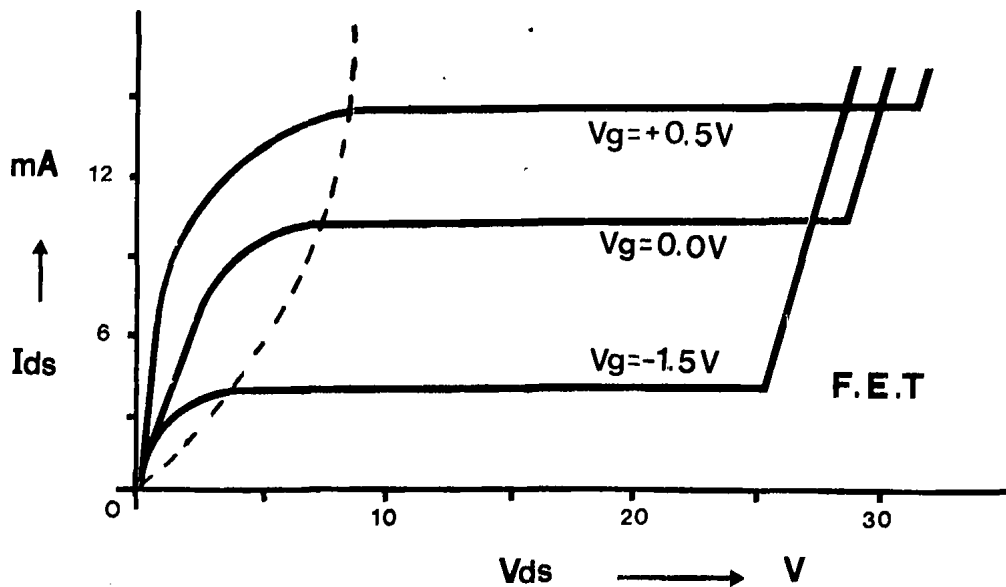


ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ



Τόμος Α': Ηλεκτρονικές διατάξεις



ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ



026000047130

47/87



47/87 Συγγραφέας: ΜΗΛΙΩΤΗΣ- ΣΠΗΛΩΝ

Τίτλος: Εργαζόμενος Αγρότης

Ηλεκτρονική Τέχνη AP-ΕΒΕ: 621.38703

621.3

ΜΗΛ

Τ.1

ΔΑΝΕΙΖΟΜΕΝΟΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΔΑΝΕΙΣΜΟΥ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΠΙΣΤΡΟΦΗΣ	ΜΗΛ Σ.1



ΔΗΜΗΤΡΗ Μ. ΜΗΛΙΩΤΗ
Καθηγητή Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

ΓΙΩΡΓΟΥ Ε. ΓΙΑΚΟΥΜΑΚΗ
Λέκτορα Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

Τόμος Α'

ΔΙΕΤΕΘΗ ΔΩΡΕΑΝ
ΒΑΣΕΙ ΤΩΝ Ν.Δ. 95/69 & 605/70

ΙΩΑΝΝΙΝΑ 1984



Π Ρ Ο Λ Ο Γ Ο Σ

Το βιβλίο αυτό απευθύνεται κύρια στους προπτυχιακούς φοιτητές του Φυσικού Τμήματος του Πανεπιστημίου μας και περιλαμβάνει την πρώτη σειρά Εργαστηριακών Ασκήσεων Ηλεκτρονικής Φυσικής, που αναφέρονται στις βασικές λειτουργίες των κρυσταλλολυχνιών και τα στοιχειώδη κυκλώματα ενισχύσεως και σταθεροποιήσεως. Υπάρχει ακόμη μία άσκηση επί των ηλεκτρονικών λυχνιών, επειδή θεωρούμε εκπαιδευτικά σκόπιμο να ασχοληθούν οι φοιτητές και με τις ηλεκτρονικές λυχνίες, παρόλο που θεωρούνται ξεπερασμένη τεχνολογία, διότι η κατανόηση της λειτουργίας ενός ηλεκτρονικού μηχανισμού γίνεται ευχερέστερα με τη θεώρηση ενός είδους φορέων (ηλεκτρόνια) αντί δύο (οπές- ηλεκτρόνια), όπως συμβαίνει στις κρυσταλλολυχνίες.

Η δεύτερη σειρά Εργαστηριακών Ασκήσεων, που θα εκδοθεί για το επόμενο ακαδημαϊκό έτος, περιλαμβάνει ασκήσεις συνθετώτερων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, ολοκληρωμένων, λογικών πυλών κλπ.

Το πειραματικό μέρος των ασκήσεων βασίζεται κατά ένα ποσοστό στο εκπαιδευτικό τεύχος "Learning experiences in transistors,, που επιμελήθηκε ο καθηγητής H.H. Gerrish.

Ιδιαίτερα ευχαριστούμε τον Φυσικό κ. Δημήτρη Παπαδημητρίου για τη συμβολή του στη συγγραφή της παλαιάς εκδόσεως του βιβλίου "Εργαστηριακές Ασκήσεις Ηλεκτρονικών και Κρυσταλλικών λυχνιών,, το οποίο αποτέλεσε και βάση του παρόντος.

Δ. Μ. Μ.

Γ. Ε. Γ.

Ιωάννινα 1983



Α Σ Φ Α Λ Ε Ι Α Ε Ρ Γ Α Σ Τ Η Ρ Ι Ο Υ

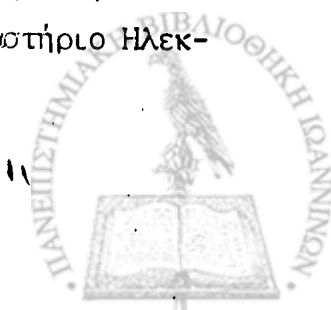
Εισαγωγή

Καθημερινά ένας μεγάλος αριθμός ανθρώπων τραυματίζεται ή και χάνει τη ζωή του σε διάφορα ατυχήματα. Οποιαδήποτε μελέτη των συνθηκών, κάτω από τις οποίες συμβαίνουν τα ατυχήματα αυτά, οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι μόνον ένα ελάχιστο ποσοστό τους είναι πραγματικά αδύνατο να προβλεφθεί και αποφευχθεί. Συνάγεται λοιπόν, ότι είναι ανάγκη να αυξηθεί ο βαθμός ασφάλειας σε κάθε χώρο ανθρώπινης δραστηριότητας και ιδιαίτερα εργασίας. Τη σκοπιμότητα αυτή εξυπηρετούν τα παρακάτω, που αναφέρονται στην Ασφάλεια Εργαστηρίου.

Η πειραματική διδασκαλία ωρισμένων μαθημάτων έχει το σημαντικό πλεονέκτημα της ταχύτερης, αμεσώτερης και βαθύτερης κατανόησης κάθε εκπαιδευτικού θέματος. Παράλληλα όμως δημιουργεί έναν μικρό κατ'αρχήν αριθμό κινδύνων για όλους τους εργαζόμενους (εκπαιδευτές και εκπαιδευόμενους) στα διάφορα Εργαστήρια (Φυσικής, Χημείας, Ηλεκτρονικής κλπ.) Είναι λοιπόν απαραίτητο να λαμβάνεται πάντοτε στους Εργαστηριακούς χώρους μια σειρά μέτρων, που έχουν σκοπό να υποβιβάσουν σε συχνότητα και σοβαρότητα κάθε πιθανό ατύχημα από προβλέψιμη ή και απρόβλεπτη αιτία. Τα μέτρα αυτά διακρίνονται σε Μέτρα Παθητικής Ασφάλειας και Μέτρα Ενεργητικής Ασφάλειας.

Τα μέτρα παθητικής ασφάλειας περιλαμβάνουν όλες εκείνες τις διατάξεις και φροντίδες, που αποσκοπούν στην προστασία των ασκουμένων ανεξάρτητα από τις δικές τους ενέργειες ή παραλείψεις. Αντίστοιχα τα μέτρα ενεργητικής ασφάλειας περιλαμβάνουν το σύνολο των ενεργειών και φροντίδων των ασκουμένων, που αποσκοπούν επίσης στην προστασία τους από ατυχήματα αμέλειας, κακής λειτουργίας ή βλάβης οργάνων κλπ.

Πρέπει να τονισθεί, ότι προκειμένου για Εργαστήρια (εκπαιδευτικά, ερευνητικά κλπ.) μεγαλύτερο βάρος δίνεται στα μέτρα ενεργητικής ασφάλειας και τούτο, επειδή στους χώρους τους αναμένεται να εργασθούν άτομα ενήλικα, εκπαιδευμένα και με αυξημένη πνευματική ενάργεια, αντίθετα από ότι συμβαίνει π.χ. σε μια κατοικία, όπου αναμένεται να υπάρχουν και άτομα ανήλικα, ανεκπαίδευτα κλπ. Η γενική αυτή αρχή ισχύει βέβαια και για το Εργαστήριο Ηλεκτρονικής Φυσικής, στο οποίο θα ασκηθείτε.



Παθητική Ασφάλεια

Τα μέτρα παθητικής ασφάλειας του Εργαστηρίου περιλαμβάνουν:

α) Αυτόματους διακόπτες διαρροής (relays) στους ηλεκτρικούς πίνακες τροφοδοσίας του Εργαστηρίου. Το όριο λειτουργίας των διακοπών αυτών είναι 30mA, που σημαίνει, ότι οποτεδήποτε (π.χ. ηλεκτροπληξία, διαρροή οργάνου ή κυκλώματος, βραχυκύκλωμα κλπ.) παρουσιαστεί διαρροή προς τη γη ρεύματος μεγαλύτερου από 30mA, διακόπτεται η παροχή ηλεκτρικής ισχύος από τους πίνακες.

β) Μαγνητικές και θερμικές ασφάλειες σε κάθε γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος.

γ) Διακόπτες και θερμικές ασφάλειες ταχείας τήξης σε κάθε συγκρότημα (πάγκο) εργαστηριακών ασκήσεων, μέσω των οποίων ελέγχεται και ασφαρίζεται η συνολική τροφοδοσία του συγκροτήματος.

δ) Ασφάλειες υπερρορτώσεως και βραχυκυκλώσεως σε κάθε επί μέρους όργανο ή τροφοδοτικό, που χρησιμοποιείτε.

ε) Γειώσεις σε κάθε σημείο, όπου είναι σκόπιμο να τοποθετηθούν.

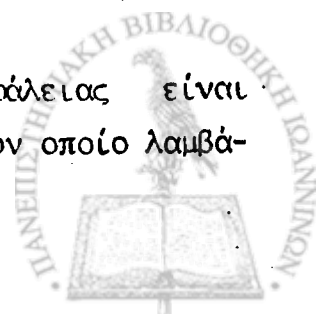
Έχει προβλεφθεί ακόμη ένα σύνολο επικουρικών μέτρων, όπως η χρήση κατά τη διεξαγωγή των ασκήσεων όσο το δυνατόν χαμηλότερων τάσεων, η χρησιμοποίηση, όπου είναι δυνατόν μονωτικών υλικών, η κατάλληλη διάταξη χώρου, η εξασφάλιση επαρκούς φωτισμού και εξαερισμού κλπ.

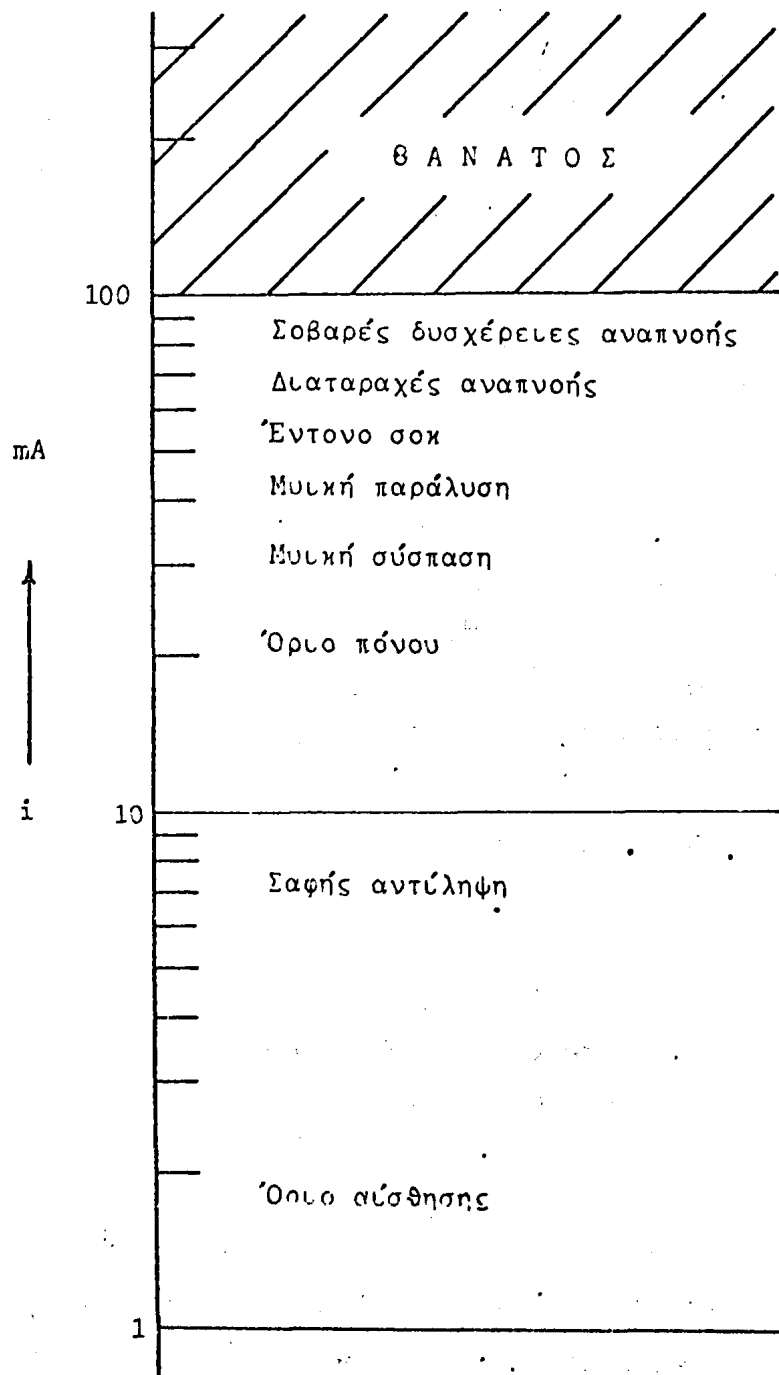
Είναι προφανές, ότι με τα μέτρα αυτά επιδιώκεται η πρόληψη ατυχημάτων ηλεκτρικής κυρίως φύσης, γεγονός απόλυτα αιτιολογημένο εφ'όσον αναφερόμαστε σε Εργαστήριο Ηλεκτρονικής. Επιδιώκεται επίσης εκτός από την προστασία των ασκουμένων και η προστασία του εξοπλισμού του Εργαστηρίου, ο οποίος περα από την αντικειμενικά υψηλή οικονομική του αξία συχνά συμβαίνει να είναι αναντικατάστατος και εκπαιδευτικά απαραίτητος.

Προσοχή: Ποτέ μην επαναπαύεσθε στην ύπαρξη και καλή λειτουργία των συστημάτων παθητικής ασφάλειας. Συχνά συμβαίνει να μη λειτουργούν ικανοποιητικά και οι συνέπειες μπορεί να είναι τραγικές.

Ενεργητική Ασφάλεια

Προκειμένου να επιτευχθεί υψηλός βαθμός ενεργητικής ασφάλειας είναι απαραίτητο να υπάρχει σαφής γνώση του κινδύνου, απέναντι στον οποίο λαμβά-





Βιολογικά αποτελέσματα
 του ηλεκτρικού ρεύματος

Σχήμα Α-1



νονται τα προφυλακτικά μέτρα. Όπως ήδη αναφέρθηκε για το Εργαστήριο Ηλεκτρονικής ο κατ'εξοχήν κίνδυνος είναι η ηλεκτροπληξία. Ο όρος περιγράφει συν-οπτικά κάθε είδος βλάβης του ανθρώπινου οργανισμού, που οφείλεται στη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος από το εσωτερικό του. Είναι σημαντικό να τονισθεί ότι οι βλάβες στον ανθρώπινο οργανισμό προκαλούνται από τη διέλευση ρεύματος μέσω του σώματος και όχι από την έκθεσή του σε κάποια διαφορά δυναμικού. Στο διάγραμμα του σχήματος Α-1 δίνεται η κλίμακα βιολογικών αποτελεσμάτων για διάφορες εντάσεις του διερχόμενου ρεύματος. Όπως φαίνεται, το ρεύμα των 100mA είναι το όριο θανάτου. Πρέπει πάντως να λαμβάνεται υπ'όψη, ότι το όριο αυτό εξαρτάται πολύ από τη φυσική κατάσταση του ατόμου (ελαττώνεται σημαντικά για ασθενή ή ευπαθή άτομα) και το χρόνο διελεύσεως του ρεύματος (ελαττώνεται όσο αυξάνει ο χρόνος αυτός).

Εφ'όσον λοιπόν κύριος στόχος είναι ο υποβιβασμός του ρεύματος, που ενδέχεται να διέλθει από το σώμα, είναι προφανές, ότι πρέπει να λαμβάνεται συνεχής φροντίδα, ώστε αυτό να παρουσιάζει όσο το δυνατόν υψηλότερη ηλεκτρική αντίσταση. Η ηλεκτρική αντίσταση του σώματος οφείλεται κύρια στο δέρμα, το οποίο για το λόγο αυτό πρέπει να διατηρείται στεγνό. Η αντίσταση του στεγνού σώματος είναι μεταξύ 2kΩ και 200kΩ (που σημαίνει, ότι θανατηφόρα είναι κάθε τάση πάνω από 200V), ενώ του υγρού σώματος-βρεγμένου, ιδρωμένου κλπ-είναι μεταξύ 500Ω και 1000Ω (που σημαίνει, ότι θανατηφόρα είναι κάθε τάση πάνω από 50V).

Η βασική αρχή της ενεργητικής ασφάλειας συνοψίζεται στη φράση:

Πρώτα σκεφτόμαστε και κατόπιν ενεργούμε.

Οι οδηγίες (μέτρα), που ακολουθούν, αποτελούν εξειδίκευση της βασικής αυτής αρχής.

α) Προετοιμαστείτε πλήρως για το αντικείμενο, που πρόκειται να μελετήσετε.

β) Αναγνωρίστε το χώρο εργασίας και τις ιδιομορφίες του (θέση διακοπών, αγωγών, πινάκων, εξόδων, εμποδίων, νιπτήρων κλπ.).

γ) Μην απασχολείστε με άλλα ζητήματα κατά τη διάρκεια της πειραματικής σας εργασίας και μην απασχολείτε τους άλλους. Συχνά η αμηρημάδα κοστίζει ακριβά.

δ) Κινείσθε πάντοτε στους εργαστηριακούς χώρους αργά και προσεκτικά.

ε) Κρατάτε τάξη στην εργασία σας. Η ακαταστασία επαυξάνει τον κίνδυνο βραχυκυκλωμάτων και ατυχημάτων.

στ) Θεωρείτε πάντοτε τα κυκλώματα υπό τάση. Το κύκλωμα θεωρείται χω-



ρίς τάση μόνον όταν τη διακόψατε οι ίδιοι και επιβεβαιώσατε τη διακοπή με τα κατάλληλα όργανα.

ζ) Μάθετε την παροχή πρώτων βοηθειών και ειδικά τεχνητής αναπνοής. Το ποσοστό επιβιώσεως μετά από μια ηλεκτροπληξία ελαττώνεται εκθετικά σχεδόν συναρτήσσει του χρόνου, που μεσολάβησε μέχρι την έναρξη της τεχνητής αναπνοής.

Κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής των ασκήσεων πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στις παρακάτω διατάξεις:

1. Τροφοδοτικά υψηλής τάσης (0-400V)

2. Αυτομετασχηματιστές (variacs). Ακόμη και αν ο μεταγωγός εξόδου τους βρίσκεται στη θέση μηδέν ($V_{out} = 0$), είναι πιθανόν στην έξοδο να εμφανίζουν τη φάση του δικτύου, αν η είσοδός τους δεν έχει συνδεθεί με τη σωστή πολικότητα.

3. Πυκνωτές. Ακόμη και εκτός κυκλώματος συχνά είναι φορτισμένοι και ενδέχεται να προκαλέσουν ηλεκτρικό σοκ αν εκφορτισθούν (βραχυκυκλωθούν) μέσω του σώματος.

4. Ηλεκτρονικές λυχνίες. Σε κατάσταση λειτουργίας και λίγο μετά τη διακοπή της έχουν υψηλή θερμοκρασία και μπορούν να προκαλέσουν εγκαύματα.

Τέλος προκειμένου να προστατευθεί αποτελεσματικά και ο εξοπλισμός του Εργαστηρίου:

α) Αναγνωρίστε σωστά τα διάφορα όργανα και εξαρτήματα και τις πολικότητές τους.

β) Επιλέξτε τις σωστές κλίμακες στα διάφορα όργανα. Αρχίστε γενικά από τις μεγαλύτερες.

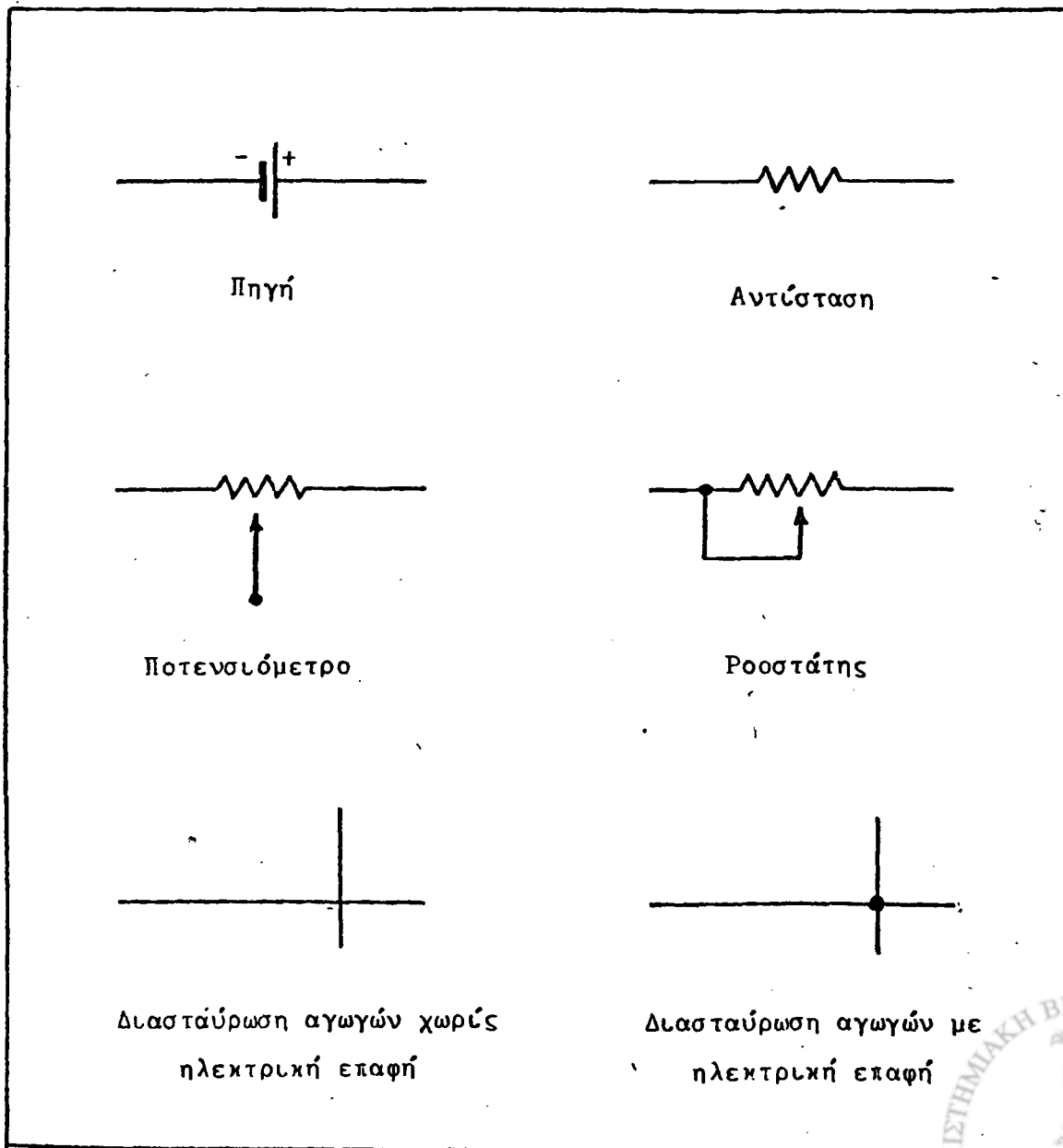
γ) Ζητείστε να επιθεωρηθεί το κύκλωμα της ασκήσεως πριν συνδεθεί με τις πηγές τροφοδοσίας.

Σε κάθε αμφιβολία να απευθύνεστε στο προσωπικό του Εργαστηρίου και να έχετε πάντοτε υπ' όψη ότι η ζωή, ακεραιότητα και υγεία προηγούνται αναμφίβολα σε σπουδαιότητα της επιθυμίας και ανάγκης για εκπαίδευση και απόκτηση γνώσεων.



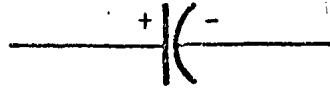
ΣΥΜΒΟΛΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ

Για την ευχερέστερη απεικόνιση και μελέτη των διαφόρων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων έχει καθιερωθεί ένας αριθμός ειδικών χαρακτηριστικών συμβόλων, που το κάθε ένα τους παριστά μια συγκεκριμένη διάταξη ή στοιχείο (π.χ. αντίσταση, πυκνωτή, κρυσταλλοτρίοδο κλπ.). Στις επόμενες σελίδες δύνονται τα συνηθέστερα και κυριώτερα από τα σύμβολα αυτά.





Πυκνωτής



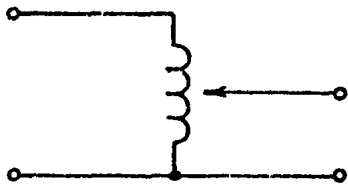
Ηλεκτρολυτικός πυκνωτής



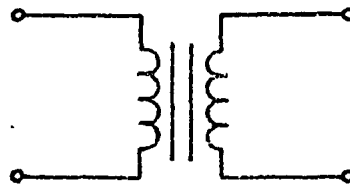
Μεταβλητός πυκνωτής



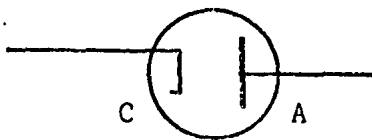
Πηνύο



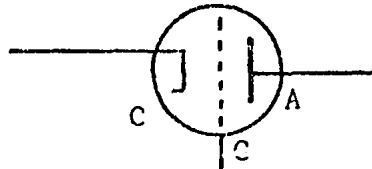
Αυτομετασχηματιστής (Variac)



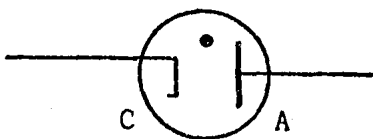
Μετασχηματιστής



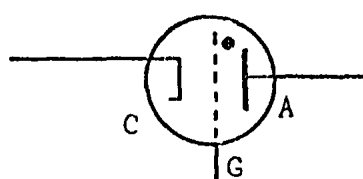
Δύοδος ηλεκτρονική λυχνία



Τρίοδος ηλεκτρονική λυχνία



Δύοδος αερίου



Τρίοδος αερίου





Κρυσταλλοδίοδος



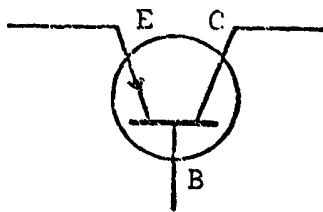
Δίοδος Zener



Δίοδος tunnel

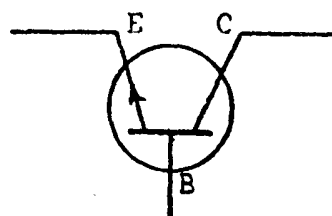


Δίοδος Varicap

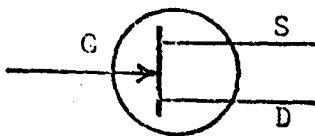


p-n-p

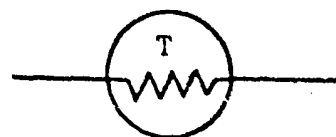
Κρυσταλλοτρίοδος



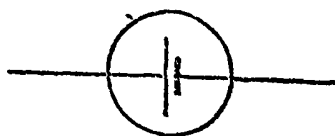
n-p-n



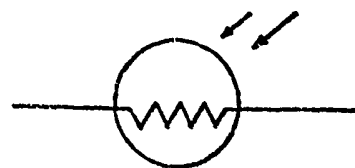
Κρυσταλλοτρίοδος F.E.T.



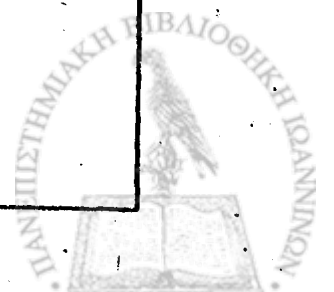
Thermistor



Φωτοβολταϊκό στοιχείο



Φωτοαντίσταση



Για την κατασκευή των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων εκτός από τις ποικίλες ηλεκτρονικές διατάξεις (λυχνίες, κρυσταλλολυχνίες κλπ.) χρησιμοποιούνται και διάφορα ηλεκτρονικά εξαρτήματα, όπως αντιστάσεις, πυκνωτές, ποτενσιόμετρα, μετασχηματιστές κλπ. Παρακάτω δίνονται μερικά βασικά στοιχεία για τα συνηθέστερα από τα εξαρτήματα αυτά.

Αντιστάσεις

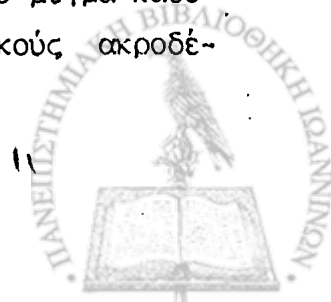
Είναι εξαρτήματα, που χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό της εντάσεως του ρεύματος στα διάφορα ηλεκτρονικά κυκλώματα καθώς και για τη δημιουργία με τη βοήθεια των ηλεκτρικών πηγών της επιθυμητής κάθε φορά τάσης πόλωσης μιας διατάξεως. Διακρίνονται σε δυο βασικές κατηγορίες· τις σταθερές αντιστάσεις, που η τιμή τους είναι καθορισμένη και αμετάβλητη, και τις μεταβλητές αντιστάσεις, που η τιμή τους μπορεί να μεταβάλλεται μεταξύ ενός ελάχιστου -συνήθως μηδενικού- και ενός μέγιστου όριου.

Σταθερές αντιστάσεις

Κατασκευάζονται από διάφορα υλικά, με διάφορες μεθόδους και διαφορετικές προδιαγραφές ανάλογα με τη χρήση, για την οποία προορίζονται. Ανεξάρτητα όμως από τον τρόπο και το υλικό κατασκευής της κάθε αντίσταση χαρακτηρίζεται από δύο φυσικά μεγέθη: α) Την τιμή της ηλεκτρικής ωμικής αντιστάσεώς της (π.χ. 270kΩ) και β) Τη μέγιστη ισχύ, που μπορεί να αντέξει, χωρίς να υπερθερμανθεί και καταστραφεί (π.χ. 0.5W). Η ισχύς αυτή σχετίζεται με το μέγιστο ρεύμα, που μπορεί να διέλθει από την αντίσταση, με τη γνωστή σχέση: $N = i^2 \cdot R$.

Οι συνηθέστεροι τύποι αντιστάσεων είναι:

α) Αντιστάσεις γραφίτη: Αποτελούνται από μίγμα σκόνης γραφίτη και ρητινικών πλαστικών. Ανάλογα με το ποσοστό αναλογίας γραφίτη στο μίγμα καθορίζεται η τιμή της αντιστάσεως. Έχουν συρματόμορφους μεταλλικούς ακροδέκτες και περιβάλλονται από πολυστυρενική μόνωση.



Παραλλαγή των αντιστάσεων γραφίτη αποτελούν οι αντιστάσεις ταινίας γραφίτη, που αποτελούνται από κεραμικό υλικό υψηλής ποιότητας, πάνω στο οποίο αποτίθεται με χημικό τρόπο ελικόμορφη ταινία γραφίτη το πάχος της οποίας καθορίζει την τιμή της αντιστάσεως. Οι αντιστάσεις αυτές έχουν καλύτερη ποιότητα κατασκευής και ακρίβεια τιμής, αλλά παράλληλα και μεγαλύτερο κόστος.

β) Αντιστάσεις σύρματος: Αποτελούνται συνήθως από λεπτό σύρμα μεταλλικού κράματος (χρωμονικελίνη, constantan κλπ) περιτυλιγμένο σε κεραμικό και προστατευμένο με μονωτικό υλικό. Έχουν γενικά μικρές τιμές και χρησιμοποιούνται, όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια και θερμοκρασιακή σταθερότητα. Παραλλαγή τους αποτελούν οι αντιστάσεις μεταλλικής ταινίας.

Κάθε αντίσταση αναγράφει πάνω της τα χαρακτηριστικά της μεγέθη (αντίσταση - ισχύ). Συνήθως όμως οι κατασκευαστές αντιστάσεων -ειδικά γραφίτη- χρησιμοποιούν το χρωματικό κώδικα. Η τιμή δηλαδή της αντιστάσεως εκφράζεται με ένα σύνολο τεσσάρων γραμμών, που ο κώδικας τους δίνεται στο σχήμα Σ-1. Έτσι π.χ. με βάση τον κώδικα αυτόν η αντίσταση, που έχει πάνω της την εξής διαδοχή χρωματιστών ταινιών:

Κόκκινο - Μαύρο - Πορτοκαλί - Αργυρό

έχει τιμή $20k\Omega \pm 10\%$. Αν η τρίτη ταινία είναι χρυσή ή αργυρή ο αριθμός των δύο πρώτων ψηφίων διαιρείται δια 10 ή 100 αντίστοιχα.

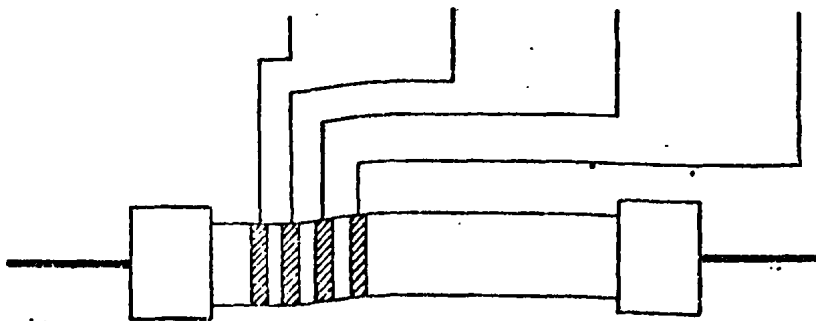
Οι αντιστάσεις γραφίτη κατασκευάζονται σε διάφορες τυποποιημένες τιμές, που εκτείνονται από 1Ω έως $27M\Omega$, ενώ μικρότερες από 1Ω και μεγαλύτερες από $27M\Omega$ καθώς και αντιστάσεις εκτός των τυποποιημένων τιμών κατασκευάζονται και χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές. Υπάρχουν επίσης ειδικές αντιστάσεις με ανοχή 1% ή και μικρότερη, που έχουν καλύτερη ποιότητα αλλά και υψηλότερο φυσικά κόστος.

Όσον αφορά την ισχύ τους οι αντιστάσεις άνθρακα (γραφίτη) κυκλοφορούν σε πέντε τύπους ($1/8W$, $1/4W$, $1/2W$, $1W$, $2W$), που διακρίνονται από το μέγεθός τους. Για μεγαλύτερες ισχύεις υπάρχουν ειδικής κατασκευής αντιστάσεις κεραμικές ή σύρματος συνήθως ($4W$ έως $1kW$).

Μεταβλητές αντιστάσεις (ή ροοστάτες)

Κατασκευάζονται τόσο σε τύπο σύρματος όσο και σε τύπο γραφίτη. Ο ένας ακροδέκτης τους είναι σταθερός, ενώ ο άλλος μετακινείται με τη βοήθεια μεταγωγού, έτσι ώστε το μήκος της αντιστάσεως, που παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο ακροδεκτών, να μεταβάλλεται. Μεταβάλλεται έτσι και η τιμή της αν-

Χρώμα	Δεκάδες	Μονάδες	Συντελεστής	Ανοχή
Μαύρο	0	0	10^0	Αργυρό $\pm 10\%$
Καφέ	1	1	10^1	
Κόκκινο	2	2	10^2	Χρυσό $\pm 5\%$
Πορτοκαλλί	3	3	10^3	
Κίτρινο	4	4	10^4	
Πράσινο	5	5	10^5	
Μπλέ	6	6	10^6	
Μωβ	7	7		
Γκρίζο	8	8		
Άσπρο	9	9		



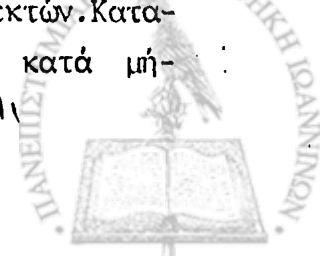
Χρωματικός κώδικας αντιστάσεων

Σχήμα Σ-1

αντιστάσεως.

Ποτενσιόμετρα

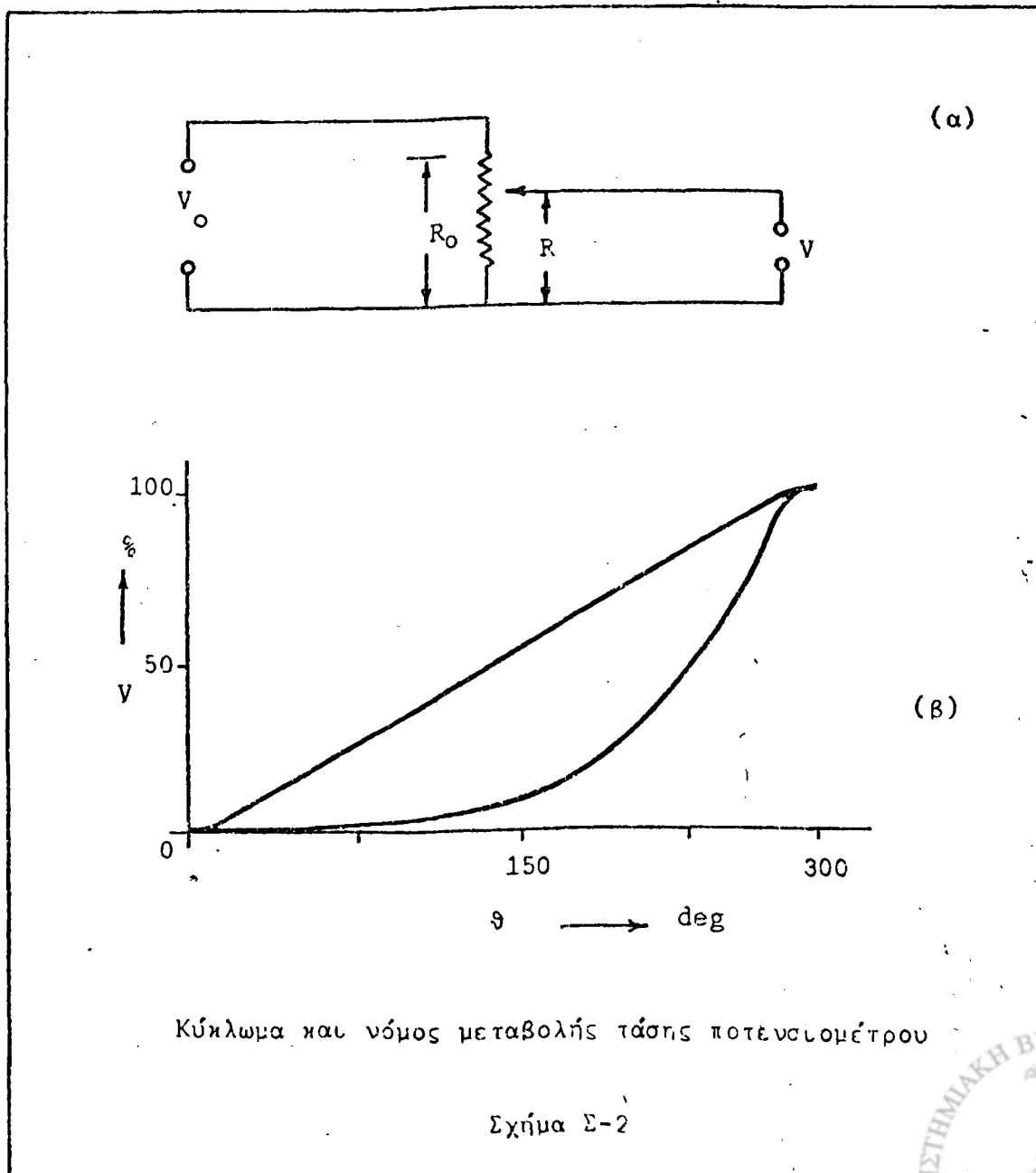
Είναι ηλεκτρονικά εξαρτήματα με τα οποία επιτυγχάνεται η λήψη ενδιαμέσων τιμών τάσης από μία σταθερή. Είναι συστήματα τριών ακροδεκτών. Κατασκευαστικά αποτελούνται από μια αντίσταση (σύρματος ή γραφίτη), κατά μή-



κος της οποίας μπορεί και κινείται ένας δρομέας. Όπως φαίνεται και στο σχήμα Σ-2.α, αν μεταξύ των άκρων Α και Β της αντίστασης εφαρμοσθεί τάση V_0 η τάση μεταξύ του δρομέα Γ και του άκρου Β θα είναι:

$$V = V_0 \cdot \frac{R_1}{R}$$

Μεταβάλλοντας τη θέση του δρομέα μεταβάλλεται η τιμή της R_1 , άρα και η τιμή της V από 0 έως V_0 . Συνήθως η αντίσταση R (γραφίτης ή σπείρα σύρματος) έχει σχήμα κυκλικού τόξου και ο δρομέας μετακινείται με περιστροφή ενός άξονα κατά 300° συνολικά. Υπάρχουν όμως και ποτενσιόμετρα γραμμικής μεταφοράς του δρομέα (συρόμενα).



