια του σχήματος 11.6η. Σ' αυτό, αν  $Q$  είναι το σημείο ηρεμίας ενός τρανζίστορ με κοινό εκπομπό, τα ρεύματα ηρεμίας του θα είναι:  $I_{cQ} = 7 \text{ mA}$  και  $I_{bQ} = 80 \mu\text{A}$ .



Σχ. 11.6η.

Παράδειγμα γραφικού προσδιορισμού της παραμέτρου  $h_{fe}$ .

Αν με σταθερή τάση  $V_{ce}$  ( $U_{ce}$  δηλαδή ίση με μηδέν) μεταβάλλομε το ρεύμα της βάσεως  $+ 20 \mu\text{A}$ , θα έχομε για  $I_{b_1} = 80 \mu\text{A}$ ,  $I_c = 9 \text{ mA}$ .

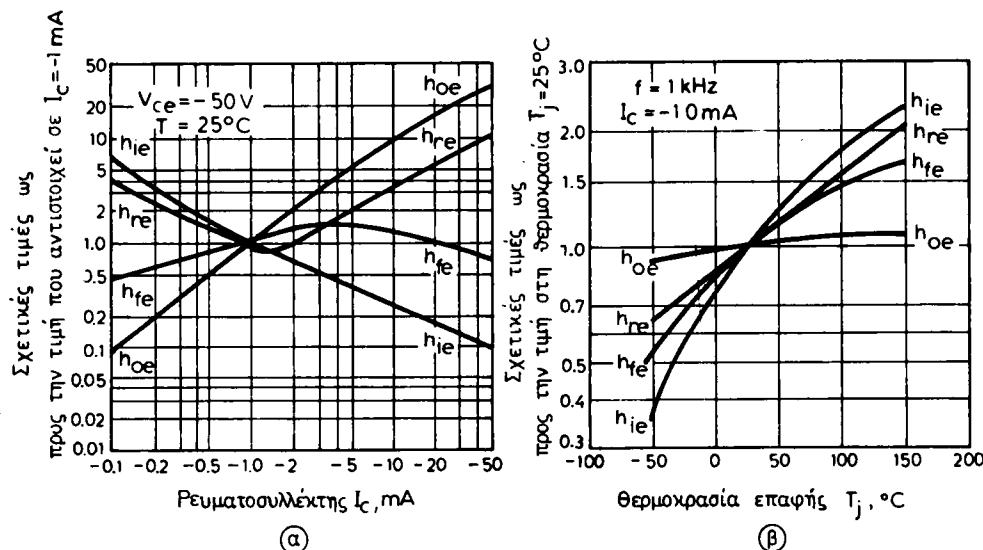
Έχομε λασιπόν:

$$h_{fe} = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} / V_{ce} = \text{σταθ.} = \frac{I_{c1} - I_{cQ}}{I_{b1} - I_{bQ}} = \frac{9 - 7}{80 - 60} \frac{\text{mA}}{\mu\text{A}} = \\ = \frac{2000}{20} \frac{\mu\text{A}}{\mu\text{A}} = 100 \Rightarrow h_{fe} = 100$$

Με ανάλογο τρόπο μπορούμε να υπολογίσουμε όλες τις παραμέτρους  $h$  στις διάφορες συνδεσμολογίες του τρανζίστορ, από τις χαρακτηριστικές εισόδου ή εξόδου για κάθε συνδεσμολογία.

Το σημείο ηρεμίας όμως του τρανζίστορ μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία, με συνέπεια τη μεταβολή του σημείου ηρεμίας του. Οι χαρακτηριστικές όμως του τρανζίστορ ούτε ευθείες είναι ούτε ισαπέχουν. Αυτό σημαίνει ότι στα διάφορα σημεία ηρεμίας οι παράμετροι  $h$  θα έχουν διαφορετική τιμή.

Η μεταβολή των παραμέτρων  $h$  δίνεται, συνήθως, από τον κατασκευαστή σε ειδικά διαγράμματα. Τα διαγράμματα αυτά (σχ. 11.6θ) δίνουν τη μεταβολή σε συνάρτηση με το ρεύμα του συλλέκτη  $I_c$  ή σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία επαφής  $T_j$ .



Σχ. 11.6θ.

Μεταβολές των παραμέτρων της τρανζίστορ.

- α) Σε συνάρτηση με το ρεύμα συλλέκτη. β) Σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία επαφής.

### Εφαρμογή.

Για ένα τρανζίστορ δίνεται  $r_b = 200 \Omega$  και  $\beta = 100$ . Νά βρείτε την παράμετρο  $h_{ib}$  για σημέριο ηρεμίας  $I_e = 1 \text{ mA}$ .

### Απάντηση.

Από τον πίνακα σχέσεων των παραμέτρων στο τέλος του βιβλίου βρίσκομε ότι:

$$h_{ib} = r_e + (1 - \alpha) r_b$$

Από τη σχέση (11.5.4) βρίσκομε ότι:

$$r_e \approx \frac{25 \text{ mV}}{1 \text{ mA}} = 25 \Omega$$

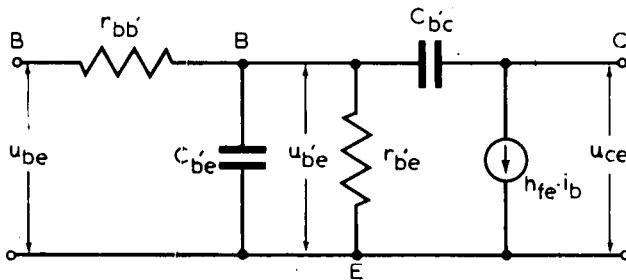
$$\text{Επίσης: } \alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} = \frac{100}{101} \approx 0,99$$

$$\text{Οπότε: } h_{ib} = 25 + (1 - 0,99) 200 \Omega \Rightarrow h_{ib} = 27 \Omega$$

### γ) Υβριδικό ισοδύναμο τύπου π.

Ως τώρα στην ανάπτυξη των ισοδυνάμων κυκλωμάτων δεχθήκαμε λειτουργία στη χαμηλή συχνότητα.

Για τη μελέτη της συμπεριφοράς του τρανζίστορ στην υψηλή συχνότητα, χρησιμοποιείται το υβριδικό ισοδύναμο τύπου π. Ένα τέτοιο ισοδύναμο κοινού εκπομπού (C.E.) φαίνεται στο σχήμα 11.6i. Σ αυτό, Β είναι ο εξωτερικός ακροδέκτης της βάσης ένω Β' είναι η επαφή μέσα στη βάση. Η αντίσταση  $r_{bb'}$  είναι η ωμική αντίσταση του ακροδέκτη και του υλικού της βάσεως ως το σημείο Β'. Η  $r_{be}$  είναι η δυναμική αντίσταση της επαφής βάσεως-εκπομπού. Η  $C_{be}$  είναι η χωρητικότητα διαχύσεως και η  $C_{bc}$  η χωρητικότητα της επαφής.



Σχ. 11.6i.

Υβριδικό ισοδύναμο τρανζίστορ τύπου π, σε σύνδεση κοινού εκπομπού και λειτουργία στην υψηλή συχνότητα.

### 11.6.2 Το τρανζίστορ σε απλή ενισχυτική διάταξη.

Από υβριδικό ισοδύναμο του σχήματος 11.6δ μπορούμε να καταστρώσουμε μερικές γενικές σχέσεις από τις οποίες είναι δυνατό να υπολογίζουμε τα χαρακτηριστικά μεγέθη ενός απλού ενισχυτικού κυκλώματος με τρανζίστορ όπως αυτά που φαίνονται στο σχήμα 11.6ζ.

Θεωρούμε λοιπόν ότι στην είσοδο του τετραπόλου θέτομε την πηγή με τάση  $u_s$  με εσωτερική αντίσταση  $r_b$  και στην έξοδό του φόρτο  $R_L$ .

$$\text{Η αντίσταση εισόδου του θα είναι: } r_i \approx \frac{u_1}{i_1}$$

$$\text{Η ενίσχυση ρεύματος θα είναι: } A_i = \frac{i_2}{i_1}$$

$$\text{Η ενίσχυση τάσεως θα είναι: } A_v = \frac{u_2}{u_1} = \frac{i_2 R_L}{i_1 r_i} = A_i \cdot \frac{R_L}{r_i}$$

$$\text{Η απολαβή ισχύος θα είναι: } A_p = \frac{u_2 i_2}{u_1 i_1} = A_v A_i$$

### ΠΙΝΑΚΑΣ 11.6.2

Γενικές σχέσεις επιδόσεων απλών ενισχυτικών κυκλωμάτων τρανζίστορ

Αντίσταση εισόδου	$r_i = h_{11} - h_{12} A_i R_L$
Ενίσχυση ρεύματος	$A_i = \frac{h_{21}}{1 + h_{22} R_L}$
Ενίσχυση τάσεως	$A_v = - A_i \frac{R_L}{r_i}$
Ενίσχυση ισχύος	$A_p = A_i A_v$
Αντίσταση εξόδου	$r_o = \frac{1}{h_{22} - \frac{h_{12} h_{12}}{R_s + h_{11}}}$

$$\text{Επίσης η αντίσταση εξόδου θα είναι: } r_o \approx \frac{u_2}{i_2}$$

Με βάση τους ορισμούς αυτούς παραθέτομε τον πίνακα 11.6.2 στον οποίο φαντούνται οι γενικές σχέσεις επιδόσεών απλών ενισχυτικών κυκλωμάτων τρανζίστορ.

Στις σχέσεις του πίνακα αυτού, οι παράμετροι  $h$  θα είναι κάθε φορά οι αντίστοιχες παράμετροι του είδους του κυκλώματος του ενισχυτή (με κοινή βάση ή κοινό εκπομπό ή κοινό συλλέκτη).

### Εφαρμογή.

Τρανζίστορ πυριτίου έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

$$h_{ie} = 600 \Omega, h_{re} = 125 \times 10^{-6}, h_{fe} = 200, h_{oe} = 75 \mu\text{mhos}$$

Το τρανζίστορ είναι συνδεμένο σε ένα κύκλωμα κοινού εκπομπού με φόρτο  $R_L = 1 \text{ k}\Omega$  και εσωτερική αντίσταση της πηγής που είναι συνδεμένη στην είσοδο του κυκλώματος  $r_s = 200 \Omega$ . Να υπολογισθούν:

a) Η ενίσχυση ρεύματος  $A_i$ .

- β) Η αντίσταση εισόδου  $r_{ie}$ .
- γ) Η ενίσχυση τάσεως  $A_v$ .
- δ) Η απολαβή ισχύος  $A_p$ .
- ε) Η αντίσταση εξόδου  $r_{oe}$ .

### Απάντηση.

$$a) A_i = \frac{h_{fe}}{1 + h_{oe} \cdot R_L} = \frac{200}{1 + (75 \times 10^{-6} \times 10^3)} \approx 186$$

$$\beta) r_{ie} = h_{re} - h_{re} A_i R_L = 600 - (125 \times 10^{-6} \times 186 \times 10^3) \approx 577 \Omega$$

$$\gamma) A_v = -A_i \frac{R_L}{r_{ie}} = -186 \times \frac{10^3}{577} \approx -322$$

$$\delta) A_p = A_i A_v = 186 \times 322 \approx 59890$$

$$\epsilon) r_{oe} = \frac{1}{h_{oe} - \frac{h_{re} h_{ie}}{R_s + h_{ie}}} = \frac{1}{75 \times 10^{-6} - \frac{125 \times 10^{-6} \times 200}{200 + 600}} \approx 227 \text{ k}\Omega$$

### 11.7 Το τρανζίστορ σε λειτουργία διακόπτη.

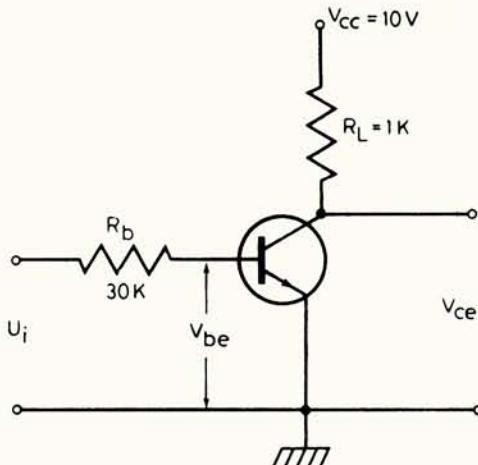
Έστω ότι έχουμε ένα τρανζίστορ συνδεμένο σε κύκλωμα με κοινό εκπομπό (σχ. 11.7α). Όπως είδαμε σε προηγούμενη παράγραφο οι καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί ένα τρανζίστορ είναι η ενεργός, η κατάσταση κόρου ή η κατάσταση αποκοπής (σχ. 11.7β). Αυτό εξαρτάται από την τάση που θα επικρατεί στους ακροδέκτες βάσεως-εκπομπού. Το τρανζίστορ βρίσκεται στην αποκοπή, όταν το ρεύμα της βάσεως  $I_b$  είναι πρακτικά μηδέν, πράγμα που συμβαίνει οπωσδήποτε όταν η επαφή βάσεως-εκπομπού είναι ανάστροφα πολωμένη. Στην αποκοπή το τρανζίστορ δεν άγει, και η τάση  $V_{ce}$  θα είναι πρακτικά η τάση της πηγής  $V_{cc}$ . Στην πραγματικότητα υπάρχει ένα πολύ μικρό ανάστροφο ρεύμα από τον εκπομπό στο συλλέκτη. Όταν η επαφή βάσεως εκπομπού πολωθεί κατά την ορθή φορά, τότε το τρανζίστορ άγει. Περνάει δηλαδή στην ενεργό κατάσταση.

Αν το ρεύμα βάσεως γίνει αρκετά μεγάλο, το τρανζίστορ είναι δυνατό να περάσει στην κατάσταση κόρου. Να διαρρέεται δηλαδή από ένα μεγάλο ρεύμα και η τάση  $V_{ce}$  να γίνει η ελάχιστη. Αυτό ποσοτικά μπορούμε να το δούμε στις χαρακτηριστικές του σχήματος 11.7β για το κύκλωμα του σχήματος 11.7α.

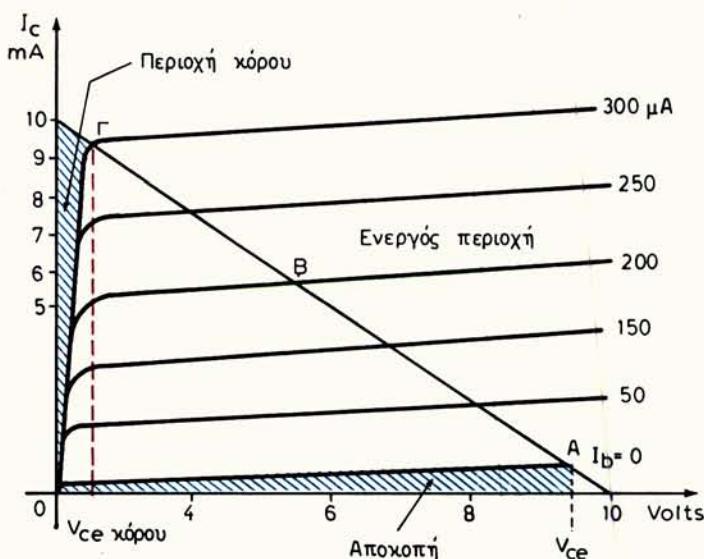
Στο σημείο Α της ευθείας φόρτου, (ρεύμα  $I_b = 0$  το τρανζίστορ παύει να άγει: Έρχεται δηλαδή στην αποκοπή η όπως λέμε για συντομία, είναι **εκτός** (off). Σ' αυτή την κατάσταση η τάση  $V_{ce}$  είναι πάνω από 9 V και το ρεύμα που κυκλοφόρει είναι το πολύ μικρό ανάστροφο ρεύμα συλλέκτη. (Οι χαρακτηριστικές έχουν χαραχθεί με ανοχές, για να διακρίνονται οι ενδιαφέρουσες περιοχές λειτουργίας).

Για την τιμή  $I_b = 200 \mu\text{A}$  π.χ. το τρανζίστορ εργάζεται στο σημείο Β που είναι μέσα στην ενεργό περιοχή.

Όταν όμως το ρεύμα της βάσεως  $I_b$  γίνει 300  $\mu\text{A}$ , το σημείο λειτουργίας του είναι το Γ. Από την τιμή αυτή του  $I_b$  και πέρα, το τρανζίστορ εργάζεται στον κόρο. Η τάση  $V_{ce}$  είναι πολύ μικρή (στη πραγματικότητα μερικά δέκατα του βόλτη). Στην κατάσταση αυτή λέμε οτι το τρανζίστορ είναι **εντός** (on).



Σχ. 11.7α.



Σχ. 11.7β.

Χαρακτηριστικές εξόδου του κυκλώματος 11.7α.  
Φαίνονται οι περιοχές κόρου και αποκοπής όπως και η ευθεία φόρτου.

Είναι λοιπόν δυνατό, με κατάλληλους παλμούς τάσεως  $U_i$  στον ακροδέκτη της βάσεως, να φέρνομε το τρανζίστορ εναλλακτικά στις καταστάσεις **ΕΝΤΟΣ** ή **ΕΚΤΟΣ**, οπότε το τρανζίστορ θα εργάζεται ως διακόπτης που ανοιγοκλείνει.

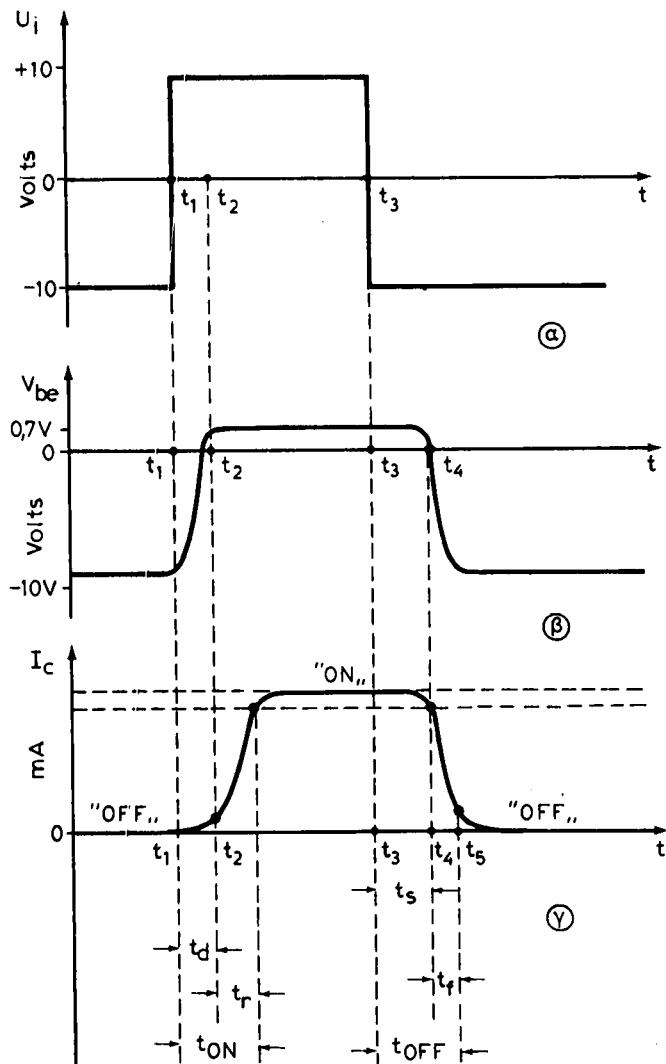
#### 11.7.1 Μεταβατικοί χρόνοι.

Η μέγιστη συχνότητα με την οποία μπορεί το τρανζίστορ να πέρναει από τη μια

κατάσταση στην άλλη έχει πολλές φορές σπουδαία σημασία στις εφαρμογές.

Η συχνότητα αυτή εξαρτάται από το χρόνο που απαιτείται για να έλθει το τρανζίστορ από τη κατάσταση **εκτός** στην κατάσταση **εντός** και αντίστροφα.

Έστω ότι στην είσοδο του τρανζίστορ του σχήματος 11.7α, η τάση  $u_i$  έχει τη μορφή τέλειου τετραγωνικού παλμού [σχ. 11.7γ(α)]. Στο χρόνο  $t = 0$  η τάση  $u_i$  είναι αρνητική και η βάση του τρανζίστορ ανάστροφα πολωμένη ( $V_{be} = -10$  V) και το τρανζίστορ στην κατάσταση εκτός [σχ. 11.7γ(β)]. Το ρεύμα του συλλέκτη τότε είναι  $I_c = 0$  [σχ. 11.7γ(γ)] και η τάση  $V_{ce} \approx 10$  V [σχ. 11.7γ(δ)].



Σχ. 11.7γ.

Μεταβατικοί χρόνοι κατά τη λειτουργία ενός τρανζίστορ με παλμούς.

Στη χρονική στιγμή  $t_1$ , η τάση  $u_i$  στον ακροδέκτη της βάσεως γίνεται απότομα  $+10$  V. Αυτό πολώνει την επαφή βάσεως εκπομπού θετικά και κάνει το ρεύμα της βάσεως περίπου  $300$  μΑ. Δηλαδή:

$$I_b = \frac{10\text{ V} - 0,7\text{ V}}{30\text{ K}} \approx 300\text{ }\mu\text{A}$$

Γι' αυτό το ρεύμα βάσεως το τρανζίστορ έρχεται στον κόρο. Ωστόσο το τρανζίστορ δε θα ανταποκριθεί αμέσως. Η τάση  $V_{be}$  αυξάνει βαθμιαία όπως φαίνεται στο σχήμα, με καθυστέρηση ως προς την τάση  $u_i$ . Αυτό προκαλεί καθυστέρηση στην ανάπτυξη του ρεύματος του συλλέκτη  $I_c$ , ώστου να φθάσει στην τιμή κόρου του  $\approx 9$  V. Ο χρόνος που μεσολαβεί από τή χρονική στιγμή  $t_1$  που ο εφαρμόσθηκε ο παλμός, ως τη χρονική στιγμή  $t_2$  που το ρεύμα  $I_c$  φθάνει στο 10% της τελικής τιμής λέγεται **χρόνος καθυστέρησεως**  $t_d$  (delay time). Ο χρόνος  $t_r$  που μεσολαβεί από την χρονική στιγμή  $t_2$  ως τη στιγμή που το ρεύμα φθάνει το 90% της τελικής του τιμής λέγεται **χρόνος ανδρου του παλμού του ρεύματος**  $t_r$  (rise time). Το άθροισμα του χρόνου καθυστέρησεως  $t_d$  και του χρόνου ανόδου  $t_r$  είναι ο χρόνος που απαιτείται για να έλθει το τρανζίστορ στον κόρο ( $t_{on}$ ).