Όπως και οι αντιστάσεις τα ποτενσιόμετρα χαρακτηρίζονται από δύο μέγεθη· την ολική αντίστασή τους και τη μέγιστη ισχύ, που μπορούν να δεχθούν. Συνήθως τα ποτενσιόμετρα γραφίτη έχουν μεγάλη αντίσταση (μέχρι $10\text{M}\Omega$) και χαμηλή ισχύ (μέχρι 2W), ενώ τα σύρματος αντίθετα μικρή αντίσταση (μέχρι 100Ω) και μεγάλη ισχύ (μέχρι 100W). Αν βέβαια οι ακροδέκτες Β και Γ ενός ποτενσιόμετρου βραχυκυκλωθούν εξωτερικά, μετατρέπεται άμεσα σε ροοστάτη.

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των ποτενσιόμετρων αποτελεί ο νόμος μεταβολής της τάσης στα άκρα τους Β και Γ (που συνδέεται βέβαια άμεσα με το νόμο μεταβολής της παρεμβαλλόμενης αντιστάσεως R) συναρτήσεως της γωνίας στροφής του. Αν η τάση αυτή μεταβάλλεται γραμμικά με τη γωνία στροφής του άξονα του δρομέα (καμπύλη (1) -σχήμα Σ-2.β), το ποτενσιόμετρο λέγεται γραμμικό. Αν όμως η τάση αυτή μεταβάλλεται ανάλογα προς τον αντιλογάριθμο της γωνίας στροφής, το ποτενσιόμετρο λέγεται λογαριθμικό. Τα γραμμικά ποτενσιόμετρα χρησιμοποιούνται κυρίως στα διάφορα όργανα (μετρήσεων κλπ), ενώ τα λογαριθμικά στις διάφορες ηχοσυσσκευές (ακουστικά ενισχυτές κλπ), διότι συνεργάζονται καλύτερα με τα αισθητήρια του ανθρώπου (αυτί π.χ.) που παρουσιάζουν επίσης λογαριθμική μεταβολή της ευαισθησίας τους (νόμος των Fechner-Weber).

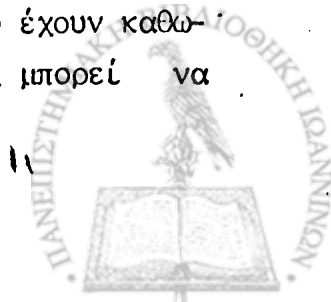
Απλοποιημένη μορφή των ποτενσιόμετρων αποτελούν τα trimmers, τα οποία δεν έχουν άξονα στροφής του δρομέα, η μετακίνησή του οποίου γίνεται με κοχλίοστρόφο (κατσαβίδι). Χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις, όπου ανάγκη μετοβολής της θέσης του δρομέα εμφανίζεται πολύ σπάνια.

Πυκνωτές

Είναι ηλεκτρονικά εξαρτήματα, που χρησιμοποιούνται κύρια για να παρεμποδίσουν ένα συνεχές ρεύμα κατά μήκος ενός αγωγού ή να βραχυκυκλώσουν μια εναλλασσόμενη συνιστώσα τάσης μεταξύ δύο σημείων.

Κύριο χαρακτηριστικό μέγεθος ενός πυκνωτή είναι η χωρητικότητά του, που εξαρτάται από το μέγεθος των οπλισμών του, τη μεταξύ τους απόσταση και το παρεμβαλλόμενο διηλεκτρικό. Επειδή η μονάδα Farad είναι πολύ μεγάλη, η χωρητικότητα εκφράζεται συνήθως με τα υποπολλαπλάσια της μF (10^{-6}F) και pF (10^{-12}F).

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες πυκνωτών· οι σταθεροί, που έχουν καθορισμένη χωρητικότητα και οι μεταβλητοί, που η χωρητικότητά τους μπορεί να μεταβάλλεται.



Σταθεροί πυκνωτές

Κατασκευάζονται με διάφορες μεθόδους και από διάφορα υλικά. Διακρίνονται όμως κυρίως βάσει του υλικού, που χρησιμοποιούν σα διηλεκτρικό. Έτσι υπάρχουν:

Πυκνωτές χάρτου: Αποτελούνται από δυο λεπτά φύλλα αλουμινίου, που μεταξύ τους παρεμβάλλεται φύλλο χαρτιού συχνά ποτισμένο με μονωτικό λάδι ή κερί για να αυξηθεί η διηλεκτρική σταθερά του. Το σύνολο περιτυλίγεται σε σχήμα κυλίνδρου και σφραγίζεται μέσα σε μεταλλικό ή πλαστικό περίβλημα. Επιτυγχάνεται έτσι μεγάλη χωρητικότητα σε μικρό όγκο.

Πυκνωτές μίκας και κεραμικοί: Έχουν σα διηλεκτρικό μαρμαρυγία ή κεραμικά υλικά αντίστοιχα. Συνήθως είναι μικρής χωρητικότητας και όγκου. Λόγω της μεγάλης σταθερότητας της χωρητικότητάς τους και των μικρών διηλεκτρικών απωλειών, που παρουσιάζουν, χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα υψηλών συχνοτήτων.

Πυκνωτές πολυστερίνης: Έχουν μικρό όγκο και μεγάλη ακρίβεια τιμής χωρητικότητας. Χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα ακριβείας.

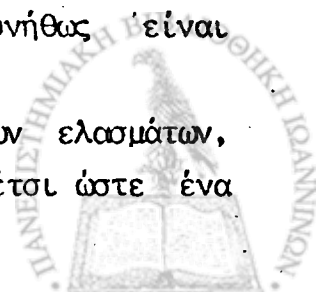
Ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές: Είναι ειδική κατηγορία πυκνωτών, που έχει την ιδιότητα να εμφανίζει πολικότητα συνδεσμολογίας. Οι παλιότερου τύπου (υγρού τύπου) ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές αποτελούνται από δύο μεταλλικά φύλλα (συνήθως αλουμινίου), που βυθίζονται μέσα σε ηλεκτρολυτικό διάλυμα (συνήθως βόρακα-βορικού οξέος). Όταν στα φύλλα αυτά εφαρμοσθεί διαφορά δυναμικού το ένα (θετικός πόλος) επικαλύπτεται από λεπτό στρώμα άλατος, που σαν μονωτικό σώμα αποτελεί το διηλεκτρικό του πυκνωτή. Το στρώμα αυτό έχει πάχος μερικών μορίων και για το λόγο αυτό εξασφαλίζει στον πυκνωτή μεγάλη χωρητικότητα. Οι νεώτερου τύπου (ξηρού τύπου) ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές έχουν τον ηλεκτρολύτη εμποτισμένο σε φύλλα απορροφητικού χαρτιού ή υφάσματος.

Είναι ευνόητο, ότι αν ένας τέτοιος πυκνωτής συνδεθεί σε κύκλωμα με πολικότητα αντίστροφη από την προβλεπόμενη, θα συμβεί ηλεκτρόλυση και θα διέλθει από μέσα του μεγάλο ρεύμα προκαλώντας τελικά την καταστροφή του. Σήμερα υπάρχουν βελτιωμένοι τύποι ηλεκτρολυτικών πυκνωτών, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε εναλλασσόμενες τάσεις.

Μεταβλητοί πυκνωτές

Οι μεταβλητοί πυκνωτές χρησιμοποιούνται κυρίως σε κυκλώματα συντονισμού (επιλογείς ραδιοφωνικών δεκτών ή πομπών, φίλτρα κλπ). Συνήθως είναι δύο τύπων:

Αέρα: Αποτελούνται από δύο ομάδες ομοαξονικών ημικυκλικών ελασμάτων, τα οποία με περιστροφή του κοινού τους άξονα μετακινούνται, έτσι ώστε ένα



διαφορετικό κάθε φορά τμήμα της επιφάνειάς τους -που αυξάνει, όσο αυξάνει η γωνία στροφής- να δρα σαν ενεργός οπλισμός του πυκνωτή. Επιτυγχάνονται έτσι διάφορες τιμές χωρητικότητας συνήθως μεταξύ 15 και 500 pF.

Στερεού διηλεκτρικού: Αποτελούνται από δύο ομοαξονικούς κυλίνδρους με ταξύ των οποίων παρεμβάλλεται κύλινδρος στερεού διηλεκτρικού (π.χ. κεραμικού). Με περιστροφή ενός κατάλληλα προσαρμοσμένου κοχλία επιτυγχάνεται η μεταβολή του εμβαδού του τμήματος των επιφανειών, που βρίσκονται απέναντι αλλήλων, άρα και της χωρητικότητας του συστήματος.

Όλοι οι πυκνωτές -σταθεροί και μεταβλητοί- χαρακτηρίζονται από δύο κυρίως μεγέθη. Το χωρητικόητά τους, που έχει ήδη αναφερθεί, και εξαρτάται βασικά από τη διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού υλικού τους (καθώς επίσης και από τις γεωμετρικές τους διαστάσεις) και τη μέγιστη τάση λειτουργίας τους, που βασικά εξαρτάται από τη διηλεκτρική αντοχή του διηλεκτρικού τους και είναι η μέγιστη διαφορά δυναμικού, που μπορεί να εφαρμοσθεί μεταξύ των οπλισμών τους χωρίς κίνδυνο να εκσπάσει ηλεκτρικός σπινθήρας και να καταστραφούν. Τα δύο αυτά χαρακτηριστικά μεγέθη αναγράφονται πάνω στους πυκνωτές. Ειδικά στους κεραμικούς πυκνωτές για την αναγραφή χρησιμοποιείται χρωματικός κώδικας όπως στις αντιστάσεις. Κατ'εξαίρεση στους ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές σημειώνεται και η πολικότητά τους.

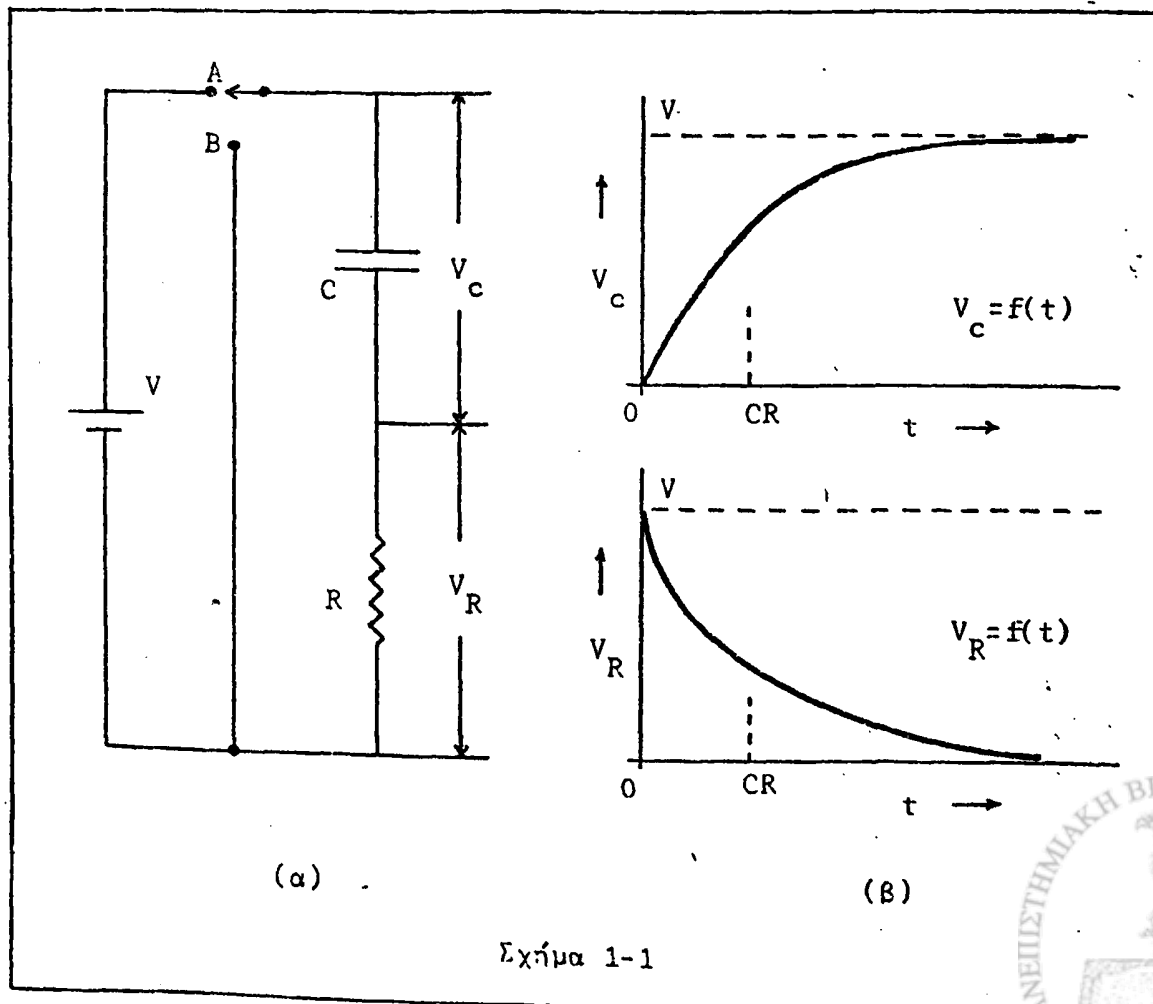
Εκτός από τα παραπάνω δύο μεγέθη καθοριστικός για την ποιότητα ενός πυκνωτή είναι και ο συντελεστής απωλειών ισχύος, που εκφράζει το ποσοστό ισχύος, που μετατρέπεται σε θερμότητα λόγω διηλεκτρικών απωλειών στο εσωτερικό του πυκνωτή, σε κάθε περίοδο μιας εναλλασσόμενης τάσης, που εφαρμόζεται στα άκρα του. Απώλειες ισχύος εμφανίζονται και κατά τη χρήση των πυκνωτών στο συνεχές (διαρροές). Είναι προφανές ότι στόχος είναι ο κατά το δυνατόν υποβιβασμός των απωλειών αυτών. Τους μεγαλύτερους συντελεστές απωλειών έχουν οι πυκνωτές χάρτιου και τους μικρότερους οι πυκνωτές πολυστερίνης.

Η χωρητικότητα των πυκνωτών, όπως και η αντίσταση των αντιστάσεων, επηρεάζεται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Πιο σταθεροί από θερμοκρασιακή άποψη είναι οι κεραμικοί πυκνωτές.



Εισαγωγή

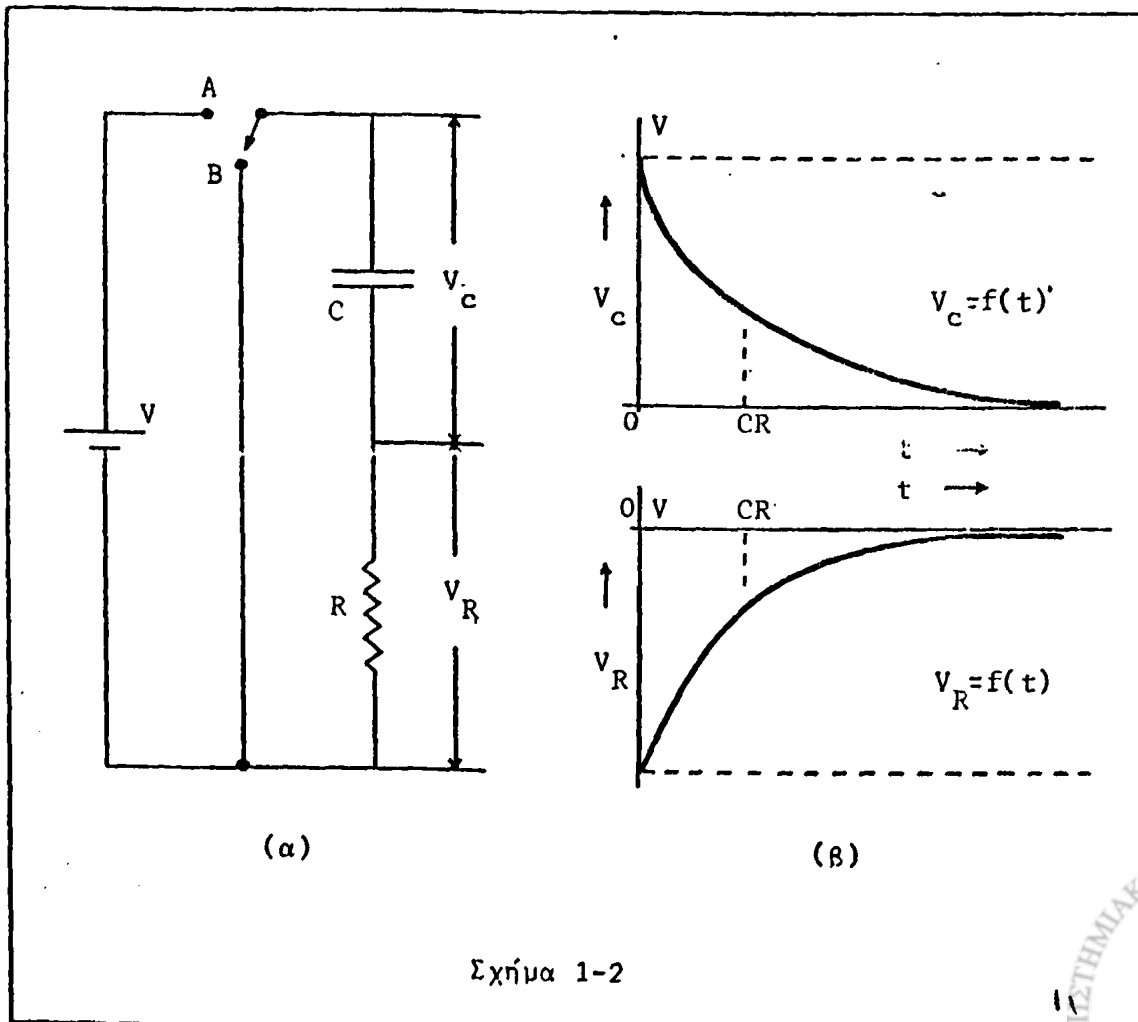
Υπενθυμίζονται αρχικά τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες ενός τυπικού κυκλώματος RC σε σειρά. Έτσι ονομάζεται το κύκλωμα, που περιλαμβάνει έναν πυκνωτή και μια αντίσταση συνδεσμοποιημένους σε σειρά, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1-1.α. Έστω ότι αρχικά όλοι οι κλάδοι του κυκλώματος είναι ανοικτοί και τη χρονική στιγμή $t=0$ ο μεταγωγός μετακινείται στη θέση Α αποκαθιστώντας σε ενιαίο κύκλωμα τους δύο εξωτερικούς κλάδους. Είναι γνωστό τότε, ότι το κύκλωμα θα αρχίσει να διαρρέεται από ένα ρεύμα, που λόγω φόρτισης του πυκνωτή διαρκώς θα ελαττώνεται, και ότι οι τάσεις στα άκρα του πυκνωτή V_C και της αντίστασης V_R θα είναι συναρτήσεις του χρόνου και θα έ-



$$t_{\text{φορτ}}^c \approx 6RC \approx t_{\text{εκφορτ}}^c$$

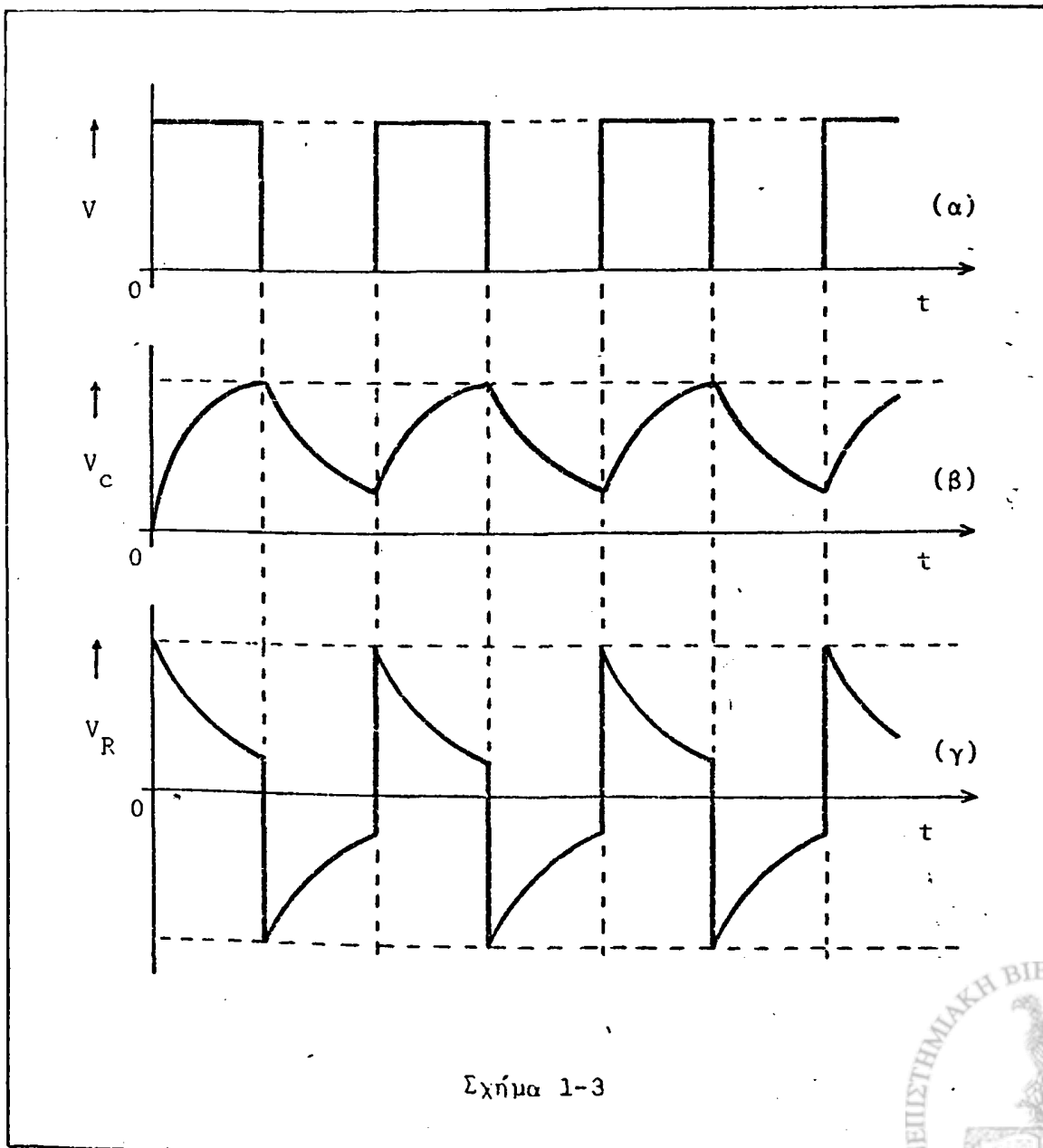
χουν τη μορφή του σχήματος 1-1β. Το άθροισμα βέβαια των τάσεων $V_C + V_R$ πρέπει να ισούται πάντοτε προς την τάση V της πηγής τροφοδοσίας. Μετά από παρέλευση αρκετού χρόνου, που είναι τουλάχιστον ίσος προς το εξαπλάσιο της σταθεράς χρόνου RC του κυκλώματος, ο πυκνωτής φορτίζεται σχεδόν εντελώς, το ρεύμα μηδενίζεται και η πτώση τάσης στα άκρα της αντιστάσεως μηδενίζεται επίσης, με αποτέλεσμα ολόκληρη η εφαρμοζόμενη τάση να εμφανίζεται στα άκρα του πυκνωτή.

Αν τώρα ο μεταγωγός μετακινηθεί στη θέση Β, η πηγή απομονώνεται και ο πυκνωτής βραχυκυκλώνεται μέσω της αντιστάσεως R (σχήμα 1-2α). Αρχίζει λοιπόν να εκφορτίζεται μέσω αυτής και η τάση στα άκρα του να ελαττώνεται μέχρις ότου μηδενισθεί πρακτικά μετά πάροδο αρκετού χρόνου, όσου απαιτήθηκε για τη φόρτισή του. Ταυτόχρονα με την έναρξη της εκφορτίσεως εμφανίζεται στα άκρα της αντιστάσεως μια τάση αντίθετου σημείου προς την τάση του πυκνωτή, επειδή τώρα η αντίσταση διαρρέεται από αντίρροπο ρεύμα, και ίση κατά μέτρο προς αυτήν, επειδή πρέπει πάντα να ισχύει η σχέση $V_R + V_C = 0$, εφόσον στο κύκλωμα δεν υπάρχει πηγή. Είναι προφανές, ότι και η τάση αυτή ελαττώνεται κατά απόλυτη τιμή συναρτήσει του χρόνου και τελικά μηδενίζεται ό-



πως φαίνεται και στο σχήμα 1-2β.

Αν ο μεταγωγός κινείται συνέχεια παραμένοντας επί ίσα χρονικά διαστήματα τόσο στη θέση Α όσο και στη θέση Β, τότε η τάση, που εφαρμόζεται στα άκρα του κυκλώματος RC έχει τη μορφή του σχήματος 1-3α. Η μορφή αυτή ονομάζεται τετραγωνικός παλμός και, αν η περίοδος του ισούται με τη σταθερά χρόνου του κυκλώματος, στα άκρα των C και R θα εμφανίζονται οι κυματομορφές του σχήματος 1-3β και 1-3γ αντίστοιχα. Συνήθως οι σταθερές χρόνου των διαφόρων κυκλωμάτων είναι πολύ μικρές (τάξη των μsec) και είναι εξαιρετικά δυσχερές να βρεθούν κατάλληλοι μηχανικοί διακόπτες, ώστε να είναι δυνατή η παρατήρηση των κυματομορφών, που αναφέραμε. Χρησιμοποιούνται λοιπόν εναλλακτικά αντί της συνεχούς πηγής και του διακόπτη ειδικές γεννήτριες, που παρέχουν απ' ευθείας την κυματομορφή του σχήματος 1-3α στην είσοδο του κυκλώματος (γεννήτριες τετραγωνικών παλμών).



Σχήμα 1-3

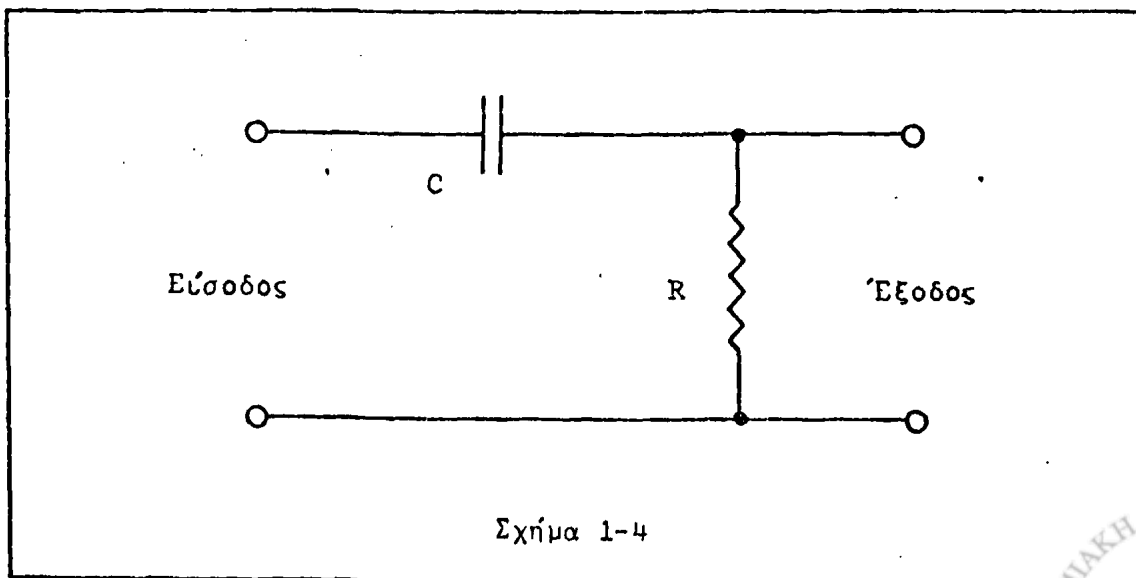


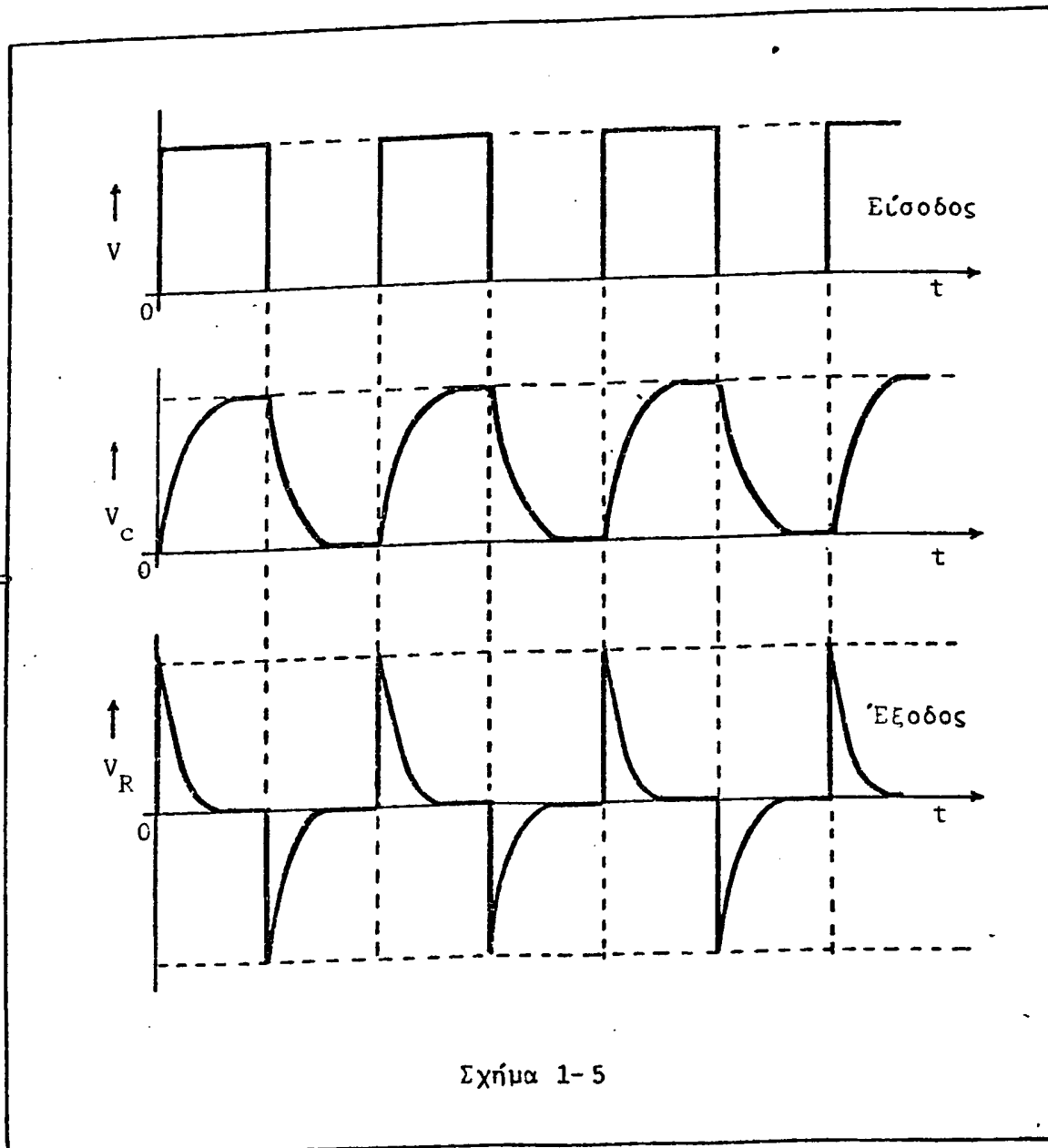
Κυκλώματα διαφορίσεως

Έτσι ονομάζονται τα κυκλώματα, που στην έξοδό τους παρέχουν μία τάση ανάλογη προς την χρονική παράγωγο της τάσης, που εφαρμόζεται στην εισοδό τους. Ένα κύκλωμα RC, σαν αυτό που μελετήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο μπορεί να δράσει σαν κύκλωμα διαφορίσεως, αν έξοδός του θεωρηθούν τα άκρα της αντιστάσεως R (σχήμα 1-4) και η σταθερά χρόνου του επιλεγεί έτσι, ώστε να είναι πολύ μικρότερη από την περίοδο του παλμού, που εφαρμόζεται στην εισοδό του.

Από φυσική άποψη εφ'όσον η σταθερά χρόνου του κυκλώματος είναι πολύ μικρότερη από την περίοδο του τετραγωνικού παλμού εισόδου τάσης V , ο πυκνωτής προλαβαίνει να φορτισθεί πλήρως και η τάση στα άκρα του να εξισωθεί προς την τάση της πηγής πολύ πριν τη λήξη του πρώτου μισού του παλμού ($V \neq 0$). Σα συνέπεια το ρεύμα του κυκλώματος και η πτώση τάσης στα άκρα της αντιστάσεως R μηδενίζονται επίσης πολύ πριν τη λήξη της πρώτης ημιπεριόδου. Αντίστοιχα κατά το δεύτερο μισό του παλμού ($V = 0$) ο πυκνωτής προλαβαίνει να εκφορτισθεί πλήρως και κατ'ακολουθία η τάση στα άκρα της R να μηδενισθεί πολύ πριν από τη λήξη του επίσης. Προκύπτουν λοιπόν για τις τάσεις στα άκρα του πυκνωτή και της αντιστάσεως οι κυματομορφές του σχήματος 1-5 (β και γ).

Με απλό τρόπο μπορεί να αποδειχθεί, ότι η τάση στα άκρα της αντιστάσεως είναι ανάλογη της χρονικής παραγώγου της τάσης εισόδου. Σύμφωνα με την υπόθεση, που έγινε δεκτή, ισχύει:





$f = 100 \text{ Hz}$
 $\omega = 2\pi f$
 $= 200\pi$
 $\frac{1}{\omega C} \gg R$
 όταν το
 C & το
 R να είναι
 μικρότερο
 από better
 $C = 0.01 \mu\text{F}$
 $R = 470 \Omega$

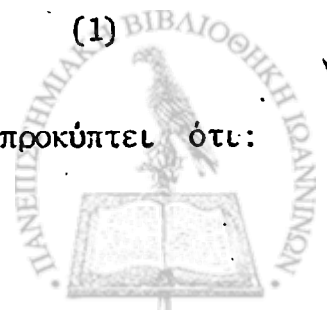
$$T \gg RC \rightsquigarrow T \gg 2\pi RC \rightsquigarrow \frac{T}{2\pi C} \gg R \rightsquigarrow$$

$$\rightsquigarrow \left[\frac{1}{\omega C} \gg R \right]$$

Η σχέση αυτή σημαίνει ότι η αντίσταση του πυκνωτή στη διέλευση του σήματος εισόδου είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίσταση της αντιστάσεως R , άρα και η πτώση τάσης στα άκρα του (V_C) θα είναι πολύ μεγαλύτερη από την πτώση τάσης στα άκρα της R (V_R). Δηλαδή:

$$\underline{\underline{V_C \gg V_R}}$$

Εφαρμόζοντας το δεύτερο κανόνα του Kirchhoff στο κύκλωμα προκύπτει ότι:



$$V = V_C + V_R$$

που βάσει της (1) γίνεται:

$$V = V_C$$

Είναι γνωστό όμως ότι:

$$V_C = \frac{q}{C} \leadsto q = V_C \cdot C = V \cdot C$$

και ότι:

$$i = \frac{dq}{dt} \leadsto i = C \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

Η διαφορά δυναμικού όμως στα άκρα της R δίδεται από τη σχέση:

$$V_R = i \cdot R$$

που βάσει της (2) γίνεται:

$$\boxed{V_R = RC \frac{dV}{dt}} \quad \checkmark$$

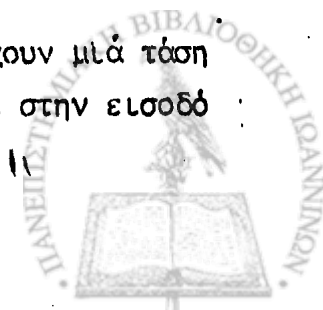
Η εξίσωση αυτή εκφράζει το ζητούμενο, δηλαδή ότι η τάση στην έξοδο του κυκλώματος είναι ανάλογη προς την παράγωγο της τάσης εισόδου.

Όσο μικρότερη είναι η σταθερά χρόνου τόσο οξύτεροι θα είναι οι παλμοί εξόδου, ενώ το ύψος τους εξαρτάται και από την ταχύτητα εναλλαγής (μεταπτώσεις) της τάσης εισόδου μεταξύ των τιμών 0 και V.

Εκτός από το κύκλωμα, που περιγράφηκε, υπάρχουν και άλλα κυκλώματα παραγωγίσεως, όπως κυκλώματα LC κλπ. Χρησιμοποιούνται κυρίως στην παραγωγή οξέων ετεροσήμων διαδοχικών παλμών, οι οποίοι διεγείρουν άλλα κυκλώματα.

Κυκλώματα ολοκληρώσεως

Έτσι ονομάζονται τα κυκλώματα, που στην έξοδό τους παρέχουν μία τάση ανάλογη προς το χρονικό ολοκλήρωμα της τάσης, που εφαρμόζεται στην εισοδό



τους. Ένα κύκλωμα RC σαν τα προηγούμενα μπορεί να δράσει σαν κύκλωμα ολοκληρώσεως, αν έξοδος του θεωρηθούν τα άκρα του πυκνωτή (σχήμα 1-6) και η σταθερά χρόνου του επιλεγεί έτσι, ώστε να είναι πολύ μεγαλύτερη από την περίοδο του πολμού εισόδου.

Από φυσική άποψη επειδή η σταθερά χρόνου του κυκλώματος είναι μεγάλη, ο πυκνωτής δεν προλαβαίνει ούτε να φορτισθεί, αλλά ούτε και να εκφορτισθεί πλήρως. Η τάση στα άκρα του αυξομειώνεται περιοδικά και συμμετρικά περί την τιμή $V/2$. Αντίστοιχα το ρεύμα φορτίσεως δεν μηδενίζεται (εκτός των σημείων ασυνεχείας) ποτέ και η τάση στα άκρα της αντίστασης έχει πάντοτε μη μηδενικές θετικές ή αρνητικές τιμές. Προκύπτουν λοιπόν στα άκρα των C και R οι κυματομορφές του σχήματος 1-7(β και γ).

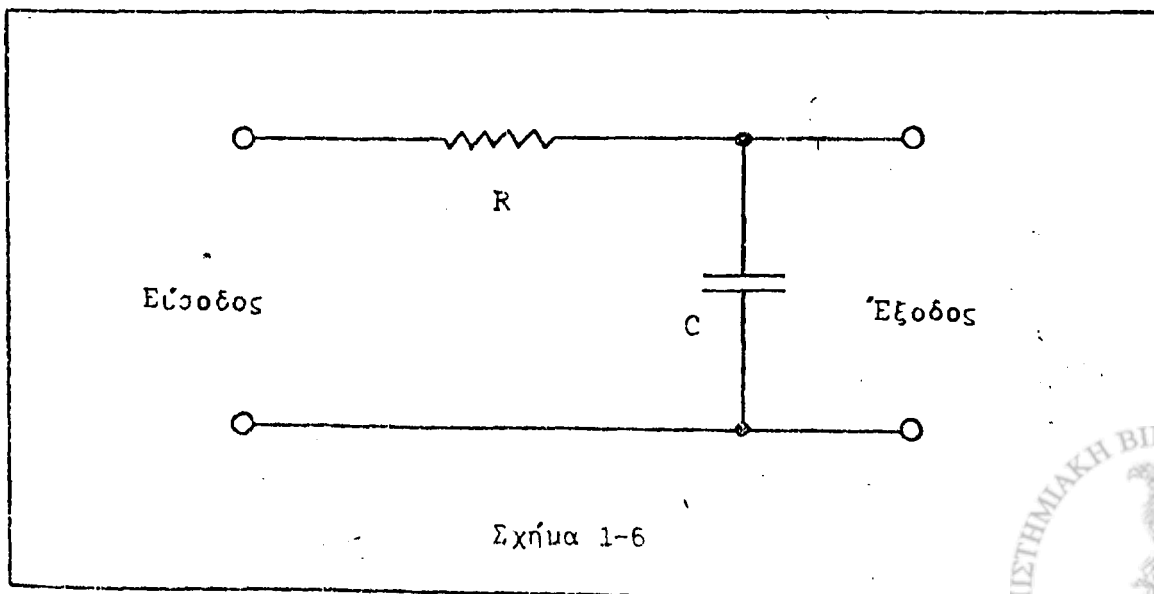
Σύμφωνα με την υπόθεση για τη σχέση περιόδου και σταθεράς χρόνου ισχύει ότι:

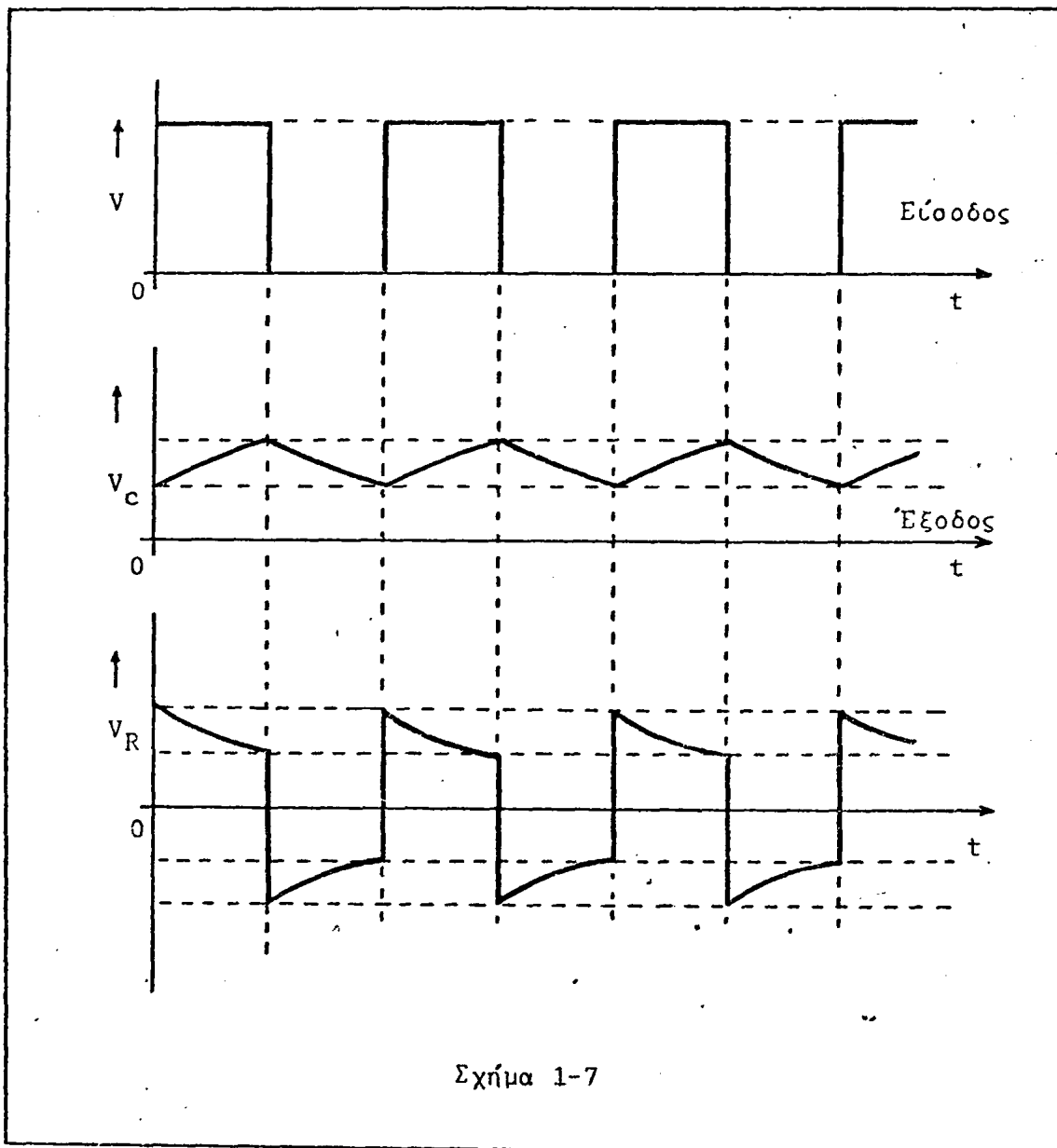
$$\begin{aligned} & \omega = 2\pi f \text{ για } f = 1000 \text{ Hz} \\ & \text{καλύτερα και } C = 0,1 \mu\text{F} \\ & \text{και } R = 10 \text{ K}\Omega = 10^3 \Omega \end{aligned} \quad T \ll RC \rightsquigarrow T \ll 2\pi RC \rightsquigarrow \frac{T}{2\pi C} \ll R \rightsquigarrow$$

$$\rightsquigarrow \left[\frac{1}{\omega C} \ll R \right]$$

Η σχέση αυτή βέβαια σημαίνει, ότι η ωμική αντίσταση του κυκλώματος είναι πολύ μεγαλύτερη από τη χωρητική και η πτώση τάσης κατά συνέπεια στα άκρα της R είναι πολύ μεγαλύτερη από την πτώση τάσης στα άκρα του C, ήτοι:

$$\underline{\underline{V_R \gg V_C}} \quad (3)$$





Εφαρμογή του δεύτερου κανόνα του Kirchhoff στο κύκλωμα δίνει:

$$V = V_R + V_C$$

που βάσει της (3) γίνεται:

$$V = V_R \rightsquigarrow$$

$$\rightsquigarrow V = i \cdot R$$

Για την τάση στα άκρα του πυκνωτή ισχύει κατά τα γνωστά:



$$V_c = \frac{q}{C} \leadsto dV_c = \frac{1}{C} \cdot dq \leadsto$$

$$\leadsto dV_c = \frac{1}{C} i \cdot dt = \frac{i \cdot dt}{C}$$

Η τελευταία σχέση λόγω της (4) γράφεται:

$$dV_c = \frac{V \cdot dt}{RC}$$

και με ολοκλήρωση συνάγεται η σχέση:

$$V_c = \frac{1}{RC} V \cdot dt \quad \checkmark$$

που εκφράζει το ζητούμενο, δηλαδή ότι η τάση στην έξοδο του κυκλώματος (V_c) είναι ανάλογη προς το ολοκλήρωμα της τάσης εισόδου V .

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 1-7 η κυματομορφή εξόδου είναι σχεδόν τριγωνικός παλμός. Σημειώνεται, ότι σε όλη την παροπώνω μελέτη η σύνθετη αντίσταση της πηγής τροφοδοσίας-γεννήτριας τετραγωνικού παλμού θεωρήθηκε αμελητέα.

Απαραίτητες γνώσεις

Δ. Μ. Μηλιώτη: Στοιχεία αναλύσεως κυκλωμάτων, σελ. 187-203

Χρησιμοποιούμενα όργανα

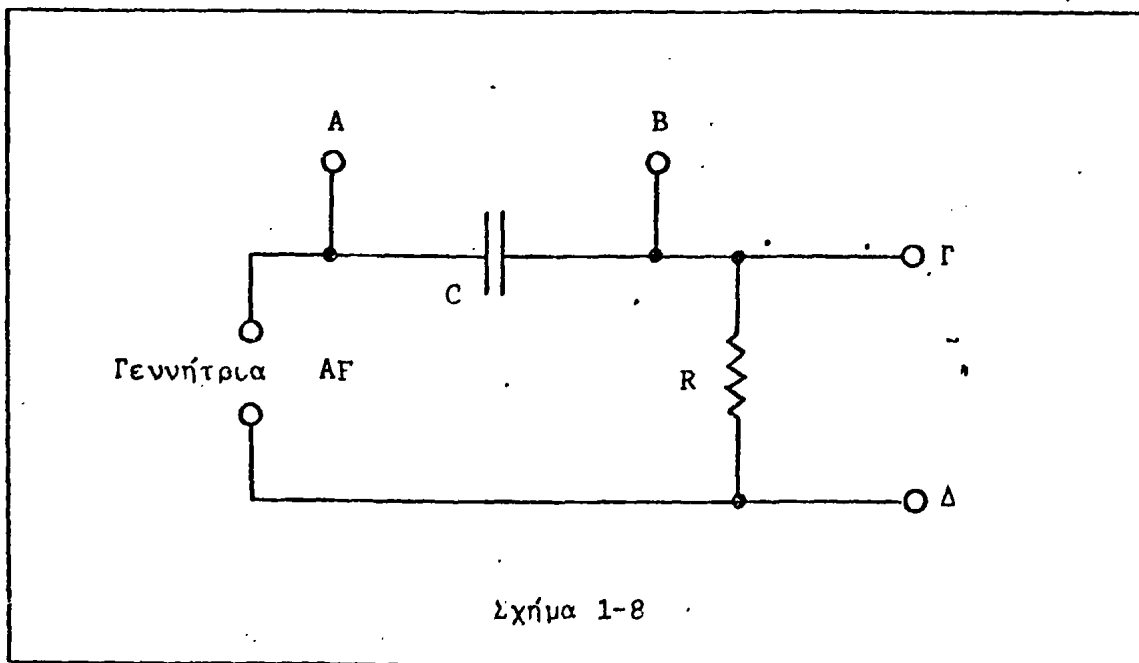
1. Γεννήτρια τετραγωνικού παλμού ακουστικών συχνοτήτων
2. Παλμογράφος
3. Αντιστάσεις: $10k\Omega - 0.5W$, $470\Omega - 0.5W$
4. Πυκνωτές: $0.1 \mu F$, $0.01 \mu F$.



Πειραματικό μέρος

Προσοχή: Μη γειώνετε σε κανένα σημείο (εκτός της γείωσης του παλμογράφου) το κύκλωμά σας. Αν στη γεννήτρια AF υπάρχει βραχυκυκλωτήρας μεταξύ των ακροδεκτών (-) και ($\frac{+}{-}$) αποσυνδέστε τον.

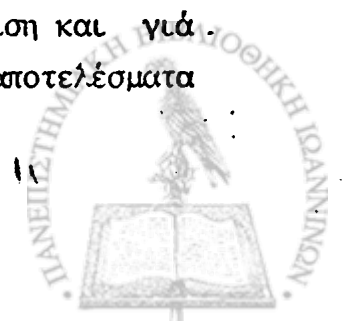
1. Πραγματοποιείτε το κύκλωμα του σχήματος 1-8 για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς πυκνωτών και αντιστάσεων. Ρυθμίστε τη συχνότητα της γεννήτριας στην τιμή $f=100\text{Hz}$ και την τάση εξόδου της στην τιμή $V = 4V_{p-p}$ (από κορυφή σε κορυφή). Η ρύθμιση αυτή να γίνει με τη βοήθεια του βαθμολογημένου κατά τάση και συχνότητα παλμογράφου. Για κάθε συνδυασμό R και C παρατηρήστε τις κυματομορφές των V_C και V_R συνδέοντας τον παλμογράφο στους ακροδέκτες A, B και Γ, Δ αντίστοιχα.



2. Σχεδιάστε τις κυματομορφές, που παρατηρήσατε, αναγράφοντας δίπλα σε κάθε μία τον συνδυασμό R-C, στον οποίο αντιστοιχεί. Η σχεδίαση να γίνει κάτω από τον τετραγωνικό παλμό εισόδου, όπως στο σχήμα 1-7.

3. Επαναλάβετε τα ίδια για συχνότητα τετραγωνικού παλμού $f = 1000\text{Hz}$.

4. Για ποίο συνδυασμό των R-C-f έχετε την καλύτερη διακρόση και για ποίον την καλύτερη ολοκλήρωση; Συμφωνούν τα πειραματικά σας αποτελέσματα με τη θεωρητική πρόβλεψη;



Άριστη διαφώριση

C =	μF
R =	Ω
f =	Hz

Άριστη ολοκλήρωση

C =	μF
R =	Ω
f. =	Hz

Ερωτήσεις

1. Είναι δυνατόν να υπάρξει κύκλωμα παραγωγής απόλυτα τετραγωνικού παλμού;
2. Από μαθηματικά αποκλειστικά άποψη τι περιμένετε για την παράγωγο και το ολοκλήρωμα ενός αυστηρά τετραγωνικού παλμού;
3. Τι συμβαίνει αν η εσωτερική αντίσταση της γεννήτριας τετραγωνικού παλμού δεν είναι αμελητέα, αλλά έχει καθαρά ωμική συμπεριφορά;



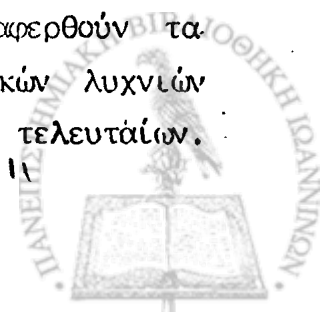
ΑΣΚΗΣΗ 2ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΛΥΧΝΙΕΣ ΚΕΝΟΥΜΕΛΕΤΗ ΠΕΝΤΟΔΟΥΕισαγωγή

Η εποχή των ηλεκτρονικών λυχνιών αρχίζει ουσιαστικά το 1904 με την επινόηση της διόδου από τον Fleming και τελειώνει περίπου στις αρχές της δεκαετίας του '70, οπότε μετά μια εικοσαετία φθίνουσας χρήσης περιορίζονται πιά μόνο σε εντελώς ειδικές κατασκευές και εφαρμογές. Η κατασκευή των πρώτων ηλεκτρονικών λυχνιών σήμανε και τη γέννηση μιας νέας επιστήμης της Ηλεκτρονικής, που η συμβολή της σήμερα στην τεχνολογική και πολιτιστική εξέλιξη της ανθρωπότητας είναι σχεδόν αδύνατο να εκτιμηθεί.

Παρά το σταδιακό περιορισμό της χρησιμοποιήσεώς τους και την αντικατάστασή τους από κρυσταλλολυχνίες ακόμη και σήμερα σε αρκετές ηλεκτρονικές κατασκευές κυρίως ειδικών προδιαγραφών και επιδόσεων χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικές λυχνίες, καθώς και σε όλες σχεδόν τις βαθμίδες εξόδου πομπών μεγάλης ισχύος. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος, για τον οποίο ακόμη και σήμερα είναι χρήσιμο και σκόπιμο εκπαιδευτικά να μελετώνται οι βασικές αρχές λειτουργίας, τα χαρακτηριστικά, οι επιδόσεις και η λογική των ηλεκτρονικών λυχνιών.

Ηλεκτρονικών λυχνιών υπάρχουν πολλά είδη. Η ταξινόμησή τους γίνεται ως προς διάφορα χαρακτηριστικά, όπως: είδος καθόδου (θερμής-ψυχρής), αριθμός ηλεκτροδίων (δίοδοι, τρίοδοι κλπ.), περιεχόμενο (κενού, αερίου), ειδικά χαρακτηριστικά (φωτοδιόδοι, κλύστρον κλπ.). Στα παρακάτω γίνεται συνοπτική αναφορά στα πρακτικά στοιχεία των τεσσάρων βασικών τύπων λυχνιών κενού (δίωδος, τρίωδος, τέτρωδος, πέντοδος), που επαμίστηκαν και τον κύριο όγκο των ηλεκτρονικών εφαρμογών τα προηγούμενα 60 χρόνια, και ειδικότερα μελετάται πειραματικά η πέντοδος, η οποία ακόμη και σήμερα είναι η τελειότερη λυχνία γενικής χρήσης.

Πριν όμως από οποιαδήποτε επι μέρους αναφορά πρέπει να αναφερθούν τα στοιχεία συγκρίσεως (πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα) των ηλεκτρονικών λυχνιών και κρυσταλλολυχνιών ώστε να αιτιολογηθεί και η επικράτηση των τελευταίων.



Έτσι λοιπόν οι κρυσταλλολυχνίες πλεονεκτούν κύρια κατά το ότι: α) Εργάζονται με εξαιρετικά μικρότερη κατανάλωση ισχύος, κύρια επειδή δεν απαιτούν ισχύ θερμάνσεως. β) Έχουν πολύ μικρότερο όγκο. γ) Εργάζονται και σε πολύ χαμηλές τάσεις. δ) Έχουν πολύ καλύτερη μηχανική αντοχή. ε) Συνδεσμολογούνται απλούστερα και ευχερέστερα στα διάφορα κυκλώματα. στ) Έχουν πολύ μικρότερο κόστος και ταχύτερους ρυθμούς μαζικής παραγωγής.

Αντίστοιχα οι ηλεκτρονικές λυχνίες πλεονεκτούν κύρια κατά το ότι: α) Έχουν πολύ καλύτερη αντοχή έναντι ηλεκτρικών διαταραχών (βραχυκυκλώματα, υπερτάσεις κλπ) του κυκλώματος λειτουργίας τους. β) Επηηρεάζονται λιγότερο από θερμοκρασιακές μεταβολές του περιβάλλοντος λειτουργίας. γ) Η μεταβολή και προσαρμογή του σχεδιασμού τους είναι ευκολότερη. δ) Είναι συστήματα ελεγχόμενα από τάσεις, ενώ η πλειοψηφία των κρυσταλλολυχνιών ελέγχεται από ρεύματα, με αποτέλεσμα να επιτρέπουν ευχερέστερη σχεδίαση και υπολογισμό κυκλωμάτων.

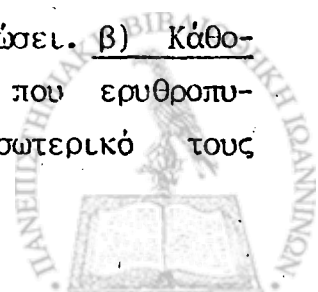
Είναι προφανές, ότι τα πλεονεκτήματα των κρυσταλλολυχνιών είναι συντριπτικά τόσο από λειτουργική, όσο και από οικονομοτεχνική άποψη.

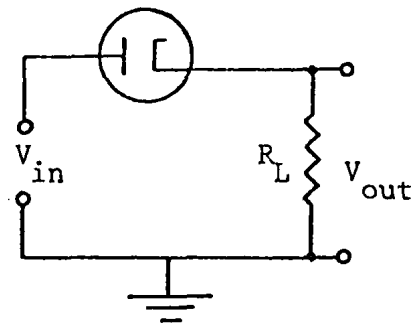
Δίοδος ηλεκτρονική λυχνία

Η δίοδος είναι η παλιότερη και απλούστερη ηλεκτρονική λυχνία. Η δομή και το βασικό κύκλωμα συνδεσμολογίας της δίδονται στο σχήμα 2-1.α. Από κατασκευαστική άποψη έχει σχεδόν πάντοτε σχήμα κυλινδρικό, γυάλινο περίβλημα και η πίεση στο εσωτερικό της ποικίλει μεταξύ 10^{-5} και 10^{-8} Torr, ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζεται. Έχει βέβαια, όπως και η ονομασία της μαρτυρεί, δύο ηλεκτρόδια την κάθοδο, με μηδενικό συνήθως δυναμικό, και την άνοδο, με μέσο θετικό συνήθως δυναμικό.

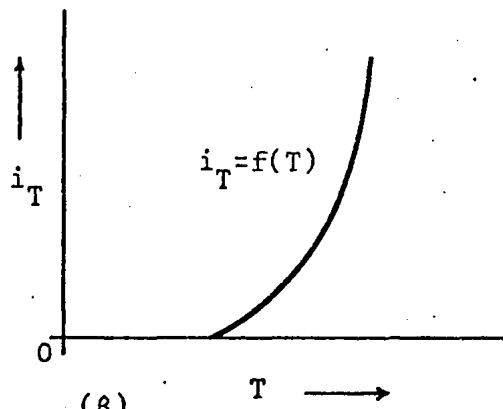
Η κάθοδος είναι συνήθως ραβδόμορφη και τοποθετείται κατά μήκος του άξονα της λυχνίας. Ρόλος της είναι να παρέχει τη μεγαλύτερη δυνατή θερμονική εκπομπή ηλεκτρονίων και παράλληλα να έχει μια σειρά άλλα μικρής ή μεγάλης σημασίας χαρακτηριστικά.

Υπάρχουν δυο κατηγορίες καθόδων με ειδικολογία διαφορά τον τρόπο θερμάνσεώς τους. α) Κάθοδοι άμεσου θερμάνσεως: θερμαίνονται με διέλευση μέσα από το ίδιο το υλικό τους ενός ρεύματος ικανού να τις ερυθροπυρώσει. β) Κάθοδοι εμμέσου θερμάνσεως: θερμαίνονται με τη βοήθεια νήματος, που ερυθροπυρώνεται με διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος και βρίσκεται στο εσωτερικό τους

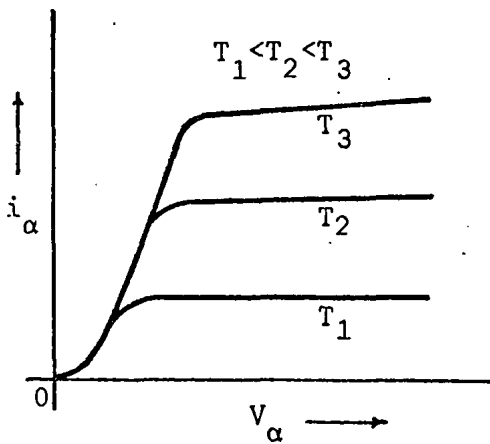




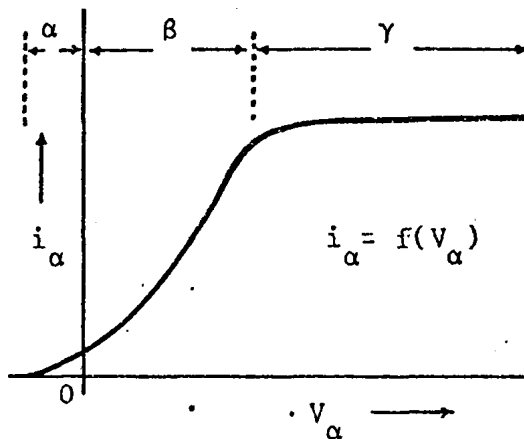
(α)



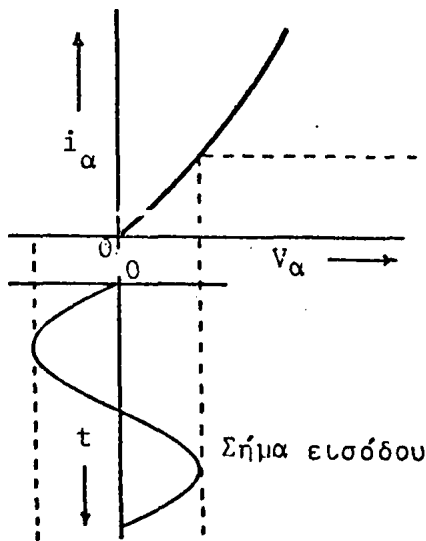
(β)



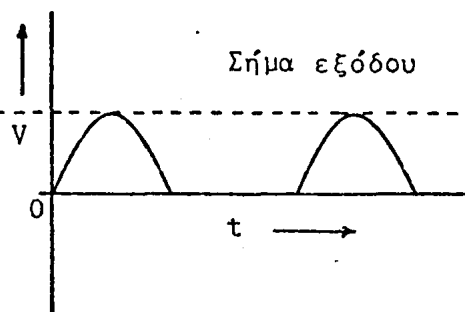
(γ)



(δ)



Σήμα εισόδου



Σήμα εξόδου

Κύκλωμα ημιανορθώσεως με δύοοδο

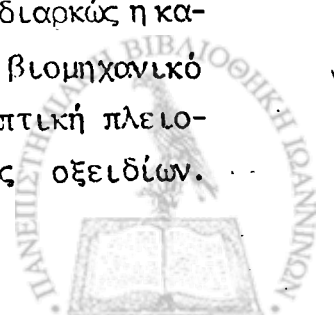
(ε)

Σχήμα 2-1



χωρίς να έρχεται σε ηλεκτρική επαφή μαζί τους. Οι κάθοδοι αμέσου θερμάνσεως πλεονεκτούν κυρίως ως προς την ταχύτητα ενάρξεως λειτουργίας, αλλά μειονεκτούν ως προς το ότι: α) Έχουν μικρή θερμική αδράνεια, με αποτέλεσμα μικρομεταβολές στην τάση θερμάνσεως να έχουν άμεσο αντίκτυπο στο θερμιονικό ρεύμα. β) Επειδή τροφοδοτούνται συνήθως με εναλλασσόμενο ρεύμα, το δυναμικό εκκινήσεως των ηλεκτρονίων δεν είναι σταθερό και κοινό για όλα τα ηλεκτρόνια. γ) Είναι δυσχερής η κατασκευή τέτοιων καθόδων με επιχρίσματα οξειδίων, που, όπως αναφέρεται αμέσως παρακάτω, αυξάνουν σημαντικά την ικανότητα θερμιονικής εκπομπής.

Το πρώτο υλικό κατασκευής καθόδων ήταν το βολφράμιο, που είναι μέταλλο δύστηκτο, με χαμηλή τάση ατμών ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες και πολύ ανθεκτικό. Επειδή όμως έχει μεγάλο έργο εξαγωγής ($\approx 4.5\text{eV}$) επιδιώχθηκε υποβιβασμός του με διάφορους τρόπους. Πρακτικά έχουν επικρατήσει οι εξής δύο: α) Κάθοδοι θοριωμένου βολφραμίου: Προσθήκη οξειδίου του θόριου σε ποσοστό 1-2% στο βολφράμιο δημιουργεί ένα μονοατομικό στρώμα θόριου στην επιφάνεια της καθόδου, το οποίο στρώμα έχει σημαντικά μικρότερο έργο εξαγωγής ($= 3.4\text{eV}$) και εξαχνώνεται πολύ λιγότερο από το κοινό θόριο. β) Κάθοδοι οξειδίων: Στις καθόδους αυτές το κύριο υλικό τους είναι νικέλιο ή κράμα Κοπα1. Το μέταλλο αυτό επικαλύπτεται με επίχρισμα οξειδίων μετάλλων αλκαλικών γαιών, συνήθως βάριου ή στρόντιου. Με τον τρόπο αυτό το έργο εξαγωγής της καθόδου εξισώνεται με το έργο εξαγωγής του βάριου ή στρόντιου (2.5 eV και 2.1 eV αντίστοιχα). Επιτυγχάνονται έτσι για σταθερό ρυθμό θερμιονικής εκπομπής ηλεκτρονίων μικρότερες θερμοκρασίες καθόδου, πράγμα που σημαίνει μικρότερες ισχείς θερμάνσεως και καλύτερο κενό στο εσωτερικό των λυχνιών. Σημαντικό ακόμη πλεονέκτημα των καθόδων οξειδίων είναι η ικανότητά τους να παρέχουν υψηλής πυκνότητας στενιμαία ρεύματα (π.χ. είναι εφικτή η παροχή παλμών πυκνότητας ρεύματος 10^8 A/m^2 , διάρκειας μερικών μsec και περιόδου επίσης μερικών μsec) χαρακτηριστικό πολύ χρήσιμο σε ωρισμένες διατάξεις, όπως τα radar. Πέρα όμως από τα πλεονεκτήματά τους οι κάθοδοι οξειδίων παρουσιάζουν και ωρισμένα μειονεκτήματα, από τα οποία σημαντικότερα είναι: α) Έχουν μικρό σχετικά χρόνο ζωής (πρώτα φαινόμενα γήρανσης μετά μερικές εκατοντάδες ώρες λειτουργίας), επειδή είναι πολύ πιο ευαίσθητες από το βολφράμιο στο σωματιακό βομβαρδισμό από θετικά ιόντα, που υφίσταται διαρκώς η κάθοδος. β) Η επαναληπτικότητα κατασκευής και επιδόσεών τους σε βιομηχανικό επίπεδο δεν είναι απόλυτη. Παρά τα μειονεκτήματα αυτά η συντριπτική πλειοψηφία των ηλεκτρονικών λυχνιών τελευταίας γενιάς έχουν καθόδους οξειδίων.



Ανεξάρτητα όμως από τον τύπο της καθόδου η θερμονική εκπομπή των ηλεκτρονίων ακολουθεί το γνωστό νόμο του Richardson:

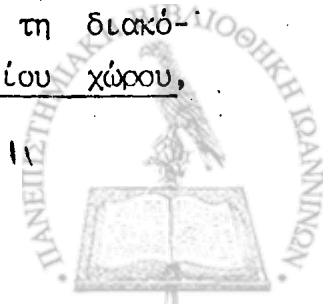
$$i = A \cdot S \cdot T^2 \cdot e^{-b/kT}$$

όπου i το ρεύμα καθόδου, T η απόλυτη θερμοκρασία της, S το εμβαδόν της, b το έργο εξαγωγής του υλικού της, A μια σταθερά εξαρτώμενη επίσης από το υλικό της και k η σταθερά Boltzmann. Γραφική παράσταση της σχέσης αυτής δίδεται στο σχήμα 2-1.β.

Η άνοδος αντίστοιχα έχει σχήμα ημικυλινδρικό, περιβάλλει την κάθοδο και συνήθως αποτελείται από φύλλο μετάλλου δύστηκτου, με μεγάλο έργο εξαγωγής και μεγάλο συντελεστή φαιότητας, ώστε να αποβάλλει γρήγορα θερμότητα (π.χ. ταντάλιο). Η τελευταία αυτή απαίτηση είναι ιδιαίτερα σημαντική, επειδή ολόκληρη η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων, που διακινούνται στη λυχνία, μετατρέπεται σε θερμότητα κατά την πρόσκρουσή τους στην άνοδο, η θέρμανση της οποίας επιτείνεται και λόγω της ακτινοβολίας της καθόδου. Υπάρχει συνεπώς συνεχής κίνδυνος υπερθερμάνσεως και καταστροφής της.

Πρέπει πάντως να σημειωθεί, ότι τα δομικά στοιχεία μιας διόδου ποικίλουν σημαντικά ανάλογα με το σκοπό, για τον οποίο προορίζεται και ο οποίος καθορίζει π.χ. την ισχύ της διόδου, τη μέγιστη τάση λειτουργίας της, τη χωρητικότητά της κλπ.

Η δίοδος είναι ένα κλασσικό μη γραμμικό και ασύμμετρο στοιχείο κυκλώματος. Η συμπεριφορά της περιγράφεται από το σμήνος των στατικών χαρακτηριστικών καμπυλών της (σχήμα 2-1.γ). Η ερμηνεία της μορφής κάθε χαρακτηριστικής είναι ευχερής και δίδεται εδώ με συντομία. Στην περιοχή α (σχήμα 2-1.δ) που είναι γνωστή σαν ζώνη εκκλίσεως, η καμπύλη υποδεικνύει, ότι η λυχνία διαρρέεται από ρεύμα (ανοδικό ρεύμα), παρ'όλο που η τάση στα άκρα της (ανοδική τάση) είναι μηδενική ή και αρνητική. Η ύπαρξη αυτού του ρεύματος οφείλεται στο ότι τα ηλεκτρόνια, που εκπέμπονται θερμικά από την κάθοδο έχουν κατανομή ταχυτήτων κατά Maxwell-Boltzmann. Έτσι στατιστικά ένας ωρισμένος αριθμός τους έχει αρκετά μεγάλη ενέργεια και φθάνει στην άνοδο ακόμη και χωρίς την ύπαρξη ελκτικού προς αυτήν πεδίου δημιουργώντας έτσι το ρεύμα μηδενικής τάσης. Η εφαρμογή ανάστροφης τάσης στη δίοδο περιορίζει σταδιακά τη ροή αυτών των ταχέων ηλεκτρονίων προς την άνοδο, διότι δημιουργεί απωστικό από αυτήν πεδίο, για μια δε ωρισμένη τιμή της (V_0) τη διακόπτει τελείως. Στην περιοχή β, που είναι γνωστή σαν περιοχή φορτίου χώρου,



τα εκπεμπόμενα από την κάθοδο ηλεκτρόνια έλκονται από την άνοδο, αλλά η πορεία τους προς αυτήν δυσχεραίνεται λόγω της παρουσίας στον μεταξύ των ηλεκτροδίων χώρο και πλησιέστερα στην κάθοδο ενός "νέφους ηλεκτρονίων". Το νέφος αυτό δημιουργείται εξ αιτίας του ότι σε χαμηλές ανοδικές τάσεις η άνοδος δεν μπορεί να συλλέγει με ικανοποιητικό ρυθμό όλα τα θερμιονικά εκπεμπόμενα ηλεκτρόνια. Είναι ευκολονόητο ότι, όσο αυξάνει η ανοδική τάση, περιορίζεται το "νέφος ηλεκτρονίων" και αυξάνει το ανοδικό ρεύμα. Στην περιοχή φορτίου χώρου, που είναι και η συνήθης περιοχή εργασίας της διόδου, η εξάρτηση του ρεύματος από την τάση περιγράφεται ικανοποιητικά από την αναλυτική σχέση των Langmuir-Child:

$$i_a = k \cdot V_a^{3/2}$$

όπου k μια κατασκευαστική σταθερά. Τέλος η περιοχή γ, γνωστή σαν περιοχή κόρυ, υποδεικνύει, ότι το ανοδικό ρεύμα είναι σχεδόν σταθερό και ανεξάρτητο από την ανοδική τάση. Αυτό συμβαίνει, επειδή η άνοδος έχει πλέον αρκετά θετικό δυναμικό, ώστε να συλλέγει όλα τα εκπεμπόμενα από την κάθοδο ηλεκτρόνια. Περαιτέρω αύξηση του δυναμικού της δεν προκαλεί αύξηση του ανοδικού ρεύματος, διότι ο αριθμός των εκπεμπόμενων από την κάθοδο ηλεκτρονίων ανά μονάδα χρόνου εξαρτάται μόνον από τη θερμοκρασία της και όχι από την ανοδική τάση (με την προϋπόθεση βέβαια ότι δεν αναπτύσσονται τόσον ισχυρά πεδία, ώστε να γίνεται σημαντική η συνεισφορά του φαινόμενου Schottky). Λύση δηλαδή του ανοδικού ρεύματος μπορεί να προκληθεί στην περιοχή αυτή μόνον με αύξηση της θερμοκρασίας της καθόδου αυτό όμως, όπως δείχνει και το σχήμα 2-1.γ, ισοδυναμεί με αλλαγή χαρακτηριστικής.

Η κυριώτερη χρήση της διόδου είναι τα κυκλώματα ανορθώσεως και φωράσεως. Εξ αιτίας του ότι δυνατότητα εκπομπής ηλεκτρονίων έχει μόνον η κάθοδος, το ηλεκτρικό ρεύμα στη λυχνία μπορεί να διαδίδεται με πραγματική φορά μόνον από την κάθοδο στην άνοδο. Αποτελεί κατά συνέπεια η διάταξη μονοπολικής αγωγιμότητας. Αυτό σημαίνει, ότι, αν στην είσοδο του κυκλώματος 2-1.α εφαρμοσθεί μια εναλλασσόμενη τάση, στην έξοδο θα προκύψει ημιανορθωμένη συνεχής. Γραφική ερμηνεία της ανορθωτικής δράσης δίδεται στο σχήμα 2-1.ε. Πρέπει να σημειωθεί ότι: α) Το τμήμα της χαρακτηριστικής της διόδου, που φαίνεται, είναι τμήμα δυναμικής χαρακτηριστικής και β) Σαν διάταξη μονοπολικής αγωγιμότητας η διάταξη δεν είναι ιδανική εμφανίζει κατά την ορθή φορά αντίσταση μεταξύ 100Ω και 1000Ω και κατά την ανάστροφη άνω των 1000 ΜΩ.

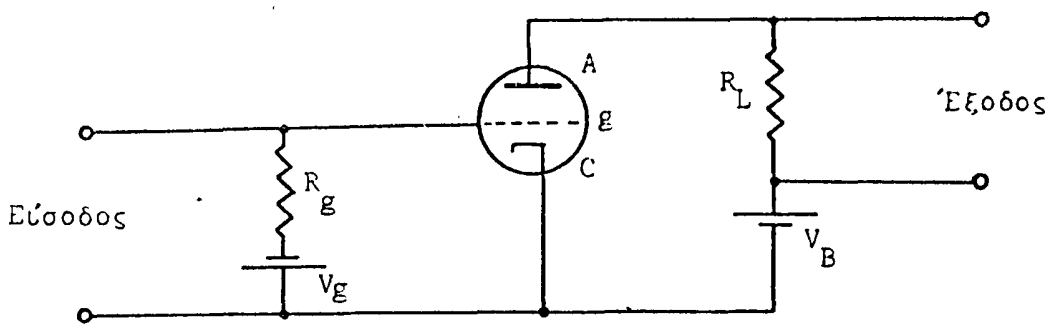
Τρίοδος ηλεκτρονική λυχνία

Σε μια δίοδο λυχνία η περιοχή φορτίου χώρου καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το ρεύμα της λυχνίας και τη μορφή της χαρακτηριστικής της. Αν λοιπόν με κάποιον τρόπο επηρεασθεί η περιοχή αυτή, θα επηρεασθεί ανάλογα και το ρεύμα της λυχνίας. Για το σκοπό αυτό προστέθηκε μεταξύ ανόδου και καθόδου και μάλιστα πλησιέστερα προς την κάθοδο, στην περιοχή φορτίου χώρου, ένα τρίτο ηλεκτρόδιο με σχήμα σπείρας ή πλέγματος με μεγάλα διάκενα και δημιουργήθηκε έτσι η τρίοδος ηλεκτρονική λυχνία (de Forest, 1906). Το ηλεκτρόδιο αυτό φέρεται σε διάφορα δυναμικά ως προς την κάθοδο και ανάλογα με το δυναμικό του επηρεάζει κατά διάφορο τρόπο το ρεύμα της τριόδου.

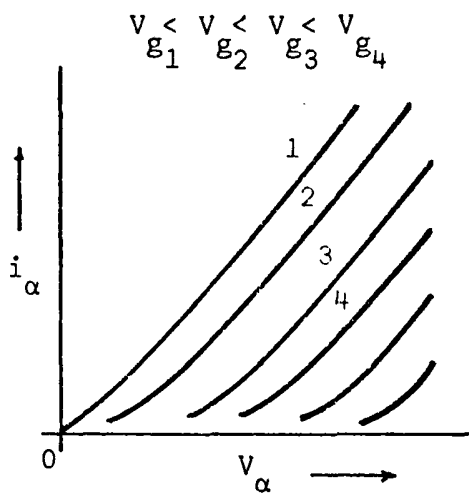
Συγκεκριμένα αν το δυναμικό του γίνει αρνητικότερο από το δυναμικό της καθόδου, τότε το ρεύμα της τριόδου μειώνεται, επειδή στην πορεία των ηλεκτρονίων παρεμβάλλεται ένας λόφος δυναμικού, που πρέπει να υπερπηδηθεί (σχήμα 2-5.β) την απαιτούμενη όμως για αυτό ενέργεια μόνον λίγα ηλεκτρόνια έχουν. Αν μάλιστα το δυναμικό αυτό ξεπεράσει μια ορισμένη τιμή (τάση αποκοπής) το ανοδικό ρεύμα διακόπτεται τελείως. Αντίστοιχα αν το δυναμικό πλέγματος γίνει θετικότερο από το δυναμικό της καθόδου, παραμένοντας βέβαια πάντα αρνητικότερο από το δυναμικό ανόδου, το ρεύμα της τριόδου αυξάνει επειδή υποβιβάζεται ουσιαστικά η σημασία της περιοχής φορτίου χώρου και τα ηλεκτρόνια υποβοηθούνται να απομακρυνθούν από την κάθοδο. Επειδή το πλέγμα κατασκευαστικά βρίσκεται πολύ πλησιέστερα στην κάθοδο από ότι η άνοδος, απαιτεί πολύ μικρότερες τιμές τάσης για να εξουδετερώσει (αντισταθμίσει) την επίδραση του ανοδικού δυναμικού. Αυτό σημαίνει, ότι με μικρές μεταβολές της τάσης πλέγματος επιτυγχάνονται σημαντικές μεταβολές του ανοδικού ρεύματος, μεταβολές που, για να πραγματοποιηθούν χωρίς την παρουσία του πλέγματος, θα απαιτούσαν πολύ μεγαλύτερες μεταβολές της ανοδικής τάσης. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει τη δυνατότητα χρησιμοποίησής μιας τριόδου σαν ενισχυτή.

Στο σχήμα 2-2α δίδεται ένα απλουστευμένο τυπικό κύκλωμα συνδεσμολογίας και δομής μιας τριόδου και στα σχήματα 2-2.β και 2-2.γ δυο οικογένειες στατικών χαρακτηριστικών καμπυλών της. Η πρώτη οικογένεια είναι το σμήνος χαρακτηριστικών ανόδου, όπως ονομάζονται οι καμπύλες, που εκφράζουν τη μεταβολή του ανοδικού ρεύματος i_a συναρτήσει της ανοδικής τάσης V_a για σταθερό δυναμικό πλέγματος. Οι χαρακτηριστικές δίνονται κυρίως για αρνητικές τιμές δυναμικού πλέγματος, επειδή η τριόδος χρησιμοποιείται σχεδόν πάντα με το πλέγμα αρνητικά πολωμένο. Οι καμπύλες αυτές δεν είναι ευθείες, ούτε

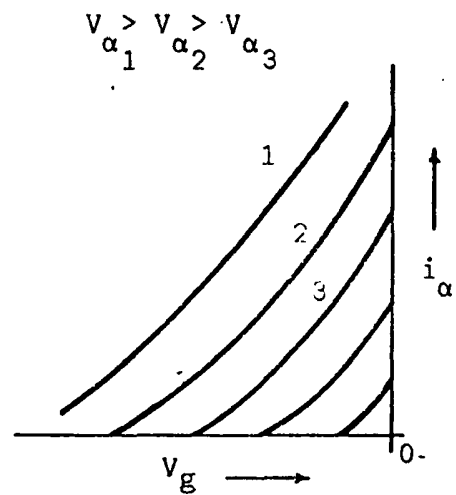




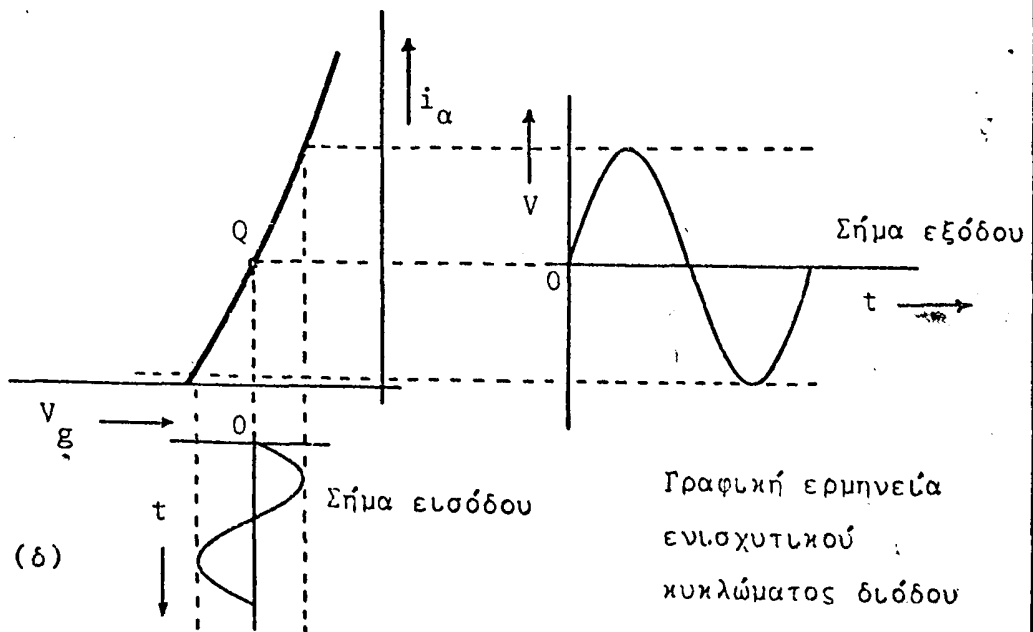
(α)



(β)

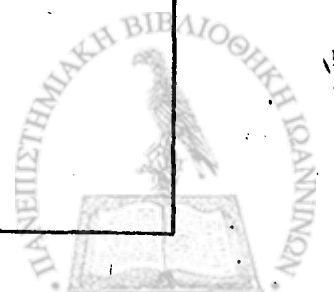


(γ)



(δ)

Σχήμα 2-2



ισαπέχουν μεταξύ τους, μπορεί όμως να θεωρηθεί, ότι εκπληρούν τους όρους αυτούς σε μικρές περιοχές περί το μέσον τους.

Η δεύτερη οικογένεια είναι το σμήνος χαρακτηριστικών πλέγματος, δηλαδή οι καμπύλες, που εκφράζουν τη μεταβολή του ανοδικού ρεύματος συναρτήσει της τάσης πλέγματος για σταθερή ανοδική τάση. Δίδονται και αυτές για αρνητικές τιμές της τάσης πλέγματος για το λόγο, που αναφέρεται παραπάνω. Από τις καμπύλες αυτές φαίνεται καθαρά, ότι, όσο ελαττώνεται το δυναμικό πλέγματος, τόσο ελαττώνεται το ανοδικό ρεύμα. Το σημείο τομής της καμπύλης με τον άξονα των τάσεων ορίζει την τάση αποκοπής.

Πρέπει να σημειωθεί στο σημείο αυτό, ότι οι δύο οικογένειες καμπυλών είναι ομοσήμαντες, εκφράζουν δηλαδή τα ίδια φυσικά φαινόμενα. Δεν υπάρχει πληροφορία, που να περιέχεται στη μία και να είναι αδύνατο να συναχθεί από την άλλη. Απλά και μόνο άλλοτε είναι ευχερέστερη η χρησιμοποίηση του ενός σμήνους και άλλοτε του άλλου.