Ο χρόνος αυτός εξαρτάται από πολλούς παράγοντες στους οποίους περιλαμβάνονται οι παράμετροι του τρανζίστορ και τα άλλα εξαρτήματα του κυκλώματος. Τον κυριότερο όμως ρόλο παίζουν οι χωρητικότητες των επαφών.

Ο χρόνος καθυστέρησεως  $t_d$  οφείλεται στο ότι από τη στιγμή που θα πολωθεί η βάση κατά την ορθή φορά, χρειάζεται κάποιος χρόνος για τη συγκέντρωση φορέων μειονότητας στην παροχή της βάσεως προς τον εκπομπό, όπως και κάποιος χρόνος, για να αρχίσουν οι φορείς να περνούν την περιοχή της βάσεως για να φθάσουν στο συλλέκτη και να δημιουργήσουν το ρεύμα  $I_c$ .

Οι τυπικοί μεταβατικοί χρόνοι από την κατάσταση **εκτός** στην κατάσταση **εντός** κυμαίνονται από  $75$  ως  $300$  nanosecond ( $10^{-9}$  sec) και διαφέρουν ακόμα και για το ίδιο τρανζίστορ, σύνδεσμολογημένο με διαφορετικές συνθήκες κυκλώματος.

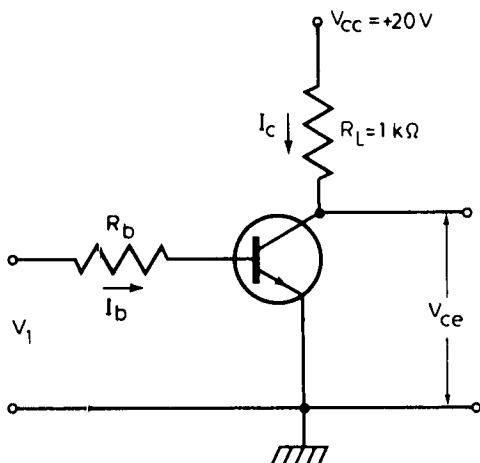
Το ρεύμα του συλλέκτη μένει στον κόρο όσο το δυναμικό της βάσεως μένει στα  $+10$  V. Στη χρονική στιγμή  $t_3$ , η τάση  $u_i$  γίνεται απότομα  $-10$  V. Και πάλι το τρανζίστορ δεν άνταποκρίνεται αμέσως. Το ρεύμα του συλλέκτη καθυστέρει ν' αρχίσει να μειώνεται, όπως φαίνεται στο σχήμα. Ο χρόνος που μεσολαβεί από τη χρονική στιγμή  $t_3$  που ο εφαρμόσθηκε η αρνητική τάση ως τη στιγμή  $t_4$  που το ρεύμα πέφτει στο 90% της τιμής κόρου λέγεται **χρόνος αποθηκεύσεως** (storage time)  $t_s$ . Και ο χρόνος που μεσολαβεί από τη χρονική στιγμή  $t_4$  ως τη χρονική στιγμή  $t_5$ , που το ρεύμα πέφτει στο 10% της τιμής που είχε στον κόρο, λέγεται **χρόνος πτώσεως** (fall time)  $t_f$ . Το άθροισμα του **χρόνου αποθηκεύσεως** και του **χρόνου πτώσεως** δίνει το χρόνο  $t_{off}$  μεταβάσεως από την κατάσταση **εντός** στην κατάσταση **εκτός**. Ο χρόνος πτώσεως  $t_f$  εξαρτάται από τους ίδιους παράγοντες που εξαρτάται και ο χρόνος ανόδου. Η καθυστέρηση όμως  $t_s$  (χρόνος αποθηκεύσεως) οφείλεται στο ότι, όταν το τρανζίστορ λειτουργεί στον κόρο, όχι μόνο ο εκπομπός αλλά και ο συλλέκτης δίνει φορείς στη βάση. Όταν αναστρέφεται η πολικότητα της βάσεως προς τα αρνητικά, οι αποθηκευμένοι φορείς επιστρέφουν στο συλλέκτη και συντηρούν έτσι για κάποιο χρονικό διάστημα το ρεύμα του, το οποίο αρχίζει να μειώνεται μόλις εξαντληθούν οι επιπλέον αυτοί φορείς στη βάση. Ο χρόνος αποθηκεύσεως εξαρτάται από την κατασκευή του τρανζίστορ αλλά και από

το πόσο περισσότερο ηταν το ρεύμα της βάσεως από το ελάχιστο που απαιτούνταν για να πραγματοποιηθεί ο κόρος. Οι τυπικές τιμές του χρόνου  $t_{off}$  κυμαίνονται από 100-300 μ sec. Τό διθροίσμα  $T_t$  των χρόνων  $t_{on}$  και  $t_{off}$  είναι χαρακτηριστικό του κυκλώματος και καθορίζει πόσες φορές στη μονάδα του χρόνου μπορεί ν' αλλάξει κατάσταση τα τρανζίστορ χωρίς να αλλοιωθούν τα χαρακτηριστικά του.

Πολλές φορές για να επιταχυνθεί η λειτουργία του κυκλώματος, δεν αφήνεται το τρανζίστορ να φθάσει στον κόρο [λειτουργία ανάμεσα στα σημεία Α και Β της ευθείας φόρτου (σχ. 11.7β)]. Έτσι, ενώ οι χρόνοι  $t_d$ ,  $t_r$  και  $t_f$  μένουν οι ίδιοι, μειώνεται ο χρόνος  $t_s$ .

### Εφαρμογή.

Το τρανζίστορ του κυκλώματος 11.7δ είναι πυριτίου και έχει κανονικά  $\beta = 100$ , που όμως μεταβάλλεται από 50 ως 150. Να βρεθεί το ρεύμα κόρου και η μέγιστη τιμή της  $R_b$ , για την οποία θα εξασφαλίζεται λειτουργία του τρανζίστορ όταν στην είσοδο τεθεί θετικός παλμός  $V_1 = 10$  V.



Σχ. 11.7δ.

### Λύση.

- Όταν το τρανζίστορ λειτουργεί στον κόρο, η τάση  $V_{ce}$  είναι περίπου 0 V. Επομένως το ρεύμα του συλλέκτη θα είναι:

$$I_c = \frac{V_{cc}}{R_L} = \frac{20 \text{ V}}{1000 \Omega} = 20 \text{ mA}$$

- Το ρεύμα της βάσεως για να φθάσει το τρανζίστορ στον κόρο θα είναι, από τη σχέση 11.3.4.

$$I_b = \frac{I_c}{\beta} = \frac{V_{cc}}{\beta R_L}$$

Αυτή τουλάχιστο η τιμή του ρεύματος στη βάση αρκεί για να φθάσει το τρανζίστορ στον κόρο. Στην πράξη, το ρεύμα αυτό, για να εξασφαλισθεί η λειτουργία σε κόρο, πρέπει να είναι μεγαλύτερο, πρέπει δηλαδή:

$$I_b > \frac{V_{cc}}{\beta R_L}$$

Αφού όμως η τιμή του  $I_b$  κυμαίνεται από 50 ως 150, για να είμαστε βέβαιοι ότι σε όλη την κλίμακα της μεταβολής αυτής το  $I_b$  θα είναι πάντοτε μεγαλύτερο από το  $V_{cc} / \beta R_L$ , εκλέγομε την ελάχιστη τιμή του  $\beta$ , δηλαδή την 50. Οπότε:

$$I_b > \frac{V_{cc}}{\beta R_L} \Rightarrow I_b > \frac{20 \text{ V}}{50 \times 10^3 \Omega} \Rightarrow I_b > 400 \mu\text{A}$$

- 3) Όταν η  $V_1$  γίνει + 10V, η επαφή βάσεως εκπομπού είναι πολωμένη κατά την ορθή φορά και από το κύκλωμα εισόδου θα έχομε:

$$I_b = \frac{V_1 - V_{eb}}{R_b} > 400 \mu\text{A} \Rightarrow R_b < \frac{V_1 - V_{eb}}{400 \mu\text{A}} \Rightarrow R_b < \frac{10 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{400 \mu\text{A}}$$

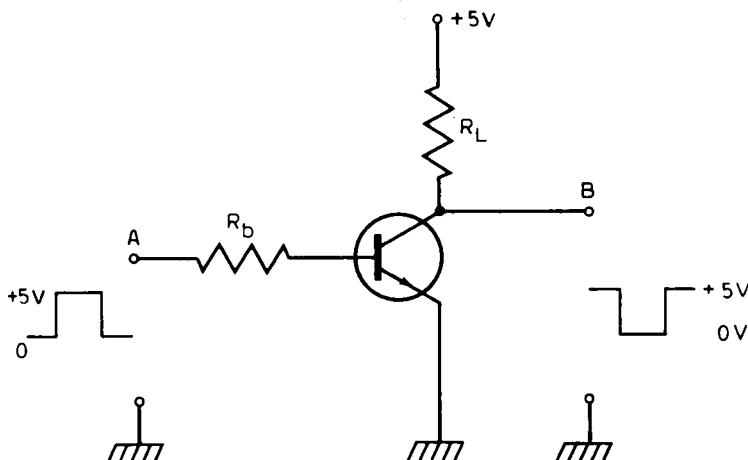
και  $R_b < 25 \text{ k}\Omega$

Έτσι λοιπόν η  $R_b$  πρέπει να είναι το πολύ  $25 \text{ k}\Omega$  για να εξασφαλισθεί η λειτουργία στον κόρο.

### 11.7.2 Το τρανζίστορ στα ψηφιακά κυκλώματα.

Ένα από τα βασικά στοιχεία στα ψηφιακά κυκλώματα είναι το τρανζίστορ. Στα κυκλώματα αυτά γίνεται κυρίως εκμετάλλευση της λειτουργίας του τρανζίστορ ως διακόπτη.

Στο κύκλωμα π.χ. του σχήματος 11.7ε, αν θέσουμε στην είσοδο A ένα παλμό με στάθμες 0 και +5 V ικανό να φέρει το τρανζίστορ στον κόρο, θα έχομε, όταν η τά-



Σχ. 11.7ε.

Απλό κύκλωμα αντιστροφέα (πύλης «όχι») με τρανζίστορ.

ση είναι 0, αποκοπή του τρανζίστορ και επομένως στην έξοδο Β τάση +5 V (οι τάσεις θεωρούνται πάντοτε ως προς τη γη).

Όταν η τάση στο Α γίνεται +5 V, το τρανζίστορ έρχεται στον κόρο και η τάση στο Β γίνεται πρακτικά 0. Τα αντίστροφα συμβαίνουν όταν ο παλμός στην είσοδο, από +5 V γίνεται 0. Τότε η έξοδος από Ο γίνεται +5 V. Έχουμε δηλαδή μια αναστροφή του παλμού στην έξοδο. Το κύκλωμα αυτό λέγεται αναστροφέας.

Μπορούμε στη στάθμη 0 V να αντιστοιχίσουμε το στοιχείο 0 και στη στάθμη +5 V το στοιχείο 1. Έτσι όταν θα έχουμε στην είσοδο του αναστροφέα 0, στην έξοδό του θα έχουμε 1 και αντίστροφα.

Χρήσιμο είναι εδώ να πούμε ότι στα ηλεκτρονικά έχουμε δυο κατηγορίες κυκλωμάτων: τα **αναλογικά** και τα **ψηφιακά**. Αναλογικά είναι τα κυκλώματα στα οποία όταν στην είσοδό τους δέχονται σήματα από την έξοδό τους εξέρχονται σήματα που, μέσα σε ορισμένα όρια μπορούν, να έχουν οποιαδήποτε τιμή. Ψηφιακά είναι τα κυκλώματα που, και στην είσοδο και την έξοδό τους τα σήματα έχουν καθορισμένες τιμές. Οι τιμές συνήθως είναι τιμές δυναμικού στις οποίες αντιστοιχούμε τα ψηφία 0 ή 1.

Το ακουστικό σήμα ενός ραδιοφωνικού προγράμματος π.χ. που μεταδίδεται με ένα διαμορφωμένο κύμα υψηλής συχνότητας (φέρον) είναι ένα αναλογικό σήμα, γιατί το πλάτος ή η συχνότητα του μπορεί να πάρει κάθε τιμή στα όρια ενός ευρέος φάσματος.

Αντίθετα, η πληροφορία που μπορεί να δώσει ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής τσέπης έχει τη μορφή ψηφιακού σήματος, δηλαδή σήματος με διάκριτες τιμές.

Τα ψηφιακά κυκλώματα διακρίνονται σε **λογικά** και **ακολουθιακά**. Λογικά είναι αυτά που η έξοδός τους σε μια χρονική στιγμή εξαρτάται από την τιμή που θα έχει η είσοδός τους στην ίδια χρονική στιγμή. Ακολουθιακά είναι αυτά που η έξοδός τους σε μια χρονική στιγμή εξαρτάται και από τιμές που είχε η είσοδός τους και σε προηγούμενες στιγμές.

Τα ψηφιακά κυκλώματα σχεδιάζονται για να αποθηκεύουν πληροφορίες και δεδομένα, να δέχονται νέα δεδομένα, να εκτελούν υπολογισμούς, να παίρνουν αποφάσεις, και να δίνουν αποτελέσματα.

Ο αποδοτικός συνδυασμός των ψηφιακών κυκλωμάτων απαιτεί ειδικό αριθμητικό σύστημα και μια ειδική Άλγεβρα: την «Άλγεβρα των διακοπτών» (switching Algebra) που είναι Άλγεβρα Boole.

Στα ψηφιακά κυκλώματα εκτός από τα τρανζίστορ χρησιμοποιούνται και δίοδοι σε διάφορους συνδυασμούς.

Σημασία μεγάλη έχει η ταχύτητα λειτουργίας των διόδων και τρανζίστορ σ' αυτά τα κυκλώματα. Γι' αυτό και τα τρανζίστορ που χρησιμοποιούνται έχουν, συνήθως, πολύ καλή κατασκευή, έτσι, ώστε να μην παρουσιάζουν μεγάλες χωρητικότητες ή ωμικές αντιστάσεις.

## 11.8 Φωτοτρανζίστορ.

Το φωτοτρανζίστορ έχει την ίδια κατασκευή με ένα τρανζίστορ επαφής, με τη διαφορά ότι προβλέπεται η δυνατότητα φωτισμού της επαφής βάσεως-συλλέκτη. Το φωτοτρανζίστορ μπορεί να λειτουργήσει ή με τη βάση πολωμένη με κάποια τά-

ση ή ασύνδετη (στον αέρα).

Από τη σχέση 11.3.6α γνωρίζομε ότι το ρεύμα του συλλέκτη  $I_c$  σε κύκλωμα με κοινό εκπομπό είναι:

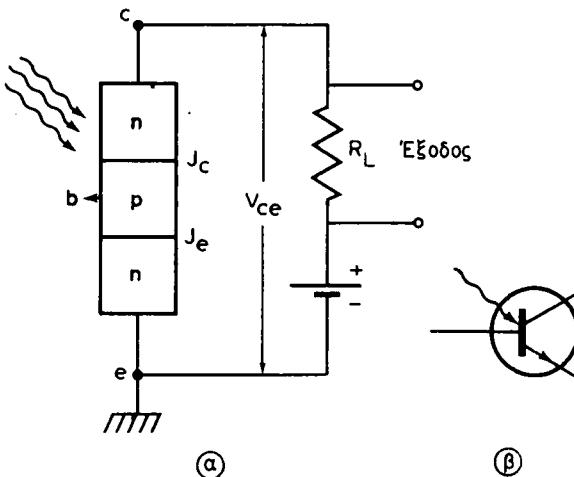
$$I_c = \beta I_b + (\beta + 1) I_{cbo} \quad (11.8.1)$$

Στο κύκλωμα του σχήματος 11.8 φαίνεται ο τρόπος συνδέσεως φωτοτρανζίστορ. Σ' αυτό, η βάση είναι ασύνδετη, άρα το  $I_b = 0$  και από τη σχέση (11.8.1) θα έχομε:

$$I_c = (\beta + 1) I_{cbo}$$

Δηλαδή το ρεύμα  $I_c$  είναι  $(\beta + 1)$  φορές το ανάστροφο ρεύμα βάσεως συλλέκτη.

Το ρεύμα αυτό είναι το ρεύμα της επαφής  $J_c$  στο κύκλωμα του σχήματος 11.8 σύμφωνα με τη σύνδεση της πηγής που κάνει τη συνδεσμολογία ανάλογη με αυτή του κοινού εκπομπού στα κοινά τρανζίστορ.



Σχ. 11.8.

α) Παράσταση συνδεσμολογίας φωτοτρανζίστορ. β) Συμβολισμός.

Όταν φωτισθεί η επαφή  $J_c$ , δημιουργούνται επιπλέον φορείς στην περιοχή απογυμνώσεως, με αποτέλεσμα την αύξηση του ανάστροφου ρεύματος  $I_{cbo}$  και συνεπώς του  $I_c$ . Μπορούμε δηλαδή έχοντας την οικονομία της συνδεσμολογίας της βάσεως, να μεταβάλλουμε το ρεύμα του συλλέκτη μεταβάλλοντας το φωτισμό της επαφής  $J_c$ .

Οι χαρακτηριστικές των φωτοτρανζίστορ είναι δύοις με τις χαρακτηριστικές τρανζίστορ με κοινό εκπομπό, με τη διαφορά ότι αντί να έχουν παράμετρο το  $I_b$ , έχουν τη φωτεινή ισχύ.

Χρησιμοποιούνται σε διατάξεις αυτοματισμού, στην ανάγνωση διατρήτων καρτελών και ταινιών, στους υπολογιστές και αλλού.

Υπάρχουν φωτοτρανζίστορ που είναι, ευαίσθητα, εκτός από την οπτική, και στην υπεριώδη, την υπέρυθρο, δύος και στην περιοχή των ακτίνων X του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

### 11.9 Συχνότητες αποκοπής α και β.

Η δυνατότητα λειτουργίας των ενισχυτικών κυκλωμάτων με τρανζίστορ σε υψηλές συχνότητες περιορίζεται από εσωτερικούς και εξωτερικούς παράγοντες.

Οι εσωτερικοί παράγοντες αιναφέρονται στην κατασκευή του τρανζίστορ, και κυρίως στις ενδοχωρητικότητές του, ενώ οι εξωτερικοί στα εξαρτήματα του κυκλώματος που συνοδεύουν το τρανζίστορ. Εδώ θα σταθούμε στην επίδραση των υψηλών συχνοτήτων στη λειτουργία μόνο του τρανζίστορ.

Για ένα τρανζίστορ σε συνδεσμολογία με κοινή βάση, το μέτρο της παραμέτρου  $\alpha$ , που στην ουσία εκφράζει την ενίσχυση ρεύματος  $I_c/I_e$ , παραμένει σχεδόν σταθερό σε χαμηλές συχνότητες. Όταν όμως η συχνότητα λειτουργίας αυξάνει προς υψηλές τιμές, η α αρχίζει να μικραίνει. Σε κάποια τιμή συχνότητας το μέτρο της α θα γίνει ίσο με το 0,7 της τιμής που είχε στις χαμηλές συχνότητες. Τη συχνότητα αυτή τη λέμε συχνότητα αποκοπής- $\alpha$  (alpha cutoff frequency). Η μείωση αυτή του α οφείλεται κυρίως στη δυνατότητα διαδρομής των φορέων μέσα στη βάση. Όταν δηλαδή ο χρόνος διαδρομής των φορέων (π.χ. σε ένα τρανζίστορ n-p-n, ηλεκτρονίων από τον εκπομπό και οπών από το συλλέκτη) μέσα στη βάση είναι μεγαλύτερος από την περίοδο της εναλλασσόμενης τάσεως που εφαρμόζεται, οι φορείς δεν προφθάνουν να διατρέξουν την περιοχή της βάσεως στη διάρκεια μιας περιόδου, με αποτέλεσμα να υποστηρεύονται μέσα σ' αυτή. Η συσσώρευση αυτή δημιουργεί δυσκολία στην κίνηση των φορέων μέσα στη βάση, με αποτέλεσμα την αλλοίωση του α. Η συχνότητα αποκοπής- $\alpha$  συμβολίζεται συνήθως με  $f_\alpha$ . Αν  $\alpha_0$  είναι η τιμή της α στο συνεχές, τότε το μέτρο της σε μια συχνότητα  $f$  θα δίνεται από τη σχέση:

$$|\alpha| = \frac{\alpha_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_\alpha}\right)^2}} \quad (11.9.1)$$

Υπάρχουν τρανζίστορ κατασκευασμένα για να λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες. Η  $f_\alpha$  τους φθάνει τις χιλιάδες MHz. Στα κυκλώματα με προσγειωμένο εκπομπό παρουσιάζεται φυσικά μείωση του β στις υψηλές συχνότητες.

Η υψηλή συχνότητα στην οποία το μέτρο του β γίνεται ίσο με το 0,7 της τιμής  $\beta_0$  που έχει στις χαμηλές συχνότητες ή το συνεχές λέγεται συχνότητα αποκοπής β. Και συμβολίζεται με  $f_\beta$ .

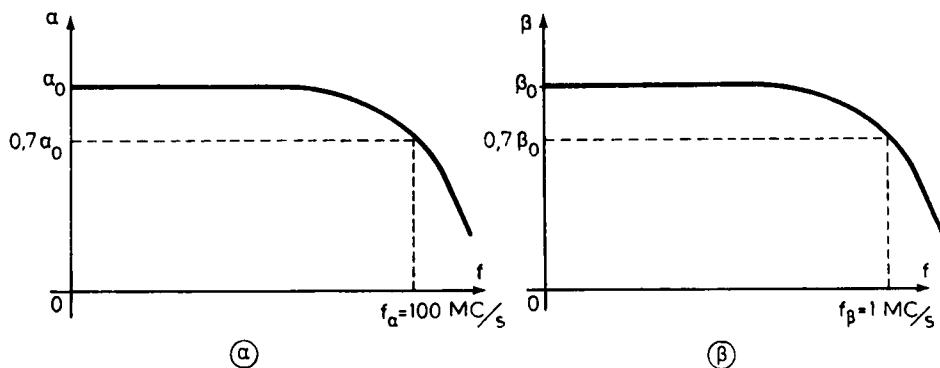
Η  $f_\alpha$  με την  $f_\beta$  συνδέονται με τη σχέση:

$$f_\beta = (1 - \alpha) f_\alpha \quad (11.9.2)$$

Αυτό σημαίνει ότι ένα τρανζίστορ με  $\alpha = 0,99$  και  $f_\alpha = 100$  Mc/sec στη συνδεσμολογία με κοινή βάση θα έχει σε συνδεσμολογία με κοινό εκπομπό συχνότητα αποκοπής:

$$f_\beta = (1 - 0,99) \times 100 \text{ Mc/sec} = 1 \text{ Mc/sec}$$

Η μείωση της υψηλής συχνότητας λειτουργίας του ίδιου τρανζίστορ είναι πραγματικά πολύ μεγάλη από τη συνδεσμολογία σε κύκλωμα με κοινή βάση, όταν αυτό συνδεθεί σε κύκλωμα με κοινό εκπομπό. Η καμπύλη μεταβολής του α και του β,



Σχ. 11.9.