Εκτός όμως από τα σμήνη των χαρακτηριστικών καμπυλών η τρίδος περιγράφεται ικανοποιητικά και από μια ομάδα χαρακτηριστικών μεγεθών - παραμέτρων, που παρέχουν ένα κριτήριο εκτιμήσεως των επιδόσεων της και καθορίζονται κύρια από τα κατασκευαστικά της στοιχεία. Οι παράμετροι αυτές είναι:

α) Διαγωγιμότητα: Ορίζεται από τη σχέση:

$$g_m = \left. \frac{\Delta i_\alpha}{\Delta V_g} \right| V_\alpha = \text{const.}$$

και εκφράζει την κλίση των χαρακτηριστικών πλέγματος. Έχει διαστάσεις αγωγιμότητας και σύνθητος μέγεθος μερικά μπη (millimhos = $10^{-3} \Omega^{-1}$).

β) Εσωτερική αντίσταση: Ορίζεται από τη σχέση:

$$r_\alpha = \left. -\frac{\Delta V_\alpha}{\Delta i_\alpha} \right| V_g = \text{const.}$$

και εκφράζει τον αντίστροφο της κλίσης των χαρακτηριστικών ανόδου. Έχει διαστάσεις αντιστάσεως και σύνθητος μέγεθος μεταξύ 500Ω και 100kΩ. Από φυσική άποψη εκφράζει την αντίσταση, που παρεμβάλλεται στο ανοδικό κύκλωμα λόγω της παρουσίας της τριόδου.

γ) Συντελεστής ενισχύσεως: Ορίζεται από τη σχέση:



$$\mu = -\frac{\Delta V_{\alpha}}{\Delta V_g} \quad \Big| \quad i_{\alpha} = \text{const.}$$

είναι καθαρός αριθμός και έχει σύνηθες μέγεθος μεταξύ 2 και 100. Εκφράζει το πόσο πρέπει να μεταβληθεί η ανοδική τάση, ώστε να αντισταθμίσει μια μεταβολή της τάσης πλέγματος. Επειδή το πηλίκο $\Delta V_{\alpha}/\Delta V_g$ είναι αρνητικός αριθμός (όταν αυξάνει η V_{α} , ελαττώνεται η V_g και αντίστροφα), τίθεται στη σχέση ορισμού πρόσημο (-), το οποίο εξασφαλίζει θετικές τιμές στον συντελεστή. Όπως δείχνει και το ονομά του, ο συντελεστής αυτός έχει εξαιρετική σημασία για τον προσδιορισμό της μέγιστης ενίσχυσης τάσης, που μπορεί να επιτευχθεί με την αντίστοιχη τρίοδο.

Σύμφωνα με όσα αναφέρονται παραπάνω, είναι προφανές, ότι οι τιμές των παραμέτρων αυτών θα εξαρτώνται άμεσα από το σημείο της χαρακτηριστικής, για το οποίο υπολογίζονται. Παρ' όλα αυτά στην πράξη κάθε λυχνία χαρακτηρίζεται από μια και μόνη συγκεκριμένη τριάδα παραμέτρων Αυτό συμβαίνει, επειδή οι κατασκευαστές δίνουν τις τιμές των g_m , ρ_{α} και μ για το μέσο περίπου της γραμμικής περιοχής των χαρακτηριστικών, όπου βέβαια οι παράμετροι είναι σταθερές για σημαντικό εύρος μεταβολών και όπου άλλωστε πρόκειται να εργασθεί η τρίοδος.

Από τις σχέσεις ορισμού προκύπτει εύκολα, ότι οι παράμετροι αυτές δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, αλλά συνδέονται με τη σχέση:

$$\mu = \rho_{\alpha} \cdot g_m$$

Η τρίοδος χρησιμοποιείται κυρίως σαν ενισχύτρια. Ένα απλό ενισχυτικό κύκλωμα είναι του σχήματος 2-2.α. Στο σχήμα 2-2.δ δίνεται γραφική εξήγηση της λειτουργίας του (για τάξη Α). Συγκεκριμένα το πλέγμα πολώνεται στο μέσον περίπου του ευθύγραμμου τμήματος της χαρακτηριστικής $i_{\alpha} = f(V_g) \mid V_{\alpha} = \text{const}$. Το σήμα εισόδου επιπροστίθεται στην τάση πολώσεως και προκαλεί διακύμανση της περί το σημείο λειτουργίας Q (ή, όπως λέγεται συνηθέστερα ολίσθηση του σημείου Q περί την αρχική του θέση). Η διακύμανση αυτή προκαλεί αντίστοιχη διακύμανση του ανοδικού ρεύματος, που είναι αρκετά ισχυρό και διαφέροντας την αντίσταση φόρτου R_L προκαλεί με τη σειρά του εμφάνιση στα άκρα της μιας εναλλασσόμενης τάσης πολύ μεγαλύτερης από την τάση εισόδου.



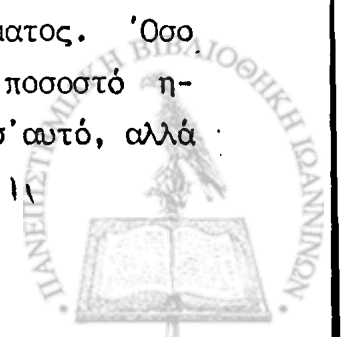
Τέτροδος ηλεκτρονική λυχνία

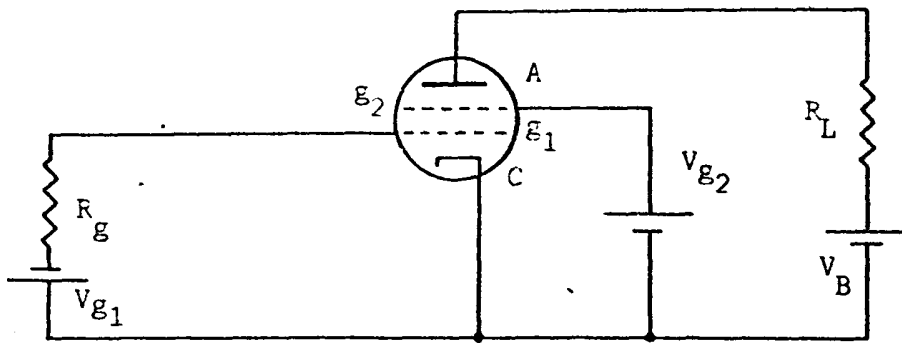
Η τρίοδος σαν ενισχύτρια παρουσιάζει δύο βασικά μειονεκτήματα, έχει μικρό σχετικά συντελεστή ενισχύσεως (μέχρι 100) και μεγάλη χωρητικότητα μεταξύ ανόδου και πλέγματος ($\approx 10\text{pF}$). Και τα δύο αυτά μειονεκτήματα εξουδετερώνονται με την προσθήκη μεταξύ της ανόδου και του πλέγματός της (οδηγού πλέγματος) ενός ακόμη ηλεκτροδίου, οπότε βέβαια δημιουργείται η τέτροδος ηλεκτρονική λυχνία. Το τέταρτο αυτό ηλεκτρόδιο έχει δυναμικό θετικό ως προς την κάθοδο και δομή ανάλογη προς τη δομή του οδηγού πλέγματος, ονομάζεται δε προστατευτικό πλέγμα. Στο σχήμα 2-3.α δίδεται ένα απλουστευμένο τυπικό κύκλωμα δομής και συνδεσμολογίας μιας τετρόδου.

Η παρεμβολή του προστατευτικού πλέγματος, που έχει θετικό δυναμικό, με ταξύ ανόδου και οδηγού πλέγματος έχει σαν αποτέλεσμα το δυναμικό ανόδου να επιδρά πολύ λίγο στη ροή του ανοδικού ρεύματος, αντίθετα με ότι συμβαίνει στην τρίοδο. Συνέπεια αυτής της δράσης είναι το ανοδικό ρεύμα να μεταβάλλεται ελάχιστα για σημαντικές μεταβολές της ανοδικής τάσης. Αυτό βέβαια σημαίνει εξαιρετικά μεγάλη εσωτερική αντίσταση λυχνίας και λαμβανομένου υπ' όψη, ότι η διαγωγιμότητά της διατηρείται σχεδόν σταθερή, σημαίνει τελικά μεγάλο συντελεστή ενισχύσεως (από τη σχέση $\mu = g_m \cdot \rho_a$), που μπορεί να φθάσει έως 800.

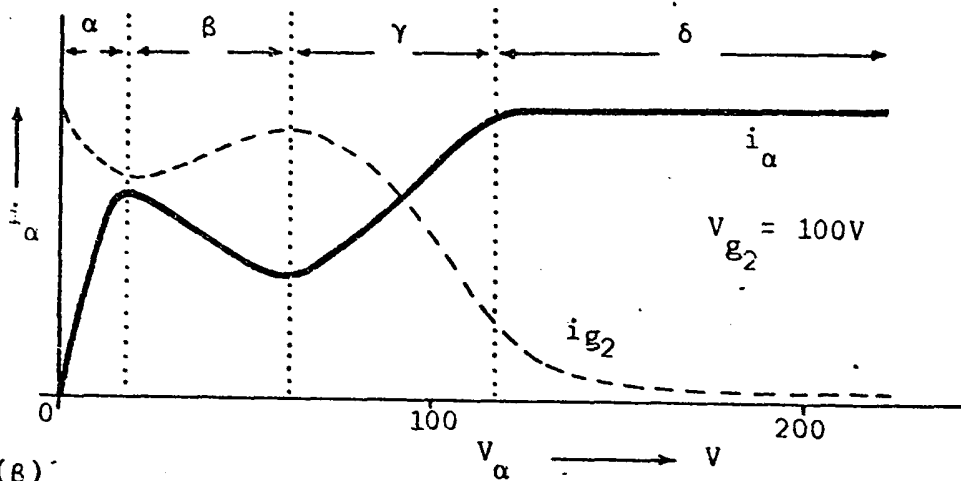
Παράλληλα η θωράκιση, που προκαλεί το προστατευτικό πλέγμα στην άνοδο, έχει σαν αποτέλεσμα τυχούσες μεταβολές του δυναμικού της να επηρεάζουν το φορτίο του οδηγού πλέγματος πολύ λιγότερο απ' ό,τι αντίστοιχες μεταβολές σε μια τρίοδο. Αυτό όμως σημαίνει υποβιβασμό της χωρητικότητας ανόδου- οδηγού πλέγματος, που φθάνει τα 0.01 pF.

Στο σχήμα 2-3.β δίδεται η χαρακτηριστική ανόδου μιας τετρόδου μαζί με τις καμπύλες ολικού ρεύματος και ρεύματος προστατευτικού πλέγματος. Αρχικά για μικρές ανοδικές τάσεις (περιοχή α της χαρακτηριστικής) το ανοδικό ρεύμα αυξάνει από μια μηδενική μέχρι μέγιστη τιμή. Αυτό συμβαίνει, επειδή για τις μικρές αυτές ανοδικές τάσεις το δυναμικό του προστατευτικού πλέγματος είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το δυναμικό της ανόδου και έτσι όλα τα ηλεκτρόνια, που προέρχονται από την κάθοδο (μέσω του οδηγού πλέγματος), συλλέγονται κυρίως από το προστατευτικό πλέγμα. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από την υψηλή αρχική τιμή του ρεύματος προστατευτικού πλέγματος. Όσο τώρα αυξάνει το δυναμικό της ανόδου, ένα όλο και σημαντικότερο ποσοστό ηλεκτρονίων διαπερά το προστατευτικό πλέγμα και δεν επιστρέφει σ' αυτό, αλλά

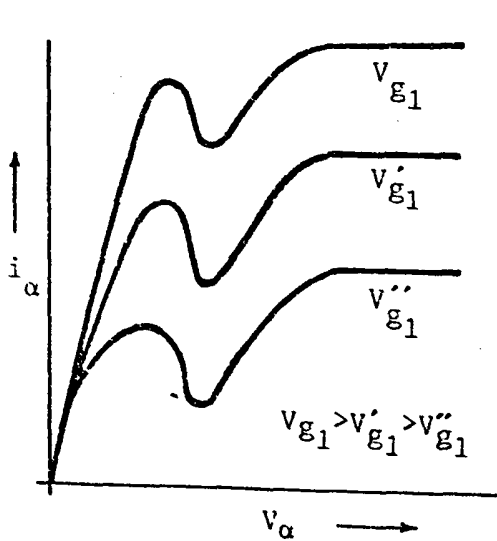




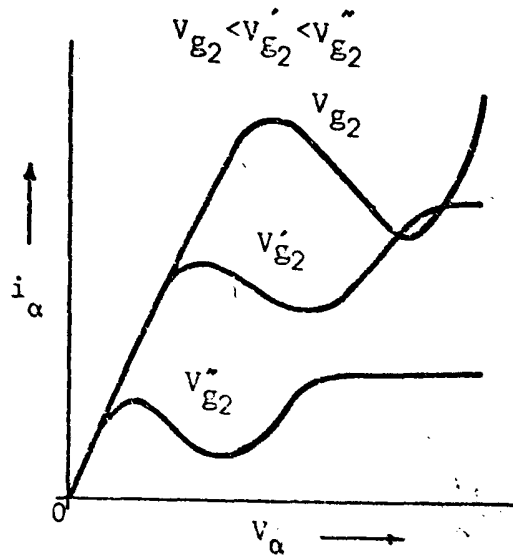
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 2-3



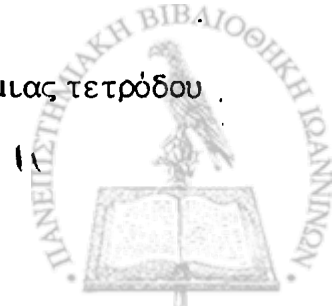
συλλέγεται από την άνοδο προκαλώντας αντίστοιχα αύξηση του ανοδικού ρεύματος και μείωση του ρεύματος προστατευτικού πλέγματος. Για ακόμη μεγαλύτερες τιμές της ανοδικής τάσης (περιοχή β της χαρακτηριστικής) παρουσιάζεται μείωση του ανοδικού ρεύματος. Το φαινόμενο είναι εξαιρετικά ενδιαφέρον και ερμηνεύεται ως εξής: Εφ' όσον το δυναμικό ανόδου αυξάνει αρκετά, το ανάστροφο ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ ανόδου και προστατευτικού πλέγματος μειώνεται αισθητά, με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια, που διέρχονται από τα ανοίγματα του τελευταίου και οδεύουν προς την άνοδο, να μην υφίστανται αρκετά μεγάλη επιβράδυνση και να προσκρούουν σ' αυτήν με μεγάλη ταχύτητα προκαλώντας δευτερογενή εκπομπή ηλεκτρονίων. Από τα δευτερογενή αυτά ηλεκτρόνια ένα μέρος επιστρέφει στην άνοδο, αλλά και ένα σημαντικό μέρος (υπόλοιπο) υπό την επίδραση του ανάστροφου πεδίου, που προαναφέρθηκε κινείται προς το προστατευτικό πλέγμα και συλλέγεται από αυτό. Δημιουργείται έτσι μια συνιστώσα ρεύματος με φορά αντίθετη προς το ανοδικό, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωσή του. Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται και από την αύξηση στη συζητούμενη περιοχή του ρεύματος προστατευτικού πλέγματος. Περαιτέρω αύξηση βέβαια της ανοδικής τάσης (περιοχή γ της χαρακτηριστικής) υποβιβάζει διαρκώς την ένταση του ανάστροφου πεδίου, με αποτέλεσμα όλο και λιγότερα δευτερογενή ηλεκτρόνια να μπορούν να διαφύγουν από την άνοδο. Έτσι το ανοδικό ρεύμα αυξάνει και αντίστοιχα το ρεύμα προστατευτικού πλέγματος μειώνεται. Τέλος όταν η ανοδική τάση ξεπεράσει την τάση προστατευτικού πλέγματος, περιοχή δ της χαρακτηριστικής, όλα τα ηλεκτρόνια (πρωτογενή και δευτερογενή) συλλέγονται από την άνοδο, το ρεύμα της οποίας αυξάνει και σχεδόν σταθεροποιείται εξισούμενο περίπου με το ολικό ρεύμα της λυχνίας.

Όπως προαναφέρθηκε η εμφάνιση μιας περιοχής "καταδύσεως" στην χαρακτηριστική ανόδου της τетроδου είναι εξαιρετικά ενδιαφέρον στοιχείο, επειδή στην περιοχή αυτή των τάσεων η δυναμική αντίσταση της λυχνίας

$$R_d = \Delta V_a / V_i \alpha$$

γίνεται αρνητική. Η τέτροδος είναι μια από τις σπανίες διατάξεις, που παρουσιάζουν αρνητική δυναμική αντίσταση, (ανάλογη συμπεριφορά παρουσιάζει και μια κρυσταλλολυχνία, που θα μελετηθεί σε επόμενη άσκηση, η δίοδος tube) και χρησιμοποιείται για την ιδιότητά της αυτή ευρύτατα σε κυκλώματα ταλαντώσεων.

Στο σχήμα 2-3.γ δίδεται το σμήνος χαρακτηριστικών ανόδου μιας τетроδου



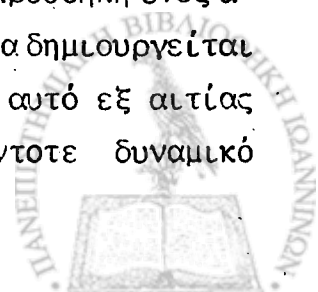
γιά σταθερό δυναμικό προστατευτικού πλέγματος και μεταβαλλόμενα (διάφορα) δυναμικά οδηγού πλέγματος. Είναι εμφανές, ότι μεταβάλλεται μόνον η τιμή του ανοδικού ρεύματος, ενώ η θέση καταδύσεως παραμένει σταθερή. Αντίστοιχα στο σχήμα 2-3.δ δίδεται το ίδιο σμήνος χαρακτηριστικών γιά σταθερό δυναμικό οδηγού πλέγματος και μεταβαλλόμενα (διάφορα) δυναμικά προστατευτικού πλέγματος. Στην περίπτωση αυτή εκτός από την τιμή του ανοδικού ρεύματος μεταβάλλεται και η θέση καταδύσεως.

Σχετικά τώρα με τη δυνατότητα παραγωγής ταλαντώσεων-κυμάνσεων από μια τέτροδο. Η δυνατότητα αυτή εμφανίζεται στην περιοχή καταδύσεως, οπότε ένα σημαντικό μέρος των ηλεκτρονίων, ειδικότερα όσα περνούν πολύ κοντά στα σύρματα του προστατευτικού πλέγματος, υφίσταται την επίδραση ενός ισχυρού ηλεκτροστατικού πεδίου, το οποίο, όσο οδεύουν από τον οδηγό προς το προστατευτικό πλέγμα τα επιταχύνει και κατόπιν, όταν οδεύουν από το προστατευτικό πλέγμα προς την άνοδο, τα επιβραδύνει προκαλώντας τελικά αναστροφή της φοράς κινήσεώς τους και επανάληψη του ίδιου φαινομένου (επιτάχυνση δηλαδή μεταξύ ανόδου και προστατευτικού πλέγματος και επιβράδυνση μεταξύ προστατευτικού πλέγματος και οδηγού πλέγματος). Το πλάτος βέβαια των διαδοχικών αυτών παλινδρομήσεων ελαττώνεται διαρκώς και τελικά τα ηλεκτρόνια συλλέγονται από το προστατευτικό πλέγμα. Το φαινόμενο όμως αυτό αποτελεί στην ουσία φθίνουσα ταλάντωση ηλεκτρικών φορέων, δηλαδή ρεύματος, ενώ οι πηγές τροφοδοσίας είναι συνεχείς. Υπάρχουν δε διάφοροι τρόποι η φθίνουσα αυτή ταλάντωση να μετατραπεί σε συντηρούμενη και να διεγείρει κατόπιν κάποιο άλλο κύκλωμα.

Πέντοδος ηλεκτρονική λυχνία

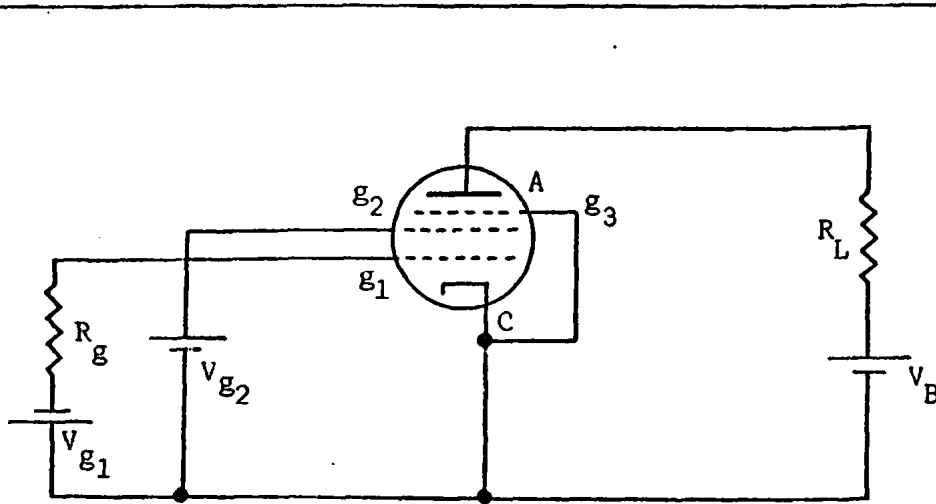
Όπως αναφέρεται παραπάνω, η προσθήκη του προστατευτικού πλέγματος και η δημιουργία της τετρόδου έχει σαν αποτέλεσμα σημαντική βελτίωση του συντελεστή ενισχύσεως (αύξηση) και της χωρητικότητας (μείωση) της τριόδου. Δυστυχώς όμως διαμορφώνει παράλληλα και τη χαρακτηριστική ανόδου, έτσι ώστε να παρουσιάζει το τμήμα καταδύσεως, γεγονός ανεπιθύμητο στις εφαρμογές ενισχύσεως.

Η ανεπιθύμητη συχνά αυτή κατάδυση εξαφανίζεται με την προσθήκη ενός ακόμη πλέγματος μεταξύ ανόδου και προστατευτικού, οπότε βέβαια δημιουργείται μια λυχνία πέντε συνολικά ηλεκτροδίων (πέντοδος). Το πλέγμα αυτό εξ αιτίας της λειτουργίας του ονομάζεται ανασταλτικό πλέγμα. Έχει πάντοτε δυναμικό

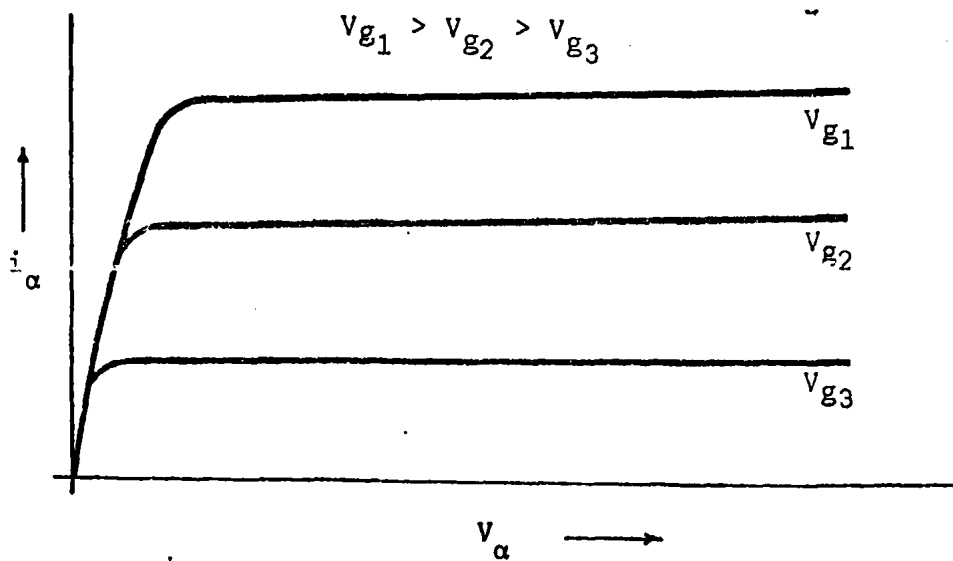


χαμηλότερο τόσο από το δυναμικό ανόδου όσο και από το δυναμικό προστατευτικού πλέγματος και συνήθως βραχυκυκλώνεται προς την κάθοδο, οπότε βέβαια αποκτά το (μηδενικό) δυναμικό της. Στο σχήμα 2-4.α δίδεται απλοποιημένο τυπικό κύκλωμα δομής και συνδεσμολογίας μιας πεντόδου.

Η παρουσία αυτή ενός ηλεκτροδίου με χαμηλό δυναμικό μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων υψηλού δυναμικού, έχει διπλό αποτέλεσμα: α) Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια, που εκπέμπονται από την άνοδο, εμποδίζονται λόγω του ισχυρού απωσι



(α)



(β)

Σχήμα 2-4



κού δυναμικού του να ασιομακρυνθούν από αυτήν προς το προστατευτικό πλέγμα και τελικά συλλέγονται πάλι από την άνοδο. Διακόπτεται έτσι η ανόστραφη συνιστώσα του ρεύματος, που είναι υπεύθυνη για την εμφάνιση της καταδύσεως στη χαρακτηριστική της τετρόδου. β) Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια, που εκπέμπονται από το προστατευτικό πλέγμα, εμποδίζονται για τον ίδιο λόγο να κινηθούν προς την άνοδο και επιστρέφουν τελικά σ' αυτό. Αντίθετα η κίνηση των ηλεκτρονίων από την κάθοδο προς την άνοδο, μέσω των πλεγμάτων πάντα, δεν εμποδίζεται, εφόσον πρόκειται για κίνηση από ένα σημείο χαμηλού προς ένα σημείο υψηλού δυναμικού. Η μόνη επίδραση, που προκαλείται στα ηλεκτρόνια αυτά, λόγω της παρουσίας του ανασταλτικού πλέγματος, είναι μια διαμόρφωση ταχύτητας και εν μέρει χωρικής πυκνότητας ροής τους.

Στο σχήμα 2-4.β δίδεται το σμήνος χαρακτηριστικών ανόδου μιας πεντόδου. Φαίνεται καθαρά, ότι η περιοχή κόρου είναι εξαιρετικά εκτεταμένη και ευθυγραμμη. Αυτό υποδηλώνει, ότι το ολικό φοτίο χώρου μιας πεντόδου είναι πρακτικά σταθερό με εξαίρεση τις πολύ μικρές ανοδικές τάσεις και η ωφέλιμη περιοχή ανοδικών τάσεων σημαντικά εκτεταμένη. Φαίνεται ακόμη, ότι η μεταβολή του δυναμικού του οδηγού πλέγματος (V_{g_1}) επιδρά στις χαρακτηριστικές, όπως σε μια τρίοδο λυχνία.

Σχετικά με τις παραμέτρους επιδόσεων μιας πεντόδου ισχύουν τα παρακάτω. Οι παράμετροι ορίζονται όπως και σε μια απλή τρίοδο, μόνο που στην περίπτωση της πεντόδου τα V_{g_2} και V_{g_3} θεωρούνται πάντα σταθερά. Η διαγωγιμότητα στην πέντοδο έχει παραπλήσιες τιμές προς τη διαγωγιμότητα μιας τριόδου ίσων διαστάσεων, ενώ η εσωτερική αντίσταση και ο συντελεστής ενισχύσεως είναι σημαντικά αυξημένες. Συγκριτική εικόνα δίνει ο παρακάτω πίνακας η λυχνία 6J5 είναι τρίοδος και η λυχνία 6SJ7 πέντοδος ισοδιάστατή της.

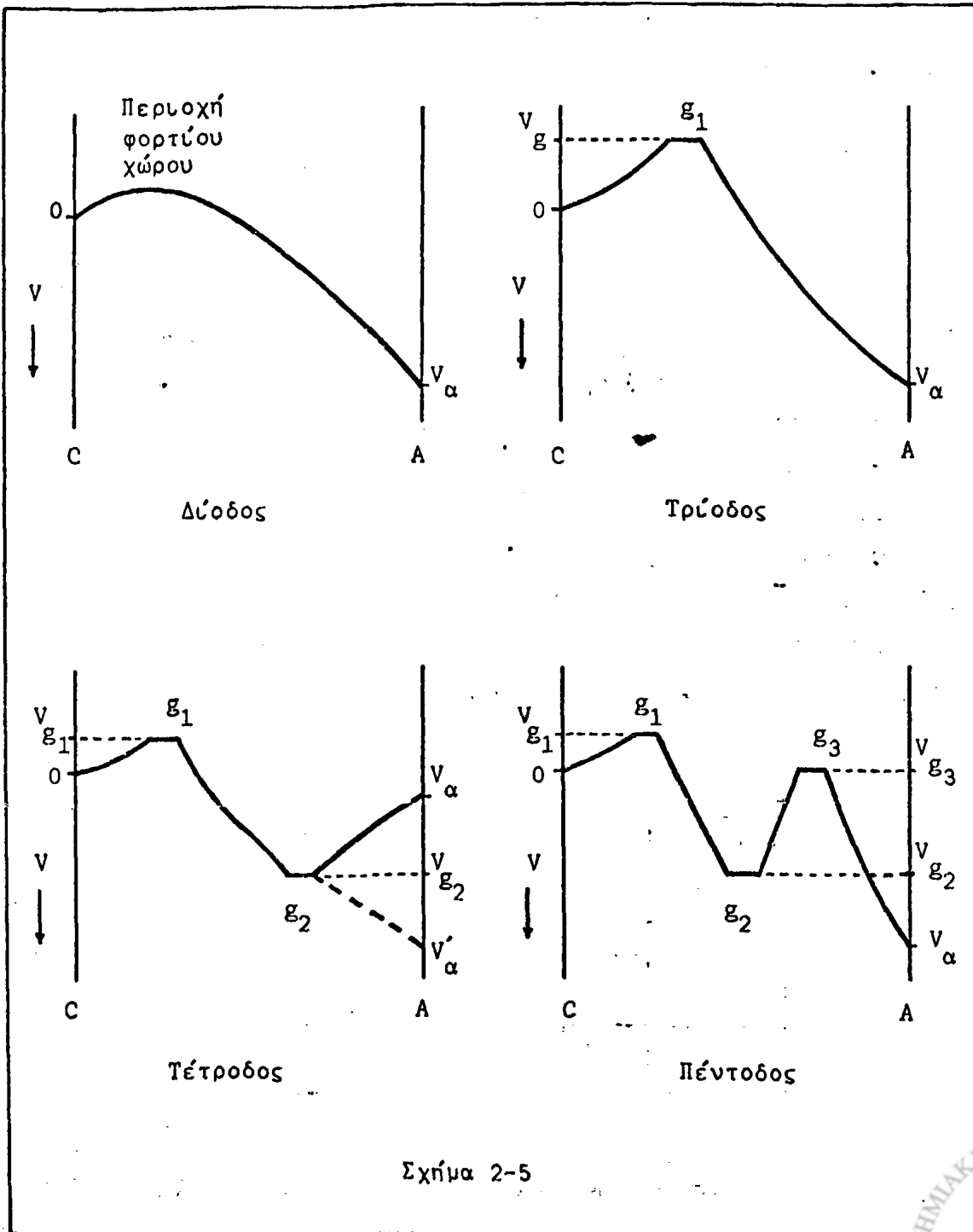
	6J5	6SJ7
g_m	2.6 mmhos	1.7 mmhos
ρ_a	8 k Ω	1000 k Ω
μ	20	1650

Η πέντοδος χρησιμοποιείται κυρίως σαν: α) Ενισχυτής τάσεων ειδικά σε



υψηλές συχνότητες, επειδή παρουσιάζει μηδενική σχεδόν ανασύζευξη (feedback) μεταξύ ανόδου και οδηγού πλέγματος. β) Πηγή σταθερού ρεύματος, επειδή το ανοδικό ρεύμα της είναι ανεξάρτητο από την ανοδική τάση για μεγάλη περιοχή τιμών της.

Τελειώνοντας θα πρέπει να αναφερθεί η ύπαρξη μιας ειδικής πεντόδου, της οποίας το οδηγό πλέγμα δεν έχει σταθερό βήμα ελικώσεως σε όλο του το μήκος, με αποτέλεσμα η λυχνία να παρουσιάζει μεταβλητή τιμή συντελεστή ενισχύσεως



ανάλογα με την τιμή της τάσης πόλωσης του οδηγού πλέγματος. Η πλήρης όμως μελέτη της δράσης και των επιδράσεων της ξεφεύγει από τα όρια της σύντομης αυτής αναιρέσεως.

Στο σχήμα 2-5 δίδεται συγκεντρωτικά για όλες τις λυχνίες, που συζητήθηκαν, η κατανομή δυναμικού στο εσωτερικό τους. Με τη βοήθεια των γραφικών αυτών κατανομών γίνεται ευχερέστερη η κατανόηση της λειτουργίας κάθε μιας.

Απαραίτητες γνώσεις:

Δ. Μ. Μηλιώτη: Στοιχεία ανάλυσεως κυκλωμάτων και βασικές λειτουργίες ηλεκτρονικών λυχνιών, σελ. 312-333

Χρησιμοποιούμενα όργανα:

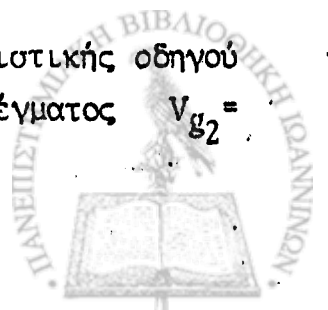
1. Δύο τροφοδοτικά υψηλής τάσης (για την πόλωση του προστατευτικού πλέγματος και της ανόδου).
2. Τροφοδοτικό χαμηλής τάσης (για την πόλωση του οδηγού πλέγματος).
3. Ηλεκτρονικό βολτόμετρο
4. Πολύμετρο (για τη μέτρηση του ανοδικού ρεύματος).

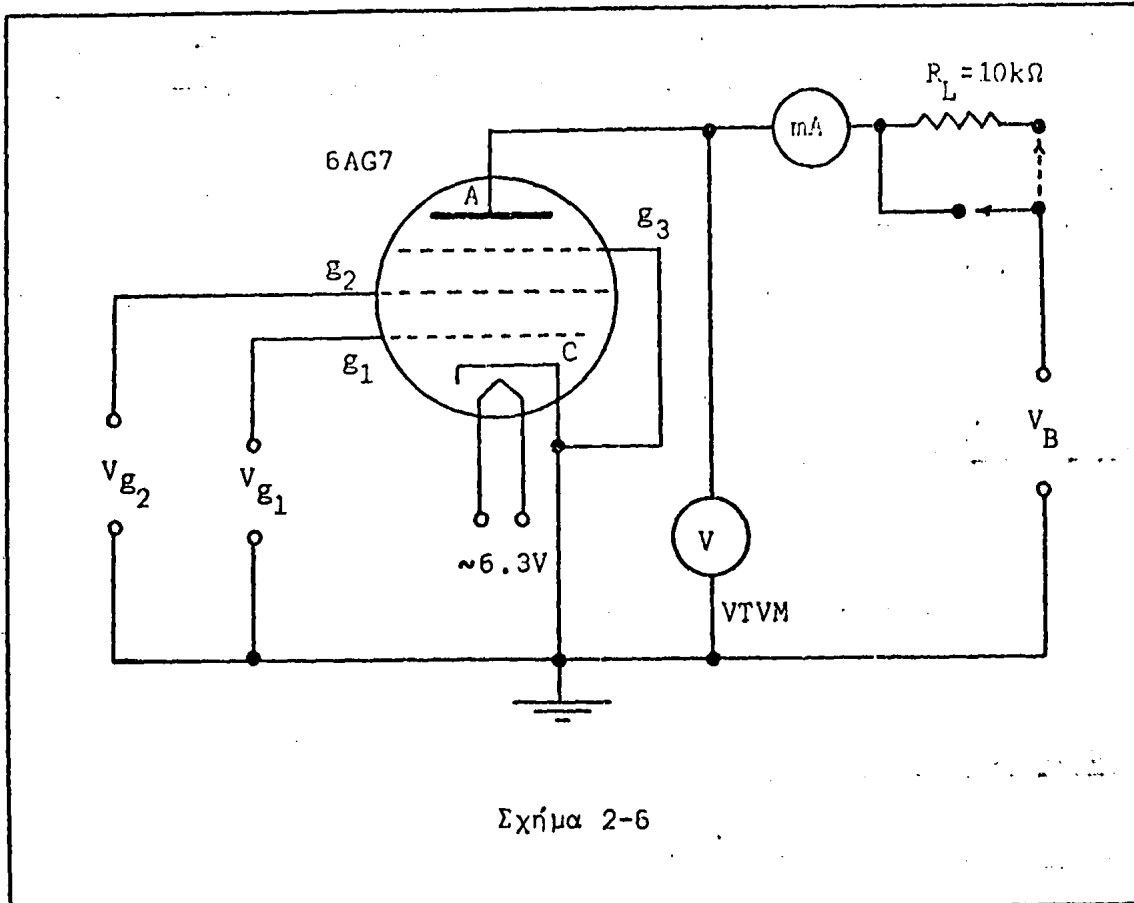
Πειραματικό μέρος

1. Πραγματοποιείτε το κύκλωμα του σχήματος 2-6 χωρίς την αντίσταση των $10k\Omega$ και λάβετε μετρήσεις για τη χάραξη της στατικής χαρακτηριστικής ανόδου, που αντιστοιχεί σε δυναμικό προστατευτικού πλέγματος $V_{g2} = 50V$ και δυναμικό οδηγού πλέγματος $V_{g1} = -0.6V$. Καταχωρήστε τις μετρήσεις στον παρακάτω πίνακα.

2. Επαναλάβετε τις μετρήσεις για δυναμικό οδηγού πλέγματος $V_{g1} = -1.5V$. Καταχωρήστε τις μετρήσεις στον ίδιο πίνακα και χαράξτε την καμπύλη στο ίδιο διάγραμμα με την προηγούμενη.

3. Λάβετε μετρήσεις για τη χάραξη της στατικής χαρακτηριστικής οδηγού πλέγματος με ανοδική τάση $V_a = 200V$ και τάση προστατευτικού πλέγματος $V_{g2} = 40V$. Οι μετρήσεις να καταχωρηθούν στον επόμενο πίνακα.





	$V_{g_1} = -0.6V$	$V_{g_2} = -1.5V$
V_α V	I_α mA	I_α mA
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		

	$V_{g_1} = -0.6V$	$V_{g_1} = -1.5V$
V_α V	I_α mA	I_α mA
10		
15		
20		
25		
30		
35		
40		
45		
50		

	$R_L = 0\Omega$ $V_a = 200V$	$R_L = 10k\Omega$ $V_B = 200V$
$-V_{B1}$ V	I_a mA	I_a mA
0.0		
0.5		
1.0		
1.5		
2.0		
2.5		
3.0		
3.5		
4.0		

4. Συνδέστε στο κύκλωμα την αντίσταση φόρτου $R_L = 10k\Omega$. Επαναλάβετε τις προηγούμενες μετρήσεις και καταχωρήστε τα αποτελέσματά τους στον προηγούμενο πίνακα. Η δυναμική χαρακτηριστική πλέγματος να σχεδιασθεί στο ίδιο διάγραμμα με τη στατική.

Ερωτήσεις

1. Ποιά είναι τα πλεονεκτήματα των κρυσταλλολυχνιών έναντι των ηλεκτρονικών λυχνιών;
2. Ως προς τι υπερτερεί η πέντοδος έναντι μιας τριόδου λυχνίας;
3. Γιατί οι άνοδοι των ηλεκτρονικών λυχνιών πρέπει να κατασκευάζονται από μέταλλα με μεγάλο έργο εξαγωγής; Είναι αυτό γενικός κανόνας;
4. Αν σε μια τριόδο αυξηθεί η πυκνότητα του πλέγματός της, τι επίπτωση θα έχει το γεγονός αυτό στις χαρακτηριστικές πλέγματος;



ΜΕΛΕΤΗ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΔΙΟΔΟΥΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΑΝΟΡΘΩΣΕΩΣΕισαγωγή

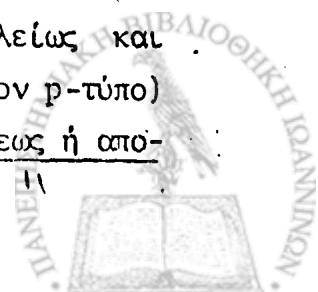
Η κρυσταλλοδίοδος είναι η πιο απλή κρυσταλλολυχνία. Χρησιμοποιείται σε όλες σχεδόν τις εφαρμογές, στις οποίες παλιότερα χρησιμοποιείτο η δίοδος λυχνία κενού, επειδή συγκριτικά με αυτήν παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα.

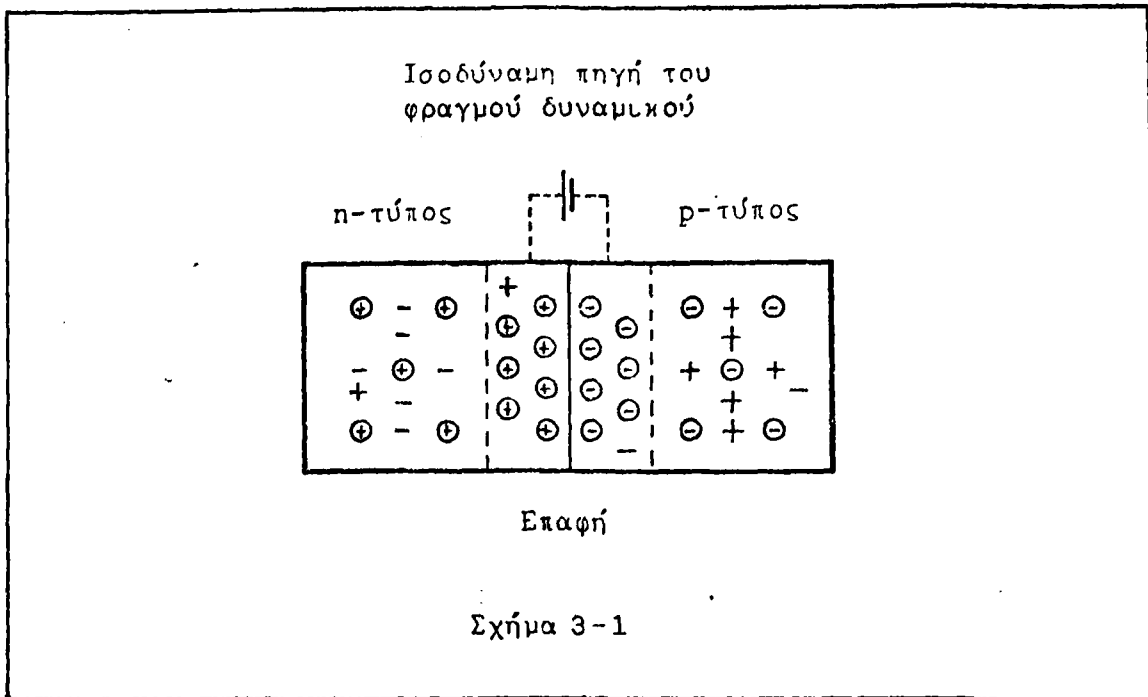
Αποτελείται από έναν ημιαγωγό τύπου p και έναν ημιαγωγό τύπου n σε επαφή. Η επαφή αυτή δεν είναι μηχανική. Στην πραγματικότητα πρόκειται για ένα κομμάτι ημιαγωγού υλικού (συνήθως Si ή Ge), στο ένα τμήμα του οποίου έχουν χημικά προστεθεί προσμίξεις τρισθενούς στοιχείου (p-τύπος) και στο υπόλοιπο προσμίξεις πεντασθενούς στοιχείου (n-τύπος).

Στην περιοχή της επαφής ηλεκτρόνια από τον ημιαγωγό τύπου-n διαχέονται προς τον ημιαγωγό τύπου-p και εξουδετερώνονται από ισάριθμες οπές. Αντίστοιχα οπές από τον ημιαγωγό τύπου-p διαχέονται προς τον ημιαγωγό τύπου-n και εξουδετερώνονται από ισάριθμα ηλεκτρόνια. Απομένουν έτσι στον ημιαγωγό τύπου-p και κοντά στην επαφή ακίνητα αρνητικά φορτισμένα ιόντα και αντίστοιχα στον ημιαγωγό τύπου-n ακίνητα θετικά φορτισμένα ιόντα. Έτσι ο n-τύπου ημιαγωγός αποκτά ένα μικρό θετικό φορτίο +Q και ο p-τύπου ημιαγωγός ένα μικρό αρνητικό φορτίο -Q.

Η κατανομή αυτή των φορτίων στη διαχωριστική ζώνη μεταξύ των δύο ημιαγωγών έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου έντασης E και την εμφάνιση μιας διαφοράς δυναμικού, που ονομάζεται φραγμός ή λόφος δυναμικού (σχήμα 3-1). Εξ αιτίας του φραγμού αυτού, που είναι της τάξης δεκάτων του Volt, εμποδίζεται η περαιτέρω διάχυση φορέων και αποκαθίσταται μια κατάσταση ηλεκτρικής ισορροπίας.

Είναι ευνόητο, ότι στην κατάσταση αυτή της ισορροπίας ελάχιστοι είναι οι κινητοί φορείς, που υπάρχουν στην περιοχή επαφής. Μπορούμε λοιπόν σε πρώτη προσέγγιση να δεχτούμε, ότι οι κινητοί φορείς απουσιάζουν τελείως και ότι υπάρχουν μόνο ακίνητα θετικά (στον n-τύπο) και αρνητικά (στον p-τύπο) ιόντα. Εξ αιτίας αυτού η περιοχή αυτή ονομάζεται περιοχή εκκενώσεως ή απο-





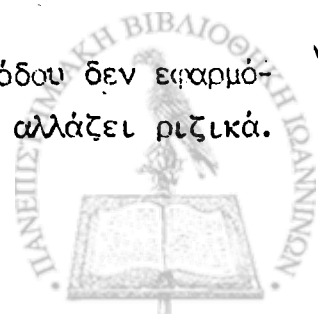
γυμνώσεως ή περιοχή φορτίου χώρου.

Προκύπτει λοιπόν σε μια επαφή p-n η παρακάτω κατάσταση για το κάθε είδος φορέων:

- α) Οι φορείς πλειονότητας του n-τύπου (ηλεκτρόνια) απωθούνται από το αρνητικό φορτίο $-Q$ του p-τύπου.
- β) Οι φορείς πλειονότητας του p-τύπου (οπές) απωθούνται από το θετικό φορτίο $+Q$ του n-τύπου.
- γ) Οι φορείς μειονότητας του n-τύπου (οπές) έλκονται από το αρνητικό φορτίο $-Q$ του p-τύπου.
- δ) Οι φορείς μειονότητας του p-τύπου (ηλεκτρόνια) έλκονται από το θετικό φορτίο $+Q$ του n-τύπου.

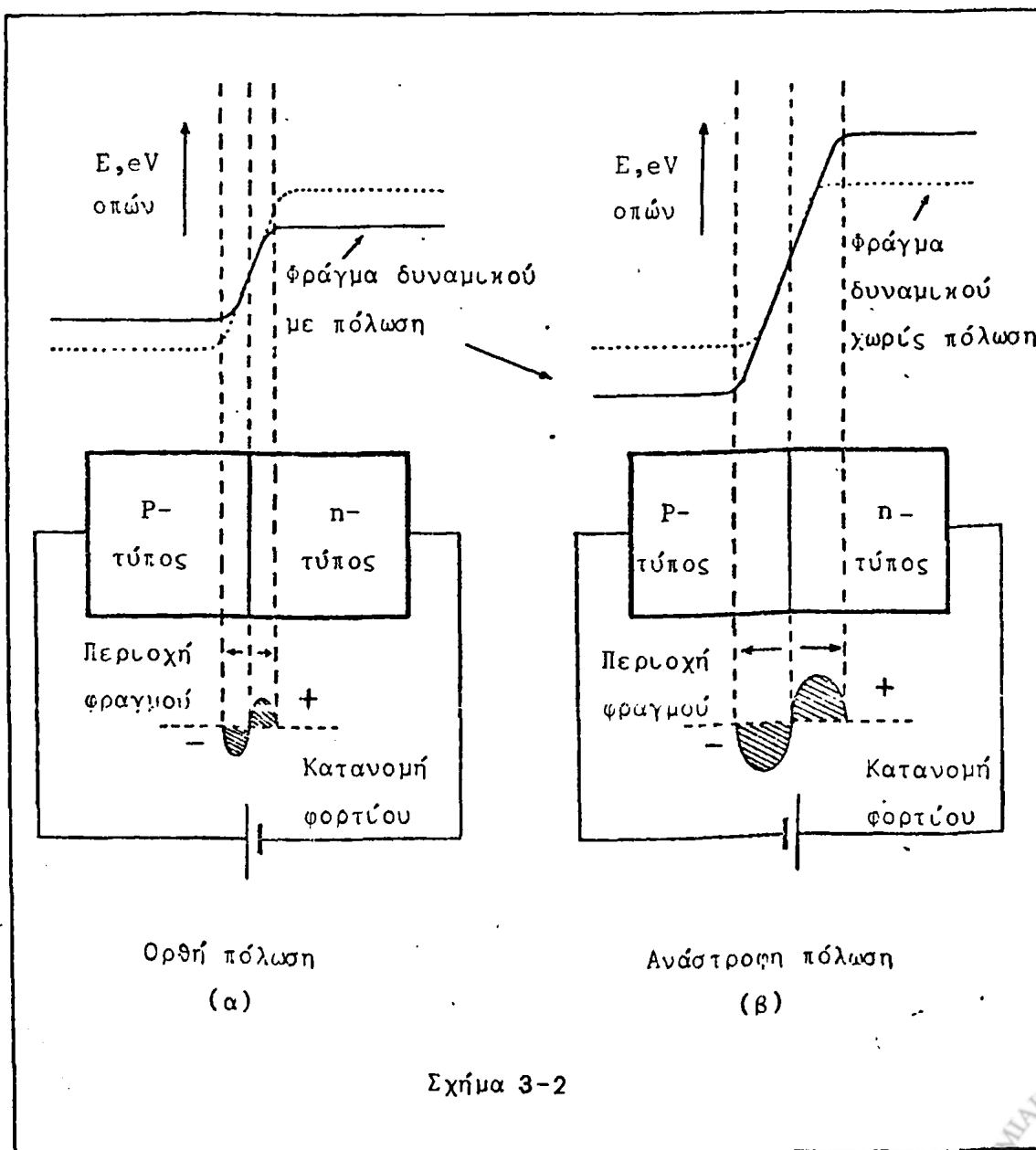
Όπως αναφέρεται και παραπάνω η παντελής απουσία κινητών φορέων από την περιοχή απογυμνώσεως αποτελεί μια ιδανική κατάσταση. Στην πραγματικότητα λόγω της θερμικής ενέργειας του κρυστάλλου υπάρχει μια σταθερή ροή φορέων δια της επαφής. Η ροή αυτή συνίσταται από φορείς μειονότητας, οι οποίοι έλκονται (οαρώνονται) δια μέσου της επαφής και από ένα πολύ μικρό ποσοστό φορέων πλειονότητας, οι οποίοι στατιστικά έχουν αρκετή ενέργεια, ώστε να υπερνικήσουν το φραγμό δυναμικού. Τα δύο αυτά ρεύματα είναι αντίθετα, οπότε το ολικό ρεύμα δια της επαφής είναι μηδέν.

Όλα τα παραπάνω ισχύουν, όταν στα άκρα της κρυσταλλοδιόδου δεν εφαρμόζεται καμιά τάση, διότι, αν εφαρμοσθεί κάποια, η κατάσταση αλλάζει ριζικά.



Συγκεκριμένα:

Αν η επαφή p-n πολωθεί ορθά (εφαρμοσθεί δηλαδή θετικό δυναμικό στον ημιαγωγό p-τύπου και αρνητικό στον ημιαγωγό n-τύπου), το εξωτερικό πεδίο αντιτίθεται στο εσωτερικό πεδίο της περιοχής απογυμνώσεως με αποτέλεσμα η έκταση της περιοχής αυτής να περιορίζεται και ο φραγμός δυναμικού να ελαττώνεται (σχήμα 3-2 α). Αποτέλεσμα αυτού είναι οι φορείς πλειονότητας να μπορούν ευκολότερα να διέρχονται δια της περιοχής απογυμνώσεως υπερνικώντας το φραγμό δυναμικού. Δημιουργείται έτσι ένα ρεύμα φορέων πλειονότητας ορθής φοράς (οι οπές κινούνται από τον p-τύπο προς τον n-τύπο και τα ηλεκτρόνια αντίστροφα). Το ρεύμα των φορέων μειονότητας παραμένει ανεπηρέαστο από την ε-



εξωτερική πόλωση, επειδή η φορά του εσωτερικού πεδίου δεν αλλάζει, αλλάζει μόνον η έντασή του. Το ρεύμα αυτό (I_r) σύμφωνα με τα προαναφερθέντα έχει αντίθετη φορά από το ρεύμα των φορέων πλειονότητας (I_f) και αφαιρείται από αυτό. Έτσι κατά την ορθή πόλωση η κρυσταλλοδιόδος διαρρέεται από το ρεύμα ορθής πόλωσης, που είναι ίσο προς $I_o = I_f - I_r$ ή κατά προσέγγιση $I_o \approx I_f$, επειδή το I_r είναι πολύ μικρό (περίπου 1% του I_f).

Αν τώρα η επαφή p-n πολωθεί ανάστροφα (εφαρμοσθεί δηλαδή θετικό δυναμικό στον ημιαγωγό n-τύπου και αρνητικό στον ημιαγωγό p-τύπου) το εξωτερικό πεδίο είναι ομόρροπο με το εσωτερικό με αποτέλεσμα η έκταση της περιοχής απογυμνώσεως να μεγαλώνει και ο φραγμός δυναμικού να αυξάνει (σχήμα 3-2.β). Αποτέλεσμα αυτού είναι οι φορείς πλειονότητας να εμποδίζονται ακόμμη περισσότερο να διέλθουν την περιοχή απογυμνώσεως, ενώ για τους φορείς μειονότητας δεν συμβαίνει καμιά αλλαγή. Το ρεύμα λοιπόν των φορέων πλειονότητας ελαττώνεται δραστικά και γίνεται αρκετές φορές μικρότερο από το ρεύμα των φορέων μειονότητας, που παραμένει αναλλοίωτο. Έτσι το ρεύμα ανάστροφης πόλωσης προκύπτει ίσο προς: $I_a = I_r - I_f$ και κατά προσέγγιση $I_a \approx I_r$.

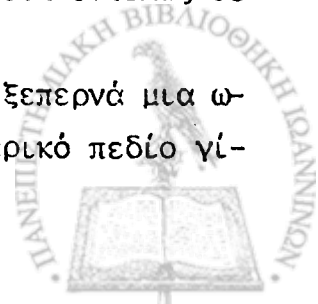
Χαρακτηριστική καμπύλη κρυσταλλοδιόδου

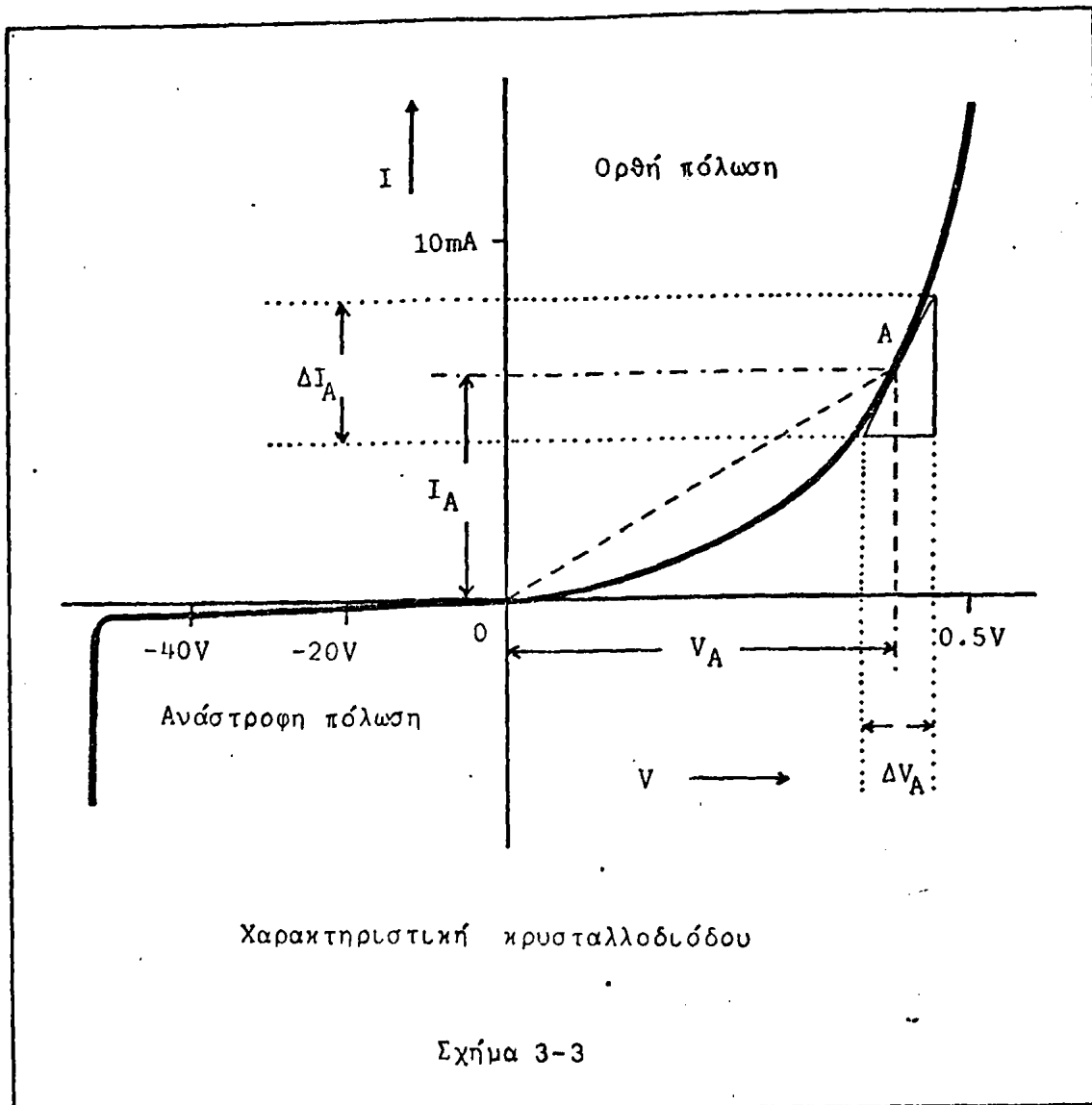
Στο σχήμα 3-3 δίδεται η χαρακτηριστική της κρυσταλλοδιόδου, δηλαδή η γραφική παράσταση της μεταβολής του ρεύματος, που τη διαρρέει, συναρτήσει της τάσης, που εφαρμόζεται στα άκρα της. Από τη χαρακτηριστική αυτή φαίνεται, ότι κατά την ορθή πόλωση αύξηση της τάσης έχει σαν αποτέλεσμα σχεδόν εκθετική αύξηση του ρεύματος, ενώ κατά την ενώ κατά την ανάστροφη πόλωση το ρεύμα παραμένει σχεδόν σταθερό και ανεπηρέαστο από την τάση. Τη συμπεριφορά αυτή περιγράφει αναλυτικά η σχέση υπολογισμού του ρεύματος της κρυσταλλοδιόδου:

$$I = I_o \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right)$$

Σε ορθή πόλωση ο εκθετικός όρος αυξάνει ταχύτατα και η μονάδα παύει να έχει ουσιαστική σημασία ($e^{\frac{eV}{kT}} \gg 1$). Αντίστοιχα σε ανάστροφη πόλωση ο εκθετικός όρος είναι πολύ μικρός ($e^{-\frac{eV}{kT}} \ll 1$) και μπορεί να αγνοηθεί εντελώς σε σύγκριση με τη μονάδα.

Τα παραπάνω ισχύουν βέβαια εφόσον η ανάστροφη τάση δεν ξεπερνά μια ωρισμένη μέγιστη τιμή, διότι πέρα από την τιμή αυτή το εσωτερικό πεδίο γί-





νεται πολύ ισχυρό και οι φορείς αποκτούν αρκετή ενέργεια, ώστε κατά την κρούση τους με τα άτομα του ημιαγωγού, μπορούν να προκαλούν ιονισμούς. Το φαινόμενο επαναλαμβάνεται αλυσισδωτά και για τους νέους φορείς (φαινόμενο χιονοστιβάδας) με αποτέλεσμα να αυξηθεί απότομα και εξαιρετικά το ρεύμα της διόδου (άκρο αριστερό τμήμα της χαρακτηριστικής) και να την καταστρέψει. Μόνον ειδικές διόδου, οι διόδου Zener, μπορούν να υφίστανται το φαινόμενο αυτό χωρίς να καταστρέφονται.

Ας σημειωθεί, ότι το ανάστροφο ρεύμα κόρου διπλασιάζεται για κάθε αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10°C περίπου. Η ευαισθησία αυτή ως προς τη θερμοκρασία οφείλεται στο ότι οι κρυσταλλικοί δεσμοί σπάζουν ευκολότερα, όταν αυξάνει η θερμική ενέργεια του κρυστάλλου και έτσι δημιουργούνται περισσότερα ζεύγη οπών-ηλεκτρονίων.

Από τη χαρακτηριστική της κρυσταλλοδιόδου φαίνεται ακόμη, ότι η αντί-



στασή της σε ορθή πόλωση είναι μεταβλητή και εξαρτάται από το σημείο λειτουργίας της. Υπάρχει επίσης διαφοροποίηση και για το ίδιο σημείο μεταξύ της στατικής:

$$R_s = \frac{V_A}{I_A}$$

και της δυναμικής:

$$R_d = \frac{\Delta V_A}{\Delta I_A}$$

αντίστασης. Αντίστοιχα η αντίστασή της σε ανάστροφη πόλωση είναι πολύ μεγάλη και σχεδόν σταθερή.

Αναφέρουμε τέλος τα κύρια χαρακτηριστικά, που προσδιορίζουν τις επιδόσεις και συνθήκες λειτουργίας μιας κρυσταλλοδιόδου:

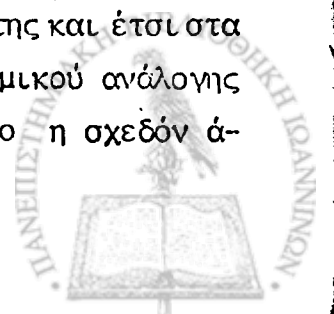
α) Μέγιστο ρεύμα ορθής πολώσεως β) Μέγιστη τάση ανάστροφης πολώσεως γ) Ρεύμα διαρροής (ο όρος περιγράφει τυπικά τη συνιστώσα εκείνη του ανάστροφου ρεύματος, που οφείλεται σε επιφανειακά κινούμενους φορείς διαφόρων προελεύσεων και είναι σχεδόν ανεξάρτητη της θερμοκρασίας) δ) Θερμοκρασιακά όρια λειτουργίας. ε) Απόκριση συχνοτήτων.

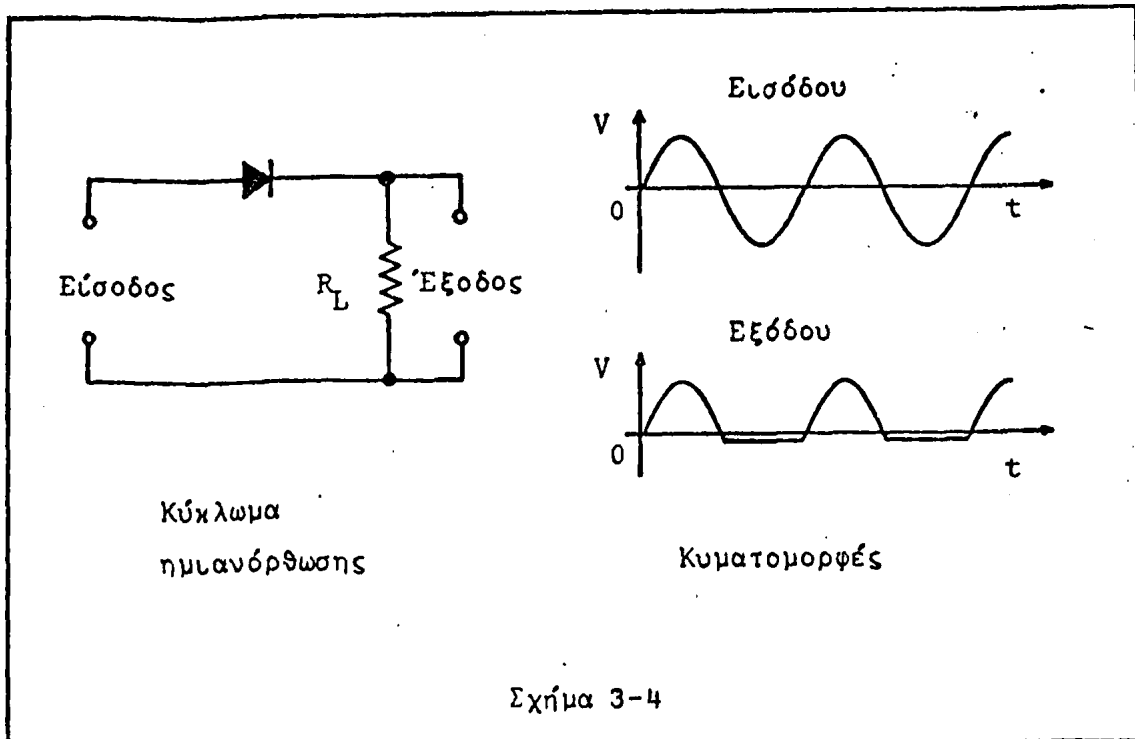
Ανόρθωση

Οι κρυσταλλοδιόδοι χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα φάρασης, σταθεροποίησης και διάφορα άλλα, κύρια όμως χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα ανόρθωσης. Έτσι ονομάζονται, όπως είναι γνωστό, τα κυκλώματα μετατροπής του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές.

Μια ιδανική κρυσταλλοδιόδος παρουσιάζει μηδενική αντίσταση κατά την ορθή φάρα (πρακτικά πολύ μικρή) και άπειρη κατά την ανάστροφη (πρακτικά πολύ μεγάλη). Την ιδιότητα ακριβώς αυτή εκμεταλλευόμαστε στα ανορθωτικά κυκλώματα.

Αν συνδέσουμε μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης στην είσοδο του κυκλώματος του σχήματος 3-4, κατά τη θετική ημιπερίοδο, οπότε η διόδος είναι πολωμένη ορθά, το ρεύμα διέρχεται σχεδόν ανεμπόδιστα δια μέσου της και έτσι στα άκρα της αντίστασης φόρτου R_L αναπτύσσεται μια διαφορά δυναμικού ανάλογης (ημιτονοειδούς) μορφής. Αντίθετα κατά την αρνητική ημιπερίοδο η σχεδόν ά-





Σχήμα 3-4

πειρη αντίσταση της διόδου εμποδίζει τη διέλευση ρεύματος διά του κυκλώματος και έτσι η διαφορά δυναμικού στα άκρα της αντιστάσεως R_L είναι μηδέν (πρακτικά λόγω του αναστροφου ρεύματος κόρου υπάρχει μια μικρή αρνητική σχεδόν σταθερή τάση). Έτσι στην έξοδο του κυκλώματος η τάση είναι ημιανορθωμένη.

Για την ημιανορθωμένη αυτή τάση, στην ιδανική της μορφή, η ανάλυση κατά Fourier δίνει:

$$V = \frac{V_0}{\pi} \left(1 + \frac{\pi}{2} \eta \mu \omega t - \frac{2}{3} \sigma \nu \nu 2 \omega t - \dots \dots \right)$$

όπου:

$$V_0 = E_0 / \left(1 + \frac{R_0}{R_L} \right)$$

Το R_0 παριστά την ολική αντίσταση του κυκλώματος, δηλαδή το άθροισμα των αντιστάσεων φόρτου, κρυσταλλοδιόδου, πηγής κλπ και το E_0 το πλάτος της τάσης εισόδου. Από τις σχέσεις αυτές συμπεραίνουμε ότι: α) Υπάρχει στην τάση εξόδου συνεχής συνιστώσα ίση προς: $E_0 / \pi \left(1 + \frac{R_0}{R_L} \right)$ και β) Η συνεχής αυτή συνιστώσα αυξάνει, όσο αυξάνει η αντίσταση φόρτου.

Εκτός βέβαια από τη συνεχή υπάρχουν και οι ανεπιθύμητες εναλλασσόμενες



συνιστώσες. Η συνεισφορά τους στην τελική μορφή της τάσης εκφράζεται συνήθως με μία παράμετρο, που ονομάζεται βαθμός κυμάτωσης ή απλά κυμάτωση (ripple) και ορίζεται από τη σχέση:

$$\gamma = \frac{V_{\epsilon\nu}}{V_{\sigma\upsilon\nu}}$$

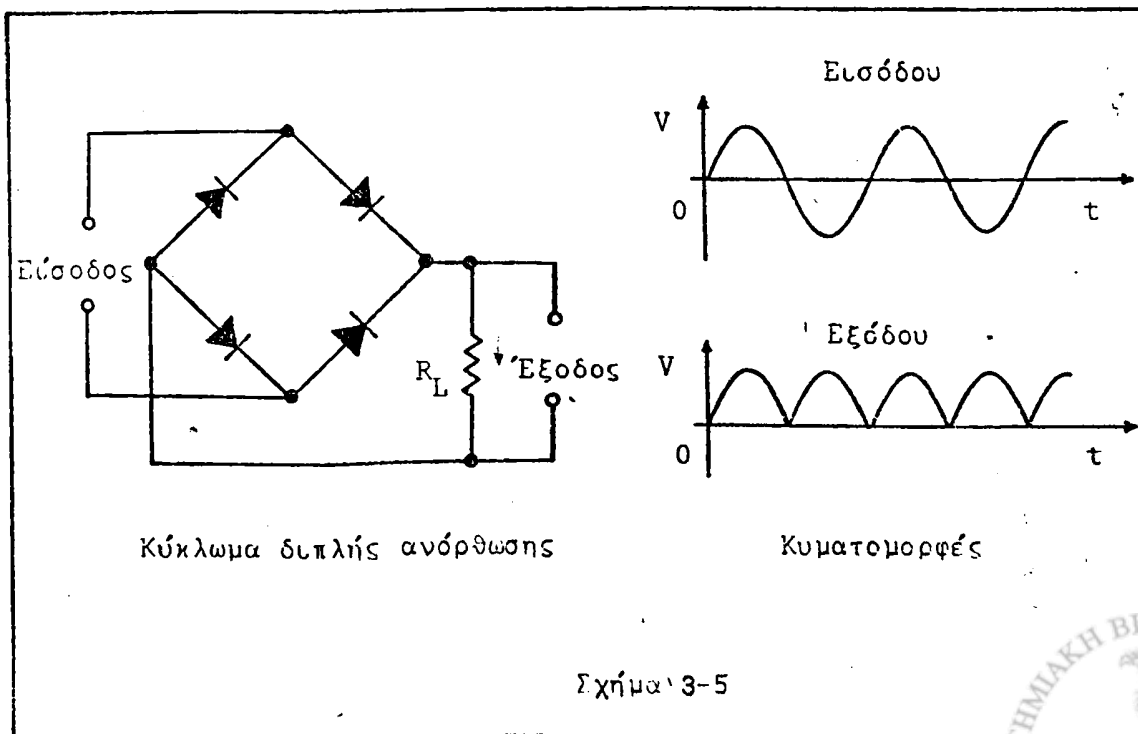
όπου $V_{\epsilon\nu}$ η ενεργός τιμή όλων των εναλλασσομένων συνιστωσών και $V_{\sigma\upsilon\nu}$ η συνεχής συνιστώσα. Για απλή ανόρθωση η κυμάτωση έχει τιμή $\gamma = 1.21$.

Προκειμένου να πετύχουμε καλύτερα ανορθωτικά αποτελέσματα, δηλαδή μεγαλύτερη συνεχή συνιστώσα και μικρότερη κυμάτωση, χρησιμοποιούμε τα κυκλώματα διπλής ανόρθωσης, όπως το κύκλωμα γέφυρας (σχήμα 3-5). Με το κύκλωμα αυτό επιτυγχάνεται ανόρθωση και των δύο ημιπεριόδων του εναλλασσόμενου ρεύματος.

Η ανάλυση κατά Fourier δίνει στην περίπτωση αυτή:

$$V = \frac{2V_0}{\pi} \left(1 - \frac{2}{3} \sin 2\omega t - \frac{2}{15} \sin 4\omega t - \dots \right)$$

Η συνεχής συνιστώσα προκύπτει ίση προς: $\frac{2E_0}{\pi(1 + R_0/R_L)}$, δηλαδή διπλάσια από ότι στην απλή ανόρθωση και η κυμάτωση: 0.48, δηλαδή λιγότερη από υποδιπλάσια.



Η διπλή ανόρθωση μπορεί να βελτιωθεί ακόμη περισσότερο με την προσθήκη των λεγόμενων φίλτρων εξομαλύνσεως. Το πιο απλό από τα φίλτρα αυτά αποτελείται από έναν πυκνωτή με σταθερά χρόνου πολύ μεγαλύτερη από την ημιπερίοδο της τάσης, που ανορθώνεται, παράλληλα συνδεσμοποιημένο προς την αντίσταση φόρτου. Η προσθήκη ενός τέτοιου πυκνωτή-φίλτρου ελαττώνει την κυμάτωση και αυξάνει τη συνεχή συνιστώσα.

Υπάρχουν βέβαια και αποτελεσματικότερα φίλτρα. Είναι όμως πιο πολύπλοκα και πρέπει να αναζητηθούν σε εξειδικευμένες βιβλιογραφικές πηγές.

Απαραίτητες γνώσεις

Δ.Μ. Μηλιώτη: Η Φυσική των Κρυσταλλοδίοδων, σελ. 235-262.

Χρησιμοποιούμενα όργανα

1. Τροφοδοτικό χαμηλής τάσης.
2. Πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος 12.6 V (από το τροφοδοτικό υψηλής τάσης)
3. Ηλεκτρονικό βολτόμετρο.
4. Πολύμετρο (μιλιαμπερόμετρο: κλίμακα 12mA - μικροαμπερόμετρο: κλίμακα 0.06mA).
5. Παλμογράφος.
6. Αυτομετασχηματιστής.
7. Κρυσταλλοδίοδοι πυριτίου.
8. Αντιστάσεις: $R_1 = 270\Omega - 2W$, $R_2 = 1k\Omega - 0.5W$.
9. Πυκνωτής 10 μF

Πειραματικό μέρος

Προσοχή: Οι κρυσταλλοδίοδοι, που χρησιμοποιείτε, έχουν μέγιστο ρεύμα ορθής φοράς 250mA και μέγιστη ανάστροφη τάση 50V. Μην υπερβαίνετε τις τιμές αυτές, διότι θα καταστραφούν.

1. Για τον καθορισμό της ορθής και ανάστροφης πόλωσης της κρυσταλλο-



διόδου μετρήστε την αντίστασή της με το ηλεκτρονικό βολτόμετρο (κλίμακα Rx100) τόσο κατά την ορθή όσο και κατά την ανάστροφη φορά.

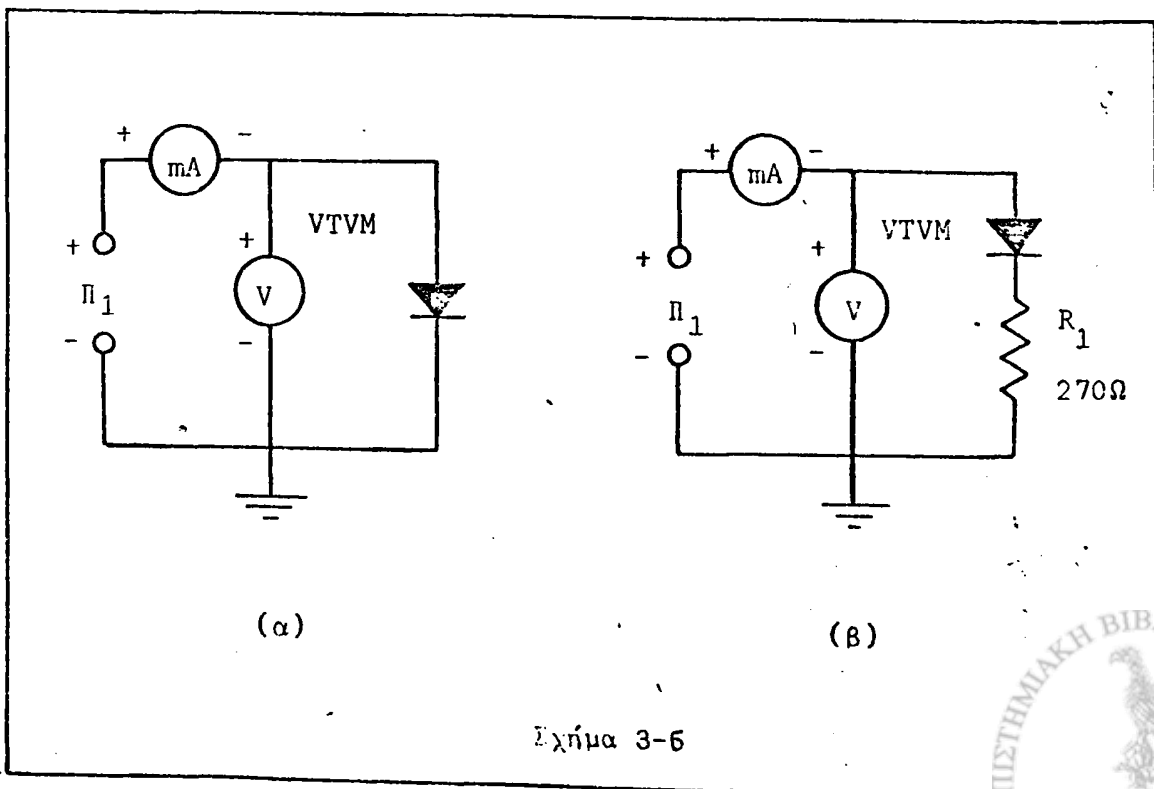
$$R_{\text{ορ}} = \quad \Omega$$

$$R_{\text{αν}} = \quad \Omega$$

2. Συνδέστε το κύκλωμα του σχήματος 3-6.α με τις ακριβείς πολικότητες του ηλεκτρονικού βολτόμετρου (VTVM), της κρυσταλλοδιόδου και του πολύμετρου-μιλιαμπερόμετρου. Ο γειωμένος ακροδέκτης του ηλεκτρονικού βολτόμετρου συμβολίζεται με (-) στα γραμμικά κυκλώματα.

3. Αρχίζοντας από το μηδέν αυξάνετε την τάση του τροφοδοτικού μέχρις ότου το πολύμετρο σας δώσει την ένδειξη $I_f = 1\text{mA}$. Σχηματίστε τον παρακάτω πίνακα και καταγράψτε την αντίστοιχη τιμή της τάσης στα άκρα της κρυσταλλοδιόδου κάτω από την τιμή $I_f = 1\text{mA}$. Να επαναληφθούν τα ίδια και για τις υπόλοιπες τιμές I_f του πίνακα (I_f παριστά το ρεύμα ορθής πόλωσης). Αποδώστε γραφικά την καμπύλη $I_f = \sigma(E)$ (στατική χαρακτηριστική, $R_L = 0$). Επαναρυθμίστε την πηγή τροφοδοσίας στην τιμή μηδέν (0 Volts).

I_f mA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E Volts										



4. Στο κύκλωμα του σχήματος 3-6.α αντιστρέψτε τη φορά της κρυσταλλοδιόδου και για τάση $E=20V$ βρείτε το ανάστροφο ρεύμα I_r (το πολύμετρο στην κλίμακα $0.06 \mu A$). Υπολογίστε την αντίσταση της κρυσταλλοδιόδου σε ανάστροφη πόλωση.

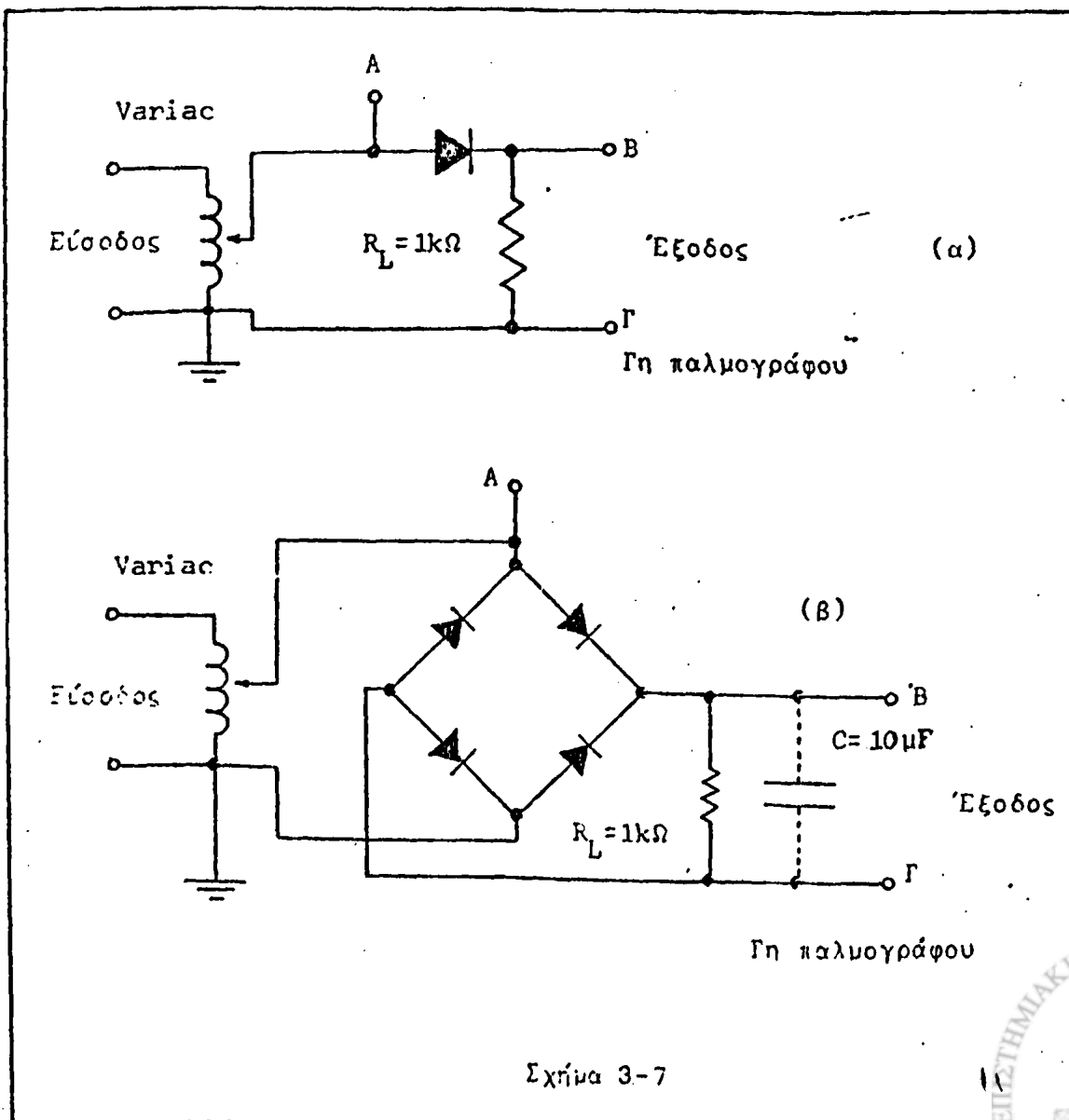
$$I_r = \quad \mu A$$

$$R_{αν} = \quad \Omega$$

5. Για δυο διαφορετικά σημεία της στατικής χαρακτηριστικής (π.χ. για $I_f = 2mA$ και $I_f = 8mA$) υπολογίστε τη στατική και δυναμική αντίσταση της κρυσταλλοδιόδου.

$$1 \quad R_s = \quad \Omega \quad R_d = \quad \Omega$$

$$2 \quad R_s = \quad \Omega \quad R_d = \quad \Omega$$



6. Συνδέστε το κύκλωμα του σχήματος 3-6.β χρησιμοποιώντας την αντίσταση φόρτου $R_L = 270\Omega$. Αυξάνοντας την τάση του τροφοδοτικού μετρήστε τις αντίστοιχες τιμές του E (με το ηλεκτρονικό βολτόμετρο) για τις τιμές I_f του προηγούμενου πίνακα. Αποδώστε γραφικά τη σχέση $I_f = \sigma(E)$ (δυναμική χαρακτηριστική, $R_L = 270\Omega$) στο ίδιο διάγραμμα με τη στατική χαρακτηριστική.

7. Να αντικατασταθεί η $R_L = 270\Omega$ με την $R_L = 1k\Omega$ στο κύκλωμα του σχήματος 3-6.β και να επαναληφθούν τα ζητούμενα της ερωτήσεως 6.

8. Από τις καμπύλες, που σχεδιάσατε, ποιά είναι περισσότερο γραμμική; Τι συμπέρασμα συνάγετε; Αιτιολογείστε αναλυτικά τη μορφή της στατικής χαρακτηριστικής.