Ενδεικτικές καμπύλες μεταβολής. Του  $\alpha$  ενός τρανζίστορ (a) και του  $\beta$  του ίδιου τρανζίστορ (b) σε συνάρτηση με τη συχνότητα  $f$ , όταν  $\alpha = 0,99$ .

σε συνάρτηση με τη συχνότητα λειτουργίας  $f$  δίνεται στο σχήμα 11.9(a) και (b). Οι συχνότητες αποκοπής του τρανζίστορ είναι οι μεγαλύτερες συχνότητες, στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί το τρανζίστορ ως ενισχυτής.

Στην πράξη αντί της  $f_\beta$  γίνεται χρήση της συχνότητας αποκοπής  $f_T$  που είναι ένα σταθερό γινόμενο.

$$f_T = \beta_0 f_\beta \quad (11.9.3)$$

Βέβαια αυτό το τρανζίστορ σε C.E. μπορεί να ενισχύσει ρεύματα από συνεχή ( $f = 0$ ) ως με συχνότητα  $f_\beta$ . Το εύρος των συχνοτήτων  $\Delta f$  που μπορεί να ενισχύσει θα είναι δηλαδή:

$$\Delta f = f_\beta \quad (11.9.4)$$

Οπότε η σχέση (11.9.3) γράφεται:

$$f_T = \beta_0 \Delta f \quad (11.9.5)$$

και εκφράζει μια γενικότερη αρχή για τους ενισχυτές, που λέει ότι το μέτρο της ενίσχυσεως επί το εύρος της ζώνης των συχνοτήτων που μπορούν να ενισχυθούν από μια ενισχυτική διάταξη, είναι σταθερό. Αυτό σημαίνει ότι κερδίζομε σε ενίσχυση, χάνομε σε εύρος συχνοτήτων.

Ότι είπαμε για τα  $\alpha$  και  $\beta$  φυσικά ισχύουν και για τα μέτρα των παραμέτρων  $h_{fb}$  και  $h_{fe}$ .

## 11.10 Τρανζίστορ επιδράσεως πεδίου (FET).

Η λειτουργία του τρανζίστορ επιδράσεως πεδίου (Field Effect Transistor), βασίζεται στη μεταβολή της αντιστάσεως ενός ημιαγωγού, με επίδραση ηλεκτρικού πεδίου.

Υπάρχουν κυρίως δύο κατηγορίες FET:

- Τα JFET (Junction Field Effect Transistors) που είναι τα FET επαφής και
- Τα IGFET (Insulated Gate FET) που είναι τα FET με μονωμένη πύλη.

Ο μηχανισμός επιδράσεως του ηλεκτρικού πεδίου είναι λίγο διαφορετικός σε

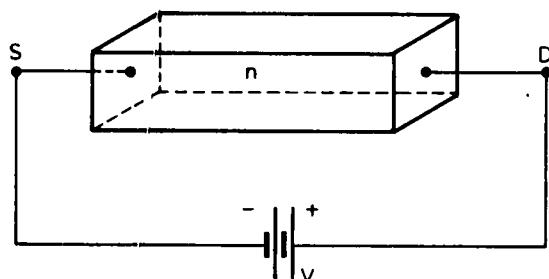
καθεμιά από τις δύο κατηγορίες. Αυτό θα γίνει κατανοητό από την περιγραφή που θα ακολουθήσει.

Το FET είναι ένα εξάρτημα με τρεις ακροδέκτες, που αντιστοιχούν στην πηγή (source), την εκροή (drain) και την πύλη (gate). Ο ρόλος τους θα φανεί παρακάτω.

### 11.10.1 FET επαφής (JFET).

Είναι γνωστό ότι ένας ημιαγιγός τύπου N ή P στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος παρουσιάζει όλα τα χαρακτηριστικά ενός αγωγού (αντίσταση, ειδική αντίσταση κλπ.).

Ας πάρομε ένα κομμάτι ημιαγιγού τύπου N, σε σχήμα ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου. Στις δύο απέναντι τιλευρές του, αφού δημιουργήσομε δύο ωμικές επαφές (δηλαδή μη ανορθωτικές) με ακροδέκτες ας συνδέσουμε τους δύο πόλους μιας πηγής (σχ. 11.10α).



Σχ. 11.10α.

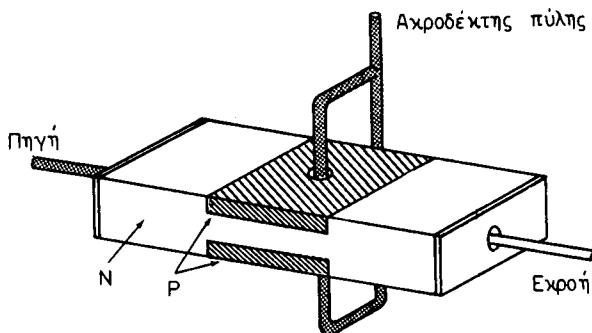
Θα δημιουργηθεί έτσι ένα ρεύμα από τα ηλεκτρόνια που θα κινηθούν από τον αρνητικό ακροδέκτη προς το θετικό. Την επαφή από την οποία ξεκινούν τα ηλεκτρόνια την λέμε εδώ πηγή (source) και την επαφή στην οποία καταλήγουν τη λέμε εκροή (drain). Ο ημιαγιγός αυτός έχει φυσικά ωμική συμπεριφορά και όσο αυξάνομε την τάση V, θα αυξάνεται και το ρεύμα. Κατά μήκος του αγωγού θα έχομε αύξηση του δυναμικού από την πηγή προς την εκροή.

Αν σε δύο απέναντι πλευρές του πρίσματος δημιουργήσομε δύο τμήματα P όπως φαίνεται στο σχήμα 11.10β, θα έχομε με το πρίσμα N δύο επαφές P-N. Θα δημιουργηθούν έτσι στην περιοχή των ορίων των τρημάτων P με το N περιοχές απογυμνώσεως. Το σύνολο αποτελεί ένα τρανζίστορ επιδράσεως πεδίου επαφής (JFET).

Πριν προχωρήσομε είναι χρήσιμο να πούμε ότι τα FET γενικά, αντί για πρισματική μπορεί να έχουν άλλη δομή. Π.χ. το τμήμα N να είναι ένας κύλινδρος και αντί για τα τμήματα P να υπάρχει δακτύλιος που περιβάλλει τον κύλινδρο.

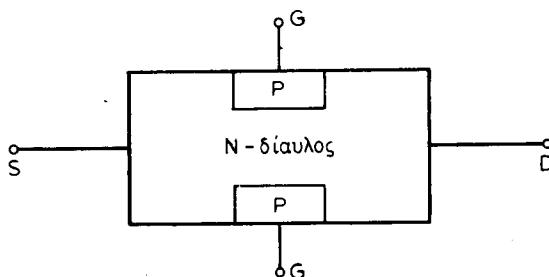
Παρακάτω για ευκολία θα θεωρούμε πρισματική την κατασκευή στα JFET (σχ. 11.10β). Και για πιο κατανοητή απεικόνιση θα χρησιμοποιήσομε στην ανάπτυξη του θέματος μια κάθετη τομή της κατασκευής αυτής (σχ. 11.10γ). Στο σχήμα σιντό ο ακροδέκτης S είναι ο ακροδέκτης της πηγής (source), ο ακροδέκτης D είναι ο ακροδέκτης της εκροής και οι ακροδέκτες G είναι οι ακροδέκτες της πύλης (gate).

Το τμήμα N λέγεται **δίσυλος** και μάλιστα στην περίπτωση του σχήματος 11.10γ έχομε δίσυλο τύπου N.



Σχ. 11.10β.

Παράσταση της κατασκευής ενός JFET.



Σχ. 11.10γ.

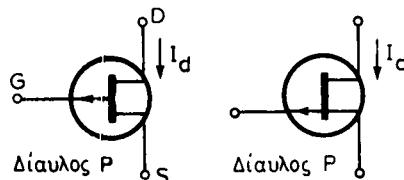
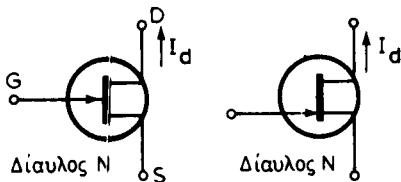
Είναι βέβαια δυνατό οι πύλες να είναι τύπου *N* και ο δίαυλος τύπου *P*.

Στην πρώτη περίπτωση έχομε JFET με δίαυλο τύπου *N*, ενώ στη δεύτερη JFET με δίαυλο τύπου *P*. Έτσι χαρακτηρίζομε άλλωστε τα FET.

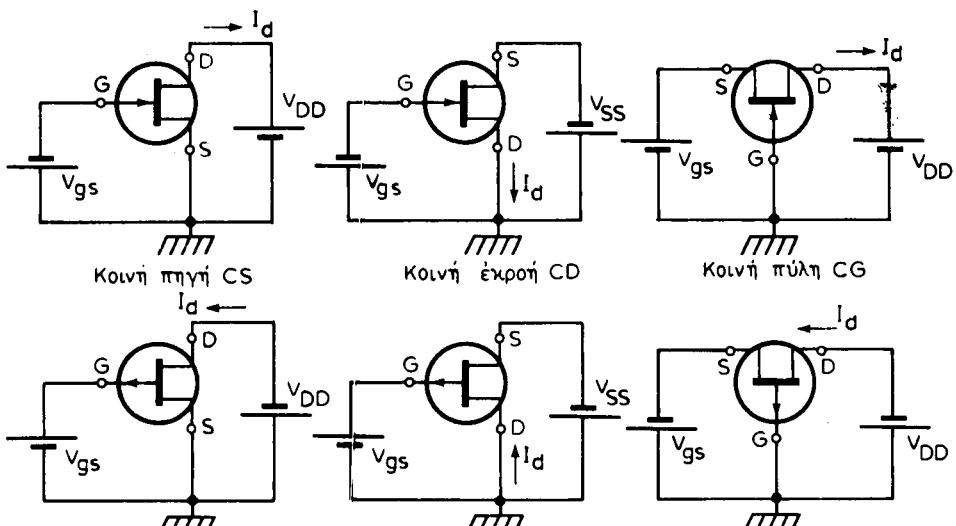
Για τη λειτουργία του JFET εφαρμόζονται δύο τάσεις: μια ανάμεσα στην πηγή και την εκροή που θα τη συμβολίζουμε  $V_{ds}$  και άλλη ανάμεσα στη πύλη και την πηγή που θα τη συμβολίζουμε με  $V_{gs}$ . Το ρεύμα του διαύλου θα το συμβολίζουμε με  $I_d$ . Η τάση πύλης-πηγής είναι συνήθως ανάστροφη. Στο σχήμα 11.10δ(α) και (β) εικονίζονται παραστατικά τρόποι συνδεσμολογίας και ο συμβολισμός JFET με δίαυλο *N* και JFET με δίαυλο *P*. Παρακάτω θα ασχοληθούμε μόνο με JFET διαύλου *N*. Ανάλογα άλλωστε ισχύουν και για JFET διαύλου *P*. Ως δυναμικό αναφοράς, δυναμικό δηλαδή που θα το θεωρούμε μηδέν, θα έχομε το δυναμικό της πηγής.

#### Τάση συσφίγξεως.

Αν συνδέσουμε την πύλη απευθείας στην πηγή ( $V_{gs} = 0$ ) και δώσουμε θετικό δυναμικό στην εκροή, τότε οι επαφές *P-N* πύλης-διαύλου θα είναι ανάστροφα πολωμένες. Αποτέλεσμα αυτής της ανάστροφης πολωμενεως θα είναι η διεύρυνση της περιοχής απογυμνώσεως στην περιοχή της επαφής *P-N*. Η διεύρυνση αυτή θα είναι πιο μεγάλη προς την πλευρά της εκροής παρά πρός την πλευρά της πηγής. Περισσότερη δε έκταση θα έχει μέσα στο χώρο του υλικού *N* παρά στο χώρο του υλικού *P*, γιατί το υλικό *P* έχει από την κατασκευή του μεγαλύτερη πυκνότητα προσμίξεων από το υλικό *N*. Αυτό γιατί και το δυναμικό της πλευράς προς την εκροή είναι μεγαλύτερο από το δυναμικό της πλευράς προς την πηγή.



(a)



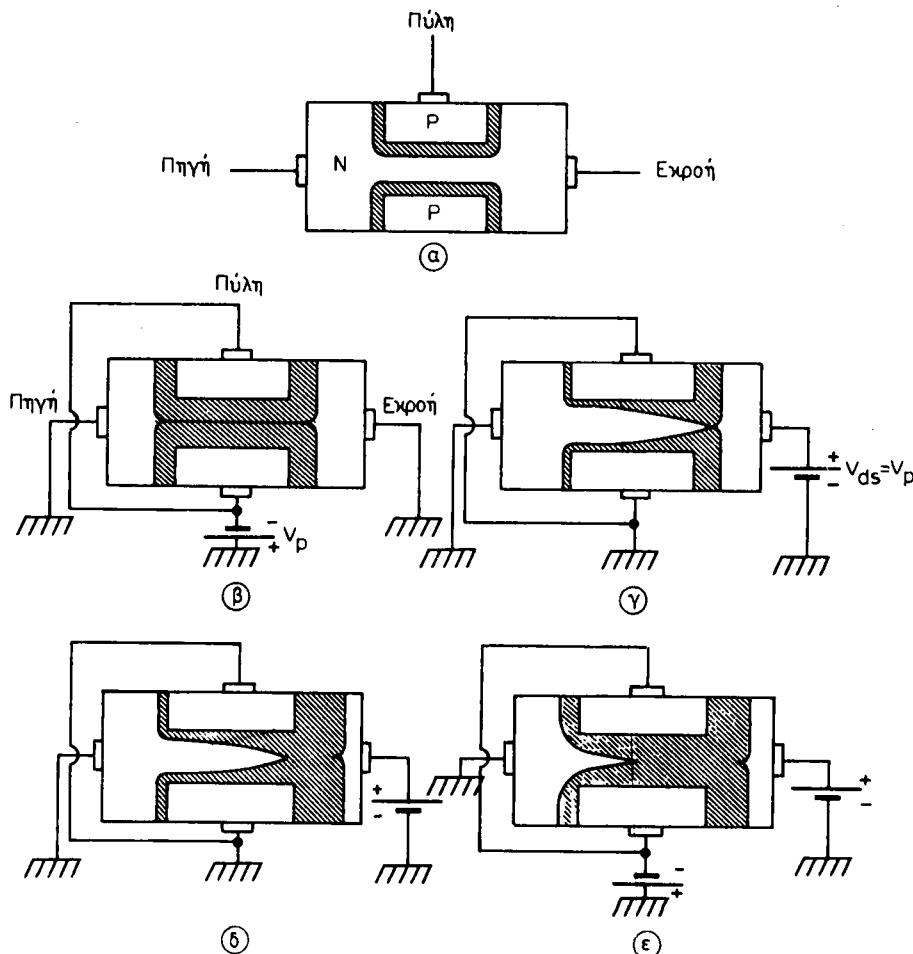
(b)

**Σχ. 11.10δ.**

α) Συμβολισμός JFET. β) Δυνατοί τρόποι συνδεσμολογίας του.

Όπως γνωρίζομε μέσα στην περιοχή απογυμνώσεως οι φορείς είναι ελάχιστοι και η αντίσταση πολύ μεγάλη. Όσο λοιπόν το δυναμικό της εκροής είναι θετικότερο, τόσο θα διευρύνεται η περιοχή απογυμνώσεως και τόσο θα αυξάνεται η αντίσταση του διαύλου (σχ. 11.10e).

Αυξάνοντας την τάση  $V_{ds}$  στην αρχή θα αυξάνεται το ρεύμα  $I_d$ . Από κάποια όμως τιμή τάσεως και πέρα όσο και αν αυξάνομε την τάση  $V_{ds}$  το ρεύμα ελάχιστα θα μεταβληθεί. Πραγματικά η διεύρυνση της περιοχής απογυμνώσεως, με την αύξηση της  $V_{ds}$ , στενεύει όλο και περισσότερο τον εύκολα αγώγιμο χώρο του διαύλου, δυσκολεύοντας πιο πολύ τη δίοδο του ρεύματος. Σε κάποια τιμή τάσεως



Σχ. 11.10ε.

Σχηματική παράσταση των μεταβολών της περιοχής απογυμνώσεως

σε ένα JFET με διάφορες τάσεις  $V_{gs}$  και  $V_{ds}$ :

α) Χωρίς τάσεις πηγής εκροής  $V_{ds}$  και πύλης  $V_{gs}$ .

β) Με τάση πηγής-εκροής 0 και τάση πύλης  $V_{gs} = V_p$ . γ) Τάση  $V_{gs} = 0$  και  $V_{ds} = V_p$ .

δ) Τάση  $V_{gs} = 0$  και  $V_{ds} > V_p$ . ε) Τάση  $V_{gs} < 0$  και  $V_{ds} >> V_p$ .

$V_{ds}$ , στην οποία συμβαίνει αυτό, οι δύο πλευρές της περιοχής απογυμνώσεως ενώνονται και φράζουν το δίαυλο.

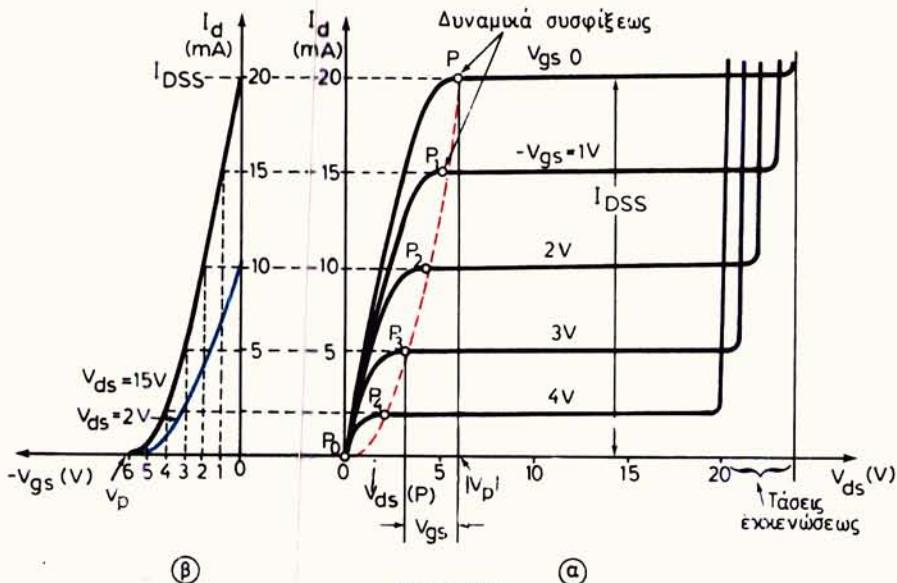
Η τάση  $V_p$  λέγεται αγγλικά **Pinch-off**. Στα ελληνικά έχει αποδοθεί με τους όρους **δυναμικό εκφορεύσεως**, **τάση στραγγαλισμού**, **τάση συσφίγξεως**. Θα κρατήσομε τον τελευταίο όρο για τα παρακάτω, αν και θα προτιμούμε να γράφουμε, όπου χρειάζεται, για την απόλυτη τιμή της τάσεως αυτής το σύμβολο  $V_p$ .

Παρά το φραγμό αυτό βέβαια ρεύμα περνάει, όπως είπαμε από το δίαυλο. Αν αυξήσομε ακόμη περισσότερο την τάση  $V_{ds}$ , θα αυξηθεί και το εύρος της περιοχής απογυμνώσεως, με αποτέλεσμα την αύξηση της αντιστάσεως του διαύλου. Η αυ-

ξηση της αντιστάσεως παρεμποδίζει την παραπέρα αύξηση του ρεύματος  $I_d$  παρόλο που η τάση  $V_{ds}$  αυξάνει. Έτσι το ρεύμα  $I_d$  μένει σχεδόν σταθερό. Από την τιμή δηλαδή  $V_p$  και πέρα η τάση  $V_{ds}$  μέχρι ορισμένα δρια ελάχιστα επηρεάζει το ρεύμα πηγής-εκροής  $I_d$ .

### a) Χαρακτηριστικές εξόδου.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, μπορούμε να χαράξουμε μια καμπύλη μεταβολής του ρεύματος  $I_d$  όταν μεταβάλλεται η τάση  $V_{ds}$ , έχοντας συνδέσει την πύλη απευθείας στην πηγή, δηλαδή  $V_{gs} = 0$ . Η καμπύλη αυτή θα είναι όπως λέμε, μια χαρακτηριστική εξόδου χαραγμένη για  $V_{gs} = 0$ . Αν τώρα συνδέσουμε μια τάση μεταξύ πύλης και πηγής, και μάλιστα ανάστροφα, και κρατώντας τη σταθερή μεταβάλλομε τη  $V_{ds}$ , θα έχουμε μια άλλη μεταβολή του ρεύματος  $I_d$  και φυσικά μία άλλη χαρακτηριστική εξόδου. Έτσι για διάφορες τιμές, σταθερές κάθε φορά, της τάσεως  $V_{gs}$  θα έχουμε ένα σμήνος χαρακτηριστικών εξόδου [σχ. 11.10στ(a)]. Η προβολή, του σημείου τομής της διακοπόμενης γραμμής με καθεμιά από τις χαρακτηριστικές, στον άξονα  $V_{ds}$  δίνει την τάση συσφίγξεως για την τιμή  $V_{gs}$  στην οποία αντιστοιχεί η χαρακτηριστική αυτή. Από το διάγραμμα των χαρακτηριστικών αυτών φαίνεται ότι όσο αρνητικότερη γίνεται η  $V_{gs}$  τόσο χαμηλότερη είναι η τάση συσφίγξεως και φυσικά τόσο μικρότερο είναι το  $I_d$ . Η τάση  $V_{ds}$  στην οποία θα συμβαίνει η σύσφιγξη κάθε φορά θα είναι  $V_{ds} = V_p - V_{gs}$ .



Σχ. 11.10στ.

Σμήνος χαρακτηριστικών JFET.

a) Εξόδου. β) Αντίστοιχη χαρακτηριστική πύλης.

Αυτό συμβαίνει γιατί όσο μεγαλύτερη είναι η ανάστροφη τάση πύλης-πηγής (αρνητικότερο δυναμικό πύλης στην περίπτωση JFET N-διαύλου) τόσο πιο εκτεταμένη είναι η περιοχή απογυμνώσεως. Η αύξηση δηλαδή της αντιστάσεως του καναλιού δεν οφείλεται μόνο στην επίδραση της τάσεως  $V_{ds}$  αλλά και στην επίδραση της τάσεως  $V_{gs}$ , με αποτέλεσμα η σύσφιγξη να γίνεται νωρίτερα, σε χαμηλότερες δηλαδή τάσεις  $V_{ds}$ .

Παρατηρούμε επίσης ότι από κάποια τιμή της  $V_{ds}$  και πάνω το ρεύμα αυξάνεται απότομα. Αυτό οφείλεται στο ότι η ανάστροφη τάση στην επαφή P-N έγινε τόση, ώστε να προκληθεί εκκένωση με συνέπεια την απότομη αύξηση του  $I_d$ . Η τάση στην οποία εκσπά η εκκένωση είναι η μεγαλύτερη τάση που επιτρέπεται να εφαρμοσθεί μεταξύ εκροής-πηγής.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό στοιχείο στο διάγραμμα αυτό είναι το ρεύμα  $I_{DSS}$ . Αυτό είναι το ρεύμα που αντιστοιχεί στο δυναμικό συσφίγξεως  $V_p$  όταν η τάση πύλης-πηγής  $V_{gs} = 0$ .

Τα JFET στα κυκλώματα πολώνονται συνήθως, έτσι, ώστε να λειτουργούν με  $V_{ds} > V_p$ . Οι χαρακτηριστικές εξόδου του JFET μοιάζουν με τις χαρακτηριστικές της πεντόδου λυχνίας κενού.

### **β) Χαρακτηριστικές πύλης.**

Μπορούμε κρατώντας τη  $V_{ds}$  σταθερή, να μεταβάλλομε την τάση πύλης - πηγής  $V_{gs}$ . Θα παρατηρήσουμε τότε ότι πάλι θα έχουμε μεταβολή του ρεύματος  $I_d$ . Χαράζομε έτσι μια χαρακτηριστική που εκφράζει τη μεταβολή του ρεύματος εκροής  $I_d$  σε συνάρτηση με την τάση  $V_{gs}$  όταν κρατάμε σταθερή την τάση πηγής - εκροής  $V_{ds}$ .

Αν άλλαξομε την τάση  $V_{ds}$ , μπορούμε, κρατώντας τη σταθερή, να χαράξομε πάλι μιαν άλλη χαρακτηριστική μεταβολής του  $I_d$  για μεταβολή της  $V_{gs}$ . Γενικά, για διάφορες σταθερές τιμές της  $V_{ds}$  χαράζομε σύνοις χαρακτηριστικών, που ονομάζονται **συμήνος χαρακτηριστικών πύλης ή χαρακτηριστικών εισόδου** [σχ. 11.10στ(β)]. Οι χαρακτηριστικές αυτές λέγονται επίσης **χαρακτηριστικές μεταφοράς**. Ωστόσο για τάσεις  $V_{ds}$  μεγαλύτερες από  $V_p$  οι χαρακτηριστικές μεταφοράς συμπίπτουν.

Για κάθε τιμή  $V_{ds}$  θα υπάρχει μια τιμή της τάσεως πύλης-πηγής  $V_{gs}$  στην οποία το ρεύμα  $I_d$  μηδενίζεται. Η τάση αυτή κάθε φορά είναι απόλυτα ίση με το  $V_p$ .

Στο σχήμα 11.10στ εικονίζεται και ο γραφικός τρόπος με τον οποίο έχει χαραχθεί η χαρακτηριστική πύλης από τις χαρακτηριστικές εξόδου. (Για  $V_{ds} = 15V$ ).

Οσα είπαμε παραπάνω ισχύουν για JFET N-διαύλου. Εντελώς ανάλογα αλλά με αντίθετες πολικότητες τάσεων και φορές ρευμάτων ισχύουν και για EFET με P-δίαυλο.

### **γ) Εξίσωση ρεύματος.**

Σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυση, το ρεύμα εκροής  $I_d$  εξαρτάται από την τάση  $V_{gs}$  και σχεδόν καθόλου από την  $V_{ds}$  για  $V_{ds} > V_p$ . Είδαμε επίσης ότι σε κάθε JFET θα υπάρχει ένα δυναμικό  $V_p$  στο οποίο για  $V_{gs} = 0$  θα αντιστοιχεί ένα ρεύμα εκροής  $I_{DSS}$ . Το  $V_p$  αυτό και συνεπώς το αντίστοιχο του  $I_{DSS}$  είναι κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του JFET.

Αποδεικνύεται ότι:

$$I_d \approx I_{DSS} \left( 1 - \frac{|V_{gs}|}{V_p} \right)^2 \quad (11.10.1)$$

Από τη σχέση 11.10.1 προκύπτει εύκολα ότι όταν  $V_{gs} = 0$ , τότε  $I_d = I_{DSS}$  και όταν  $I_d = 0$ , τότε  $|V_{gs}| = V_p$ .

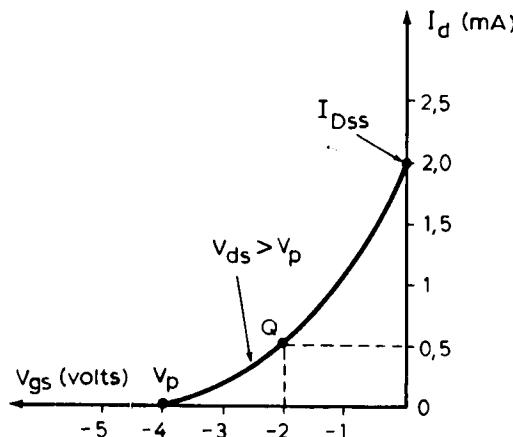
### Παράδειγμα.

Στο σχήμα 11.10ζ φαίνεται μια χαρακτηριστική πύλης ενός JFET με Ν-δίσυλο. Πόσο θα είναι το ρεύμα εκροής του για σημείο ηρεμίας  $V_{gs} = -2V$ ;

### Απάντηση.

Το  $V_p$  θα είναι ίσο με την απόλυτη τιμή της  $V_{gs}$  στην οποία μηδενίζεται το  $I_d$ . Από την χαρακτηριστική του σχήματος 11.10ζ φαίνεται ότι η τάση αυτή είναι  $V_{gs} = -4V$ . Επίσης το ρεύμα  $I_{DSS}$  για  $V_{gs} = 0$  φαίνεται ότι είναι  $I_{DSS} = 2 \text{ mA}$ . Έχοντας τώρα υπόψη ότι  $V_{gsQ} = -2V$  αντικαθιστούμε στη σχέση 11.10.1 και έχουμε:

$$I_d = 2 \text{ mA} \times \left(1 - \frac{|2V|}{|4V|}\right)^2 \Rightarrow I_d = 0,5 \text{ mA}$$



Σχ. 11.10ζ.

### 11.10.2 FET μονωμένης πύλης (IGFET).

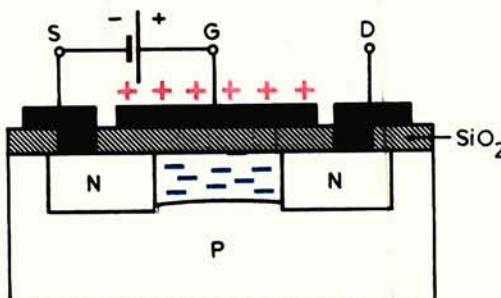
Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα τρανζίστορ MOSFET. Η λέξη MOSFET είναι τα αρχικά των λέξεων Metal Oxide Semiconductor FET. Στα MOSFET η πύλη είναι ηλεκτρικά μονωμένη από το δίσυλο με ένα στρώμα  $\text{SiO}_2$  που έχει άριστες μονωτικές ικανότητες. Παρουσιάζεται έτσι μια πολύ μεγάλη αντίσταση μεταξύ της πύλης και του διαύλου.

Τα MOSFET είναι δύο κατηγοριών: τα MOSFET προσαυξήσεως (enhancement type) και τα MOSFET διακενώσεως (depletion type).

#### a) MOSFET προσαυξήσεως.

Στο σχήμα 11.10η παριστάνεται η δομή ενός τρανζίστορ MOSFET προσαυξήσεως. Όπως φαίνεται σ' αυτό υπάρχει ένα υπόστρωμα από υλικό τύπου P με μικρής πυκνότητας προσμίξεις.

Μέσα σ' αυτό έχουν δημιουργηθεί δυο περιοχές τύπου N με μεγάλης πυκνότητας προσμίξεις. Οι περιοχές αυτές συνδέονται με τους μεταλλικούς ακροδέκτες S



Σχ. 11.10η.  
Δομή MOSFET προσαυξήσεως διαύλου N.

και D που είναι οι ακροδέκτες πηγής και εκροής αντίστοιχα. Στο επάνω μέρος υπάρχει ένα λεπτό μονωτικό στρώμα από διοξείδιο του πυριτίου και πάνω από αυτό μια μεταλλική πλάκα που συνδέεται με τον ακροδέκτη της πύλης G. Χωρίς εξωτερική τάση, ο χώρος μεταξύ της πηγής και της εκροής είναι πολύ μικρής αγωγιμότητας. Επίσης η πλάκα της πύλης και το υπόστρωμα με τό μονωτικό στρώμα ανάμεσά τους αποτελούν έναν πυκνωτή. Αν δώσουμε στον ακροδέκτη της πύλης ένα θετικό δυναμικό, η μεταλλική πλάκα της αποκτά θετικά φορτία τα οποία επάγουν αρνητικά φορτία στο χώρο του υποστρώματος P που είναι απέναντι. Έλκονται δηλαδή ηλεκτρόνια στο χώρο που είναι απέναντι από την πλάκα. Όσο θετικότερη γίνεται η πύλη, τόσο περισσότερα ηλεκτρόνια συγκεντρώνονται προς την πλευρά της. Θα φθάσει έτσι κάποια τιμή θετικού δυναμικού που η πυκνότητα των ηλεκτρονίων στο χώρο ανάμεσα στην πηγή και την εκροή θα είναι πιο μεγάλη από την πυκνότητα των οπών. Το υλικό θα έχει γίνει έτσι τύπου-N και από κάποια τιμή δυναμικού πύλης και πέρα δημιουργείται ένα αγώγιμος δίσιυλος τύπου N, έτσι ώστε αν εφαρμόσουμε θετικό δυναμικό στον ακροδέκτη της εκροής θα έχουμε την κυκλοφορία ρεύματος.

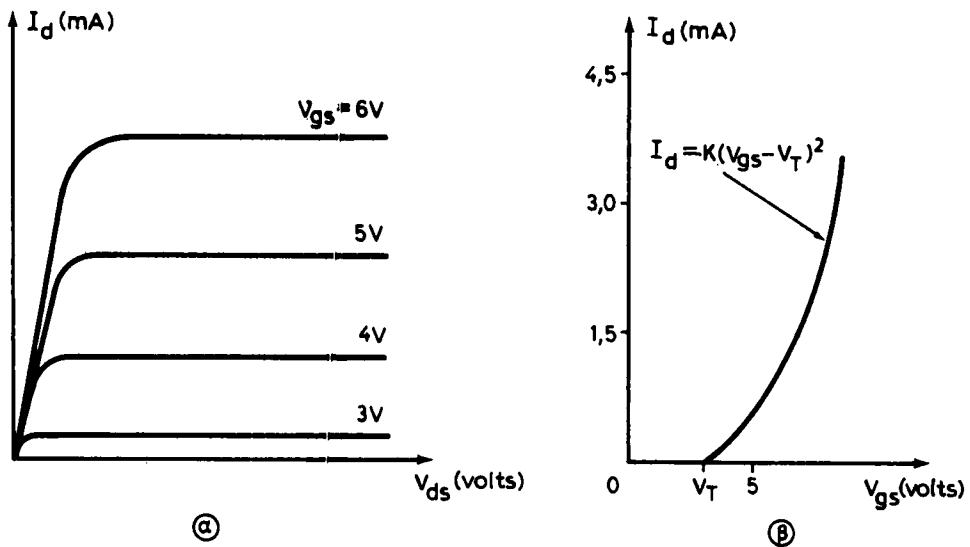
Μπορούμε έτσι πάλι να μεταβάλλομε το ρεύμα με τη μεταβολή της τάσεως πηγής-εκροής  $V_{ds}$  ή με τη μεταβολή της τάσεως πύλης-πηγής  $V_{gs}$  ή με τη μεταβολή και των δύο φυσικά. Υπάρχει μια τάση πύλης-πηγής, κάτω από την οποία δεν υπάρχει αγωγιμότητα. Το ελάχιστο αυτό δυναμικό που απαιτείται για να γίνει αγώγιμος ο χώρος από την πηγή στην εκροή, λέγεται **δυναμικό κατωφλίου** και συμβολίζεται με  $V_T$ . Το δυναμικό αυτό, συνήθως, είναι μεταξύ 2 και 4 V.

Από την προσαύξηση των ηλεκτρονίων σχετικά με τις οπές έχει πάρει την ονομασία του αυτό το FET. Δηλαδή MOSFET προσαυξήσεως διαύλου N.

Βέβαια αντί για υπόβαθρο P θα μπορούσαμε να είχαμε υπόβαθρο N, με δίσιυλο P, οπότε οι πολικότητες θα ήταν αντιστραμένες. Αυτών των τελευταίων μάλιστα η κατασκευή είναι ευκολότερη.

Αφού για  $V_{gs} = 0$  δεν υπάρχει πρακτικά ρεύμα  $I_d$ , σημαίνει ότι δεν υπάρχει και τιμή του I.

Στο σχήμα 11.10θ(α) και (β) φαίνονται οι χαρακτηριστικές MOSFET προσαυξήσεως με δίσιυλο N. Παρατηρούμε ότι στίς χαρακτηριστικές εξάδου [σχ. 11.10θ(α)] υπάρχει κόρος, που οφείλεται στη μείωση του εύρους του διαύλου (μέχρι μηδενισμό) προς την πλευρά της εκροής. Στη χαρακτηριστική πύλης [σχ. 11.10θ(β)] σημειώνεται και το δυναμικό κατωφλίου  $V_T$ . Η MOSFET προσαυξήσεως είναι πολύ



Σχ. 11.100.  
Χαρακτηριστικές MOSFET προσαυξήσεως διαύλου N.  
α) Εξόδου. β) Εισόδου.

χρήσιμη στα ολοκληρωμένα κυκλώματα.

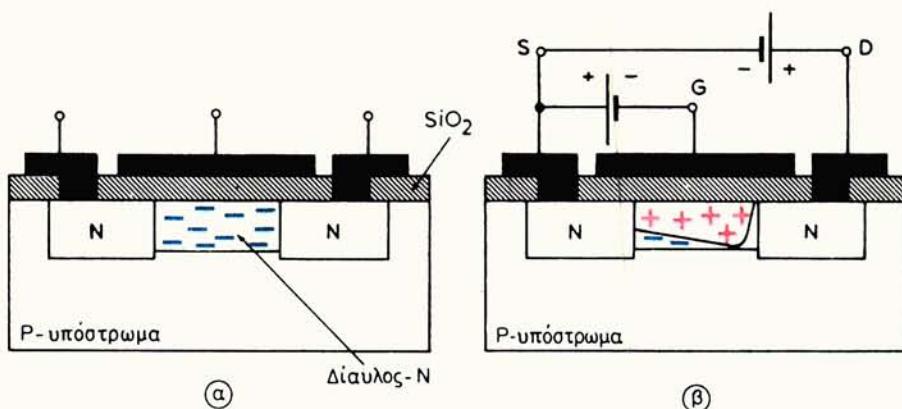
Χαρακτηριστικό αυτού του τύπου FET είναι ότι η πύλη έχει ομώνυμο δυναμικό με την εκροή. Το ρεύμα του διαύλου  $I_d$  δίνεται από τη σχέση  $I_d = K(V_{gs} - V_T)^2$  όπου  $K$  είναι σταθερά που εξαρτάται από την κατασκευή του MOSFET. Τυπική τιμή  $K = 0,3 \text{ mA/V}^2$ . Η εξίσωση ισχύει για  $|V_{gs}| > |V_T|$ .

### β) MOSFET διακενώσεως.

Η γενική κατασκευή αυτών των MOSFET είναι όμοια με των FET προσαυξήσεως, με τη διαφορά ότι σ' αυτά υπάρχει, από την κατασκευή, αγώγιμος δίσιαλος ανάμεσα στην πηγή και την εκροή [σχ. 11.101(a) και (β)].

Στο σχήμα αυτό εικονίζεται η δομή ενός FET διακενώσεως με δίσιαλο N. Η ζώνη που βρίσκεται ανάμεσι στους πόλους S και D είναι αγώγιμη και αποτελεί το δίσιαλο. Η μεταλλική πλάκα και ο δίσιαλος με το διαχωριστικό μονωτικό στρώμα του  $\text{SiO}_2$  αποτελούν έναν πυκνωτή. Αν δώσουμε ένα, έστω αρνητικό, δυναμικό στην πύλη, αν δηλαδή  $V_{gs} < 0$  τότε τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του διαύλου θα απωθηθούν μακριά από το χώρο των απέναντι από την πλάκα του διαύλου και θα δημιουργηθεί έτσι μια περιοχή απογυμνώσεως που στενεύει τον αγώγιμο δίσιαλο και δυσκολεύει τη δίσιο των ηλεκτρονίων από την πηγή στην εκροή, μειώνοντας έτσι το ρεύμα  $I_d$ . Βέβαια στη δημιουργία της περιοχής απογυμνώσεως συνεργάζεται και η τάση εκροής-πηγής  $V_{ds}$ . Γι' αυτό και η περιοχή απογυμνώσεως είναι ευρύτερη προς την πλευρά της εκροής. Για μια στάθερη τάση  $V_{gs}$ , από κάποια τιμή του δυναμικού  $V_{ds}$  και πέρα θα έχομε πάλι κόρο για τους ίδιους λόγους που είπαμε στην ανάπτυξη της λειτουργίας της JFET. Επίσης, αν κρατώντας το  $V_{ds}$  σταθερό, κάνομε το  $V_{gs}$  αρνητικότερο σε κάποια τιμή του  $|V_{gs}| = V_p$  το ρεύμα θα μηδενισθεί.

Αν όμως δώσουμε στο δυναμικό της πύλης θετική τιμή, τότε τα ηλεκτρόνια του



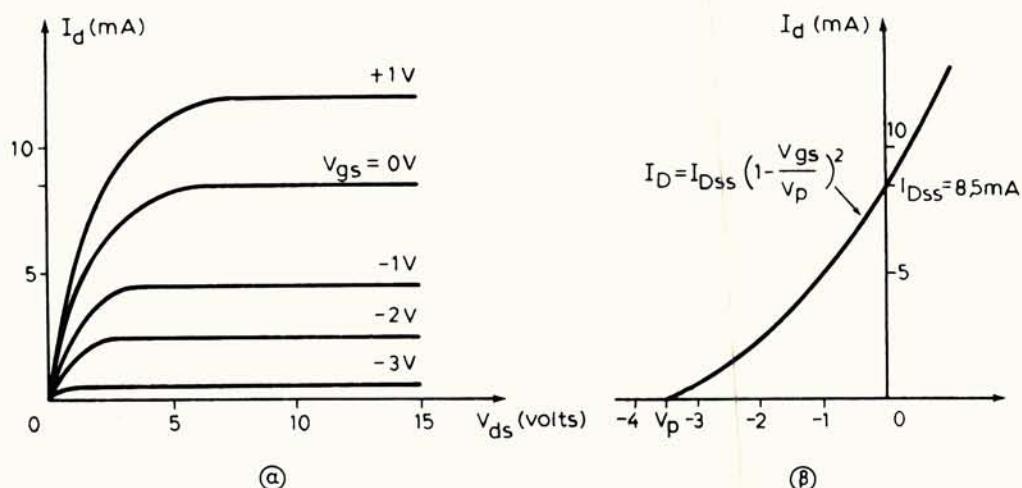
Σχ. 11.10ι.  
Τομή MOSFET διακενώσεως.  
α) Χωρίς τάσεις. β) Με τάσεις.

διαύλου θα αυξηθούν, γιατί θα υπάρξει έλξη εξ επαγγής από τη θετική τώρα πλάκα της πύλης και άλλων ηλεκτρονίων από το P υπόστρωμα. Το FET τώρα λειτουργεί σαν FET προσαυξήσεως.

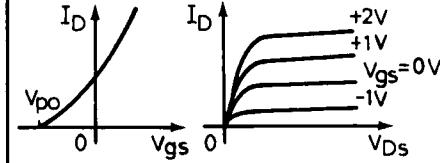
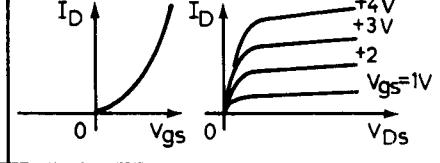
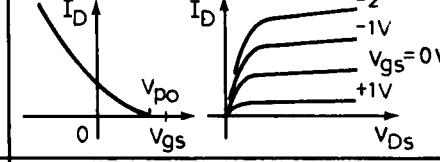
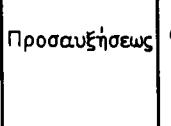
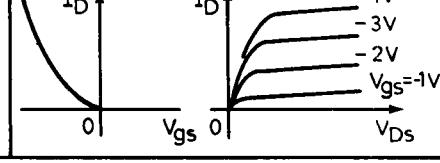
Βλέπομε δηλαδή ότι το FET διακενώσεως με δίαυλο N για τάσεις  $V_{gs}$  αρνητικές λειτουργεί ως FET διακενώσεως ή ως JFET, ενώ για τάσεις  $V_{gs}$  θετικές λειτουργεί ως FET προσαυξήσεως.

Στο σχήμα 11.10ια(α) και (β) φαίνονται οι καμπύλες εισόδου και εξόδου ενός FET διακενώσεως.

Υπάρχουν και MOSFET που αντί για μια πύλη έχουν δύο. Στη μια συνδέεται το σήμα, ενώ η άλλη παίρνει ένα σταθερό δυναμικό.