9. Πραγματοποιείτε το κύκλωμα του σχήματος 3-7.α. Στην είσοδο του αυτομετασχηματιστή εφαρμόστε εναλλασσόμενη τάση 12.6 V από το τροφοδοτικό υψηλής τάσης. Συνδέστε τον βαθμολογημένο παλμογράφο στα σημεία Α και Γ και σχεδιάστε την κυματομορφή, που παρατηρείτε. Κατόπιν συνδέστε τον παλμογράφο στα σημεία Β και Γ και σχεδιάστε πάλι την κυματομορφή, που παρατηρείτε. Σχολιάστε τις παρατηρήσεις σας.

10. Συνδέστε τώρα στο Α τον Χ ακροδέκτη του παλμογράφου, στο Β τον Υ ακροδέκτη και στο Γ τον ακροδέκτη γείωσης του παλμογράφου. Φέρτε το μεταγωγό σάρωσης του παλμογράφου στη θέση ΕΧΤ.Χ και με τη βοήθεια του ρυθμιζόμενου αυτομετασχηματιστή ρυθμίστε την τάση εξόδου του έτσι, ώστε να παρατηρήσετε στην οθόνη τη δυναμική χαρακτηριστική της κρυσταλλοδιόδου. Σχεδιάστε τη χαρακτηριστική, που παρατηρήσατε.

11. Πραγματοποιείτε το κύκλωμα του σχήματος 3-7.β. Συνδεσμολογείτε τον παλμογράφο διαδοχικά μεταξύ των σημείων Α και Γ και Β και Γ και σχεδιάστε τις παρατηρούμενες κυματομορφές εισόδου και εξόδου. Κατόπιν συνδέστε παράλληλα προς την αντίσταση φόρτου τον πυκνωτή (διακεκομμένος κλάδος κύκλωματος στο σχήμα) και σχεδιάστε τη νέα κυματομορφή εξόδου. Σχολιάστε τις παρατηρήσεις σας.

Ερωτήσεις

1. Πώς σχηματίζονται οι p- και n- τύποι ημιαγωγών;
2. Ποιά είναι τα πλεονεκτήματα και ποιά τα μειονεκτήματα των κρυσταλλοδίων συγκριτικά με τις διόδους λυχνίες κενού;
3. Ποιά χαρακτηριστικά μεγέθη προσδιορίζουν τις συνθήκες λειτουργίας



και τις επιδόσεις μιας κρυσταλλοδιόδου;

4. Μπορεί μια κρυσταλλοδιόδος να αντέξει υπερφόρτωση ρεύματος; Γιατί;

5. Ποιά είναι η φυσική σημασία της στατικής και δυναμικής αντίστασης μιας κρυσταλλοδιόδου;

6. Πώς πραγματοποιείται η διπλή ανόρθωση στο κύκλωμα γέφυρας;



ΜΕΛΕΤΗ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΔΙΟΔΟΥ ZENERΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΤΑΣΗΣΕισαγωγή

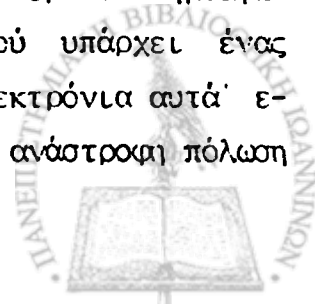
Όπως είναι γνωστό και από προηγούμενη άσκηση, μια κρυσταλλοδίοδος σε ανάστροφη πόλωση διαρρέεται από ένα εξαιρετικά μικρό ρεύμα. Αυτό ισχύει βεβαίως μέχρι μια ωρισμένη μέγιστη τιμή της ανάστροφης τάσης, πέραν της οποίας το ρεύμα αυξάνει απότομα και καταστρέφει τη δίοδο. Η τάση αυτή ονομάζεται τάση καταρρεύσεως (breakdown voltage).

Τα τελευταία χρόνια έγινε δυνατή η κατασκευή κρυσταλλοδίοδων, που δεν καταστρέφονται, όταν η ανάστροφη τάση στα άκρα τους φθάσει την τάση καταρρεύσεως. Οι δίοδοι αυτές ονομάζονται δίοδοι Zener προς τιμή του Carl Zener, που μελέτησε διεξοδικά τα φαινόμενα καταρρεύσεως. Στις δίοδους αυτές είναι δυνατό να προκαθορισθεί η τάση καταρρεύσεως με κατάλληλο έλεγχο κατά την κατασκευή τους της γεωμετρίας τους, καθώς και του ποσοστού και της κατανομής των προσμίξεων. Έτσι σήμερα υπάρχουν δίοδοι Zener με τάση καταρρεύσεως ή τάση Zener, όπως συνήθως αναφέρεται, μεταξύ 2 και 200 Volts.

Όπως έδειξαν διάφορες έρευνες, η απότομη αύξηση του ρεύματος της δίοδου στην περιοχή της τάσης Zener οφείλεται κυρίως στα εξής δύο φαινόμενα:

α) Φαινόμενο Zener: Στην περιοχή φραγμού κατά τα γνωστά υπάρχει ισχυρό εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο. Το πεδίο αυτό επιτείνεται από την ανάστροφη πόλωση. Όταν λοιπόν η ένταση του πεδίου αυτού ξεπεράσει κάποιο όριο, που είναι της τάξης του 10^8 V/m, τα ηλεκτρόνια των ατόμων του ημιαγωγού, που βρίσκονται στην περιοχή φορτίου χώρου, αποκτούν, λόγω ακριβώς του πεδίου, αρκετή ενέργεια, ώστε να "σπάσουν" τους ομοιοπολικούς δεσμούς και να ανυψωθούν από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Κάθε τέτοια ανύψωση όμως ισοδυναμεί με τη δημιουργία ενός ζεύγους σπής-ηλεκτρονίου και κατά συνέπεια προκαλείται ταχύτατη αύξηση του ανάστροφου ρεύματος.

β) Φαινόμενο χιονοστιβάδας: Απόσπαση ηλεκτρονίων από άτομα του ημιαγωγού μπορεί να γίνει και με άλλο τρόπο. Στην περιοχή φραγμού υπάρχει ένας ελάχιστος αριθμός ηλεκτρονίων θερμικής προελεύσεως. Τα ηλεκτρόνια αυτά επιταχυνόμενα από το ηλεκτρικό πεδίο είναι δυνατόν, όταν η ανάστροφη πόλωση



65

είναι μεγάλη, να αποκτήσουν αρκετή κινητική ενέργεια, ώστε κατά την κρούση τους με άτομα του ημιαγωγού να προκαλούν ιοντισμούς και κατά συνέπεια απελευθέρωση ηλεκτρονίων (δημιουργία ζευγών οπών-ηλεκτρονίων). Τα νέα ηλεκτρόνια προκαλούν διαδοχικά νέους ιοντισμούς και τελικά το αποτέλεσμα είναι ταχύτατη αύξηση του ανάστροφου ρεύματος.

Σήμερα είναι γνωστό, ότι το φαινόμενο Zener κυριαρχεί σε κρυσταλλοδιόδους με τάση Zener μέχρι 6 Volts, ενώ το φαινόμενο χιονοστιβίδας σε διόδους με μεγαλύτερες τάσεις Zener. Παρά το γεγονός αυτό η ονομασία των ειδικών αυτών διόδων (Zener) είναι κοινή για όλες.

Είναι ευνόητο, ότι το φαινόμενο Zener ευνοείται σε κρυσταλλοδιόδους με υψηλό ποσοστό προσμίξεων, διότι σ' αυτές η περιοχή απογυμνώσεως έχει μικρότερη έκταση και κατά συνέπεια για δεδομένη διαφορά δυναμικού υπάρχει μεγαλύτερη ένταση πεδίου.

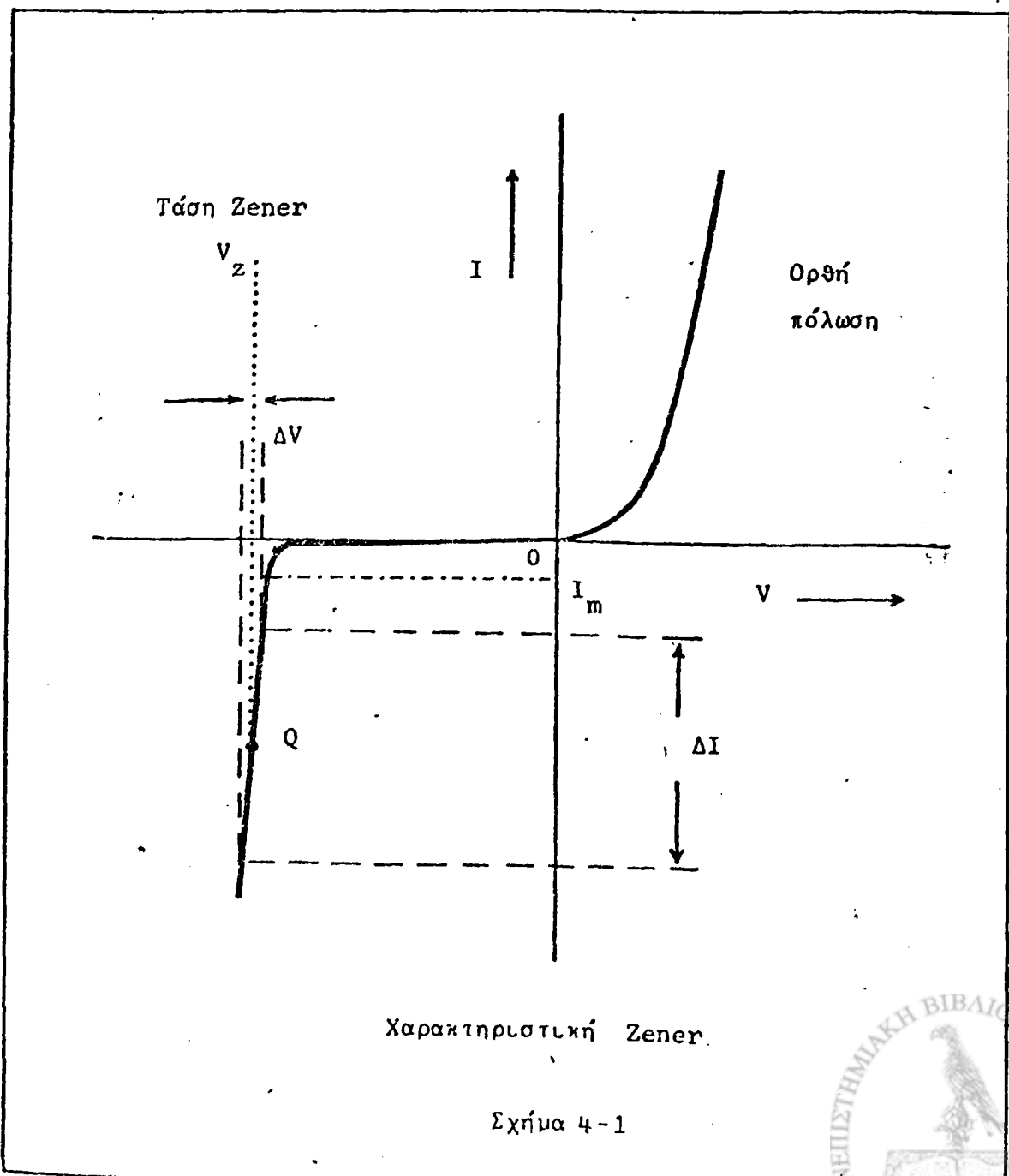
Η διάδος Zener είναι ευαίσθητη σε θερμοκρασιακές μεταβολές. Κατά την ορθή πόλωση έχει αρνητικό θερμικό συντελεστή αντιστάσεως, όπως όλες οι κρυσταλλοдиодοι και οι ημιαγωγοί. Κατά την ανάστροφη πόλωση υπάρχει μια διαφοροποίηση. Συγκεκριμένα σε διόδους με τάση Zener μεταξύ 0 και 6 Volts, όταν δηλαδή επικρατεί το φαινόμενο Zener, ο θερμικός συντελεστής αντιστάσεως είναι αρνητικός. Αυτό σημαίνει, ότι για σταθερή ανάστροφη τάση κάθε αύξηση της θερμοκρασίας έχει σαν αποτέλεσμα αύξηση του ρεύματος, που διαρρέει την κρυσταλλοδίοδο. Το γεγονός αυτό ερμηνεύεται ως εξής: Κάθε αύξηση της θερμοκρασίας του ημιαγωγού έχει σαν αποτέλεσμα αύξηση της εσωτερικής του ενέργειας, δηλαδή αύξηση της ενέργειας των ηλεκτρονίων σθένους και ευχερέστερη απόσπασή τους από τα άτομα με συνέπεια να ανυψωθούν στη ζώνη αγωγιμότητας. Αυτό βέβαια σημαίνει ενίσχυση του φαινομένου Zener και αύξηση του ρεύματος της διόδου. Αντίθετα σε διόδους με τάση Zener πάνω από 6V, όταν δηλαδή επικρατεί το φαινόμενο χιονοστιβίδας, ο θερμικός συντελεστής αντιστάσεως είναι θετικός. Αυτό σημαίνει, ότι για σταθερή ανάστροφη τάση κάθε αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση του ρεύματος, που διαρρέει τη διάοδο. Το γεγονός αυτό ερμηνεύεται ως εξής: Κάθε αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση του μέσου πλάτους ταλαντώσεως των ατόμων του πλέγματος του ημιαγωγού. Αυξάνει έτσι η πιθανότητα συγκρούσεως των ελευθέρων φορέων (ηλεκτρονίων) με άτομα του ημιαγωγού και σαν επακόλουθο μειώνεται η μέση ελεύθερη διαδρομή τους. Η μείωση αυτή σημαίνει, ότι οι φορείς έχουν μικρότερη πιθανότητα μεταξύ δύο διαδοχικών κρούσεων να αποκτήσουν κινητική ενέργεια αρκετή για να προκαλέσουν ιονισμό. Έτσι το φαινόμενο χιονοστιβίδας παρε-



μποδίζεται κατά ένα ποσοστό και το ρεύμα της κρυσταλλοδιόδου μειώνεται.

Από τη συζήτηση αυτή γίνεται εύκολα αντιληπτό, ότι εκτός από την αντίσταση της διόδου, επηρεάζεται από τις θερμοκρασιακές μεταβολές και η ακριβής τιμή της τάσης Zener (περίπου από 1-5%). Επειδή λοιπόν για διόδους με τάση Zener μεταξύ 5.5 και 6.5 Volts ο θερμοκός συντελεστής αντιστάσεως είναι περίπου μηδέν (περιοχή μεταβάσεως από αρνητικές σε θετικές τιμές) λαμβάνεται πρόνοια σε κυκλώματα ακριβείας (σταθεροποίηση σπαιτήσεων) οι χρησιμοποιούμενες Zener να έχουν τάση Zener ≈ 6 Volts.

Στο σχήμα 4-1 δίδεται η χαρακτηριστική μιας κρυσταλλοδιόδου Zener. Από τη χαρακτηριστική αυτή φαίνεται καθαρά η ιδιαίτερη συμπεριφορά σε ανάστροφη πόλωση. Όταν η ανάστροφη τάση είναι μικρότερη από την τάση Zener



το ρεύμα, που διαρρέει τη δίοδο, είναι ασήμαντο. Όταν όμως η τάση αυτή ξεπεράσει το καθορισμένο όριο, το ρεύμα αυξάνει ραγδαία για κάθε έστω και ελάχιστη επιπλέον προσαύξηση της τάσης. Γίνεται λοιπόν προφανής η βασική ιδιότητα της διόδου Zener, να διατηρεί δηλαδή σχεδόν σταθερή τάση (ιση προς την τάση Zener) στα άκρα της για μεγάλο εύρος μεταβολών του ρεύματος, που τη διαρρέει.

Σημαντικό χαρακτηριστικό της διόδου Zener είναι η δυναμική της αντίστα-ση στην περιοχή καταρρεύσεως. Η αντίσταση αυτή ορίζεται κατά τα συνήθη από τη σχέση:

$$R_d = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$

και στις εφαρμογές είναι εξαιρετικά χρήσιμο να παραμένει σταθερή. Από τη χαρακτηριστική όμως φαίνεται, ότι σταθερή παραμένει η δυναμική αντίσταση για ρεύματα μεγαλύτερα του I_m (μετά την περιοχή κάμψης). Υπάρχει λοιπόν ένα ελάχιστο ρεύμα, που πρέπει να διέρχεται από τη δίοδο, ώστε η λειτουργία της να χαρακτηρίζεται από ικανοποιητική σταθερότητα.

Κρίσιμο τέλος χαρακτηριστικό είναι η μέγιστη ισχύς, που μπορεί να καταναλώνεται στη δίοδο Zener χωρίς να την καταστρέφει. Η ισχύς αυτή σχετίζεται άμεσα με το μέγιστο ρεύμα, που μπορεί να διέλθει από τη δίοδο με βάση τη σχέση:

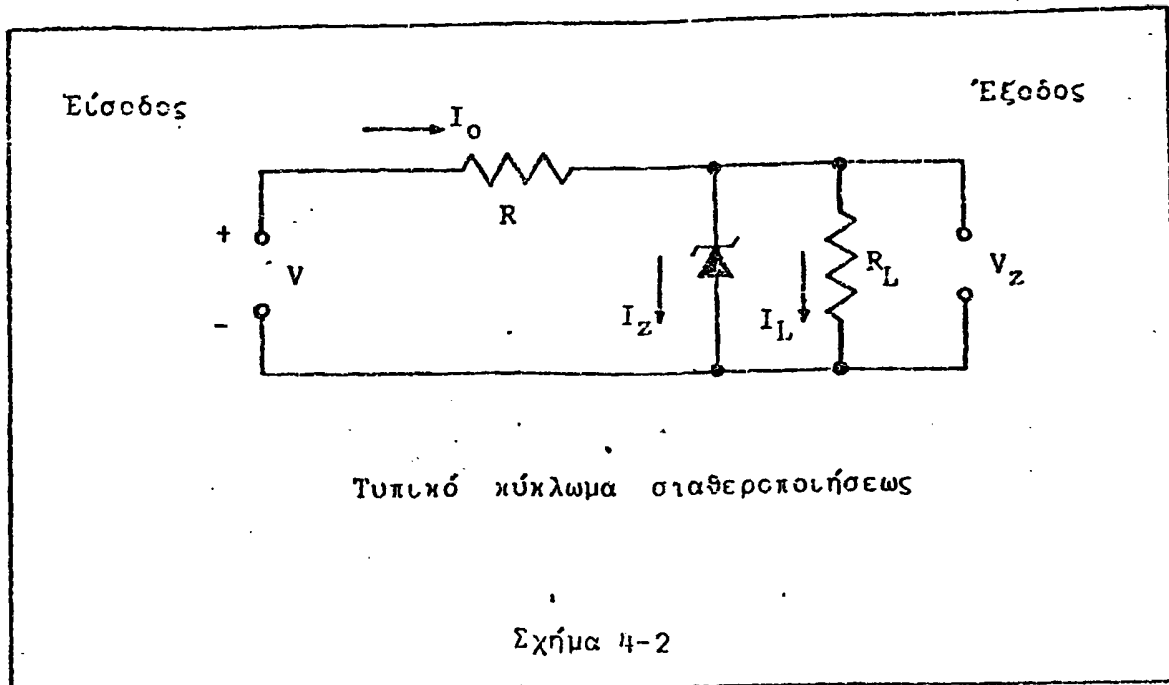
$$N_{\max} = V_z \cdot I_{\max}$$

Σταθεροποίηση τάσεων με Zener

Σε πολλές περιπτώσεις είναι απαραίτητο σε διάφορες ηλεκτρονικές εφαρμογές ωρισμένες τάσεις να διατηρούνται σταθερές σε μιά προκαθορισμένη τιμή. Τα κυκλώματα, με τα οποία επιτυγχάνεται αυτό, ονομάζονται κυκλώματα σταθεροποιήσεως τάσεων. Άλλοτε πάλι είναι απαραίτητο μερικά ευαίσθητα συστήματα, όπως π.χ. ηχεία συγκροτημάτων hi-fi ή ευαίσθητα γαλβανόμετρα, να προστατευθούν από πιθανές υπερτάσεις, που μπορούν να εμφανισθούν στην εισοδό τους. Αυτό επιτυγχάνεται με ειδικά κυκλώματα, που ονομάζονται κυκλώματα προστασίας.

Σε όλα σχεδόν τα κυκλώματα προστασίας και στα περισσότερα κυκλώματα σταθεροποιήσεως τάσεων (ιδιαίτερα στα χαμηλού κόστους) χρησιμοποιούνται





σήμερα δίοδοι Zener.

Στο σχήμα 4-2 δίδεται ένα τυπικό κύκλωμα σταθεροποίησης τάσης με δίοδο Zener. Στα άκρα της Zener και κατά συνέπεια και στα άκρα του φόρτου R_L (έξοδος του κυκλώματος) επικρατεί τάση ίση προς:

$$V_Z = V - I \cdot R$$

όπου V η τάση στους πόλους της πηγής τροφοδοσίας (είσοδος κυκλώματος), που πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την τάση Zener.

Έστω τώρα ότι για κάποιο λόγο η τάση της πηγής τροφοδοσίας μεταβάλλεται και συγκεκριμένα αυξάνει. Θα πρέπει κατά ακολουθία να αυξηθεί και η τάση στα άκρα της Zener η ελάχιστη όμως αρχική αύξηση τάσης στα άκρα της αυξάνει, σύμφωνα με όσα προβλέπει η χαρακτηριστική της, εξαιρετικά το ρεύμα, που τη διαρρέει I_Z , άρα και το συνολικό ρεύμα του κυκλώματος I_0 . Σαν αποτέλεσμα αυτού αυξάνει η πτώση τάσης κατά μήκος της αντιστάσεως R και αντισταθμίζει την αύξηση της τάσης τροφοδοσίας, έτσι ώστε η τάση στα άκρα της Zener (και του φόρτου) να παραμένει σταθερή και ίση προς την τάση Zener. Αντίστροφα φαινόμενα θα συμβούν, αν η τάση της πηγής τροφοδοσίας ελαττωθεί.

Έστω τώρα ότι μεταβάλλεται ο φόρτος R_L και συγκεκριμένα αυξάνει. Αυτό, αν η δίοδος Zener δεν υπήρχε ή ήταν απλό ωμικό στοιχείο κυκλώματος, θα έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ολικής αντιστάσεως του κυκλώματος, άρα για δεδομένη τάση τροφοδοσίας την ελάττωση του ολικού ρεύματος. Αυτό ση-

μαίνει μείωση της πτώσης τάσης κατά μήκος της αντιστάσεως R και αύξηση της διαφοράς δυναμικού στα άκρα του φόρτου (και της Zener). Στην πραγματικότητα μόλις αρχίσει να εμφανίζεται αυτή η αύξηση τάσης στα άκρα της Zener σύμφωνα πάλι με τα προβλεπόμενα από τη χαρακτηριστική της, αυξάνει δραστήκ το ρεύμα, που τη διαρρέει, και αντισταθμίζει την ελάττωση ρεύματος του παράλληλου με τη Zener κλάδου του φόρτου. Έτσι το ολικό ρεύμα του κυκλώματος παραμένει σχεδόν σταθερό και κατά συνέπεια και η τάση στα άκρα του φόρτου.

Από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω γίνεται φανερό ότι: α) Η δίοδος Zener δεν μπορεί να δράσει σαν σταθεροποιήτρια τάσεων παρά μόνο για τάσεις της πηγής τροφοδοσίας μεγαλύτερες από την τάση Zener (ακριβέστερα η λειτουργία της συνεχίζεται εφ'όσον τη διαρρέει ρεύμα τουλάχιστον ίσο προς I_m). Αν δηλαδή η τάση της πηγής γίνει μικρότερη από την τάση Zener, αναστόφευκτα το ίδιο θα συμβεί και για την τάση στα άκρα του φόρτου R_L . β) Στην περίπτωση σταθεροποίησης έναντι μεταβολών φόρτου υπάρχει κάποιο κατώτατο όριο για την τιμή του πέρα από το οποίο η Zener δεν σταθεροποιεί, επειδή παύει να διαρρέεται από ρεύμα, "βραχυκυκλώνεται" δηλαδή κατά κάποιο τρόπο από τον φόρτο. Η ελάχιστη αυτή τιμή αντιστάσεως φόρτου δίνεται από τη σχέση:

$$R_L = R \cdot V_Z / (V - V_Z)$$

Σχετικά με τα παραπάνω κυκλώματα σταθεροποίησης έχει επικρατήσει μια ορολογία για τον προσδιορισμό των επιδόσεών τους. Έτσι:

Σταθεροποίηση γραμμής: (line regulation) ονομάζεται το εύρος μεταβολής της τάσης εξόδου για δεδομένη μεταβολή της τάσης εισόδου και συγκεκριμένο φόρτο.

Σταθεροποίηση φόρτου: (load regulation) ονομάζεται το εύρος μεταβολής της τάσης εξόδου για δεδομένη μεταβολή της αντιστάσεως φόρτου και σταθερή τάση εισόδου.

Απαραίτητες γνώσεις:

Δ.Μ. Μηλιώτη : Η Φυσική των Κρυσταλλολυχνιών, σελ. 259-60

Κυκλώματα ηλεκτρονικής, σελ. 385-7



Χρησιμοποιούμενα όργανα:

1. Τροφοδοτικό χαμηλής τάσης
2. Πηγή εναλλασσόμενης τάσης (από το τροφοδοτικό υψηλής τάσης)
3. Ηλεκτρονικό βολτόμετρο
4. Πολύμετρα (2)
5. Παλμογράφος
6. Δίοδος Zener
7. Αντιστάσεις: $100\Omega - 0.5W$, $270\Omega - 2W$, $3.9\Omega - 0.5W$, $100\Omega - 1W$.
8. Ποτενσιόμετρα: $200\Omega - 0.5W$, $100k\Omega - 0.5W$, $1k\Omega - 2W$.

Πειραματικό μέρος

Προσοχή: Οι δίοδοι Zener, που χρησιμοποιείτε έχουν μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα $100mA$. Μην υπερβαίνετε την τιμή αυτή, διότι θα καταστραφούν.

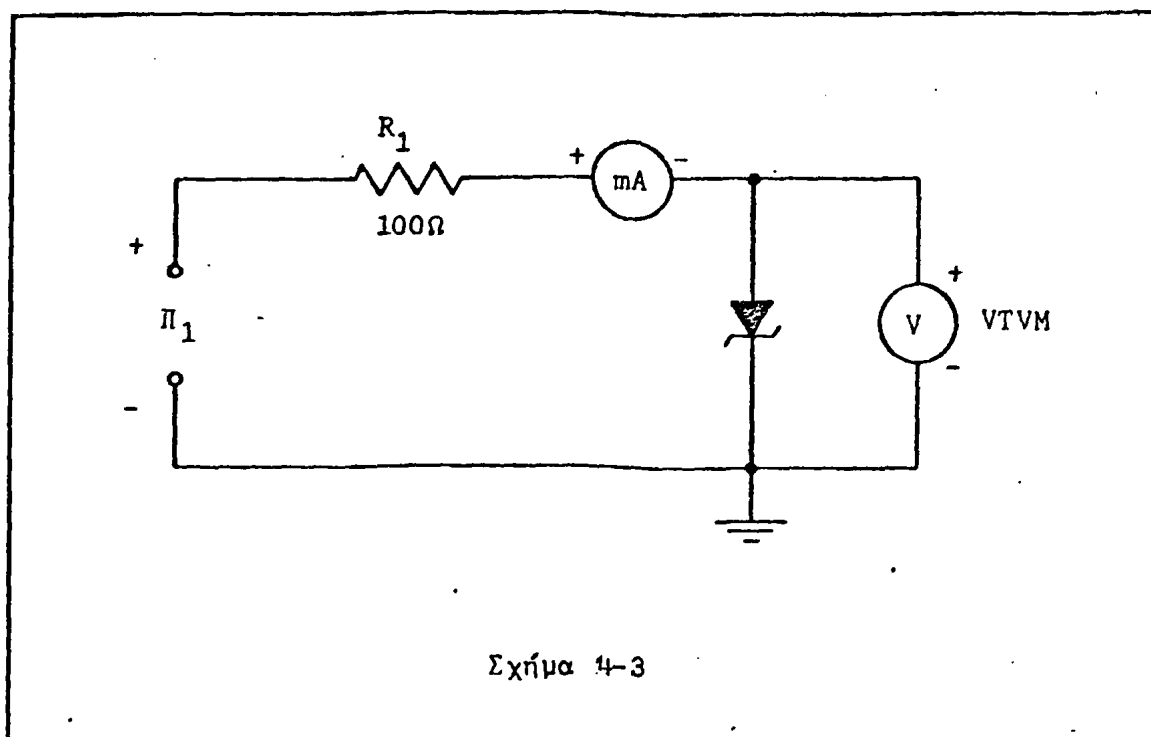
1. Πραγματοποιείτε το κύκλωμα του σχήματος 4-3. Μέσω του τροφοδοτικού Π_1 μεταβάλετε το ρεύμα του κυκλώματος (ρεύμα διόδου Zener) και καταγράψτε τις αντίστοιχες τιμές της τάσης στα άκρα της Zener για τις τιμές ρεύματος του παρακάτω πίνακα.

I mA	0	1	2	3	4	6	8	10
V Volt								

2. Στο κύκλωμα 4-3 αντιστρέψτε τη φορά της διόδου Zener και για τις τιμές ρεύματος, που σημειώνονται στον παρακάτω πίνακα, καταγράψτε τις αντίστοιχες τιμές τάσης στα άκρα της.

I μA	0	5	10	20	40	100	200	500
V Volt								
I mA								
V Volt	1	2	4	6	8	10	15	20

3. Με βάση τις μετρήσεις, που πήρατε, χαράξτε τη χαρακτηριστική της διόδου Zener και προσδιορίστε τη δυναμική της αντίσταση στο γραμμικό τμήμα



Σχήμα 4-3

της καμπύλης στην περιοχή καταρρεύσεως. Πόση είναι η τάση Zener για την κρυσταλλοδίοδο αυτή;

$$R_d = \quad \Omega$$

$$V_z = \quad V$$

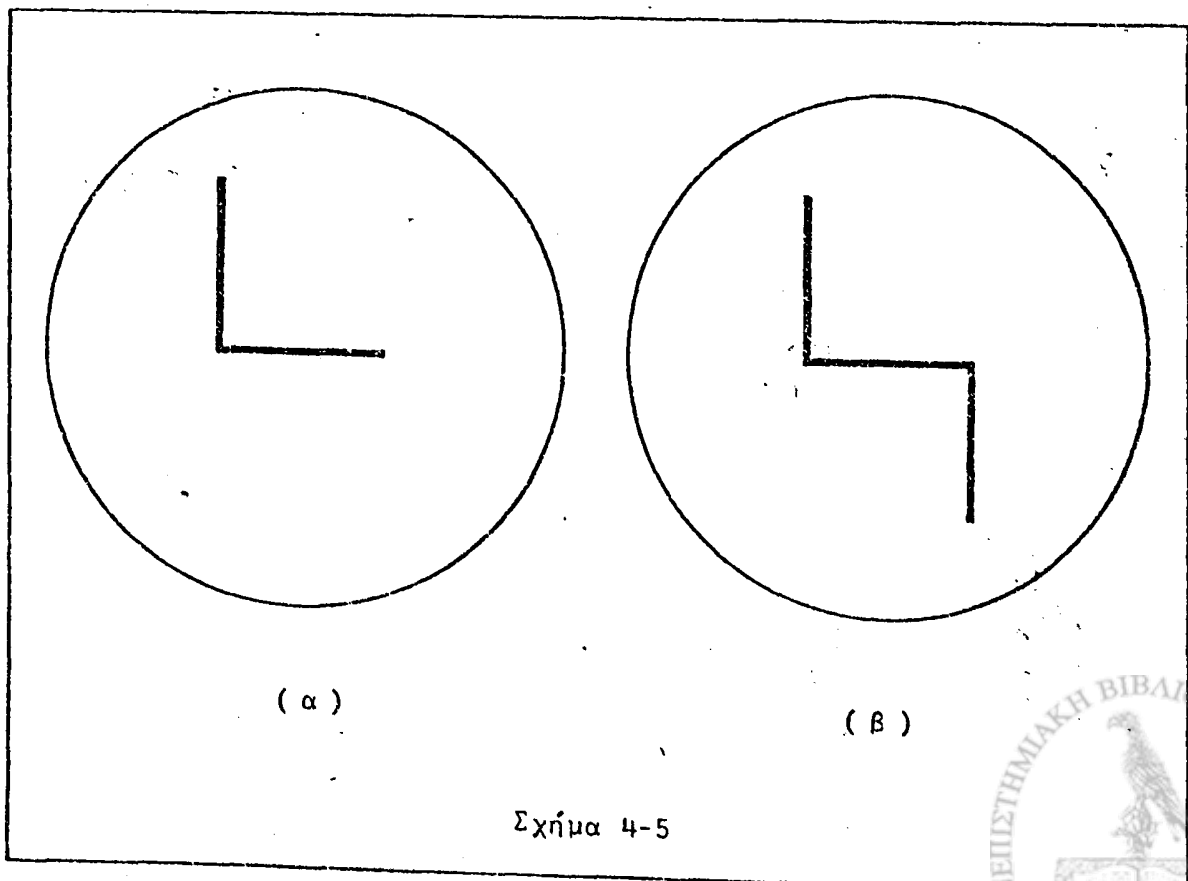
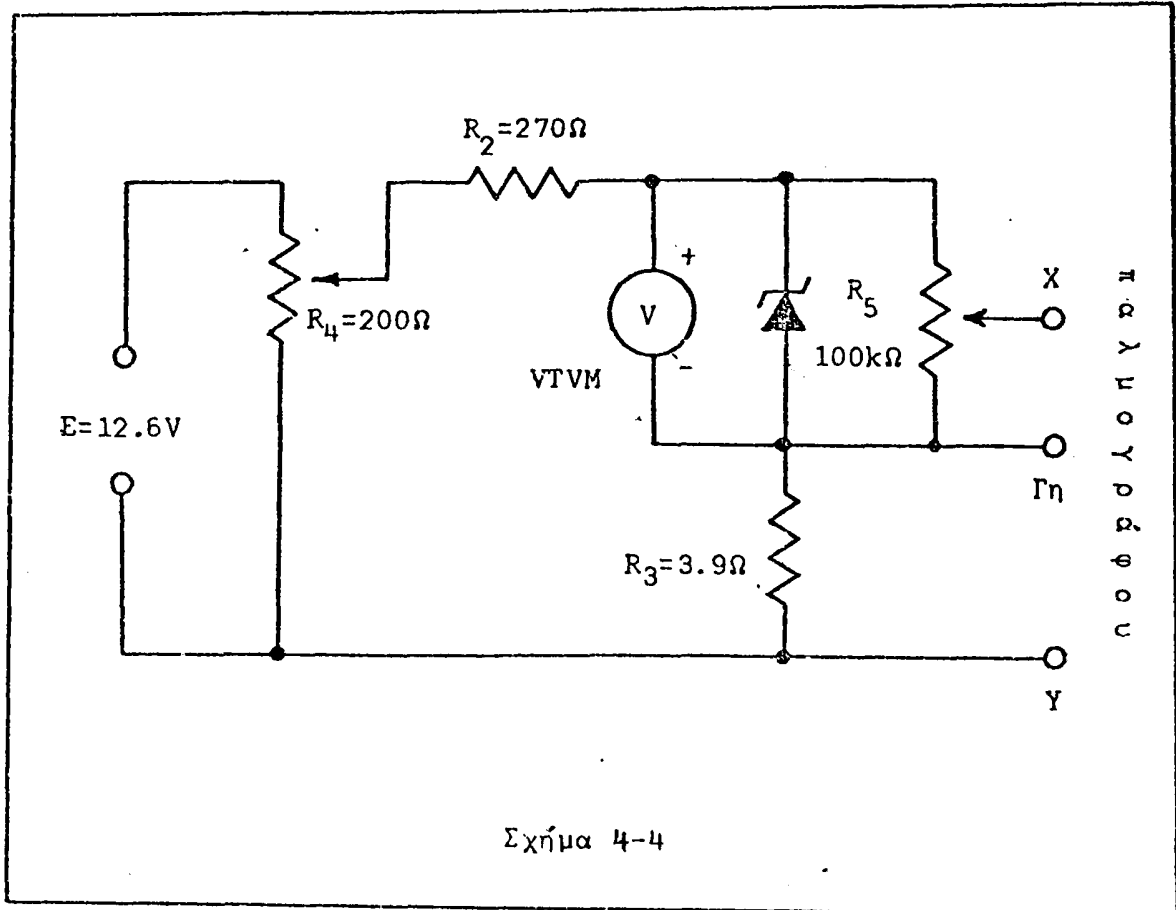
4. Πραγματοποιείτε το κύκλωμα του σχήματος 4-4 για την απεικόνιση της χαρακτηριστικής της Zener στον παλμογράφο. Ο μεταγωγός σαρώσεως του παλμογράφου να τοποθετηθεί στη θέση EXT.X. Ρυθμίστε τα ποτενσιόμετρα R_4 και R_5 μέχρις ότου παρατηρήσετε στην οθόνη την καμπύλη του σχήματος 4-5.α. Κατόπιν ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο R_4 μέχρις ότου παρατηρήσετε στην οθόνη την καμπύλη του σχήματος 4-5.β. Τι σημαίνει η αρνητική απόκλιση στον παλμογράφο; Ποιά είναι η ενεργός τιμή τάσης (V_{rms}) στα άκρα της διόδου Zener (μετρείται με το ηλεκτρονικό βολτόμετρο) τη στιγμή, που αρχίζει να παρατηρείται η αρνητική απόκλιση; Μετατρέψτε την ενεργό τάση σε τάση από κορυφή σε κορυφή (peak to peak, V_{p-p}) και συγκρίνετέ την με την τάση, που προκύπτει από τη χαρακτηριστική της διόδου. Η σχέση μετατροπής είναι:

$$V_{p-p} = 2.82 \cdot V_{rms}$$

$$V_{rms} = \quad V$$

$$V_{p-p} = \quad V$$

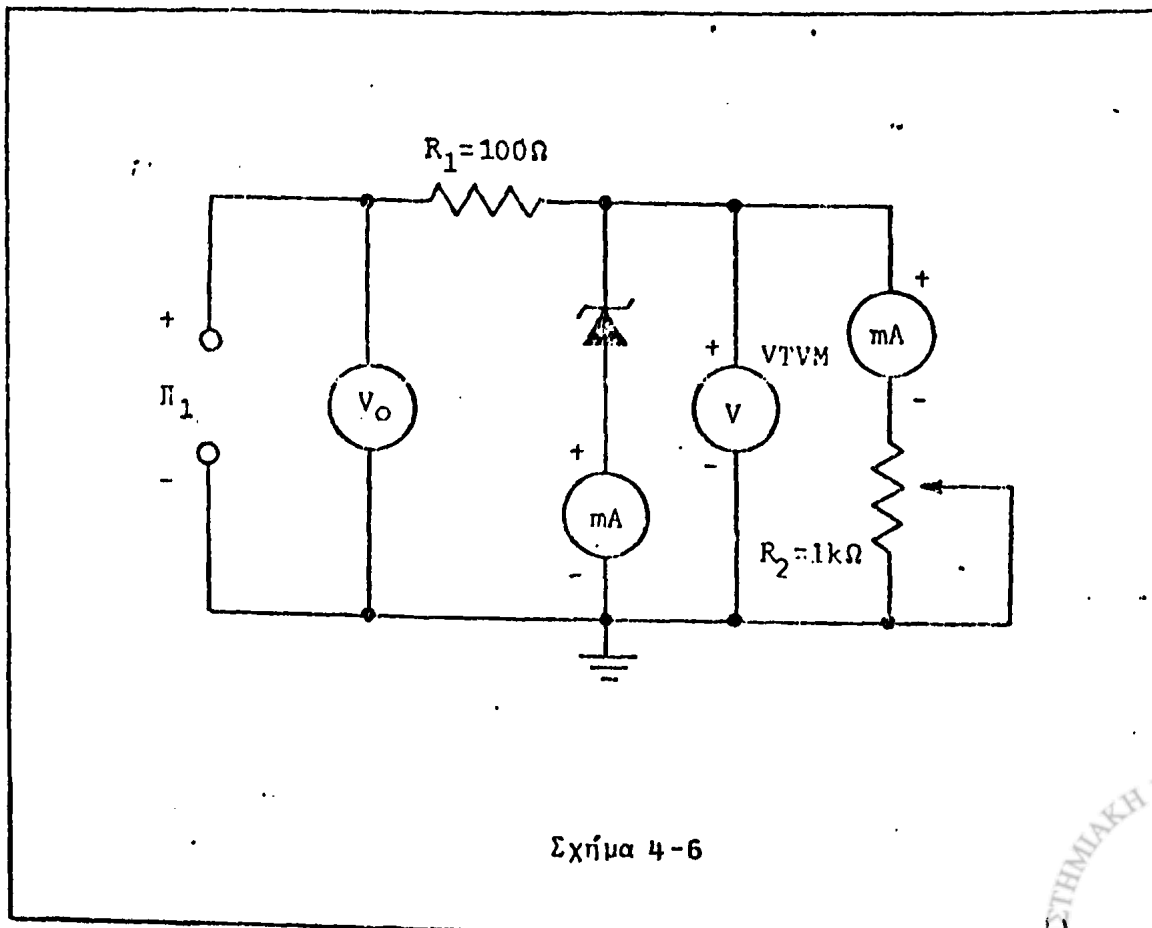




5. Πραγματοποιείτε το κύκλωμα του σχήματος 4-6. Το βολτόμετρο V_0 δεν συνδεσμοποιείται, είναι ενσωματωμένο στο τροφοδοτικό Π_1 . Το ποτενσιόμετρο R_2 (φόρτος) να ρυθμισθεί στη μέγιστη τιμή του $1k\Omega$. Το ρεύμα, που διαρρέει το ποτενσιόμετρο, είναι το ρεύμα φόρτου. Πρόκειμένου να προσδιορίσετε τη σταθεροποίηση της τάσης εξόδου έναντι μεταβολών της τάσης εισόδου, μεταβάλλοντας την τάση E του τροφοδοτικού Π_1 μετρήστε την τάση E_L στα άκρα του φόρτου, το ρεύμα του φόρτου I_L και το ρεύμα της διόδου I_Z για κάθε τιμή τάσης E του παρακάτω πίνακα.