Σχ. 11.10ια.  
Χαρακτηριστικές MOSFET διακενώσεως διαύλου Ν.  
α) Εξόδου. β) Εισόδου.

MOS FET	Συμβολισμός	Τυπικές χαρακτηριστικές
Δίαυλος Τύπου N	Διαχεινώσεως 	
	Προσαυξήσεως 	
Δίαυλος Τύπου P	Διαχεινώσεως 	
	Προσαυξήσεως 	

Σχ. 11.10ιβ.  
Συμβολισμός και χαρακτηριστικές διαφόρων τύπων MOSFET.

Στο σχήμα 11.10ιβ φαίνονται οι συμβολισμοί των διαφόρων τύπων MOSFET και οι μορφές των αντιστοίχων χαρακτηριστικών εισόδου και εξόδου.

### γ) Παράμετροι των FET.

Τα μεταβλητά μεγέθη σε ένα FET είναι το ρεύμα εκροής  $I_d$  η τάση εκροής-πηγής  $V_{ds}$  και η τάση πύλης-πηγής  $V_{gs}$ . Όταν μεταβάλλομε ένα από αυτά, κρατώντας ένα άλλο σταθερό, θα μεταβάλλεται το τρίτο. Αυτό όπως έχομε ξαναδεί εκφράζεται π.χ. με μια σχέση (συνάρτηση) της μορφής:

$$I_d = f(V_{gs}, V_{ds}) \quad (11.10.2)$$

που εκφράζει τη μεταβολή του ρεύματος  $I_d$  όταν μεταβάλλονται οι τάσεις  $V_{gs}$  και  $V_{ds}$ .

Με βάση τη συνάρτηση προσδιορίζομε τις παραμέτρους ενός FET. Οι παράμετροι αυτές, που προσδιορίζονται για μικρές μεταβολές των μεγεθών  $I_d$ ,  $V_{gs}$ , και  $V_{ds}$ , είναι:

#### 1. Διαγωγμότητα ( $g_m$ ).

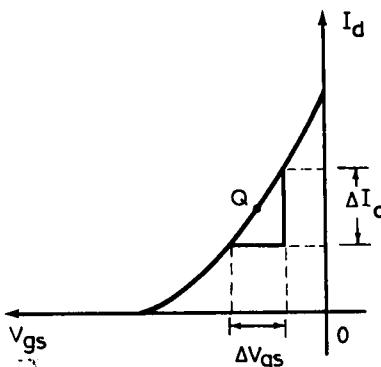
Αν κρατώντας την  $V_{ds}$  σταθερή, μεταβάλλομε την  $V_{gs}$  κατά  $\Delta V_{gs}$ , θα μετα-

βληθεί το ρεύμα  $I_d$  κατά  $\Delta I_d$ . Το πηλίκο:

$$g_m = \frac{\Delta I_d}{\Delta V_{gs}} / V_{ds} = \text{σταθερό} > V_P \quad (11.10.3)$$

είναι η διαγωγιμότητα του FET.

Αυτή μπορεί να υπολογισθεί με γραφική μέθοδο από τη χαρακτηριστική πύλη δύναμης εικονίζεται στο σχήμα 11.10ιγ.



Σχ. 11.10ιγ.  
Χαρακτηριστική πύλης.

Η τιμή της διαγωγιμότητας εξαρτάται από τη θέση του σημείου λειτουργίας που τη μετράμε. Συνήθως το σημείο αυτό είναι το σημείο ηρεμίας  $Q$ .

Αν ο κατασκευαστής δίνει τη διαγωγιμότητα  $g_{m_0}$  για κάποιο σημείο ηρεμίας με  $V_{gs} = 0$  και  $V_{ds} > V_P$ , μπορούμε να υπολογίσουμε τη διαγωγιμότητα  $g_m$  σε οποιοδήποτε άλλο σημείο λειτουργίας για το οποίο το ρεύμα εκροής θα είναι  $I_d$ , από τη σχέση:

$$g_m = g_{m_0} \left( 1 - \frac{|V_{gs}|}{V_P} \right)$$

ή σε συνδυασμό με τη σχέση 11.10.1:

$$g_m = g_{m_0} \sqrt{\frac{I_d}{I_{DSS}}} \quad (11.10.4)$$

Η διαγωγιμότητα δίνεται συνήθως σε mA/V ή mmhos. Τυπικές τιμές της κυμαίνονται από 0,5 ως 30 mA/V.

## 2. Δυναμική αντίσταση εκροής ( $r_d$ ).

Αν κρατώντας την τάση  $V_{gs}$  σταθερή, μεταβάλλομε την τάση  $V_{ds}$  κατά  $\Delta V_{ds}$ , θα μεταβληθεί το ρεύμα εκροής κατά  $\Delta I_d$ . Το πηλίκο:

$$r_d = \frac{\Delta V_{ds}}{\Delta I_d} / V_{gs} = \text{σταθερό} \quad (11.10.5)$$

δίνει τη δυναμική αντίσταση ( $r_d$ ) εκροής του FET. Τυπικές τιμές της αντιστάσεως  $r_d$  είναι αρκετές δεκάδες kΩ.

### 3. Συντελεστής ενισχύσεως ( $\mu$ ).

Αν μεταβάλλομε την τάση  $V_{ds}$  κατά  $\Delta V_{ds}$ , θα μεταβληθεί το ρεύμα εκροής  $I_d$ . Για να παραμείνει το  $I_d$  αμετάβλιτο, πρέπει να μεταβληθεί κατάλληλα το  $V_{gs}$  κατά  $\Delta V_{gs}$ .

$$\text{Το πηλίκο: } \mu = \frac{\Delta V_{gs}}{\Delta V_{ds}} \quad / \text{για } I_d = \text{σταθερό} \quad (11.10.6)$$

δίνει το συντελεστή ενισχύσεως του FET.

Ο μ είναι αδιάστατο μέγεθος με τυπικές τιμές μερικών δεκάδων. Οι παράμετροι συνδέονται μεταξύ τους με τη σχέση:

$$\mu = g_m \cdot r_d \quad (11.10.7)$$

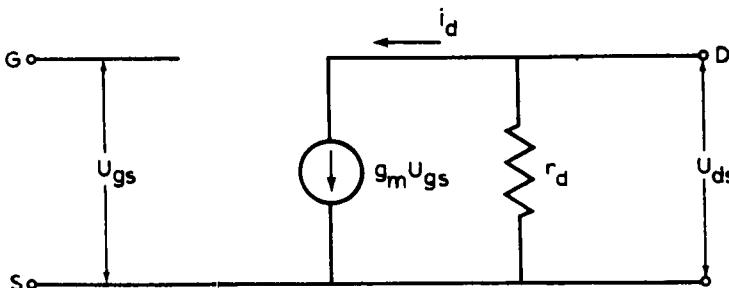
### 11.10.3 Ισοδύναμα κυκλώματα FET.

Σύμφωνα με τον ορισμό των παραμέτρων, και αν θεωρήσουμε ότι οι μικρές μεταβολές των τάσεων και του ρεύματος είναι ημιτονικές καὶ ότι η στιγμιαία μεταβολή συμπίπτει με τη στιγμιαία τιμή των εναλλασσομένων συνιστωσών, έχομε:

$$i_d = g_m U_{gs} + \frac{1}{r_d} U_{ds}$$

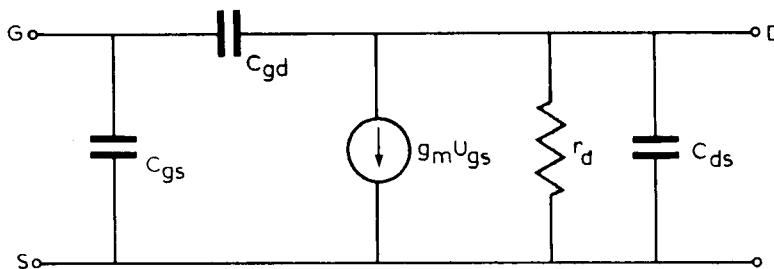
όπου  $i_d$  η στιγμιαία τιμή της εναλλασσόμενης συνιστώσας του ρεύματος εκροής, η  $U_{gs}$ , και  $U_{ds}$  οι στιγμιαίες τιμές των εναλλασσομένων συνιστωσών τάσεως πύλης - πηγής και εκροής αντίστοιχα.

Με βάση την (11.10.8) μπορούμε να δώσουμε ένα ισοδύναμο για τα FET, με την προϋπόθεση ότι τα εναλλασσόμενα μεγέθη είναι χαμηλής συχνότητας. Το ισοδύναμο αυτό φαίνεται στο σχήμα 11.10ιδ.



Σχ. 11.10ιδ.  
Ισοδύναμο κύκλωμα JFET.

Για τις υψηλές συχνότητες οπου αρχίζουν και υπολογίζονται οι διάφορες χωρητικότητες στα FET, δημιουργώντας προβλήματα στην ανάπτυξη των έπιδόσεών τους, θα έχουμε ένα τροποποιημένο ισοδύναμο όπως στο σχήμα 11.10ιε και όπου  $C_{gs}$  η χωρητικότητα πύλης-πηγής,  $C_{gd}$  η χωρητικότητα πύλης-εκροής και  $C_{ds}$  η χωρητικότητα εκροής-πηγής.



Σχ. 11.10ie.  
Ισοδύναμο κύκλωμα FET για την ύψηλή συχνότητα.

#### 11.10.4 Συγκριτικά χαρακτηριστικά FET.

Οι FET έχουν μικρότερη ενίσχυση τάσεως, αλλά πολύ μεγαλύτερη ενίσχυση ισχύος από τα τρανζίστορ επαφής. Η αντίσταση εξόδου τους σε κύκλωμα με προσγειωμένη πηγή είναι πολύ μεγάλη και συγκρίσιμη με την αντίσταση εξόδου ενός τρανζίστορ επαφής με κοινή βάση.

Λειτουργούν σε χαμηλότερες συχνότητες από τα τρανζίστορ. Έχουν όμως μικρότερο θόρυβο και μεγαλύτερη σταθερότητα στις μεταβολές της θερμοκρασίας.

Σημαντική διαφορά από τα τρανζίστορ επαφής έχουν στην αντίσταση εισόδου που είναι πολύ μεγαλύτερη στα FET. Σε MOSFET είναι περίπου  $10^{15} \Omega$  και είναι μεγαλύτερη και από αυτή των JFET. Οι χωρητικότητες επίσης πύλης-πηγής ( $C_{gs}$ ) και πύλης-εκροής ( $C_{gd}$ ) είναι μικρότερες στα MOSFET από ό,τι στα JFET. Τα MOSFET επίσης μπορούν να εργάζονται σε υψηλότερες συχνότητες από τα JFET.

Τα MOSFET δημιουργούνται πολύ ευκολότερα από τα τρανζίστορ επαφής στα ολοκληρωμένα κυκλώματα.

Τα FET είναι διατάξιες τάσεως όπως και οι λυχνίες κενού και όχι διατάξιες ρεύματος όπως τα τρανζίστορ επαφής.

Δηλαδήρεύμα εξόδου τους ρυθμίζεται με μεταβολή της τάσεως εισόδου, ενώ στα τρανζίστορ επαφής το ρεύμα εξόδου εξαρτάται και ρυθμίζεται από το ρεύμα εισόδου.

#### Έφαρμογή 1.

Για το κύκλωμα του σχήματος 11.10ιστ δίνονται  $I_{DSS} = 8 \text{ mA}$ ,  $V_p = -3 \text{ V}$ ,  $V_{DD} = 30 \text{ V}$  και  $(R_D + R_s) = 4000 \Omega$ .

Να βρεθεί η τιμή  $R_s$  ετσι, ώστε το σημείο ηρεμίας να είναι  $I_{dQ} = 2 \text{ mA}$ . Να τοποθετηθεί το σημείο ηρεμίας σε διάγραμμα της ευθείας φόρτου.

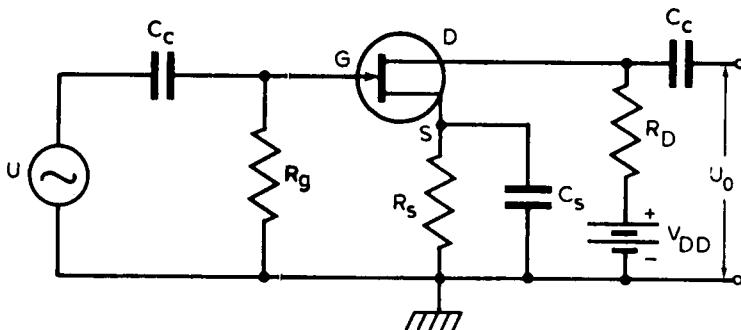
#### Απάντηση.

a) Από την εξίσωση:

$$I_{dQ} = I_{DSS} \left( 1 - \frac{|V_{gs}|}{V_p} \right)^2 \quad (11.10.9)$$

υπολογίζομε τη  $V_{gs}$  που είναι:

$$|V_{gs}| = V_p \left( 1 - \sqrt{\frac{I_{dQ}}{I_{DSS}}} \right) \quad (11.10.10)$$



Σχ. 11.10ιστ.

$$\text{και } |V_{gs}| = 3V \left(1 - \sqrt{\frac{2 \text{ mA}}{8 \text{ mA}}}\right) \Rightarrow |V_{gs}| = 3V \times \frac{1}{2} \Rightarrow |V_{gs}| = 1.5 \text{ V}$$

Η τάση  $V_{gs} = -1.5 \text{ V}$ .

Αυτή η τάση δημιουργείται με την αυτοπόλωση, με τη βοήσεια των αντιστάσεων  $R_s$  και  $R_g$ .

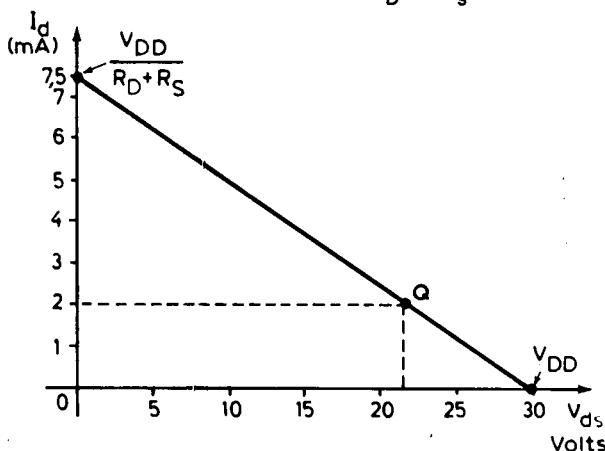
Η τάση  $V_{gs}$  θα υπολογισθεί από την πτώση τα έως που δημιουργεί το ρεύμα  $I_{dQ}$  στην  $R_s$ . Θα είναι δηλαδή:

$$|V_{gs}| = I_{dQ} \cdot R_s \Rightarrow R_s = \frac{|V_{gs}|}{I_{dQ}}$$

$$= \frac{1.5 \text{ V}}{2 \times 10^{-3} \text{ A}} \Rightarrow R_s = 750 \Omega \quad (11.10.11)$$

Η ευθεία φόρτου χαράζεται όπως γνωρίζομε ανάμεσα σε δυο σημεία. Το ένα είναι επάνω στον άξονα των τάσεων και είναι αυτό που  $V_{ds} = V_{DD}$  και το άλλο, στον άξονα των ρευμάτων και είναι το (σχ. 11.10ιζ):

$$I_d = \frac{V_{DD}}{R_D + R_s}$$



Σχ. 11.10ιζ.

Αυτά προκύπτουν από την εξίσωση 11.10.13.

Για το κύκλωμα εκροής-πηγής, που καταστρώνεται σύμφωνα με τους κανόνες του Kirchoff, έχομε:

$$V_{DD} = V_{ds} + I_d R_s + I_d R_D \quad (11.10.12)$$

$$\text{ή} \quad I_d = \frac{V_{DD}}{R_s + R_D} - \frac{1}{R_s + R_D} V_{ds} \quad (11.10.13)$$

Αν  $I_d = 0$  (σημεία στον άξονα  $V_{ds}$ ), από την 11.10.13 θα έχομε:

$$\frac{V_{DD}}{R_s + R_D} = \frac{1}{R_s + R_D} V_{ds} \Rightarrow V_{DD} = V_{ds}$$

Στην περίπτωσή μας  $V_{DD} = 30 \text{ V}$ .

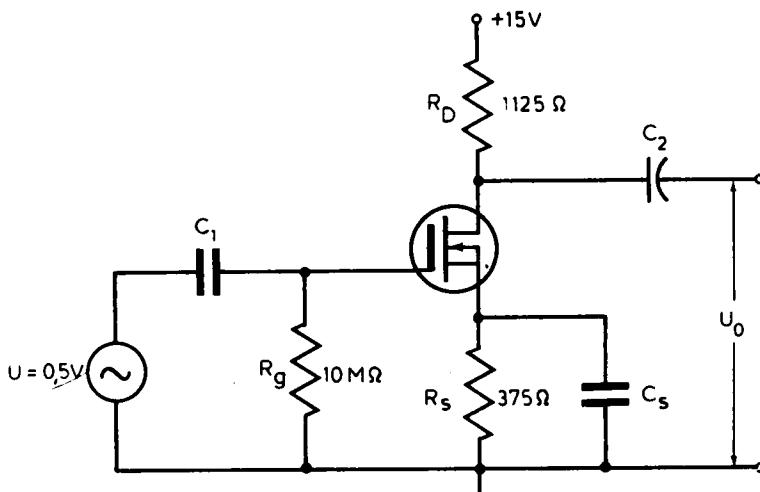
Αν τώρα στην 11.10.13 θέσομε  $V_{ds} = 0$  (σημεία στον άξονα  $I_D$ ), θα έχομε:

$$I_d = \frac{V_{DD}}{R_s + R_D} \quad \text{έδω} \quad I_d = \frac{30 \text{ V}}{4000 \Omega} = 7,5 \text{ mA}$$

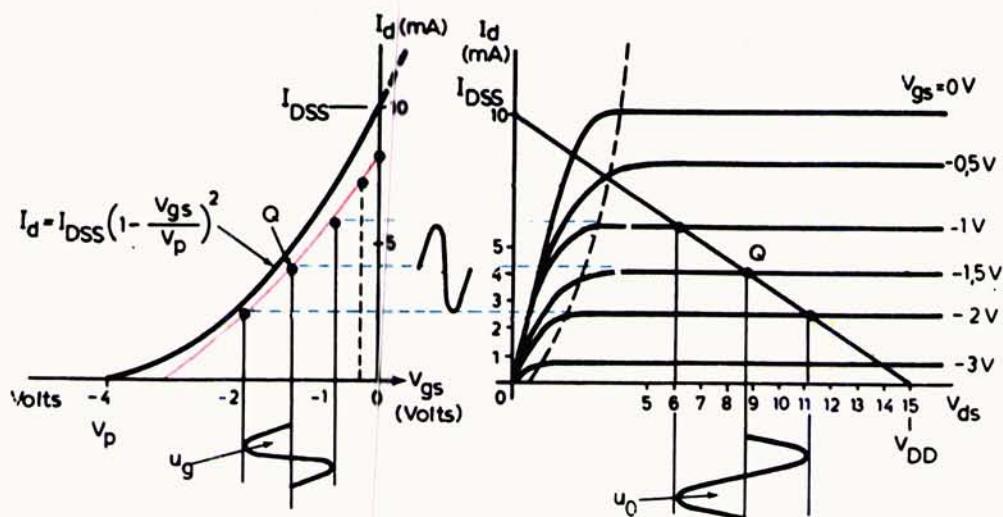
Ενώνοντας τα σημεία  $V_{DD} = 30 \text{ V}$  και  $I_d = 7,5 \text{ mA}$  χαράζομε την ευθεία φόρτου. Το σημείο ηρεμίας Q θα ορίζεται από την τομή μιας ευθείας παράλληλης προς τον άξονα  $V_{ds}$  που θα αρχίζει από σημείο του άξονα και της ευθείας φόρτου.

## Εφαρμογή 2.

Στο κύκλωμα του σχήματος 11.10ιη δίνονται οι χαρακτηριστικές  $I_d = f(V_{ds})$  του σχήματος 11.10ιη. Να σχεδιασθεί η δυναμική χαρακτηριστική και να βρεθεί πόση θα είναι η ενίσχυση τάσεως αν στην είσοδο της MOSFET τεθεί ημιτονική τάση πλάτους  $U_m = 0,5 \text{ V}$ . Οι αντιστάσεις των πυκνωτών  $C_1, C_2$  στη συχνότητα των τάσεων λειτουργίας να θεωρηθούν αμελητέες. Πόλωση πύλης  $V_{gs} = -15 \text{ V}$ .



Σχ. 11.10ιη.



Σχ. 11.10θ.

Για το κύκλωμα του σχήματος χαράζομε την ευθεία φόρτου με  $R_D + R_S = 1500 \Omega$  και  $V_{DD} = 15 \text{ V}$  (σχ. 11.10ιθ). Από την ευθεία φόρτου σχεδιάζομε τη δυναμική χαρακτηριστική της διατάξεως στο διάγραμμα της χαρακτηριστικής πύλης. Το σημείο ηρεμίας Q θα είναι επάνω στην τομή της ευθείας φόρτου με τη χαρακτηριστική  $V_{gs} = -1.5 \text{ V}$ . Αυτό είναι  $I_{dQ} = 4 \text{ mA}$  και  $V_{dsQ} = 8.5 \text{ V}$ .

Αν τώρα δώσουμε μια εναλλαγή  $U_g$  της τάσεως στην είσοδο πλάτους  $0.5 \text{ V}$ , τότε η τάση  $V_{gs}$  θα παίρνει εναλλακτικά μέγιστη και ελάχιστη τιμή  $-1\text{V}$  και  $-2\text{V}$ , που θα αντιστοιχούν σε τάσεις  $V_{ds}$ ,  $6\text{V}$  και  $11\text{V}$ . Μια εναλλαγή δηλαδή  $U_g$  πλάτους  $0.5 \text{ V}$  στην τάση  $V_{gs}$  θα δίνει μια εναλλαγή  $U_0$  πλάτους  $2.5\text{V}$  στην τάση  $V_{ds}$ . Και μάλιστα οταν η τάση  $U_g$  στην πύλη γίνεται αρνητικότερη, η τάση  $U_0$  στην έξοδο γίνεται θετικότερη. Υπάρχει δηλαδή ανάμεσά τους μια διαφορά φάσεως  $180^\circ$ . Το πηλίκο:

$$A_v = \frac{U_0}{U_g}$$

μας δίνει την ενίσχυση  $A_v$  της βαθμίδας και θα είναι:

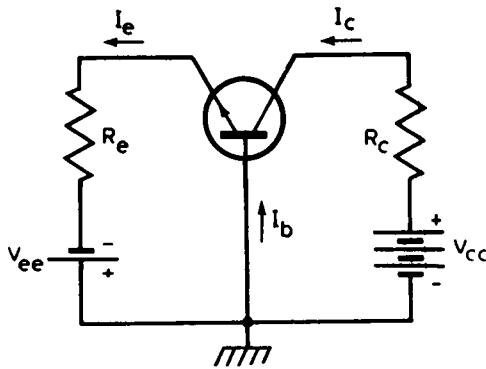
$$A_v = - \frac{2.5\text{V}}{0.5 \text{ V}} = - 5$$

Το πλήν μπροστά συμβολίζει τη διαφορά φάσεως  $180^\circ$ . Μπορούμε επίσης να γράψουμε:

$$\beta a_v = 5 \cdot 180^\circ$$

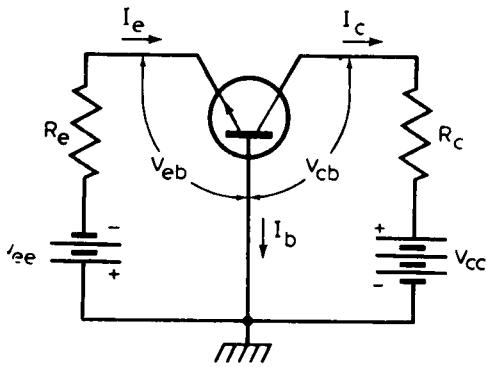
### 11.11 Ασκήσεις.

- Στο κύκλωμα του σχήματος 11.11a,  $V_{ee} = 10.7 \text{ V}$  και  $R_e = 500 \Omega$ . Ποιό θα είναι το ρεύμα  $I_e$  του εκπομπού;
  - Αν το τρανζίστορ είναι Ge.
  - Αν το τρανζίστορ είναι πυριτίου.
- Σε ένα τρανζίστορ, όταν το ρεύμα του εκπομπού είναι  $I_e = 10 \text{ mA}$ , το ρεύμα του συλλέκτη είναι

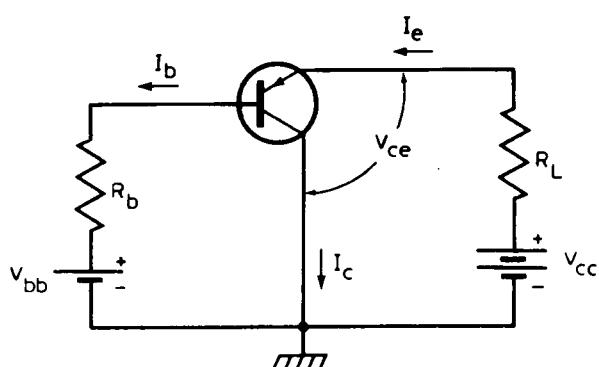


Σχ. 11.11α.

- $I_c = 9.9 \text{ mA}$ . Ποιά θα είναι κατά προσέγγιση τη τιμή της παραμέτρου  $h_{fe}$  του τρανζίστορ;
3. Τρανζίστορ έχει  $\alpha = 0.987$  και ανάστροφο ρεύμα συλλέκτη  $2 \mu\text{A}$ . Υπολογίστε το ρεύμα του συλλέκτη και το ρεύμα της βάσεως, δόταν το ρεύμα του εκπομπού είναι  $I_e = 1 \text{ mA}$ .
  4. Ένα τρανζίστορ έχει  $\alpha = 0.98$  και συχνότητα αποκοπής  $f_a = 10 \text{ MHz}$ . Ποιά θα είναι η συχνότητα αποκοπής  $\beta, f_\beta$ ;
  5. Στο κύκλωμα του σχήματος 11.11β είναι  $V_{ee} = 10 \text{ V}$ ,  $V_{cc} = 10 \text{ V}$ ,  $R_c = 4 \text{ k}\Omega$ ,  $V_{eb} = 0.7 \text{ V}$  και  $\alpha = 0.98$ . Να βρεθούν τα  $I_c$ ,  $I_e$  και η τιμή της  $R_e$  δόταν  $V_{cb} = 5 \text{ V}$ .

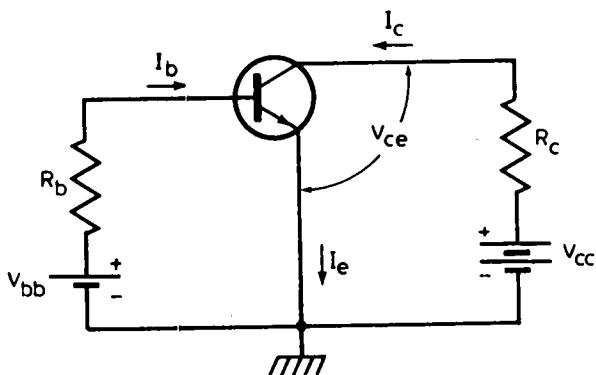


Σχ. 11.11β.

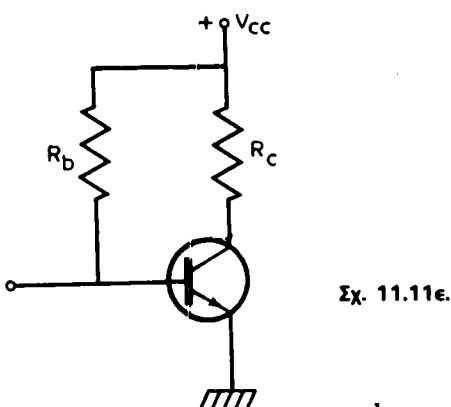


Σχ. 11.11γ.

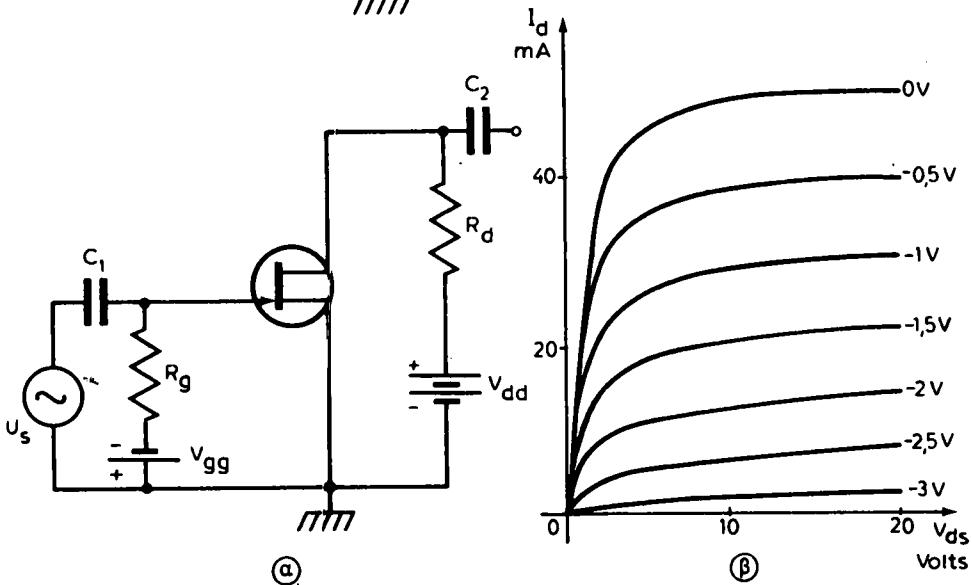
6. Στο κύκλωμα του σχήματος 11.11γ,  $V_{bb} = 3.5 \text{ V}$ ,  $V_{ee} = 6 \text{ V}$ ,  $R_b = 10 \text{ k}\Omega$  και  $R_L = 200 \Omega$ . Το τρανζίστορ είναι πυριτίου και έχει  $\beta = 39$ . Να βρεθούν τα ρεύματα βάσεως  $I_b$ , εκπομπού  $I_e$ , και συλλέκτη  $I_c$ . Επίσης η τάση  $V_{ce}$ .
7. Στο κύκλωμα του σχήματος 11.11δ. Να βρεθούν: το ρεύμα  $I_c$  και η τάση  $V_{ce}$ , αν  $I_b = 50 \mu\text{A}$ ,  $V_{cc} = 10 \text{ V}$  και  $R_c = 800 \Omega$ . Δίνεται ότι  $\alpha = 0.987$ .
8. Αν στο κύκλωμα του σχήματος 11.11ε  $V_{cc} = 12 \text{ V}$ ,  $R_b = 1 \text{ M}\Omega$  και  $R_c = 12 \text{ k}\Omega$ , να βρεθεί η ελάχιστη τιμή του  $\beta$  που απαιτείται για να έλθει το τρανζίστορ στον κόρο.
9. Στο κύκλωμα του σχήματος 11.11στ (α),  $V_{dd} = 20 \text{ V}$ ,  $R_d = 500 \Omega$ ,  $V_{gg} = -1.5 \text{ V}$ ,  $R_g = 1 \text{ M}\Omega$  και  $U_s = 1 \text{ V}$ . Δίνονται και οι χαρακτηριστικές [σχ. 11.11στ (β)]. Σχεδιάστε τη δυναμική χαρακτηριστική και με τη βοήθεια της βρείτε πόση θα είναι η τάση στην έξοδο 0. Οι αντιστάσεις των πυκνωτών  $C_1$  και  $C_2$  στη συχνότητα της πηγής  $U_s$  είναι αμελητέες.



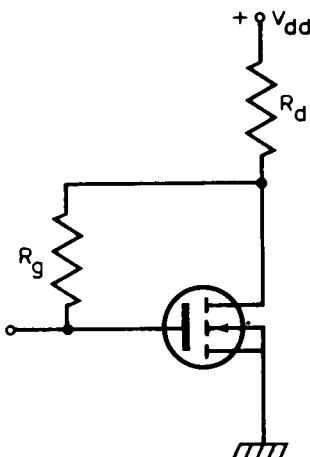
Σχ. 11.11δ.



Σχ. 11.11ε.



Σχ. 11.11στ.



Σχ. 11.11ζ

10. Για τη MOSFET προσσυξήσεως διαύλου N του σχήματος 11.11ζ δίνονται:  $V_T = 4 \text{ V}$ ,  $I_{ds} = 7,2 \text{ mA}$ , όταν  $V_{gs} = 10 \text{ V}$ . Για  $V_{dd} = 24 \text{ V}$  και  $R_g = 100 \text{ M}\Omega$  του κυκλώματος. Ποια πρέπει να είναι η τιμή της  $R_d$  για να είναι  $V_{ds} = 8 \text{ V}$ ; (το ρεύμα πύλης είναι μηδέν).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΩΔΕΚΑΤΟ

### ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

#### 12.1 Γενικά.

Οι τεχνολογικές εξελίξεις και η ευρεία διάδοση στις εφαρμογές των ηλεκτρονικών δημιούργησαν την επιτακτική ανάγκη της κατασκευής διατάξεων με μικρό όγκο, μικρό βάρος, ευχέρεια συναρμολογήσεως αλλά και χαμηλό κόστος.

Έγιναν διάφορες προσπάθειες με τη σμίκρυνση των εξαρτημάτων, την πυκνή τοποθέτησή τους στο χώρο, την ενσωμάτωση δυο ή και περισσοτέρων στο ίδιο περίβλημα, τον περιορισμό των διαστάσεων των αγωγών και των επαφών κ.ά. Οι προσπάθειες δύνανται αυτές οδήγησαν σε αδιέξοδο ως προς το μέγεθος των διακρίτων εξαρτημάτων. Το ενδιαφέρον στράφηκε στην αντικατάσταση διακρίτων εξαρτημάτων από σύνολα' όπου μέσα τους δεν θα υπάρχουν διάκριτα τα εξαρτήματα. Αναπτύχθηκε έτσι η τεχνική της μικροσμικούρναστεως (*miniatirization*) που έχει οδηγήσει σήμερα στην κατασκευή καταπληκτικών, στο μικρό τους μέγεθος, ηλεκτρονικών διατάξεων συνόλων, των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και στην ανάπτυξη ενός άλλου κλάδου των ηλεκτρονικών, τη μικρολεκτρονική.

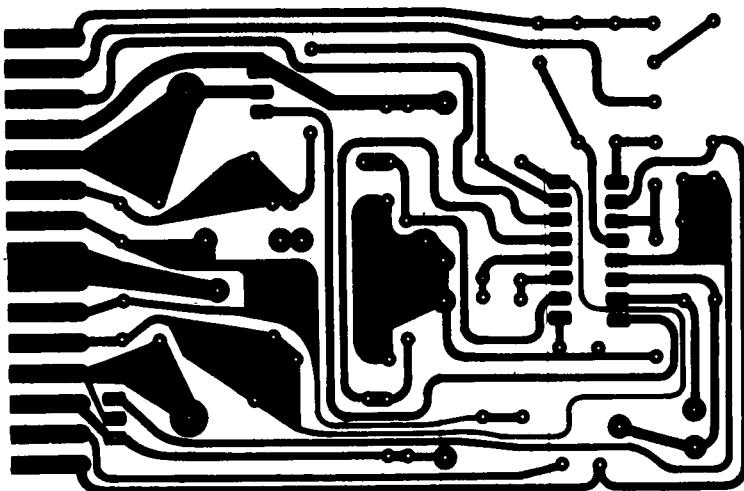
#### 12.2 Τυπωμένα κυκλώματα (*Printed circuits*).

Ένα σημαντικό βήμα στη σμίκρυνση των ηλεκτρονικών διατάξεων ήταν η δημιουργία των τυπωμένων κυκλωμάτων.

Αυτά είναι κατασκευασμένα πάνω σε μια λεπτή πλάκα από μονωτικό υλικό. Η μονωτική αυτή πλάκα καλύπτεται αρχικά με ένα λεπτό στρώμα αγώγιμου υλικού, συνήθως χαλκού.

Σχεδιάζεται κατάλληλα το κύκλωμα των συνδέσεων σε μεγάλες διαστάσεις και κατόπιν σμικρύνεται και με φωτολιθογραφική μέθοδο αφαιρούνται από το στρώμα του αγώγιμου υλικού τα ανεπιθύμητα τμήματα και μένουν *αποτυπωμένα* μόνο τα τμήματα που θα χρησιμεύσουν ως αγωγοί συνδέσεως και ως εξωτερικές επαφές (σχ. 12.2). Πάνω στη μονωτική πλάκα δημιουργούνται κατάλληλες υποδοχές για τα διάφορα εξαρτήματα, που συνδέονται είτε με κόλληση είτε με τοποθέτηση σε κατάλληλες θήκες που έχουν προηγουμένως συναρμολογηθεί επάνω της. Το σύνολο, με ειδικές επαφές στην περιφέρεια της πλάκας, μπορεί να προσαρμόζεται σε εξωτερικές υποδοχές με τρόπο που να τοποθετείται ή να αφαιρείται με απλή πίεση ή έλξη.

Η χρησιμοποίηση των τυπωμένων κυκλωμάτων διευκολύνει πολύ στη συντήρηση και τις επισκευές.



**Σχ. 12.2.**  
Τυπική πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος.

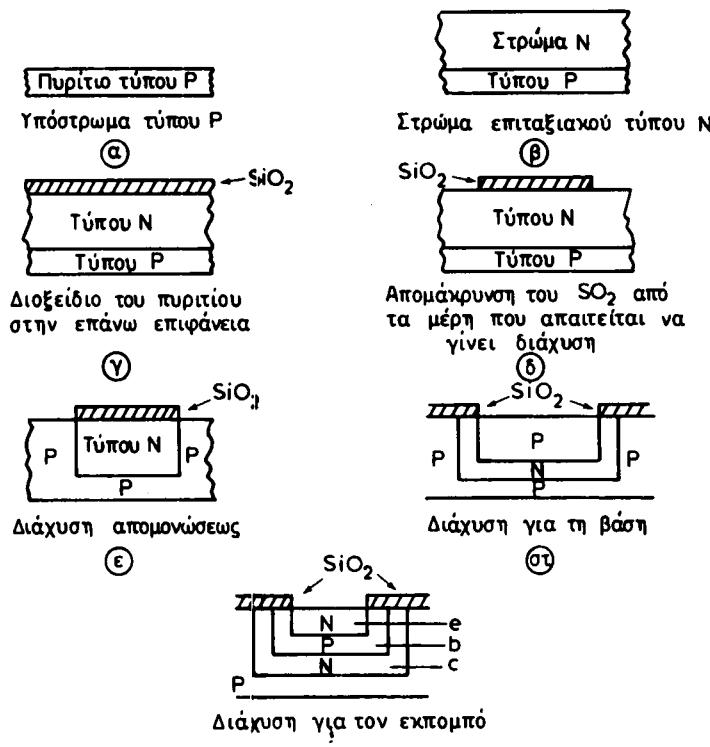
### 12.3 Ολοκληρωμένα κυκλώματα (Integrated Circuits, ICs).

Το ολοκληρωμένο κύκλωμα είναι ένα πλήρες κύκλωμα ηλεκτρονικής διατάξεως τοποθετημένο πάνω σε ένα κομμάτι ημιαγωγού. Σ' αυτό το κομμάτι υπάρχουν τόσο τα ενεργά στοιχεία του κυκλώματος, δηλαδή δίοδοι, τρανζίστορ κλπ., όσο και τα παθητικά, δηλαδή ωμικές αντιστάσεις, πυκνωτές και οι αγωγοί συνδέσεώς τους. Αυτεπαγωγές δεν έχουν ακόμη δημιουργηθεί κατά εκμεταλλεύσιμο τρόπο, αλλά έχει γίνει αρκετή πρόδος προς τη δημιουργία υποκαταστάτων των αυτεπαγωγών με μέσα που είναι δυνατό να δημιουργηθούν μέσα σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα.

#### 12.3.1 Κατασκευή.

Η τεχνική που ακολουθείται για την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος είναι όμοια με την τεχνική που κατασκευάζεται ένα τρανζίστορ με επαλληλία σε συνδυασμό με διάχυση. Οι διάφορες φάσεις της κατασκευής ενός τρανζίστορ π.χ. σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα φαίνονται στο σχήμα 12.3α.

Αρχή γίνεται από ένα κομμάτι πυριτίου  $P$  που αποτελεί το υπόστρωμα [σχ. 12.3α(α)]. Πάνω σ' αυτό αναπτύσσεται με επιταξιακή (epitaxial) ένα στρώμα  $N$ . Έχομε ήδη ετσι μια εκτεταμένη επαφή  $P-N$  [σχ. 12.3α(β)]. Θέλομε δύμας να απομονώσουμε ένα μικρό κομμάτι από αυτή για να δημιουργήσουμε το τρανζίστορ. Για το σκοπό αυτό οξειδώνομε την πάνω επιφάνεια του  $N$  τμήματος έτσι, ώστε να δημιουργηθεί ένα λεπτό στρώμα διοξειδίου του  $Si$  [σχ. 12.3α(γ)]. Τοποθετούμε κατόπιν πάνω στο στρώμα του  $SiO_2$  μια μάσκα με ανοίγματα στις περιοχές που θέλομε να αφαιρέσουμε το στρώμα του  $SiO_2$ . Με φωτολιθογραφική μέθοδο αφαιρούμε το  $SiO_2$  από αυτά τα ανοίγματα. Έτσι δημιουργούμε νησίδες από  $SiO_2$  με σαφή όρια πάνω στο στρώμα  $N$  και στις περιοχές όπου θέλομε να δη-



Σχ. 12.3a.

Διαδοχικές φάσεις κατασκευής ενός τρανζίστορ σε ολοκληρωμένο κύκλωμα.

μιουργήσομε τρανζίστορ [σχ. 12.3a(δ)]. Στη συνέχεια διαχέομε προσμίξεις P στην πάνω επιφάνεια του στρώματος N που εισδύουν μέχρι το στρώμα P, εκτός από τις περιοχές όπου υπάρχουν στρώματα SiO<sub>2</sub>. Έτσι δημιουργούνται ανεξάρτητα τμήματα N, απομονωμένα μεταξύ τους [σχ. 12.3a(ε)]. Ξαναδημιουργώντας στρώμα SiO<sub>2</sub> και επαναλαμβάνοντας την εργασία με μάσκα αλλά αφήνοντας τώρα άνοιγμα στη θέση του τρανζίστορ και αφαιρώντας από αυτή τό SiO<sub>2</sub> δημιουργούμε κενό. Σ' αυτό με προσμίξεις ρ δημιουργούμε, με διάχυση πάλι, άλλο ένα τμήμα P [σχ. 12.3a(στ)]. Επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία με την περίπτωση του σχήματος 12.3a(στ) αλλά με υλικό N δημιουργούμε μια περιοχή N. Έχομε τώρα δημιουργήσει, εκτός από το αρχικό στρώμα P ένα τρανζίστορ N-P-N, όπως φαίνεται στο σχήμα 12.3a(ζ).

Με παρόμοιο τρόπο μπορούμε να δημιουργήσομε διάφορα άλλα εξαρτήματα. Έτσι, δημιουργώντας με την παραπάνω τεχνική μόνο μια επαφή P-N, μπορούμε να επιτύχουμε μια δίοδο. Η χωρητικότητα πάλι μιας τέτοιας διόδου μπορεί να παίζει το ρόλο της χωρητικότητας ενός πυκνωτή. Επίσης, η αντίσταση μιας ανάστροφα πολωμένης διόδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αντίσταση στο κύκλωμα. Για καλώδια συνδέσεως μπορούν να χρησιμοποιηθούν αγώγιμα τμήματα του ημιαγωγού.