E Volt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
E_L Volt												
I_L mA												
I_Z mA												

6. Χαράξτε τις καμπύλες $E_L = \sigma(E)$ και $\eta = \sigma(E)$, όπου $\eta = P_{εξ} / P_{εισ.}$ ο συντελεστής αποδόσεως του συστήματος. Η καμπύλη $E_L = \sigma(E)$ ονομάζεται καμπύλη σταθεροποίησης του κυκλώματος. Ποιά είναι προσεγγιστικά η ελάχιστη



Σχήμα 4-6



τιμή τάσης του τροφοδοτικού, πέραν της οποίας αρχίζει να σταθεροποιεί η Zener;

$$E_{\min} = \quad \quad \quad V$$

7. Προκειμένου να προσδιορίσετε τη σταθεροποίηση της τάσης εξόδου έναντι μεταβολών του φόρτου, διατηρείστε την τάση τροφοδοσίας σταθερή ($E=14\text{ V}$) και μεταβάλετε τον φόρτο (ποτενσιόμετρο R_2), ώστε να λάβετε διαδοχικά για το ρεύμα φόρτου τις τιμές του παρακάτω πίνακα και καταγράψτε τις αντίστοιχες τιμές των E_L και I_Z . Ειδικά η τιμή $I_L = 0\text{mA}$ λαμβάνεται με αποσύνδεση του φόρτου από το κύκλωμα (διακοπή του κυκλώματος στο σημείο Α).

I_L mA	0	10	20	30	40	50
E_L Volt						
I_Z mA						

8. Χαράξτε την καμπύλη $E_L = \sigma(I_L)$. Η καμπύλη αυτή ονομάζεται καμπύλη σταθεροποίησης φόρτου. Υπολογίστε την επί τοις εκατό σταθεροποίηση της τάσης, όταν το ρεύμα φόρτου μεταβάλλεται από 0mA σε 50mA (ελάχιστος-μέγιστος φόρτος), μέσω του τύπου:

$$C = \frac{E_{L\min} - E_{L\max}}{E_{L\max}} \cdot 100$$

όπου $E_{L\min}$ η τάση εξόδου για ελάχιστο ρεύμα φόρτου και $E_{L\max}$ η τάση εξόδου για μέγιστο ρεύμα φόρτου.

9. Εξετάστε τώρα τι συμβαίνει στην τάση εξόδου, όταν μεταβάλλονται ταυτόχρονα η τάση εξόδου και το ρεύμα φόρτου κάτω από τις πύ δυσμενείς συνθήκες. Είναι προφανές, ότι η τάση εξόδου θα έχει ελάχιστη τιμή για τη χαμηλότερη τάση εισόδου και το μέγιστο ρεύμα φόρτου· αντίστοιχα θα έχει μέγιστη τιμή για την υψηλότερη τάση εισόδου και το ελάχιστο ρεύμα φόρτου.

Προκειμένου να παρατηρήσετε τη μεταβολή αυτή, ρυθμίστε την πηγή Π_1 για $I_L = 50\text{mA}$ και καταγράψτε την παρατηρούμενη τάση εξόδου E_L . Κατόπιν ρυθμίστε την πηγή Π_1 για $E = 16\text{V}$ και αποσυνδέστε τον φόρτο, ώστε να έχετε $I_L = 0$ και καταγράψτε πάλι την παρατηρούμενη τάση εξόδου. Ποιά είναι η μεταβολή της τάσης εξόδου ΔE_L ; Πόση είναι η σταθεροποίηση στην περίπτωση αυτή;

E Volt	I_L mA	E_L Volt
14	50	
16	0	

$\Delta E_L =$	Volt
$C = \frac{\Delta E_L}{E_{Lmax}} =$	%

Ερωτήσεις

1. Ποιά είναι η διαφορά του φαινομένου Zener από το φαινόμενο χιονοστιβάδας;
2. Γιατί σήμερα στα κυκλώματα σταθεροποίησης προτιμούνται οι δίοδοι Zener αντί των λυχνιών αερίου;
3. Σε κύκλωμα σταθεροποίησης τάσεων έναντι μεταβολών φόρτου ποιός συντελεστής σταθεροποίησης είναι προτιμότερος ο μικρός ή ο μεγάλος;
4. Στο κύκλωμα του σχήματος 4-6 υπολογίστε την ελάχιστη τιμή αντίστασης φόρτου, για την οποία η Zener εξακολουθεί να σταθεροποιεί.
5. Ποιός είναι ο σκοπός των αντιστάσεων R_2 και R_3 στο κύκλωμα του σχήματος 4-4;



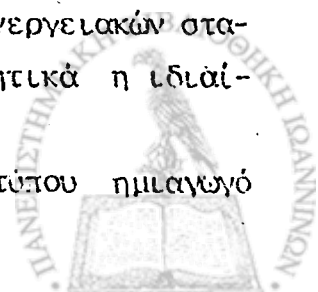
Εισαγωγή

Όπως είναι γνωστό στις κοινές κρυσταλλοδιόδους η συγκέντρωση των προσμίξεων είναι της τάξης του $1:10^8$ ως προς τον αριθμό ατόμων του ημιαγωγού κρυστάλλου και η περιοχή φραγμού έχει εύρος περίπου 5 μμ. Υπάρχει όμως και ένας τύπος κρυσταλλοδιόδου, στην οποία η συγκέντρωση των προσμίξεων ξεπερνά την αναλογία $1:10^3$ ως προς τα άτομα του ημιαγωγού και η περιοχή φραγμού έχει εύρος μόλις περί τα 10nm. Η διόδος αυτή επινοήθηκε το 1958 από τον Esaki και ονομάστηκε διόδος tunnel λόγω του φαινομένου σήραγγας (tunneling effect), στο οποίο οφείλεται η ιδιαίτερη μορφή της χαρακτηριστικής της.

Η εμφάνιση του κβαντομηχανικού αυτού φαινομένου ευνοείται από την ύπαρξη περιοχής φραγμού εξαιρετικά μικρού εύρους. Από την άποψη της Κλασσικής Μηχανικής για να μπορέσει ένα σωματίο να υπερπηδήσει ένα φραγμό δυναμικού, πρέπει να έχει τουλάχιστον τόση ενέργεια όσο το ενεργειακό ύψος του φραγμού. Προκειμένου όμως περί φραγμών με πεπερασμένο πάχος η εξίσωση Schrödinger υποδεικνύει, ότι υπάρχει μη μηδενική πιθανότητα για τη διέλευση μέσω αυτών και σωματίων με ενέργεια μικρότερη από το ύψος τους. Αυτό σημαίνει, ότι είναι δυνατόν, όταν το εύρος της περιοχής φορτίου χώρου είναι εξαιρετικά μικρό, ηλεκτρόνια να κινηθούν από τον n-τύπου ημιαγωγό στον p-τύπου χωρίς να έχουν την απαιτούμενη ενέργεια για να υπερπηδήσουν το φραγμό δυναμικού, που προκαλεί η περιοχή αυτή.

Η συνθήκη αυτή όμως, δηλαδή το μικρό πάχος της περιοχής απογυμνώσεως, είναι αναγκαία για να συμβεί το φαινόμενο σήραγγας, αλλά όχι και ικανή. Πρέπει επί πλέον να υπάρχουν από τη μια πλευρά του φραγμού (πλευρά εκκινήσεως) ενεργειακές στάθμες κατειλημμένες από ηλεκτρόνια και από την άλλη πλευρά του φραγμού (πλευρά αψίξεως) ενεργειακές στάθμες κενές από ηλεκτρόνια. Είναι λοιπόν απαραίτητο να γίνει αναφορά στη διαμόρφωση των ενεργειακών σταθμών μιας διόδου tunnel, προκειμένου να ερμηνευθεί ικανοποιητικά η ιδιαίτερη μορφή της χαρακτηριστικής της.

Σε μια κοινή κρυσταλλοδιόδο η στάθμη των δοτών στον n-τύπου ημιαγωγό



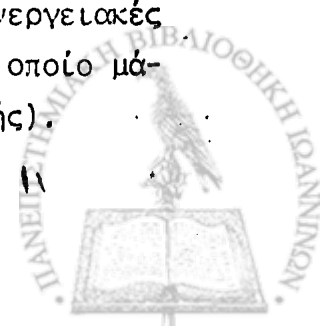
είναι λίγο χαμηλότερα από το κατάβλι της ζώνης αγωγιμότητας και η στάθμη των αποδεκτών στον p-τύπου ημιαγωγό λίγο ψηλότερα από το άνω όριο της ζώνης σθένους. Επίσης η στάθμη Fermi (F_F) τόσο στον n- όσο και στον p-τύπο βρίσκεται μέσα στο απαγορευμένο χάσμα. Σε μια διόδο tunnel όμως συμβαίνουν τα εξής: α) Η υψηλή συγκέντρωση προσμίξεων εκτός από τη δραστική μείωση του εύρους της περιοχής απογυμνώσεως έχει σαν αποτέλεσμα τα άτομα των προσμίξεων να μην είναι πια απομονωμένα μεταξύ τους λόγω παρεμβολής των ατόμων του ημιαγωγού κρυστάλλου, αλλά να μπορούν να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους ανταλλάσσοντας ηλεκτρόνια (άλλωστε η μεταξύ τους απόσταση δεν ξεπερνά πια τις 4-5 ατομικές διαμέτρους). Συνέπεια αυτής της δυνατότητας αλληλεπιδράσεως είναι οι στάθμες δοτών και αποδεκτών να διευρύνονται (εκφυλισμός) και αντίστοιχα να υποκαλύπτουν τη ζώνη αγωγιμότητας του n-τύπου ή να επικαλύπτουν τη ζώνη σθένους του p-τύπου σχηματίζοντας έτσι και στις δυο περιπτώσεις μια σύνθετη ζώνη. β) Η στάθμη Fermi βρίσκεται πλέον βυθισμένη μέσα στη ζώνη αγωγιμότητας του n-τύπου και τη ζώνη σθένους του p-τύπου.

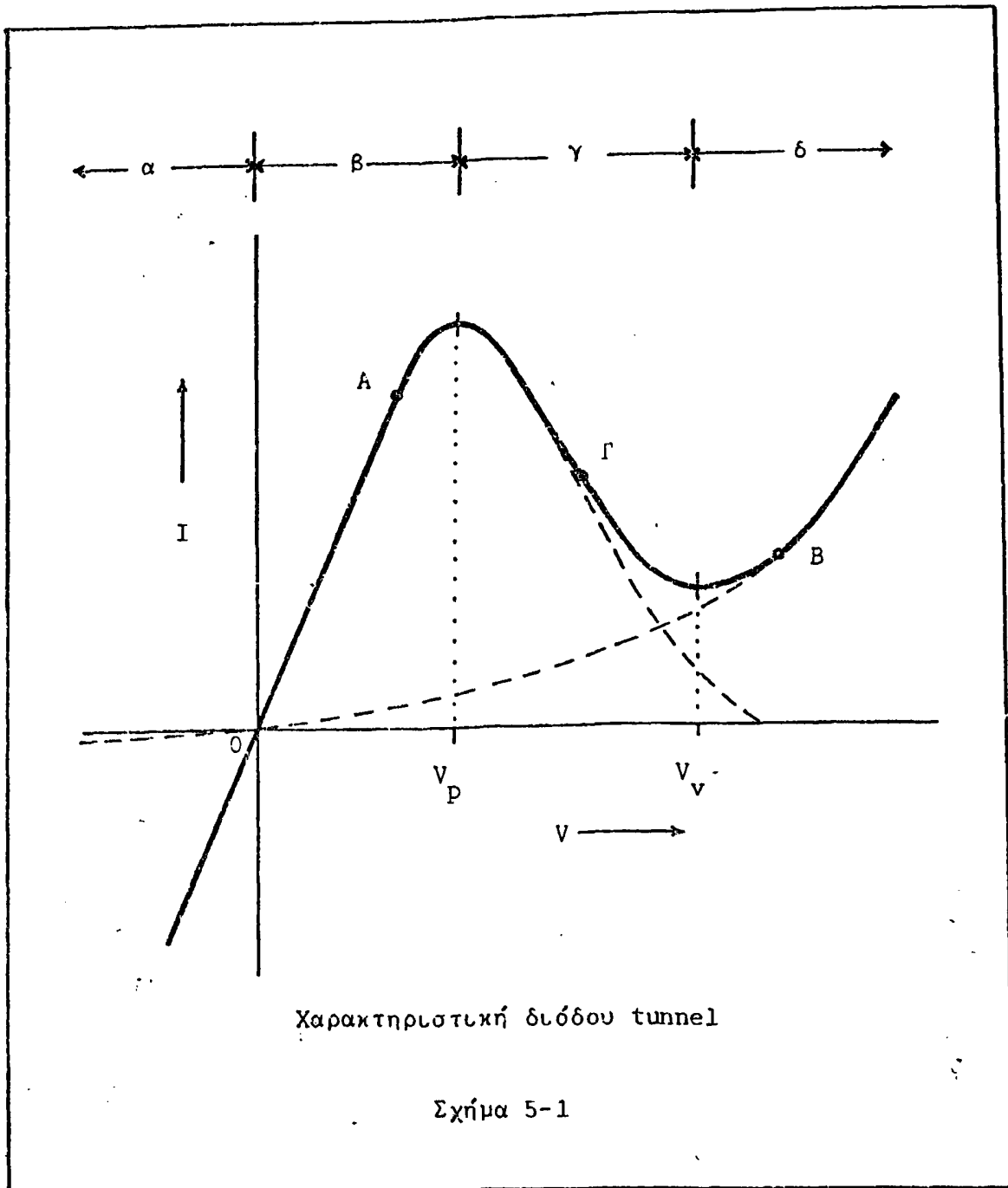
Χαρακτηριστική της διόδου tunnel

Δίδεται τώρα η ερμηνεία της μορφής της χαρακτηριστικής καμπύλης της διόδου tunnel. Η χαρακτηριστική αυτή φαίνεται στο σχήμα 5-1.

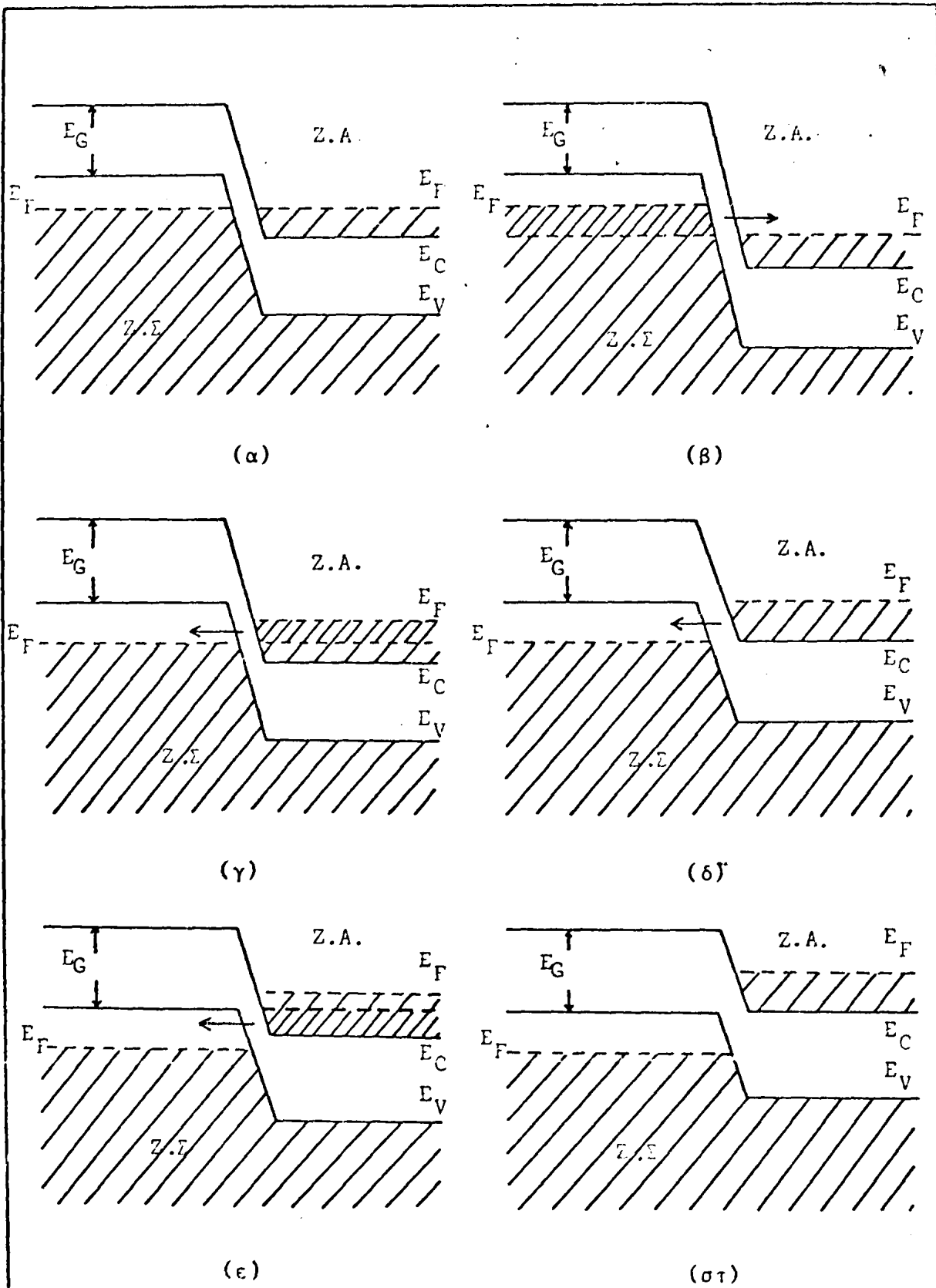
Χωρίς την εφαρμογή εξωτερικής πόλωσης η στάθμη Fermi βρίσκεται βέβαια στο ίδιο ενεργειακό ύψος και στα δύο τμήματα της κρυσταλλοδιόδου. Έτσι, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5-2α, τα ηλεκτρόνια και στις δύο πλευρές του φραγμού έχουν απέναντί τους κατειλημμένες ενεργειακές στάθμες και το φαινόμενο σήραγγας απ' ενός έχει ελάχιστη πιθανότητα να συμβεί, απ' ετέρου είναι ισοπίθανο και για τις δυο διευθύνσεις. Αυτό φυσικά σημαίνει, ότι το ολικό ρεύμα, που διαρρέει τη διόδο για μηδενική διαφορά δυναμικού στα άκρα της είναι μηδέν (σημείο (0,0) της χαρακτηριστικής).

Μόλις εφαρμοσθεί ανάστροφη πόλωση στην επαφή, το ενεργειακό διάγραμμα παίρνει τη μορφή, που φαίνεται στο σχήμα 5-2β, και ένα σημαντικό πλήθος ηλεκτρονίων, που αυξάνουν όσο αυξάνει η ανάστροφη πόλωση (πυκνά γραμμοσκιασμένο τμήμα) έχουν τη δυνατότητα, χάρι στο φαινόμενο σήραγγας, να κινηθούν από τον p-τύπου ημιαγωγό στον n-τύπου, όπου υπάρχουν ήδη οι ισοενεργειακούς κενές στάθμες. Εμφανίζεται λοιπόν ισχυρό ανάστροφο ρεύμα, το οποίο μάλιστα δεν παρουσιάζει περιοχή κόρου (περιοχή α της χαρακτηριστικής).





Αν στην επαφή εφαρμοσθεί ορθή πόλωση, τότε το ενεργειακό της διάγραμμα διαμορφώνεται, όπως δείχνει το σχήμα 5-2γ, και ηλεκτρόνια από τον n-τύπου ημιαγωγό κινούνται λόγω του φαινόμενου σήραγγας προς τον p-τύπου ημιαγωγό, διότι έχουν "απέναντί" τους κενές ισοενεργειακές τους στάθμες. Αυτό βέβαια σημαίνει την εμφάνιση ισχυρού ρεύματος ορθής φοράς που συνεχίζει να αυξάνει μέχρις ότου το κατώφλι της σύνθετης ζώνης αγωγιμότητας του n-τύπου φθάσει τη στάθμη F_{Fp1} του p-τύπου (-περιοχή β της χαρακτηριστικής) (σχήμα 5-2δ).



Ενεργειακά διαγράμματα διόδου tunnel

Περαιτέρω αύξηση της πολώσεως έχει σαν αποτέλεσμα μέρος των ηλεκτρονίων της ζώνης αγωγιμότητας του n-τύπου να έχουν "απέναντι" τους ισοενεργειακές τους απαγορευμένες στάθμες. Λόγω του γεγονότος αυτού το κυματομηχανικό ρεύμα (ρεύμα φαινομένου σήραγγας) περιορίζεται διαρκώς (σχήμα 5-2ε -περιοχή γ της χαρακτηριστικής) και διακόπτεται, όταν το κατώφλι της ζώνης αγωγιμότητας του n-τύπου φθάσει το άνω όριο της ζώνης σθένους του p-τύπου (σχήμα 5-2στ).

Το ρεύμα όμως, που διαρρέει τη δίοδο, δεν μηδενίζεται, επειδή, όπως φαίνεται και στο σχήμα, που απεικονίζει τη χαρακτηριστική της τυπικής, εκτός από την κυματομηχανική συνιστώσα, που μηδενίζεται κατά τα προγραφέντα, υπάρχει και η συνιστώσα του ρεύματος διαχύσεως, που, όπως και σε κάθε άλλη κρυσταλλοδίοδο, αυξάνει συνεχώς και εκθετικά. Έτσι το ολικό ρεύμα της τυπικής, που είναι άθροισμα των δύο αυτών συνιστωσών; παρουσιάζει μια νέα αύξηση σχεδόν εκθετική (περιοχή δ της χαρακτηριστικής).

Από τη θεώρηση της χαρακτηριστικής καμπύλης της διόδου τυπικής προκύπτουν άμεσα οι ιδιαίτερες ιδιότητές της, που είναι: α) Σε ανάστροφη πόλωση διαρρέεται από εξαιρετικά σημαντικό ρεύμα και η συμπεριφορά της αναλογεί προς τη συμπεριφορά μεταλλικού αγωγού. Το γεγονός αυτό είναι ευνόητο, εφ' όσον, σύμφωνα με όσα προγράφηκαν, το ανάστροφο ρεύμα στη δίοδο αυτή δεν οφείλεται σε φορείς μειονότητας αλλά πλειονότητας. β) Σε ορθή πόλωση παρουσιάζει αρχικά (μέχρι π.χ. τα 50mV για δίοδο γερμανίου) αύξηση του ρεύματος συναρτήσει της τάσης (ωμική συμπεριφορά). Εμφανίζεται κατόπιν ένα μέγιστο ρεύματος (ρεύμα κορυφής, I_p) και ακολουθεί μια περιοχή, στην οποία αύξηση της τάσης έχει σαν αποτέλεσμα μείωση του ρεύματος. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό, διότι καθιστά τη δίοδο τυπικής μία από τις ελάχιστες διατάξεις, που παρουσιάζουν σε κάποια περιοχή λειτουργίας τους αρνητική δυναμική αντίσταση (δηλαδή $dV/dI < 0$). Το φαινόμενο συνεχίζεται μέχρι μιας ελάχιστης τιμής ρεύματος (ρεύμα κοιλάδας, I_v), από την οποία και πέρα ακολουθεί η τυπική σχεδόν εκθετική αύξηση ρεύματος συναρτήσει της τάσης γνωστή για κάθε κρυσταλλοδίοδο. Είναι προφανές, ότι τα σημεία κορυφής και κοιλάδας είναι σημεία καμπής για τη συνάρτηση της δυναμικής αντίστασης $R_d = \sigma(V_D)$.

Σημαντικά χαρακτηριστικά μιας διόδου τυπικής είναι η τιμή του λόγου I_p/I_v , που επιδιώκεται να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη και η τιμή του I_p , που ανάλογα με τον προορισμό της διόδου μπορεί να ποικίλει από 100 μΑ έως 100Α. Σχετικά με τη συμπεριφορά της τυπικής έναντι θερμοκρασιακών μεταβολών το μεν σημείο (V_p, I_p) δεν είναι πολύ ευαίσθητο, διότι προσδιορίζε-



ται κύρια από κυματομηχανικά φαινόμενα (διακυμάνσεις περίπου 10% για μεταβολή θερμοκρασίας από -50°C σε 150°C). Αντίθετα το σημείο (V_V, I_V) είναι πολύ ευαίσθητο, διότι προσδιορίζεται κύρια από φαινόμενα διαχύσεως φορέων (διακυμάνσεις μέχρι 300% για το παραπάνω εύρος θερμοκρασιακής μεταβολής).

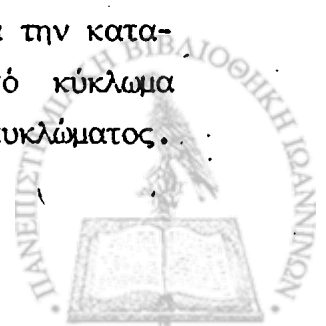
Τα πλεονεκτήματα της tunnel σχετικά με άλλες ανάλογες διατάξεις είναι χαμηλό κόστος, χαμηλός θόρυβος, χαμηλή ισχύς λειτουργίας, απλότητα και ταχύτητα αποκρίσεως. Μειονεκτήματά της είναι οι χαμηλές τάσεις λειτουργίας και το ότι, επειδή είναι διπολική διάταξη, δεν υπάρχει τρόπος απομονώσεως των βαθμίδων εισόδου και εξόδου στα κυκλώματα, που χρησιμοποιείται.

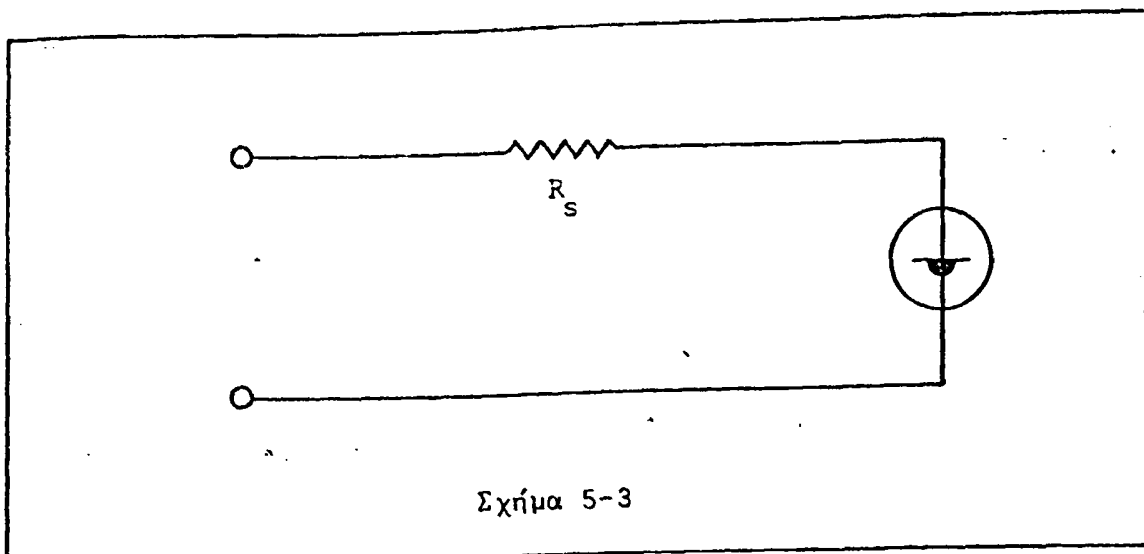
Οι χρήσεις της διόδου tunnel βασίζονται στην ιδιομορφία της χαρακτηριστικής της και ειδικότερα στην καταβύθιση της (τμήμα αρνητικής αντιστάσεως). Χρησιμοποιείται κυρίως σε κυκλώματα παραγωγής ταλαντώσεων, που θα μελετηθούν παρακάτω, και σε κυκλώματα διακοπών. Η χρησιμοποίησή της στα τελευταία αυτά κυκλώματα βασίζεται στο γεγονός, ότι η μετάπτωση της από ένα σημείο λειτουργίας (ασταθές όπως το σημείο Γ της χαρακτηριστικής) σε ένα άλλο (σταθερό όπως το Α ή το Β της χαρακτηριστικής) γίνεται ταχύτατα. Αυτό οφείλεται στο ότι το φαινόμενο σήραγγας πραγματοποιείται με την ταχύτητα του φωτός και κατά συνέπεια το κυματομηχανικό ρεύμα είναι πρακτικά απλλαγμένο από κάθε αδράνεια, που χαρακτηρίζει άλλα ρεύματα, όπως π.χ. το ρεύμα διαχύσεως μιας κοινής κρυσταλλοδιόδου (χρόνος διαχύσεως, επανασυνδέσεως, ζωής κλπ.). Επιτυγχάνονται έτσι χρόνοι μεταπτώσεως από μια κατάσταση σε άλλη της τάξης του 10^{-10} sec γεγονός ζωτικής σημασίας στην τεχνολογία των ηλεκτρονικών υπολογιστών, όπου η ταχύτητα είναι ίσως το ουσιαστικότερο στοιχείο.

Κυκλώματα ταλαντώσεων

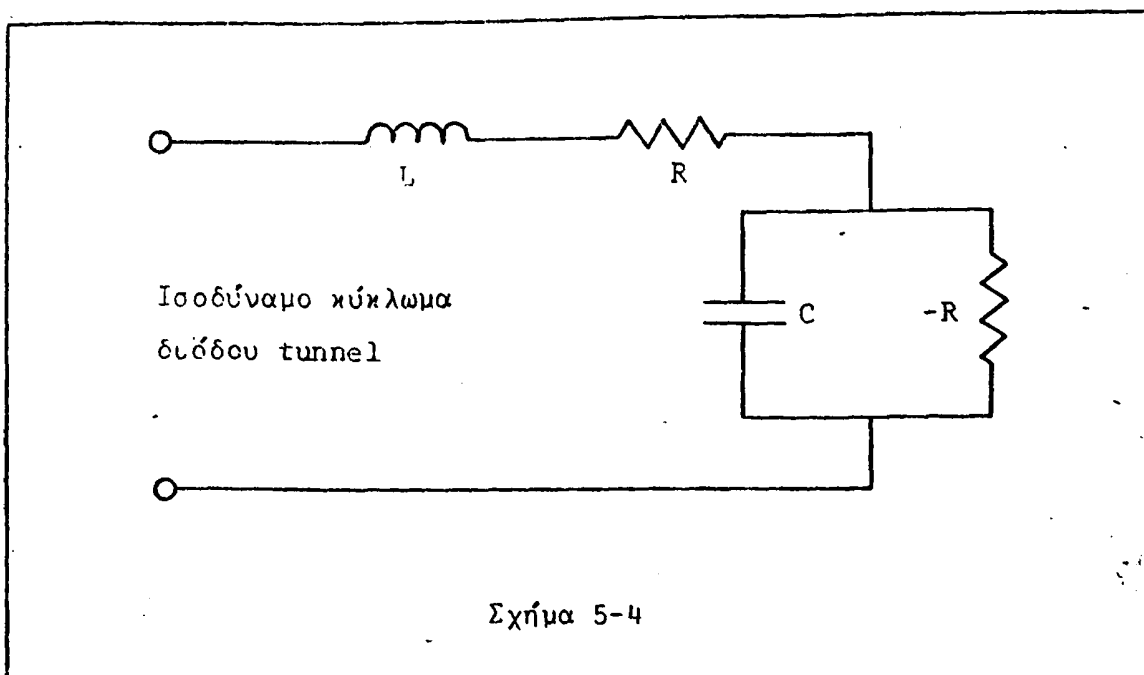
Έτσι ονομάζονται τα κυκλώματα, που μετατρέπουν μια συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη ή ορθότερα τα κυκλώματα, που τροφοδοτούμενα με μία συνεχή τάση παρέχουν στην έξοδό τους μία μεταβαλλόμενη (όχι αναγκαστικά με ημιτονικό τρόπο) τάση.

Η διόδος tunnel λόγω της αρνητικής δυναμικής της αντιστάσεως είναι τυπικό στοιχείο σε τέτοια κυκλώματα συντηρουμένων ταλαντώσεων. Για την κατανόηση της δράσης της δίδεται στο σχήμα 5-3 το απλούστερο δυνατό κύκλωμα συνδεσμολογίας της και στο σχήμα 5-4 το ισοδύναμο αυτού του κυκλώματος.





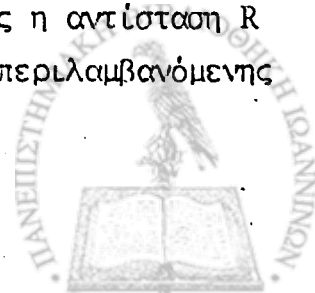
Σχήμα 5-3



Ισοδύναμο κύκλωμα
διόδου tunnel

Σχήμα 5-4

Στο ισοδύναμο αυτό κύκλωμα η αυτεπαγωγή L αντιπροσωπεύει την αυτεπαγωγή των διαφόρων στοιχείων της συνδεσμολογίας (καλωδίων κλπ.). Η χωρητικότητα C αντιπροσωπεύει τη χωρητικότητα τόσο της διόδου όσο και της συνδεσμολογίας (καθοριστική πάντως λόγω μεγέθους είναι η χωρητικότητα της διόδου, που οφείλεται κατά τα γνωστά στην ύπαρξη της περιοχής απογυμνώσεως). Η αντίσταση $-R$ εκφράζει την αντίσταση της διόδου και είναι αρνητική, επειδή η τάση πολώσεως της διόδου επιλέγεται έτσι (μέσω της αντιστάσεως R_s), ώστε να εργάζεται διαρκώς στην περιοχή της αρνητικής δυναμικής αντιστάσεως. Τέλος η αντίσταση R εκφράζει το σύνολο των ωμικών αντιστάσεων του κυκλώματος συμπεριλαμβανόμενης και της αντιστάσεως R_s .

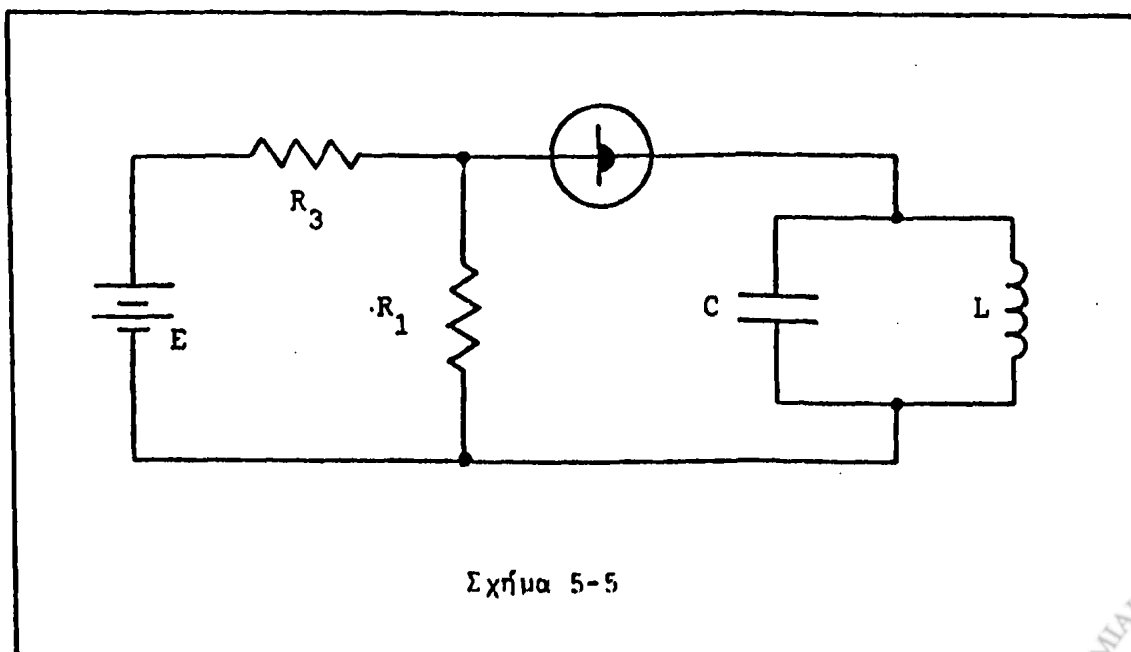


Γίνεται λοιπόν προφανές, ότι κατάλληλη επιλογή της τιμής της αντιστάσεως R_3 , έτσι ώστε να είναι μικρότερη ή τώ πολύ ίση με την ελάχιστη απόλυτη τιμή της αρνητικής δυναμικής αντίστασης της τυπικής, μπορεί να μετατρέψει το κύκλωμα σε πρακτικά αμιγές κύκλωμα LC με σχεδόν μηδενική ωμική αντίσταση. Είναι δε γνωστό, ότι το κύκλωμα LC είναι η τυπική μορφή του κυκλώματος ταλαντώσεων είτε ελευθέρων με απόσβεση εξαρτώμενη από το βαθμό ιδανικότητάς του, είτε εξαναγκασμένων με συχνότητα συντονισμού εξαρτώμενη από τις συγκεκριμένες τιμές των L και C .

Ένα κύκλωμα σαν αυτό, που περιγράφεται παραπάνω, έχει συχνότητα συντονισμού της τάξης μερικών δεκάδων GHz, αλλά παρουσιάζει πολλά προβλήματα επαναληπτικότητας, ελέγχου και σταθερότητας. Για τους λόγους αυτούς τα πρακτικά κυκλώματα ταλαντώσεων περιέχουν πρόσθετες χωρητικότητες και αυτεπαγωγές με αποτέλεσμα να είναι συνθετώτερα και να συντονίζονται σε χαμηλότερες συχνότητες, αλλά ταυτόχρονα να ελέγχονται ευχερέστερα και να λειτουργούν με μεγαλύτερο βαθμό αξιοπιστίας.

Σε όλες όμως τις περιπτώσεις παραμένει κρίσιμο στοιχείο η ρύθμιση της τάσης πόλωσης της διόδου τυπικής. Η πόλωση αυτή πρέπει όχι μόνο να είναι εξαιρετικά ακριβής, αλλά και να παραμένει σχεδόν απόλυτα σταθερή συναρτήσει του χρόνου, επειδή και μικρομεταβολές της ακόμη μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές ολισθήσεις του σημείου λειτουργίας της και αστάθεια στη συμπεριφορά της.

Στο σχήμα 5-5 δίνεται ένα πρακτικό κύκλωμα ταλαντώσεων, στο οποίο η



Σχήμα 5-5



τunnel χρησιμοποιείται κυρίως για να εξουδετερώσει με την αρνητική της αντίσταση τη θετική αντίσταση του κυκλώματος LC και έτσι να το διεγείρει σε ταλάντωση. Η αντίσταση R_3 χρησιμεύει για τη δημιουργία της κατάλληλης στάθμης πολώσεως της tunnel, ενώ η αντίσταση R_1 της προσδίδει την κατάλληλη στάθμη ρεύματος. Αν στα άκρα του πηνίου, που μπορεί να είναι το πηνίο ενός μεγαφώνου, συνδεσμοποιηθεί παλμογράφος, είναι δυνατόν να παρατηρηθεί η κυματομορφή ταλαντώσεως ή να ακουστεί ήχος από το μεγάφωνο, αν βέβαια η συχνότητά της είναι στην περιοχή των ακουστικών συχνοτήτων.

Απαραίτητες γνώσεις:

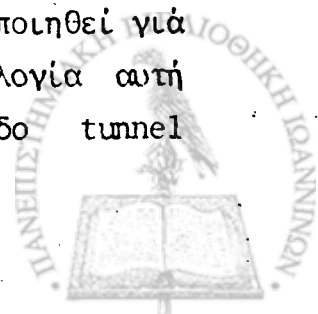
Δ. Μ. Μηλιώτη: Η Φυσική των κρυσταλλολυχνιών, σελ. 271-181.

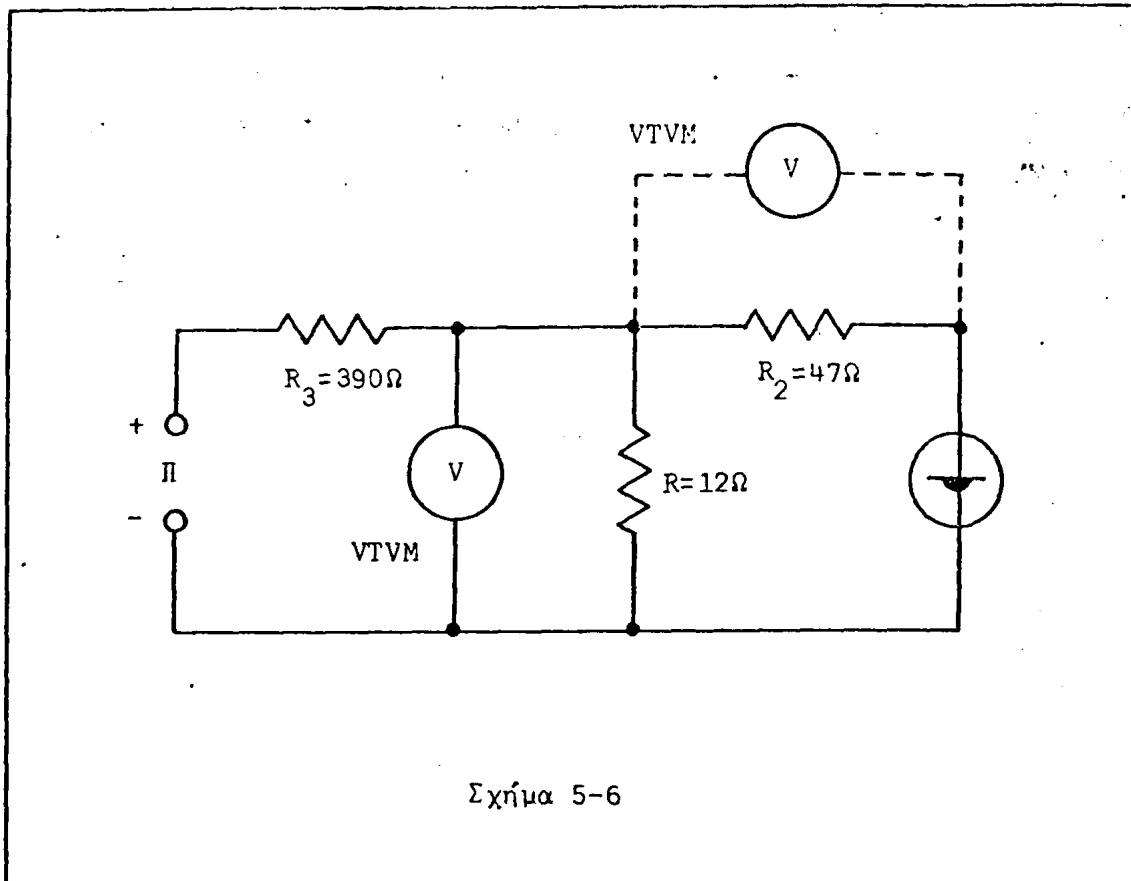
Χρησιμοποιούμενα όργανα:

1. Τροφοδοτικό χαμηλής τάσης
2. Ηλεκτρονικό βολτόμετρο
3. Παλμογράφος
4. Πηνίο (antenna coil)
5. Δίοδος tunnel
6. Αντιστάσεις: $12\Omega - 0.5W$, $47\Omega - 0.5W$, $390\Omega - 1W$
7. Πυκνωτής $0.002\mu F$

Πειραματικό μέρος

1. Προκειμένου να λάβετε μετρήσεις για τη χάραξη της χαρακτηριστικής καμπύλης της διόδου tunnel πραγματοποιείτε το κύκλωμα του σχήματος 5-6. Το ηλεκτρονικό βολτόμετρο (VTVM) συνδέεται κατά τη διάρκεια των μετρήσεων διαδοχικά στα άκρα της αντιστάσεως R_1 , οπότε η λαμβανόμενη ένδειξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της τάσης στα άκρα της tunnel, και στα άκρα της R_2 , οπότε η λαμβανόμενη ένδειξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του ρεύματος, που διαρρέει την tunnel. Η μεθοδολογία αυτή προτιμάται, επειδή η παρεμβολή αμπερομέτρου σε σειρά με τη δίοδο tunnel





γιά τη μέτρηση του ρεύματός της δημιουργεί πολλά προβλήματα στην ακρίβεια και σταθερότητα πόλωσης της.