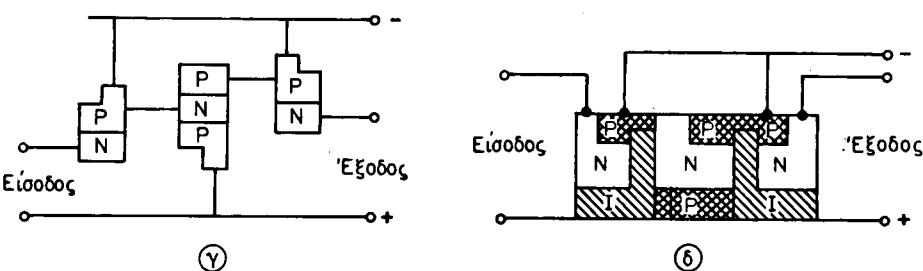
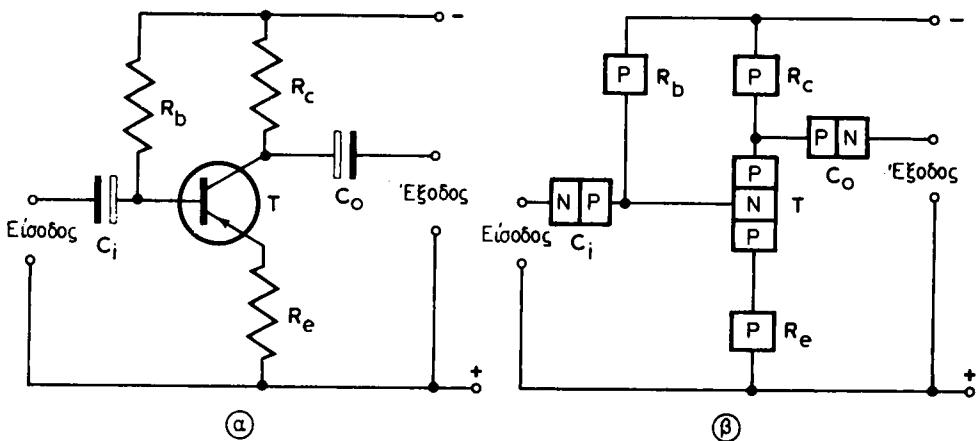
Βέβαια αντιστάσεις μπορούν να δημιουργηθούν και με κατάλληλης μορφής τμήματα του ημιαγωγού, αφού δημιουργήσομε τροποποιηθεί η ειδική τους αγωγιμότητα με τοπι-

κή ρύθμιση των προσμίξεων. Επίσης χωρητικότητες πραγματοποιούνται με την τοποθέτηση ενός στρώματος μονωτικού ( $\text{SiO}_2$ ) στην επιφάνεια μιας αγώγιμης περιοχής. Πάνω από το μονωτικό τοποθετείται λεπτή μεταλλική πλακέτα. Το σύνολο αγώγιμο τμήμα,  $\text{SiO}_2$  και μεταλλική πλακέτα συγκροτεί έναν πυκνωτή.

Με τη χρησιμοποίηση πάλι κατάλληλης **μάσκας** μπορούν να δημιουργηθούν στην τελική επιφάνεια και σε κατάλληλες θέσεις λεπτά μεταλλικά στρώματα (κυρίως από αλουμίνιο) που να χρησιμεύουν ως ακροδέκτες ή ως αγωγοί συνδέσεως.

Στο σχήμα 12.3β δίνεται μια παραστατική εικόνα μεταπτώσεως από κύκλωμα παλιάς τεχνικής [σχ. 12.3β(α)] σε μονολιθικό ολοκληρωμένο [σχ. 12.3β(δ)].

Σ' αυτό φαίνεται ότι οι τρεις αντιστάσεις  $R_b$ ,  $R_c$  και  $R_e$  έχουν αντικατασταθεί από τμήματα  $P$  του ημιαγωγού και οι πυκνωτές  $C_i$  και  $C_o$  με διόδους ανάστροφα πολωμένες [σχ. 12.3β(β)]. Στη συνέχεια καταργούνται οι αγωγοί που συνδέουν



Σχ. 12.3β.

Παραστατική διαδοχική μετάπτωση από το κύκλωμα ενισχυτή παλιάς τεχνικής σε μονολιθικό ολοκληρωμένο κύκλωμα.

Τμήματα του ίδιου τύπου τα οποία συσσωματώνονται [σχ. 12.3β(γ)]. Τα στοιχεία τάκτοποιούνται τελικά σε ενιαίο σύνολο κατά τρόπο που να έχουν όσο το δυνατό μικρότερο όγκο αλλά και ευκολότερη σύνδεση [σχ. 12.3β(δ)]. Αυτό είναι ένα μονολιθικό ολοκληρωμένο κύκλωμα. Ένα κύκλωμα δηλαδή χωρίς διάκριτα εξαρτήματα. Τα εξαρτήματα αποτελούν μέρος του ίδιου κομματιού κρυστάλλου (chip) και

έχουν δημιουργηθεί πάνω ή μέσα σ' αυτό, το καθένα με διαφορετική επεξεργασία.

Επαναλαβάνομε οτι η παραπάνω πορεία από το κύκλωμα της παλιάς τεχνικής στο μονολιθικό ολοκληρωμένο κύκλωμα είναι καθαρά παραστατική. Ο πραγματικός τρόπος κατασκευής είναι, όπως είχαμε περιγράψει προηγουμένως. Δημιουργούμε δηλαδή διάφορα στοιχεία του κυκλώματος, ξεκινώντας από ένα κομμάτι ημιαγωγού τύπου P.

Τα μονολιθικά κυκλώματα είναι η εξέλιξη μιας άλλης κατηγορίας κυκλωμάτων που λέγονται **υβριδικά**.

Τα υβριδικά κυκλώματα αποτελούνται από συνδυασμό διακρίτων εξαρτημάτων και μονολιθικών κυκλωμάτων ή από σύνδεση διαφόρων μονολιθικών κυκλωμάτων μεταξύ τους.

### **12.3.2 Κατηγορίες ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.**

Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα με βάση τον τρόπο λειτουργίας τους χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στα **γραμμικά** (αναλογικά) κυκλώματα και στα **ψηφιακά**.

Τα γραμμικά ολοκληρωμένα κυκλώματα περιλαμβάνουν τελεστικούς ενισχυτές, διαφορικούς ενισχυτές, ενισχυτές ισχύος ακουστικής συχνότητας και σταθεροποιητές τάσεως.

Τα ψηφιακά κυκλώματα περιλαμβάνουν ουσιαστικά όλα τα μη γραμμικά κυκλώματα, όπως π.χ. λογικά κυκλώματα και συνδυασμούς λογικών κυκλωμάτων, αυτοδιαγειρόμενους δονητές, πολυδονητές μιας θολής, Flip-flop κλπ.

### **12.3.3 Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.**

Ο αριθμός των στοιχείων του κυκλώματος (τρανζίστορ, διόδων, αντιστάσεων, πυκνωτών) που μπορεί να περιλαμβάνεται σε ένα κομμάτι (chip) ημιαγωγού αυξάνεται καταπληκτικά με την πάροδο του χρόνου.

Ανάλογα με τον αριθμό των στοιχείων αυτών χωρίζομε τα ολοκληρωμένα κυκλώματα σε κατηγορίες, όπως:

- Κυκλώματα συνηθισμένα (ICs) που έχουν μέχρι 60 στοιχεία ανά chip.
- Κυκλώματα μέσης κλίμακας (MSI, Medium Scale Integration), που έχουν μέχρι 200 ή 300 στοιχεία ανά chip.
- Κυκλώματα μεγάλης κλίμακας (LSI, Large Scale Integration) γύρω στα 1000 στοιχεία ανά chip.
- Κυκλώματα πολύ μεγάλης κλίμακας (VLSI, Very Large Scale Integration) που περνούν τα 20000 στοιχεία ανά chip.

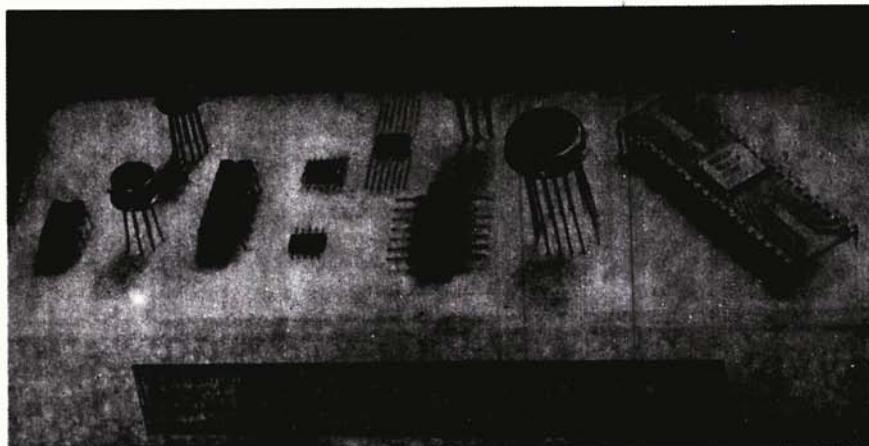
Πρέπει να έχομε πάντοτε υπόψη ότι το εμβαδό ενός μονολιθικού ολοκληρωμένου κυκλώματος είναι 1 ως 2 mm<sup>2</sup>.

Ενδεικτικά αναφέρομε ότι ο microprocessor (βασική μονάδα σε ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή) Intel 8086 περιέχει σε μια επιφάνεια 0,145 (mm<sup>2</sup>) 29000 τρανζίστορ.

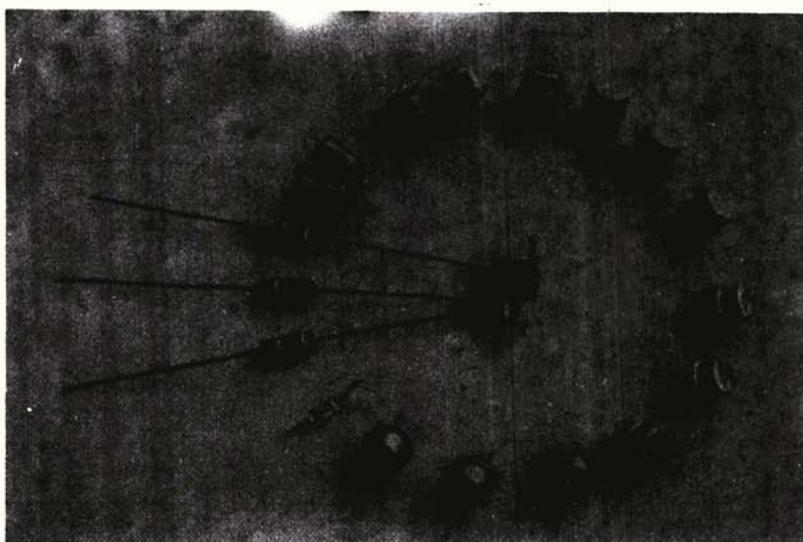
Στο σχήμα 12.3γ δίνεται η μορφή και μια συγκριτική εικόνα του μεγέθους των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Στο σχήμα 12.3δ φαίνονται τα εξαρτήματα κλασικής τεχνικής που μπορεί να περιέχει ένα πολύ μικρό ολοκληρωμένο κύκλωμα.

Άλλο χαρακτηριστικό των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων είναι η αξιοπιστία τους (παθαίνουν βλάβες πολύ δύσκολα). Επίσης η κατανάλωσή τους είναι πολύ χαμηλή.



Σχ. 12.3γ.

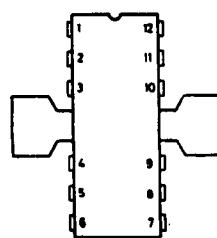


Σχ. 12.3δ.

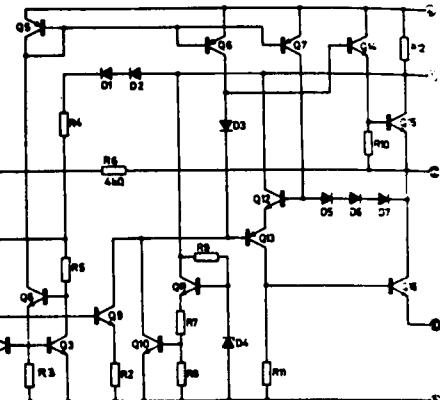
Π.χ. το TBA810S γραμμικό ολοκληρωμένο κύκλωμα που χρησιμοποιείται ως ενισχυτής χαμηλής συχνότητας σε τάξη Β έχει κατανάλωση 1W (σχ. 12.3ε). Η εμφάνιση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων αποτελεί επανάσταση στην Ηλεκτρονική που έχει εισαγάγει νέους τρόπους σκέψεως στη σχεδίαση ηλεκτρονικών διατάξεων και έχει αλλάξει τη νοοτροπία της κατασκευής και της συντηρήσεως.

#### **12.3.4 Παράδειγμα ολοκληρωμένου κυκλώματος.**

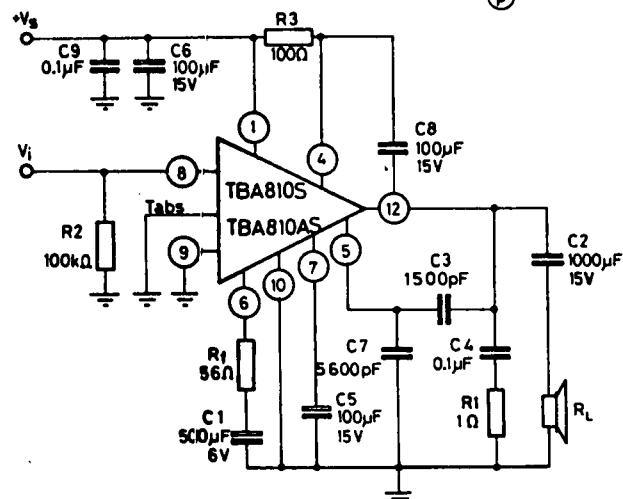
Τυπικό παράδειγμα χρησιμοποιήσεως ολοκληρωμένου κυκλώματος αποτελεί το



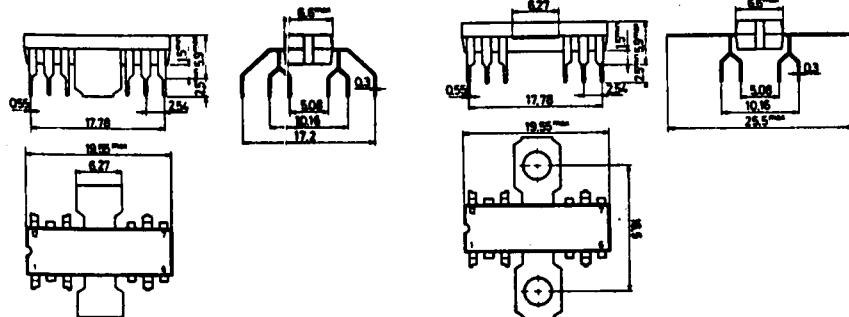
(a)



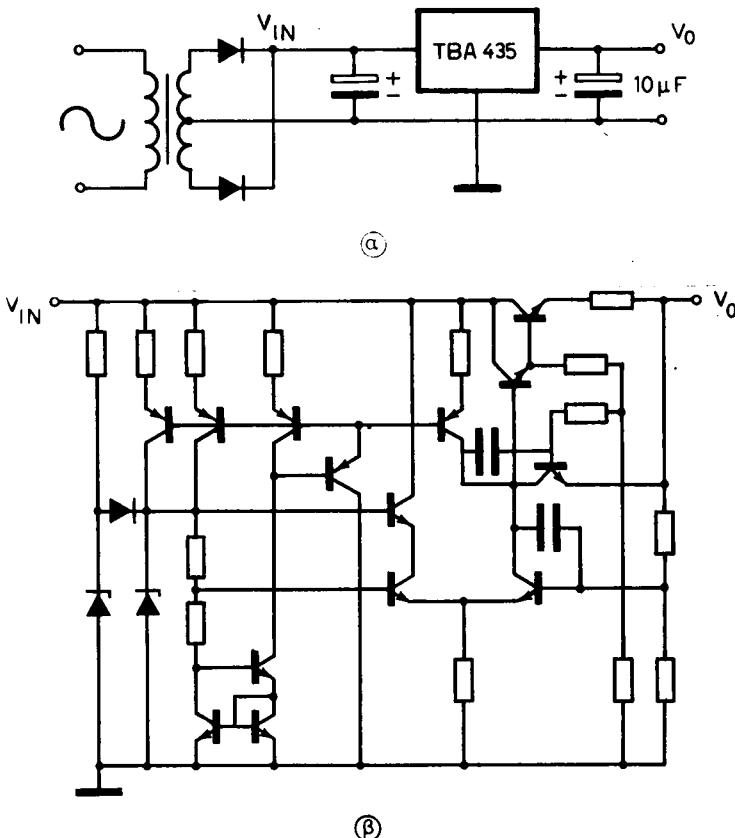
(b)



(c)



(d)



Σχ. 12.3στ.

- α) Ολοκληρωμένο κύκλωμα σταθεροποιητή τάσεως TBA 435 συνδεσμολογημένο σε τροφοδοτική διάταξη. β) Εσωτερική συνδεσμολογία του ολοκληρωμένου κυκλώματος TBA 435.

κύκλωμα του σχήματος 12.3στ., όπου στη θέση του σταθεροποιητή τάσεως στο ανορθωτικό σύστημα έχει συνδεθεί το ολοκληρωμένο κύκλωμα TBA435 [σχ. 12.3στ(α)] του οποίου η εσωτερική συνδεσμολογία φαίνεται στο σχήμα 12.3στ(β). Στο σχήμα 12.3ζ φαίνεται ένα υβριδικό ολοκληρωμένο κύκλωμα.

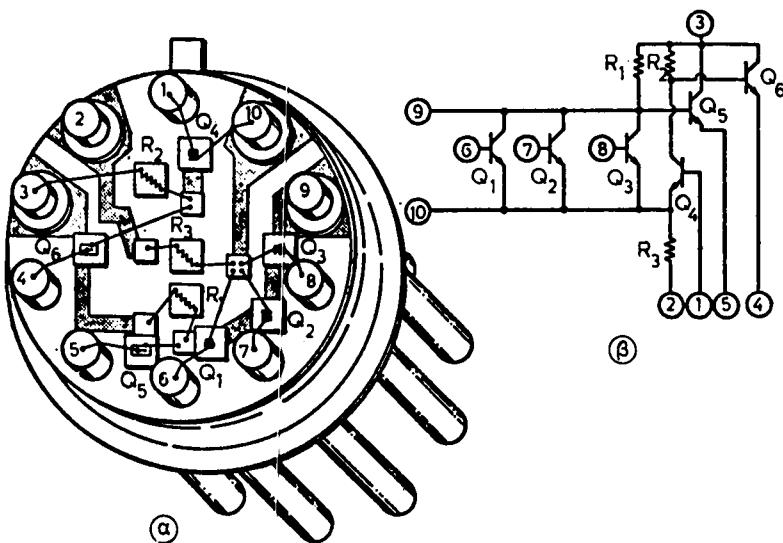
Σχ. 12.3ε.

Μονολιθικά ολοκληρωμένα κυκλώματα TBA 810S και TBA 810 AS.

- α) Εξωτερικές επαφές: 1) Τάση τροφοδοσίας. 2,3 και 11) Κενά. 4) Bootstrap. 5) Αποκατάσταση. 6) Ανασύζευξη. 7) Εξομάλυνση. 8) Είσοδος. 9) Γειωμένο υπόστρωμα. 10) Προσγείωση. 12) Έξοδος.  
 β) Εσωτερικό κύκλωμα TBA 810S και TBA 810AS.  
 γ) Συνδεσμολογημένο γραμμικό ολοκληρωμένο κύκλωμα με τα εξωτερικά στοιχεία.  
 δ) Μηχανικά χαρακτηριστικά στοιχεία.

#### Ηλεκτρικά στοιχεία

$V_s$	Τάση τροφοδοσίας	.....	20 V
$I_o$	Ρεύμα κορυφής εξόδου (μη επαναληπτικό)	.....	3,5 A
$I_o$	Ρεύμα κορυφής εξόδου (επαναληπτικό)	.....	2,5 A
$P_{tot}$	Κατανάλωση: $T_{amb} \leq 80^\circ C$ (για TBA 810S)	.....	1 W
	$T_{tab} \leq 100^\circ C$ (για TBA 810 AS)	.....	5 W
$T_{st}$	Θερμοκρασία αποθήκευσεως και $T_j$ Θερμοκρασία επαφής	.....	-40 ως 150°C



Σχ. 12.3ζ.

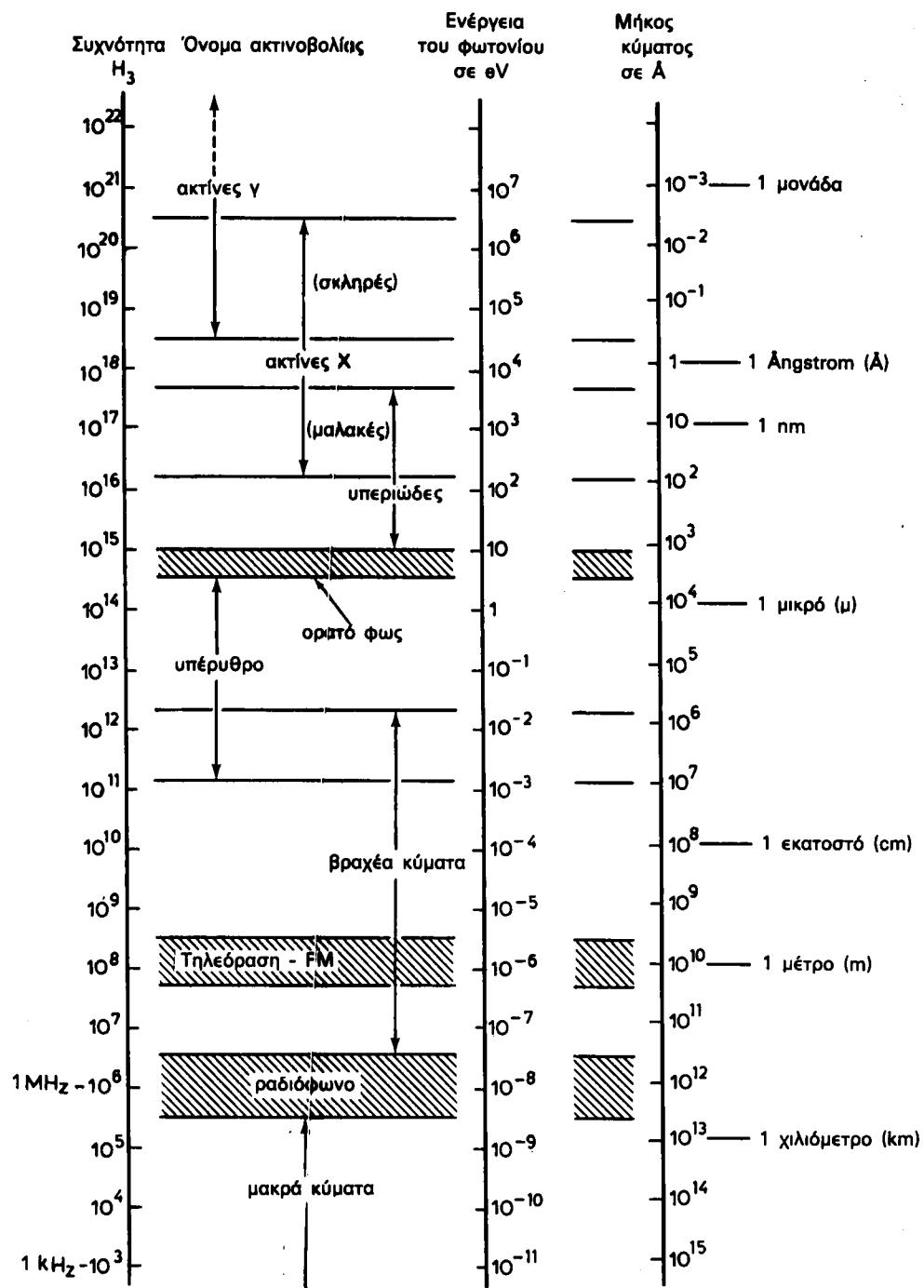
Υβριδικό ολοκληρωμένο κύκλωμα.  
 α) Πραγματική μορφή. β) Ηλεκτρικό σχέδιο.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1**  
**Χρησίμων φυσικών σταθερών**

Σταθερά	Σύμβολο	Τιμή
Φορτίο ηλεκτρονίου	e	$1,602 \times 10^{-19}$ Coulomb
Μάζα ηρεμίας ηλεκτρονίου	$m_0$	$9,109 \times 10^{-31}$ kg
Λόγος του φορτίου προς τη μάζα του ηλεκτρονίου	e/m	$1,759 \times 10^{11}$ Coulomb/kg
Σταθερά του Planck	h	$6,626 \times 10^{-34}$ Joule x sec
Σταθερά του Boltzmann	k	$1,381 \times 10^{-23}$ Joule/K
Ταχύτητα του φωτός	c	$2,998 \times 10^8$ m/sec

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2**  
Φάσματα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας



**ΠΙΝΑΚΑΣ 3**  
**κώδικας ευρωπαϊκών λυχνιών**

Πρώτο γράμμα	Δεύτερο ή τρίτο γράμμα	Αριθμός
A = τάση θερμάνσεως 4 V AC	A = απλή δίοδος φωράτρια	1-9 = Πλευρικών επαφών
B = ένταση θερμάνσεως 180 mA DC	B = διπλοδίοδος φωράτρια	10-19 = Μεταλλική (5 + 3 πόδια)
C = ένταση θερμάνσεως 200mA DC-AC	C = τρίοδος-ενισχύτρια τάσεως η ταλαντώτρια	20-29 = Λόκταλ (8 πόδια)
D = τάση θερμάνσεως 1,25–1,4 V (ξηρών στοιχείων)	D = τρίοδος ενισχύτρια ισχύος E = τέτροδος	30-39 = Όκταλ (8 πόδια)
E = τάση θερμάνσεως 6,3 V	F = πέντοδος ενισχύτρια τάσεως Υ.Σ.	40-49 = Ρίμλοκ (8 πόδια)
F = τάση θερμάνσεως 13 V	H = έξιδος ή έπτοδος μίξεως	50-59 = Λόκταλ (9 πόδια)
H = τάση θερμάνσεως 4 V DC	K = όκτοδος μεταλλάκτρια	60-69 = Βαρηκοΐας
K = τάση θερμάνσεως 2 V DC	L = πέντοδος ενισχύτρια ισχύος	70-79 = Υπομινιατούρα (8 πόδια)
N = τάση θερμάνσεως 12,6 V	M = ενδεικτική συντονισμού	80-89 = Νόβαλ (9 πόδια)
P = ένταση θερμάνσεως 300mA	N = τριοδική αερίου	90-99 = Μινιατούρα (7 πόδια)
U = ένταση θερμάνσεως 100mA	W = απλή δίοδος-ανορθώσεως αερίου	
V = ένταση θερμάνσεως 50mA	X = διπλοδίοδος-ανορθώσεως αερίου Y = απλή δίοδος-ανορθώσεως κενού	
Z = ψυχρής καθόδου	Z = διπλοδίοδος ανορθώσεως κενού	

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4**  
**Κώδικας διόδων και τρανζίστορ**

**Παλιά μέθοδος**

Πάνω στη δίοδο ήταν τυπωμένα δύο γράμματα και ένας αριθμός.

- Το πρώτο γράμμα ήταν Ο που σήμαινε ότι επρόκειτο για δίοδο από ημιαγωγό ή τρανζίστορ.
- Το δεύτερο γράμμα ήταν Α για τις διόδους και C για τα τρανζίστορ.

Π.χ. OA81 είναι δίοδος (A) από ημιαγωγό (O)  
 OC83 είναι τρανζίστορ

**Νέατερη μέθοδος**

Το πρώτο γράμμα είναι:

- a) Για εξαρτήματα από ημιαγωγό με μια ή περισσότερες επαφές, Α για το γερμάνιο, B για το πυρίτιο, C για το αρσενικούχο γάλλιο και D για το αντιμονιούχο ίνδιο.
- β) Για εξαρτήματα χωρίς επαφή, π.χ. φωτοαντιστάσεις, το πρώτο γράμμα είναι R.

Το δεύτερο γράμμα σημαίνει:

- A = δίοδος γενικής χρήσεως.
  - B = Varicap.
  - C = τρανζίστορ X.Σ. και χαμηλής ισχύος.
  - D = ισχύος Χαμ. Συχνότητας.
  - E = δίοδος Tunnel.
  - F = τρανζίστορ για υψηλές συχνότητες.
  - G = περισσότερα από ένα εξαρτήματα στο ίδιο περίβλημα.
  - S = τρανζίστορ για εφαρμογές όπως λειτουργίες διακόπτη.
  - T = Εξαρτήματα με λειτουργία ελεγχόμενη εξωτερικά.
  - U = τρανζίστορ ισχύος για λειτουργία σε κυκλώματα διακόπτη.
  - X = πολλαπλασιαστική δίοδος.
  - Y = δίοδος ανορθώτρια.
  - Z = σταθεροποιητής τάσεως.
- π.χ. BA148 είναι δίοδος πυριτίου γενικής χρήσεως.  
 BZY74 είναι δίοδος πυριτίου σταθεροποιήτρια.  
 BTX12 είναι θυρίστορ πυριτίου με πύλη —P.  
 AF139 είναι τρανζίστορ γερμανίου υψηλής συχνότητας.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5**

Τύποι μετατροπής παραμέτρων transistor

Οι τιμές αναφέρονται στο transistor BC108A για σημείο λειτουργίας  $I_{CQ} = 2mA$ ,  $V_{CEQ} = 5V$   
και συχνότητα  $f = 1\text{ kHz}$

Σύμβολο	Κοινός εκπομπός	Κοινή βάση	Κοινός συλλέκτης	Ισοδύναμο Τ
$h_{ie}$	$2,7\text{ k}\Omega$	$\frac{h_{ib}}{1 + h_{ib}}$	$h_{ie}$	$r_b + \frac{r_e}{1 - \alpha}$
$h_{re}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$\frac{h_{ib}h_{ob}}{1 + h_{ib}} - h_{rb}$	$1 - h_{re}$	$\frac{r_e}{(1 - \alpha)r_e}$
$h_{fe}$	180	$-\frac{h_{ib}}{1 + h_{ib}}$	$-(1 + h_{fe})$	$\frac{\alpha}{1 - \alpha}$
$h_{oe}$	$18\text{ }\mu\text{A/V}$	$\frac{h_{ob}}{1 + h_{ib}}$	$h_{oe}$	$\frac{1}{(1 - \alpha)r_e}$
$h_{ib}$	$\frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}$	$13,5\Omega$	$-\frac{h_{ie}}{h_{fe}}$	$r_e + (1 - \alpha)r_b$
$h_{rb}$	$\frac{h_{ie}h_{oe}}{1 + h_{fe}} - h_{re}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$h_{re} - \frac{h_{ie}h_{oe}}{h_{fe}} - 1$	$\frac{r_b}{r_e}$
$h_{pb}$	$-\frac{h_{fe}}{1 + h_{fe}}$	-0,994	$-\frac{1 + h_{fe}}{h_{fe}}$	$-\alpha$
$h_{ob}$	$\frac{h_{oe}}{1 + h_{fe}}$	$0,1\text{ }\mu\text{A/V}$	$-\frac{h_{oe}}{h_{fe}}$	$\frac{1}{r_e}$
$h_{iu}$	$h_{ie}$	$\frac{h_{ib}}{1 + h_{ib}}$	$2,7\text{ k}\Omega$	$r_b + \frac{r_e}{1 - \alpha}$
$h_{re}$	$1 - h_{re} \approx 1$	1	1	$1 - \frac{r_e}{(1 - \alpha)r_e}$
$h_{fe}$	$-(1 + h_{fe})$	$-\frac{1}{1 + h_{fe}}$	-181	$-\frac{1}{1 - \alpha}$
$h_{oe}$	$h_{oe}$	$\frac{h_{ob}}{1 + h_{fe}}$	$18\text{ }\mu\text{A/V}$	$\frac{1}{(1 - \alpha)r_e}$
$\alpha$	$\frac{h_{fe}}{1 + h_{fe}}$	$-h_{fb}$	$\frac{1 + h_{fe}}{h_{fe}}$	0,994
$r_e$	$\frac{1 + h_{fe}}{h_{oe}}$	$\frac{1}{h_{ob}}$	$-\frac{h_{fe}}{h_{oe}}$	$10\text{ M}\Omega$
$r_o$	$\frac{h_{re}}{h_{oe}}$	$h_{ib} - \frac{h_{re}}{h_{ob}}(1 + h_{fe})$	$\frac{1 - h_{re}}{h_{oe}}$	$8,3\Omega$
$r_b$	$h_{ie} - \frac{h_{re}}{h_{oe}}(1 + h_{fe})$	$\frac{h_{rb}}{h_{ob}}$	$h_{ie} + \frac{h_{re}}{h_{oe}}(1 - h_{re})$	$1200\Omega$

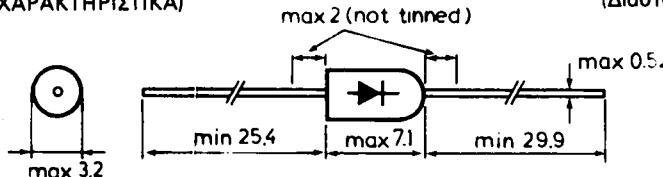
**ΠΙΝΑΚΑΣ 6**

**Παράδειγμα τεχνικών χαρακτηριστικών δίόδου όπως δίνονται από τον κατασκευαστή  
Διόδος πυριτίου BYX10, για ανόρθωση χαμηλής ιαχύος**

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΦΟΡΑ					
1. Crest working reverse voltage (Μέγιστη ανάστροφη τάση)	$V_{RWM}$	max.	800	V	
2. Repetitive peak reverse voltage (Επαναληπτική ανάστροφη τάση κορυφής)	$V_{RRM}$	max.	1600	V	
3. Average forward current (Μέγιστη μέση τιμή ρεύματος ορθής φοράς)	$I_{FAV}$	max.	0,2	A	
4. Non repetitive peak forward current $t = 10 \text{ ms}$ (Μη επαναληπτική μέγιστη ανάστροφη τάση που μπορεί να εφαρμοσθεί στη δίοδο επί χρόνο $t = 10 \text{ ms}$ )	$I_{FSM}$	max.	15	A	
5. Junction temperature (Μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία επαφής)	$T_j$	max.	125	°C	
6. Operating ambient temperature (Μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος για σωστή λειτουργία)	$T_{amb}$	max.	70	°C	
7. Thermal resistance from junction to ambient (Θερμική αντίσταση από την επαφή στο περιβάλλον)	$R_{th j - a}$	=	0,2	°C/mW	

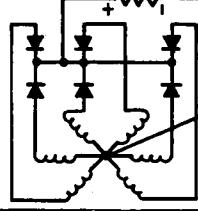
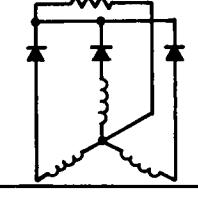
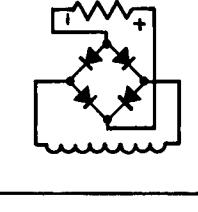
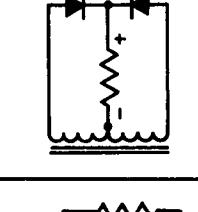
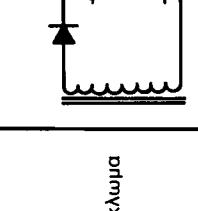
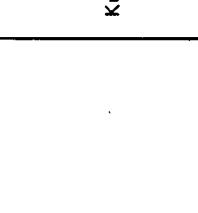
**MECHANICAL DATA**  
(ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ)

Dimensions in mm  
(Διαστάσεις σε mm)



DO-14 plastic envelope  
(πλαστικό περίβλημα)

**Κύρια χαρακτηριστικά διαφόρων περιπτώσεων ανορθωσεώς**

Μονοφασική ανόρθωση		Τριφασική ανόρθωση	
Ημανόρθωση	Κοινή διπλή ανόρθωση	Ημανόρθωση	Κοινή διπλή ανόρθωση με γένουσα
			
Kύκλωμα			
Tάσεις στο φόρτο	$\Delta$	$\Delta$	$\Delta$
$\frac{U_{dc}}{U_m}$	0,318	0,636*	0,826
Συχνότητα κυματώσεως	f	2f	3f
Ποσοστό κυματώσεως	121%	48%	18%
			4%

**ΠΙΝΑΚΑΣ 8**  
**Περιβεγκτικό περίφανο λαρυγγοπλοκούματος γραμμάτων τρανσίστορ έπιμηδών διονυσίου από τον κατασκευαστή  
 Τρανσίστορ AF239 είναι σχεδιασμένο για προστασίαν, μήκη και ταλάντωση μέχρι 900 MHz**

<b>Απόδιπτα μέγιστα χαρακτηριστικά</b>			
1. Συνεχής τάση συλλέκτη-εκπομπού με τη βάση συνοικτή	$V_{CEO}$	- 15	V
2. Συνεχής τάση συλλέκτη-εκπομπού με τη βάση βραχικυκλωμένη με τον εκπομπό	$V_{CES}$	- 20	V
3. Συνεχές ρεύμα συλλέκτη	$I_C$	- 10	mA
4. Συνεχής τάση εκπομπού βάσεως με ανοικτό το συλλέκτη	$V_{EBO}$	- 0,3	V
5. Συνεχές ρεύμα εκπομπού	$I_E$	11	mA
6. Συνολική απώλεια ισχύος (Θερμοκρασία περιβάλλοντος $\leq 66^\circ\text{C}$ )	$P_{tot}$	60	mW
7. Θερμοκρασία αποθηκεύσεως	$T_s$	- 30 ÷ 75	$^\circ\text{C}$
8. Θερμοκρασία επαφής	$T_j$	90	$^\circ\text{C}$
		Διαστάσεις σε mm	

**Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά (Θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C)**

	Σύμβολο	Ελάχιστο	Τυπικό	Μέγιστο	Μονάδες	Συνθήκες δοκιμής
1. Συνεχές ρεύμα συλλέκτη-έκπομπου με βραχυκυλλωμένη τη βάση με τον εκπομπό	$I_{CES}$			- 8	$\mu A$	$V_{CE} = - 20V$ $V_{EB} = 0$
2. Συνεχές ρεύμα συλλέκτη-έκπομπου με ανοικτή τη βάση	$I_{CEO}$			- 500	$\mu A$	$V_{CE} = - 15V$ $I_B = 0$
3. Ανάστροφο ρεύμα εκπομπου βάσεως με ανοικτό τον εκπομπό	$I_{EBO}$	10		- 100	$\mu A$	$V_{EB} = - 0.3V$ $I_C = 0$
4. Ποράμετρος $h_{FE}$ για συνεχές ρεύμα	$h_{FE}$					$V_{CE} = - 10V$ $I_C = - 2mA$
5. Συχνότητα $f_T$	$f_T$	780		5	MHz	$V_{CE} = - 10V$ $I_C = - 2 mA$ $f = 100 MHz$
6. Θόρυβος	N.F.				dB	$V_{CE} = - 10V$ $I_C = - 2 mA$
7. Χωρητικότητα $C_T$	$-C_{12l}$	0.2			pF	$f = 800 MHz$ $R_g = 60 \Omega$ $I_C = - 2 mA$ $f = 450 kHz$
8. Ενίσχυση ισχύος	$G_{PB}$	12.5	15		dB	$V_{CE} = - 10V$ $I_C = - 2 mA$ $R_L = 2 k\Omega$ $R_g = 60 \Omega$
<b>Θερμικά Χαρακτηριστικά</b>						
1. Θερμικός συντελεστής αντιστάσεως επαφής-περιβάλλοντος	$\Theta_{1,a}$			750	°C/W	
2. Θερμικός συντελεστής αντιστάσεως επαφής-περιβάλλοντος	$\Theta_{1,c}$			400	°C/W	

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Εισαγωγή .....	1
----------------	---

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

#### Στοιχεία για τη δομή της ύλης – Ηλεκτρονική θεωρία των μετάλλων

1.1 Στοιχεία για τη δομή της ύλης .....	3
1.1.1 Διέγερση και ιονισμός του ατόμου .....	5
1.2 Ηλεκτρονική θεωρία των μετάλλων .....	8

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

#### Εκπομπή ηλεκτρονίων

2.1 Γενικά .....	10
2.2 Έργο εξόδου .....	11
2.3 Θερμιονική εκπομπή .....	12
2.4 Φωτοηλεκτρική εκπομπή .....	13
2.5 Δευτερογενής εκπομπή .....	15
2.6 Εκπομπή με ισχυρό πεδίο .....	16
2.7 Ασκήσεις .....	16

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

#### Βλητική ηλεκτρονίων

3.1 Γενικά .....	18
3.2 Κίνηση ηλεκτρονίου σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο .....	18
3.3 Κίνηση ηλεκτρονίου σε σταθερό ομογενές μαγνητικό πεδίο .....	23
3.4 Κίνηση σε συνδυασμένα ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο, σταθερά .....	25
3.5 Ασκήσεις .....	28
3.6 Αρχή εστιάσεως ηλεκτρονικής δέσμης .....	28
3.7 Καθοδικός σωλήνας .....	32

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

#### Ηλεκτρονικές λυχνίες

4.1 Γενικά .....	42
4.2 Είδη ηλεκτρονικών λυχνιών .....	44
Ασκήσεις .....	76

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

#### Λυχνίες μέ άφριο

5.1 Γενικά .....	77
5.2 Δίοδοι ψυχρής καθόδου .....	78
5.3 Τρίοδοι ψυχρής καθόδου .....	81
5.4 Δίοδοι αερίου με θερμαινόμενη άνοδο .....	81

5.5 Λυχνία θύρατρον .....	82
5.6 Κώδικας λυχνιών .....	84
5.7 Ασκήσεις .....	86

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

### Φωτοηλεκτρικές διατάξεις

6.1 Φωτοηλεκτρικά στοιχεία .....	87
6.2 Φωτοκύτταρα κενού .....	87
6.3 Φωτοκύτταρα με αέριο .....	89
6.4 Ευαισθησία φωτοκυττάρων .....	90
6.5 Εφαρμογές .....	91
6.6 Φωτοηλεκτρονικός πολλαπλασιαστής .....	92
6.7 Ασκήσεις .....	94

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ

### Στοιχεία θεωρίας στερεού σώματος

7.1 Γενικά .....	95
7.2 Αγωγοί, μονωτές, ημιαγωγοί .....	96
7.3 Ενεργειακές ζώνες .....	99
7.4 Καθαροί ημιαγωγοί .....	103
7.5 Ημιαγωγοί με προσμίξεις – Δότες – Αποδέκτες .....	106
7.6 Ημιαγωγοί τύπου N .....	106
7.7 Ημιαγωγοί τύπου P .....	108
7.8 Ειδική αγωγμότητα στους ημιαγωγούς .....	111
7.9 Ευκινησία φορέων, χρόνος ζωτικής μήκος διαχύσεως .....	113
7.10 Επίδραση της θερμοκρασίας και του φωτός στους ημιαγωγούς – θερμίστορ – Βαρίστορ – Φωτοαντιστάσεις .....	115
7.11 Φαινόμενο Hall .....	124
7.12 Ασκήσεις .....	127

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΟ

### Κρυσταλλοδιόδοι

8.1 Γενικά .....	128
8.2 Επαφή P-N .....	128
8.3 Επαφή P-N με εξωτερική τάση .....	130
8.4 Χωρητικότητα επαφής P-N .....	133
8.5 Κατασκευή επαφής P-N .....	136
8.6 Χαρακτηριστικά κρυσταλλοδιόδων .....	138
8.7 Δίοδοι μεταβλητής χωρητικότητας .....	152
8.8 Δίοδος Zener .....	155
8.9 Δίοδος σήραγγας (δίοδος tunnel) .....	163
8.10 Φωτοδιόδος .....	165
8.11 Δίοδος φωτοεκπομπής (Light Emitting Diode, LED) .....	168
8.12 Ήλιακά στοιχεία .....	174
8.13 Δίοδος Backward .....	179
8.14 Δίοδοι ακίδας (Point contact diodes) .....	180
8.15 Ασκήσεις .....	181

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΑΤΟ

### Ανορθωτές

9.1 Γενικά .....	182
9.2 Δίοδοι ανορθώτριες .....	183
9.3 Φίλτρα ανορθώσεως .....	199
9.4 Ασκήσεις .....	214

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ

### Θυρίστορ (Thyristor)

10.1 Γενικά .....	215
10.2 Δίοδος τεσσάρων στρώσεων ή διόδος Shockley .....	215
10.3 Ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου (SCR) .....	219
10.4 Ασκήσεις .....	229

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΔΕΚΑΤΟ

### Τρανζίστορ

11.1 Γενικά .....	231
11.2 Λειτουργία του τρανζίστορ .....	232
11.3 Βασικές συνθεσμολογίες των τρανζίστορ .....	236
11.4 Συνεχή ρεύματα, τάσεις και ισχείς στα κυκλώματα των τρανζίστορς .....	245
11.5 Ισοδύναμα κυκλώματα τρανζίστορ .....	248
11.6 Βασικές παράμετροι των τρανζίστορς .....	251
11.7 Το τρανζίστορ σε λειτουργική διακοπή .....	264
11.8 Φωτοτρανζίστορ .....	270
11.9 Συχνότητα αποκοπής α και β .....	272
11.10 Τρανζίστορ επιδράσεως πεδίου (FET) .....	273
11.11 Ασκήσεις .....	290

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΩΔΕΚΑΤΟ

### Ολοκληρωμένα κυκλώματα

12.1 Γενικά .....	294
12.2 Τυπωμένα κυκλώματα (Printed circuits) .....	294
12.3 Ολοκληρωμένα κυκλώματα (Integrated Circuits, ICs) .....	295
Παράρτημα .....	303

**COPYRIGHT ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ**

---