Με το ηλεκτρονικό βολτόμετρο συνδεδεμένο στα άκρα της R_1 ρυθμίστε την τάση της πηγής, ώστε να λάβετε σ' αυτό ένδειξη $E_1 = 25\text{mV}$. Κατόπιν συνδεσμο-λογείστε το στα άκρα της R_2 και μετρείστε την πτώση τάσης E_2 . Επαναλάβετε το ίδιο για όλες τις τιμές του παρακάτω πίνακα.

E_1 mV	E_2 mV	V_D mV	I_D mA
0			
25			
50			
75			
100			

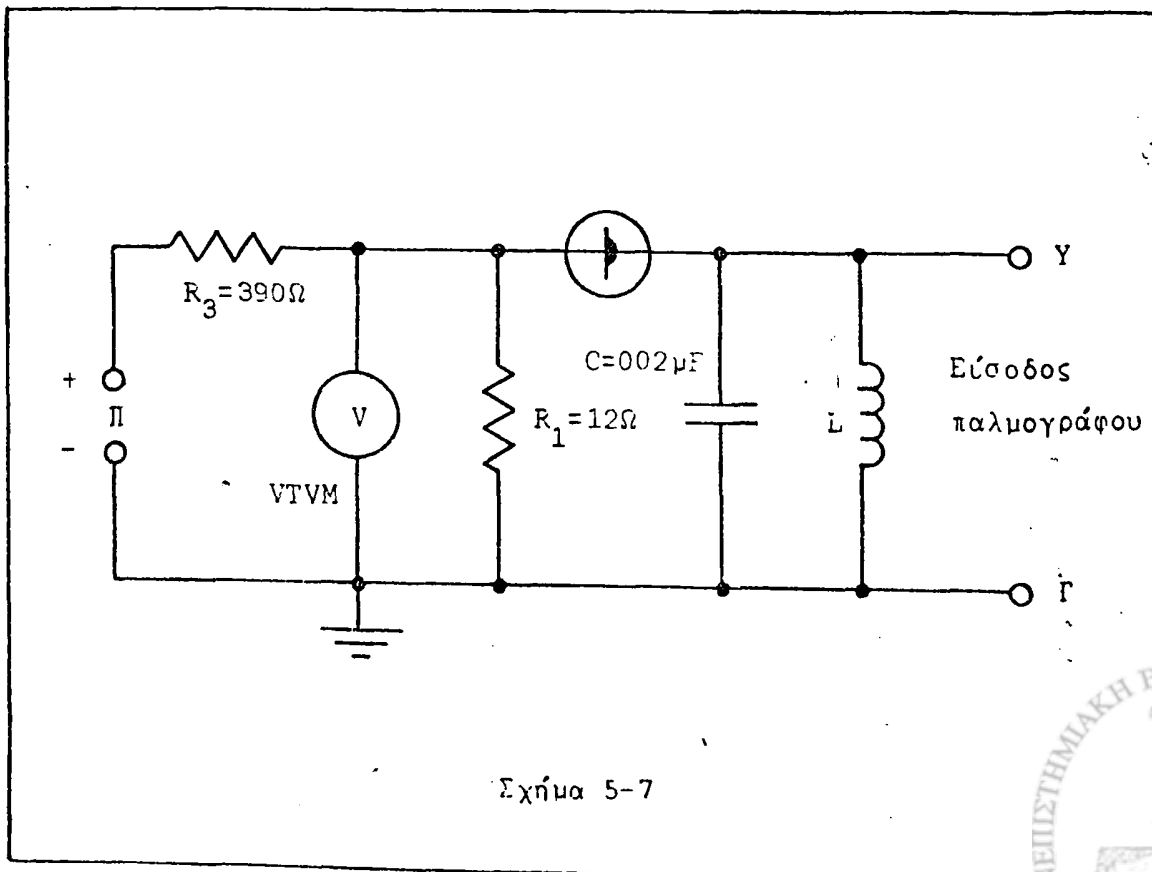
575			
600			

2. Για κάθε μέτρηση της E_2 υπολογίστε την τάση V_D στα άκρα της διόδου και το ρεύμα I_D , που τη διαρρέει. Χαράξτε κατόπιν τη χαρακτηριστική της καμπύλη $I_D = \sigma(V_D)$.

3. Από τη χαρακτηριστική καμπύλη προσδιορίστε τις τιμές τάσης, μεταξύ των οποίων η διόδος εμφανίζει αρνητική δυναμική αντίσταση. Υπολογίστε επίσης την στατική αντίσταση κορυφής, την στατική αντίσταση κοιλάδας και τη δυναμική αντίσταση στο μέσο της περιοχής μεταξύ κορυφής και κοιλάδας.

$V_p =$	mV	$V_v =$	mV
$R_p =$	Ω	$R_v =$	Ω
$R_d =$		Ω	

4. Πραγματοποιείτε το κύκλωμα ταλαντώσεων του σχήματος 5-7. Ρυθμίστε την τάση της πηγής έτσι, ώστε η ένδειξη του ηλεκτρονικού βολτόμετρου να είναι 150mV. Συνδέστε τον παλμογράφο στα άκρα Y και Γ του πηνίου και παρατηρήστε τη λαμβανόμενη κυματομορφή. Βαθμολογήστε τον παλμογράφο και σχεδιάστε την κυματομορφή, που παρατηρείτε. Τέλος μεταβάλετε την αυτεπαγωγή του πηνίου και παρατηρήστε, αν μεταβάλεται η συχνότητα της κυματομορφής. Εξηγήστε την παρατήρησή σας.



Ερωτήσεις

1. Τι σημαίνει ο όρος "αρνητική αντίσταση";
2. Γιατί στα κυκλώματα, που χρησιμοποιούνται κρυσταλλοδίοδοι tunnel, πρέπει οι τάσεις πολώσεώς τους να διατηρούνται εξαιρετικά σταθερές;
3. Συνήθως σε ποιο τμήμα της χαρακτηριστικής της εργάζεται μια δίοδος tunnel;
4. Ποιές είναι οι σημαντικότερες χρήσεις των διόδων tunnel;
5. Κάτω από ποιές συνθήκες μπορεί να υπάρξει σε μια επαφή p-n ρεύμα λόγω φαινομένου σήραγγας;



ΜΕΛΕΤΗ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΤΡΙΟΔΟΥ ΜΕ ΚΟΙΝΗ ΒΑΣΗ
ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΚΟΙΝΗ ΒΑΣΗ

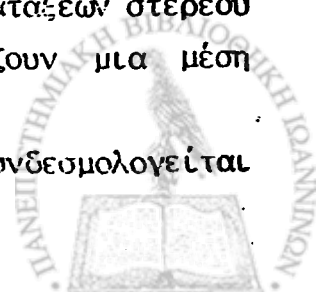
Εισαγωγή

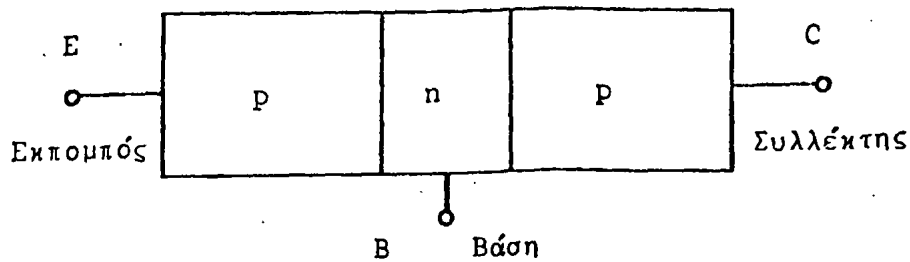
Οι κρυσταλλοτρίοδοι είναι η δεύτερη χρονικά και σημαντικότερη τεχνολογικά βαθμίδα των διατάξεων στερεού σώματος μετά τις κρυσταλλοδιόδους. Πρωτοεμφανίστηκαν το 1948 (Bardeen et al.) και δομικά αποτελούνται από μια λεπτή φέτα ενός τύπου ημιαγωγού (π.χ. n-τύπου), που βρίσκεται σε επαφή με δυο τεμάχια ημιαγωγού άλλου τύπου (π.χ. p-τύπου) εκατέρωθέν του, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6-1.α. Η επαφή βέβαια των ημιαγωγών, όπως και στην περίπτωση των κρυσταλλοδιόδων δεν είναι απλώς μηχανική. Ανάλογα με τη σειρά διαδοχής των τύπων ημιαγωγού οι κρυσταλλοτρίοδοι διακρίνονται σε pnp και npn. Το μεσαίο τμήμα τους ονομάζεται βάση (base, συμβολισμός B), ενώ τα δύο άλλα εκπομπός (emitter, συμβολισμός E) και συλλέκτης (collector, συμβολισμός C) αντίστοιχα. Οι επαφές των ημιαγωγών ονομάζονται η μεν επαφή εκπομπού-βάσης επαφή εκπομπού, η δε επαφή συλλέκτη-βάσης επαφή συλλέκτη.

Οι κρυσταλλοτρίοδοι κατασκευάζονται με διάφορες τεχνικές και η εξωτερική τους εμφάνιση παρουσιάζει μεγάλη ποικιλία μορφών, ανάλογων προς τη χρήση, για την οποία προορίζονται. Στο σχήμα 6-1.β δίδονται οι συνηθέστερες μορφές και ο κώδικας ταυτοποίησεως των ακροδεκτών τους. Σε όλες τις περιπτώσεις η βάση έχει πολύ μικρή έκταση-μέγεθος (συνήθη πάχη της τάξης μερικών μm), ενώ ο εκπομπός και πολύ περισσότερο ο συλλέκτης έχουν σημαντικά μεγαλύτερο μέγεθος. Στην πλειοψηφία των εφαρμογών χρησιμοποιούνται κρυσταλλοτρίοδοι pnp, στις οποίες η βάση έχει μικρότερο ποσοστό προσμίξεων από ότι ο εκπομπός και ο συλλέκτης.

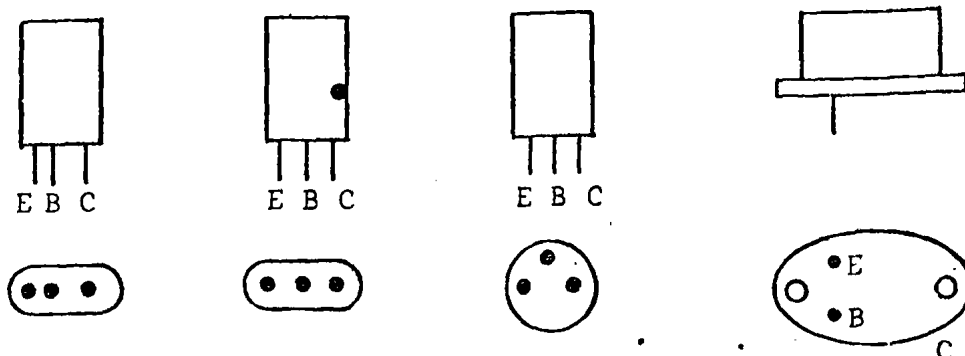
Οι κατασκευαστές κρυσταλλοτριόδων παρέχουν συνήθως τα στοιχεία προδιαγραφών και επιδόσεών τους με τη μορφή σιμνών χαρακτηριστικών καμπυλών. Επειδή όμως η παραγωγή τους, όπως άλλωστε και όλων σχεδόν των διατάξεων στερεού σώματος, δεν είναι αωστηρά επαναληπτική, τα σιμήνη αυτά εκφράζουν μια μέση συμπεριφορά του κάθε συγκεκριμένου τύπου κρυσταλλολυχνίας.

Στα διάφορα ηλεκτρονικά κυκλώματα η κρυσταλλοτρίοδος συνδεσμολογείται





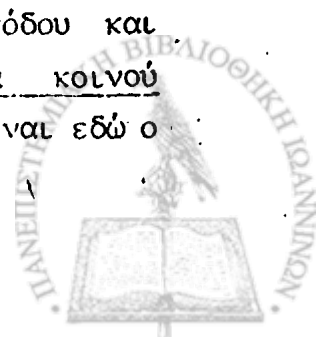
(α) Διαγραμματική δομή κρυσταλλοτριόδου

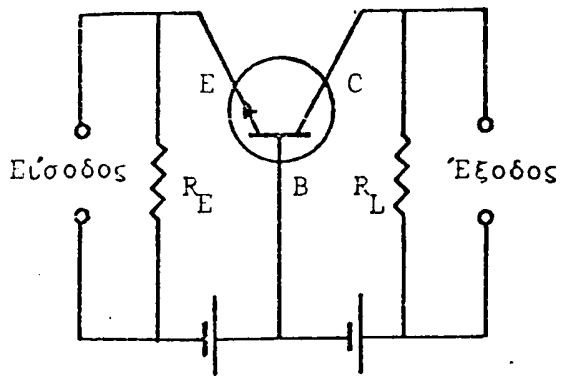


(β) Κώδικας ταυτοποίησης ακροδεκτών

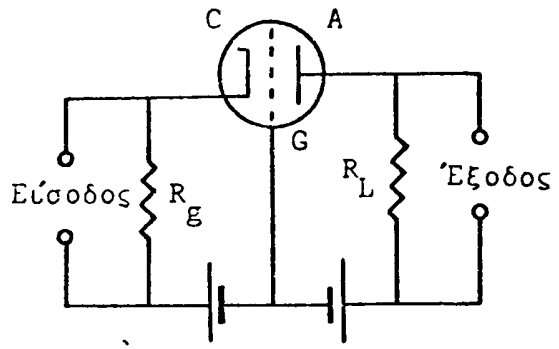
Σχήμα 6-1

έτσι, ώστε το τμήμα εκπομπού-βάσης να είναι πάντοτε ορθά πολωμένο και το τμήμα συλλέκτη-βάσης πάντοτε ανάστροφα πολωμένο. Υπάρχουν τρία είδη συνδεσμολογίας, που εξασφαλίζουν και τα τρία τον τρόπο αυτό πολώσεως. Τα τρία αυτά είδη φαίνονται στο σχήμα 6-2 και είναι: α) Συνδεσμολογία κοινής βάσης: Στη συνδεσμολογία αυτή, όπως δηλώνει και το όνομά της, η βάση αποτελεί κοινό στοιχείο τόσο στο κύκλωμα εισόδου όσο και στο κύκλωμα εξόδου. β) Συνδεσμολογία κοινού εκπομπού: Κοινό στοιχείο των κυκλωμάτων εισόδου και εξόδου στη συνδεσμολογία αυτή είναι ο εκπομπός. γ) Συνδεσμολογία κοινού συλλέκτη: Το κοινό στοιχείο των κυκλωμάτων εισόδου και εξόδου είναι εδώ ο

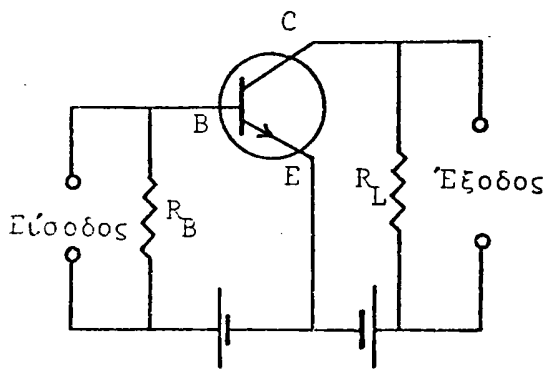




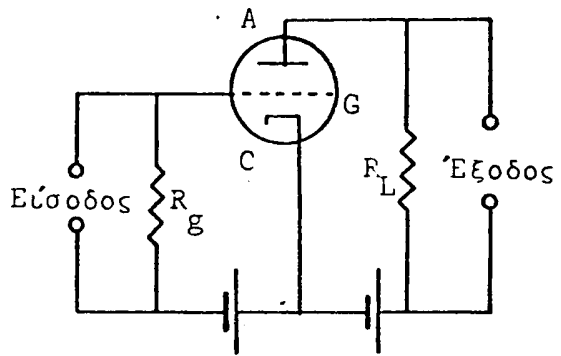
Κοινής βάσης



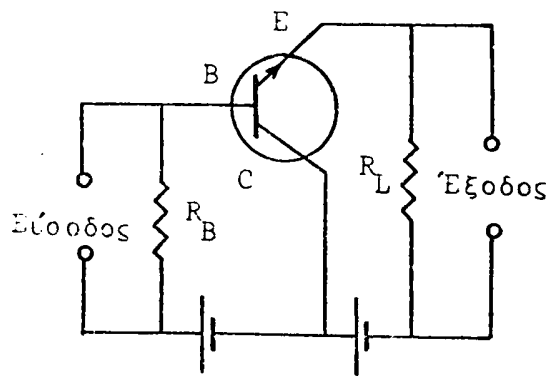
Κοινού πλέγματος



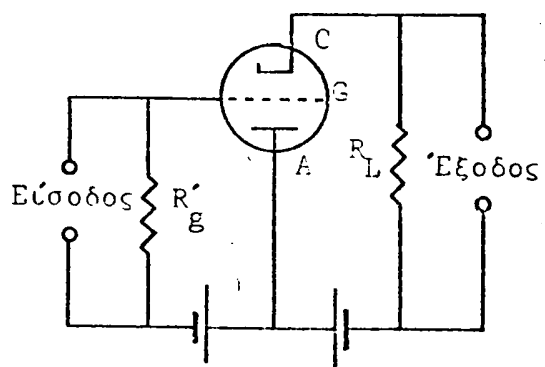
Κοινού εκπομπού



Κοινής ανόδου



Κοινού συλλέκτη



Κοινής ανόδου

Είδη συνδεσμολογίας τριόδων και κρυσταλλοτριόδων

Σχήμα 6-2



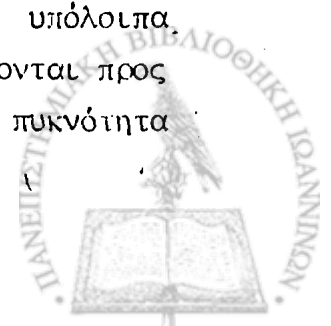
ο συλλέκτης. Οι όροι κύκλωμα εισόδου και κύκλωμα εξόδου έχουν επικρατήσει, επειδή σε κάθε συνδεσμολογία η κρυσταλλοτρίοδος, όπως άλλωστε και η τρίοδος ηλεκτρονική λυχνία, χρησιμοποιείται κύρια σαν ενισχυτής και κατά συνέπεια μέσω του ενός κυκλώματος (εισόδου) εισέρχεται το σήμα, που πρόκειται να ενισχυθεί, στη διάταξη και μέσω του άλλου (εξόδου) εξέρχεται το ενισχυμένο σήμα από αυτήν. Επίσης συχνά αντί του όρου κοινός στην ονοματολογία των συνδεσμολογιών χρησιμοποιείται ο όρος προσγειωμένος.

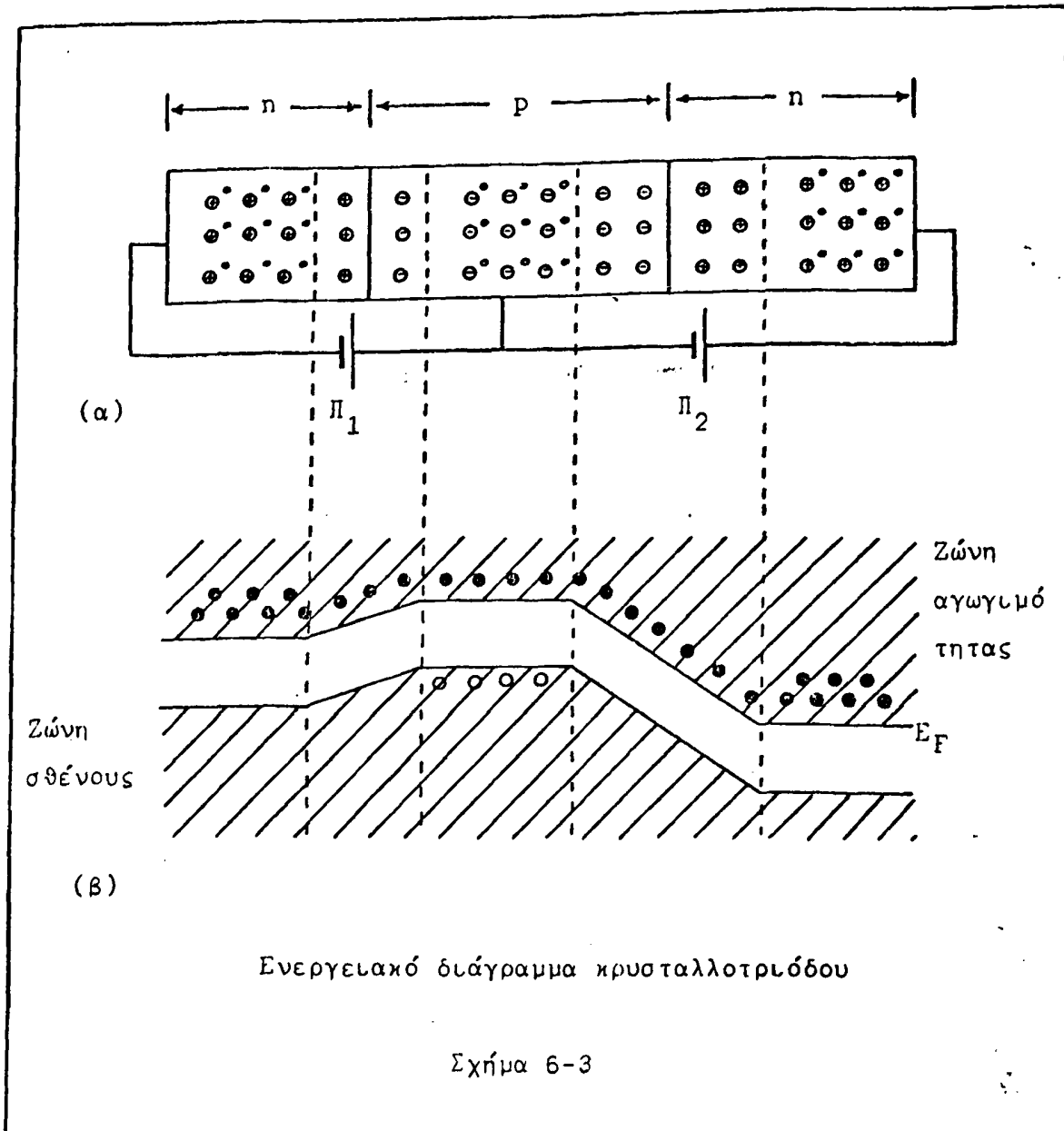
Σκόπιμο είναι στο σημείο αυτό, εφ' όσον έγινε αναφορά στην τρίοδο ηλεκτρονική λυχνία, να υπενθυμισθεί, ότι και η λυχνία αυτή συνδέεται κατά τρεις ακριβώς αντίστοιχους τρόπους, δηλαδή με κοινό πλέγμα, κοινή κάθοδο και κοινή άνοδο, που φαίνονται επίσης στο σχήμα 6-2. Γίνεται λοιπόν φανερό, ότι μεταξύ των δομικών στοιχείων μιας τριόδου και μιας κρυσταλλοτρίοδος μπορεί να πραγματοποιηθεί η εξής αντιστοιχία: Κάθοδος-εκπομπός, πλέγμα-βάση και άνοδος-συλλέκτης. Πρέπει όμως παράλληλα να τονισθεί, ότι ενώ η τρίοδος, όπως και κάθε ηλεκτρονική λυχνία, είναι στοιχείο ελεγχόμενο από τάση (τάση πλέγματος), η κρυσταλλοτρίοδος είναι στοιχείο ελεγχόμενο από ρεύμα (ρεύμα βάσης).

Συνδεσμολογία κοινής βάσης

Πριν από οποιαδήποτε μελέτη της ενισχυτικής λειτουργίας μιας κρυσταλλοτρίοδος είναι απαραίτητο να μελετηθεί η στατική λειτουργία της, δηλαδή η λειτουργία της σε κύκλωμα, που περιλαμβάνει μόνον πηγές συνεχούς.

Έστω λοιπόν η απλοποιημένη διαγραμματική συνδεσμολογία κοινής βάσης του σχήματος 6-3.α για μια κρυσταλλοτρίοδο ηρη. Από άποψη ενεργειακών σταθμών δημιουργείται μια κατάσταση σαν αυτή, που φαίνεται στο σχήμα 6-3.β. Λόγω της ορθής πολώσεως του τμήματος εκπομπού-βάσης ο φραγμός δυναμικού της επαφής εκπομπού υποβιβάζεται, ενώ λόγω της ανάστροφης πολώσεως του τμήματος συλλέκτη-βάσης ο φραγμός δυναμικού της επαφής συλλέκτη αυξάνει. Έτσι λοιπόν τα ηλεκτρόνια, που προέρχονται από τον αρνητικό πόλο της πηγής Π_1 και διαχέονται δια του εκπομπού (φορέις πλειονότητας) διέρχονται ευχερέστερα το φραγμό της επαφής εκπομπού και εισέρχονται στη βάση. Εκεί ένα μέρος τους επανασυνδέεται με τις οπές (φορέις πλειονότητας) της βάσης, ενώ τα υπόλοιπα υποβοηθούμενα και από το ευνοϊκό πεδίο της επαφής συλλέκτη διαχέονται προς αυτόν. Επειδή η βάση κατασκευαστικά έχει μικρή έκταση και μικρή πυκνότητα





προσμίξεων, είναι προφανές, ότι το ποσοστό των ηλεκτρονίων εκπομπού, που επανασυνδέονται με οπές της είναι εξαιρετικά μικρό (περίπου 1-3%), ενώ τα διαχεόμενα προς τον συλλέκτη ηλεκτρόνια αποτελούν τη συντριπτική πλειοψηφία. Τα ηλεκτρόνια αυτά μέσω των πηγών Π_2 και Π_1 επιστρέφουν στον εκπομπό.

Η ρυθμιστική δράση του ρεύματος βάσης I_B στη λειτουργία της κρυσταλλοτριόδου, που, όπως αναφέρθηκε, είναι ανάλογη με τη δράση του οδηγού ολέγματος της τριόδου, δεν οφείλεται τόσο στη μεταβολή του αριθμού των φορέων πλειονότητας της βάσης, οι οποίοι λόγω δομικών αιτιών δεν μπορεί να γίνουν σημαντικά πολυάριθμοι, όσο στο ότι μεταβολή του ρεύματος βάσης σημαίνει μεταβολή της τάσης πολώσεως βάσης (τάση βάσης-εκπομπού), γεγονός, που επηρε-

άζει άμεσα τη διαμόρφωση των ενεργειακών σταθμών και κατά συνέπεια τα ρεύματα εκπομπού (I_E) και συλλέκτη (I_C).

Από τα προγραφέντα είναι προφανές, ότι απαραίτητη προϋπόθεση για την ύπαρξη ρεύματος συλλέκτη είναι η ύπαρξη ρεύματος εκπομπού και ότι οποιαδήποτε μεταβολή στο πρώτο έχει ανάλογο αντίχτυπο στο δεύτερο, μεταξύ δε των τριών ρευμάτων ισχύει η σχέση:

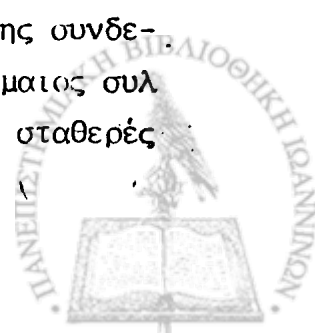
$$I_E = I_B + I_C$$

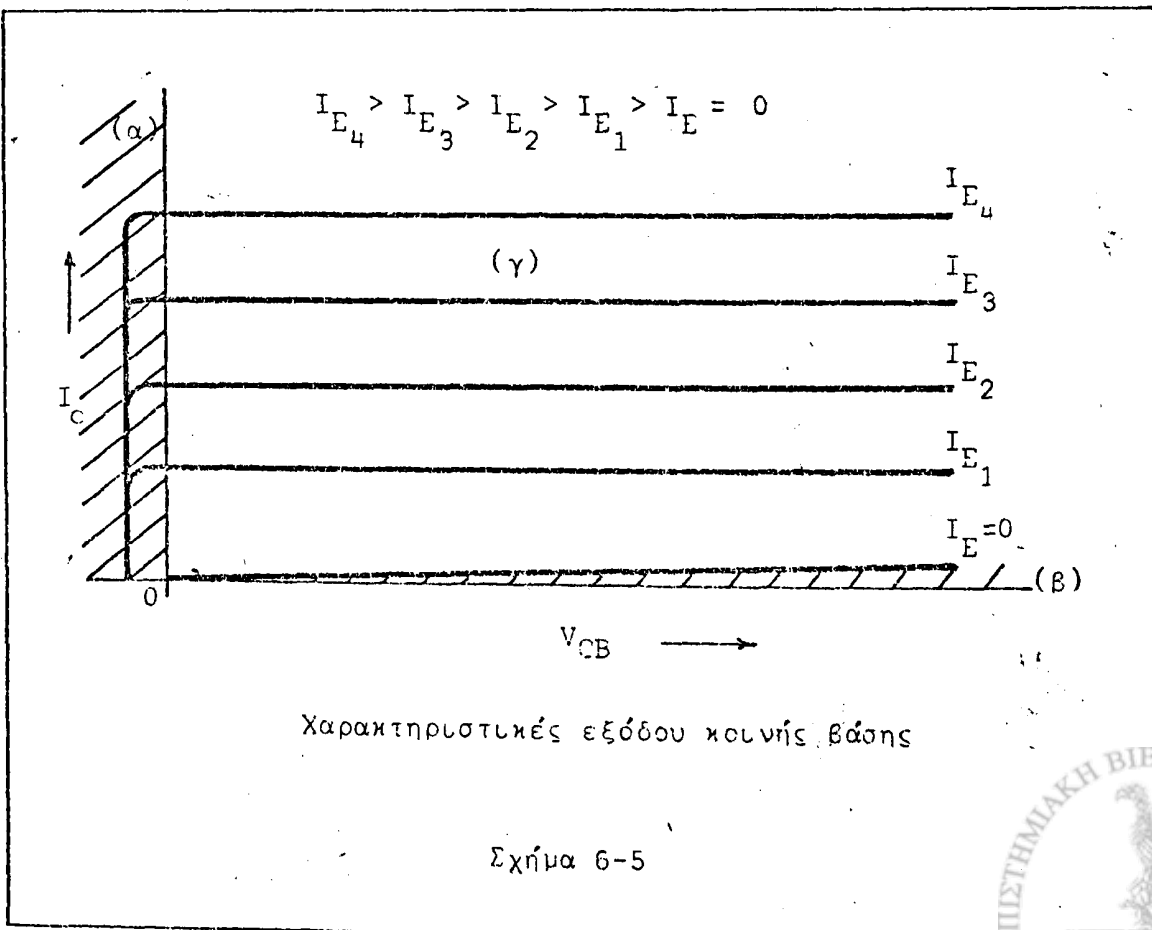
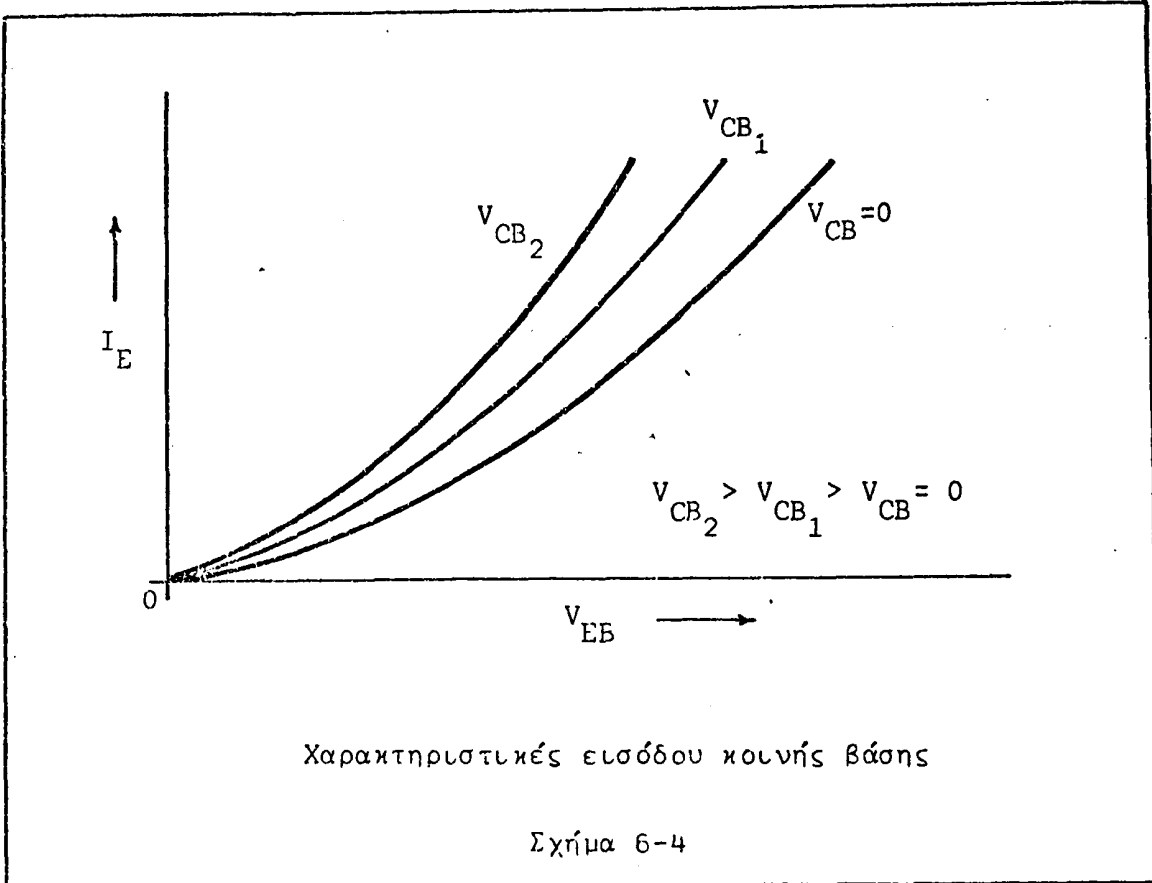
που είναι γενική και ανεξάρτητη από τον τρόπο συνδεσμολογίας της κρυσταλλοτριόδου.

Ανάλογη είναι η συζήτηση και ίδια τα συμπεράσματα, όταν η κρυσταλλοτριόδος είναι pnp, οπότε οι φορείς πλειονότητας εκπομπού και συλλέκτη είναι οπές. Βέβαια εκτός από τους φορείς πλειονότητας, που η κίνησή τους συζητήθηκε παραπάνω, υπάρχουν και οι φορείς μειονότητας, που η κίνησή τους γίνεται γενικά κατά αντίθετη φορά και δεν επηρεάζεται ουσιαστικά από τις τάσεις πόλωσης των τμημάτων. Επειδή όμως ο αριθμός τους είναι πολύ μικρότερος από ότι των φορέων πλειονότητας, τα αντίστοιχα ρεύματα, που προκαλούν, είναι πολύ μικρότερης σημασίας από τα συζητηθέντα. Επί πλέον σε όλα τα κυκλώματα εφαρμογών η λειτουργία των κρυσταλλοτριόδων βασίζεται στα ρεύματα φορέων πλειονότητας. Έτσι η λεπτομερής θεώρηση των ρευμάτων φορέων μειονότητας είναι έξω από τους στόχους αυτής της αναφοράς.

Η ποιοτική συζήτηση των ρευμάτων μιας κρυσταλλοτριόδου με κοινή βάση επιβεβαιώνεται και από τη θεώρηση των χαρακτηριστικών καμπυλών της συνδεσμολογίας. Στο σχήμα 6-4 δίδεται το σμήνος των χαρακτηριστικών εισόδου, δηλαδή οι καμπύλες που εκφράζουν τη μεταβολή του ρεύματος εκπομπού (I_E) συναρτήσεως της τάσης εκπομπού-βάσης (V_{EB}) για διάφορες τάσεις συλλέκτη - βάσης (V_{CB}). Για μηδενική τάση συλλέκτη-βάσης η καμπύλη είναι πανομοιότυπη με τη χαρακτηριστική κρυσταλλοδιόδου ορθά πολωμένης, όπως και αναμένεται. Για τάσεις συλλέκτη-βάσης μεγαλύτερες του μηδενός οι χαρακτηριστικές δείχνουν, ότι το ρεύμα αυξάνει ταχύτερα, γεγονός ευνόητο, εφόσον η αύξηση της τάσης V_{CB} υποβοηθά τη διάχυση των φορέων πλειονότητας του εκπομπού προς το συλλέκτη (πάντα μέσω της βάσης).

Στο σχήμα 6-5 δίδεται το σμήνος των χαρακτηριστικών εξόδου της συνδεσμολογίας, δηλαδή οι καμπύλες, που περιγράφουν τη μεταβολή του ρεύματος συλλέκτη (I_C) συναρτήσεως της τάσης συλλέκτη-βάσης (V_{CB}) για διάφορες σταθερές





τιμές του ρεύματος εκπομπού. Η καμπύλη για $I_E=0$ (κύκλωμα εκπομπού ανοιχτό) παριστά το ρεύμα διαρροής (ρεύμα φορέων μειονότητας) της επαφής συλλέκτη, εφ' όσον η επαφή αυτή πολώνεται ανάστροφα. Φαίνεται καθαρά, ότι όσο αυξάνει το ρεύμα εκπομπού, αυξάνει και το ρεύμα συλλέκτη (και μάλιστα ισούνται σχεδόν με το ρεύμα εκπομπού). Είναι αξιοσημείωτο, ότι: α) Ακόμη και για τάση $V_{CB} = 0$ το ρεύμα συλλέκτη διατηρεί τη σταθερή μη μεδενική τιμή του. Αυτό οφείλεται στο ότι η επαφή συλλέκτη ακόμη και χωρίς εξωτερική πόλωση έχει τέτοια κλίση ενεργειακών σταθμών, που υποβοηθεί τη διάχυση των φορέων πλειονότητας προς τον συλλέκτη. Για να ελαττωθεί και τελικά μηδενιστεί το ρεύμα αυτό πρέπει η επαφή συλλέκτη να πολωθεί ορθά, δηλαδή η τάση V_{CB} να αναστραφεί. β) Το ρεύμα συλλέκτη είναι ανεξάρτητο από την τάση συλλέκτη-βάσης. Απλή θεώρηση του ενεργειακού διαγράμματος του σχήματος 6-3 αρκεί για να αιτιολογήσει το γεγονός αυτό, που άμεση συνέπειά του είναι να μπορεί το κύκλωμα εξόδου στη συνδεσμολογία κοινής βάσης να θεωρηθεί μια εξαιρετικά ικανοποιητική πηγή ρεύματος. Η περιοχή (α) του σμήνους ονομάζεται περιοχή κόρου, η περιοχή (β) περιοχή αποκοπής και η περιοχή (γ) γραμμική περιοχή και είναι εκείνη, στην οποία εργάζεται πάντοτε σχεδόν η κρυσταλλοτρίοδος (με εξαίρεση τις περιπτώσεις χρησιμοποίησής της σαν διακόπτη).

Ενισχυτικές ιδιότητες κρυσταλλοτριόδων

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα η κρυσταλλοτρίοδος χρησιμοποιείται κύρια σαν ενισχύτρια. Όλοι οι τρόποι συνδεσμολογίας της παρέχουν την δυνατότητα ενισχύσεως τάσης, ρεύματος ή ισχύος χωρίς βέβαια αυτό να σημαίνει, ότι ενισχύονται σε κάθε συνδεσμολογία και τα τρία αυτά μεγέθη.

Πριν από οποιαδήποτε αναφορά λοιπόν στις ενισχυτικές ικανότητες και ιδιομορφίες της συνδεσμολογίας κοινής βάσης, σκόπιμο είναι να αναφερθούν συγκεντρωτικά τα ενισχυτικά χαρακτηριστικά, κοινά και μη, κάθε συνδεσμολογίας, ώστε να δοθεί και η δυνατότητα πραγματοποίησεως των απαραίτητων συγκρίσεων.

Συνδεσμολογία κοινής βάσης: Το σήμα εισόδου εφαρμόζεται μεταξύ εκπομπού και βάσης και το ενισχυμένο σήμα λαμβάνεται μεταξύ συλλέκτη και βάσης. Η αντίσταση εισόδου είναι μικρή (μεταξύ 20Ω και 1000Ω) και η αντίσταση εξόδου μεγάλη (μεταξύ $100k\Omega$ και $10M\Omega$). Η ενίσχυση (απολαβή) ρεύματος είναι λίγο μικρότερη από τη μονάδα ($A_1 = \alpha \approx 0.97$), η ενίσχυση τάσης μεγαλύτερη



της μονάδας ($A_V \approx \alpha \cdot R_L / R_{in}$) και η ενίσχυση ισχύος μέση ($A_P = A_V \cdot A_i$). Τα σήματα εισόδου και εξόδου είναι ομοφασικά (διαφορά φάσης $\varphi=0^\circ$). Έχει πολύ καλή απόκριση στις υψηλές συχνότητες και μεγάλο εύρος περιοχής αποκρίσεως. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται σε ενισχυτές τηλεοράσεως, video κλπ. Επίσης λόγω της μεγάλης διαφοράς των αντιστάσεων εισόδου και εξόδου χρησιμοποιείται σαν μονάδα προσαρμογής μεταξύ κυκλωμάτων με χαμηλή αντίσταση εξόδου και κυκλωμάτων με υψηλή αντίσταση εισόδου, όπως π.χ. σε διατάξεις που περιλαμβάνουν ηλεκτρονικές λυχνίες και κρυσταλλολυχνίες.

Συνδεσμολογία κοινού εκπομπού: Το σήμα εισόδου εφαρμόζεται μεταξύ βάσης και εκπομπού και το σήμα εξόδου λαμβάνεται μεταξύ συλλέκτη και εκπομπού. Η αντίσταση εισόδου είναι μέση (μεταξύ 20Ω και $5k\Omega$) και η αντίσταση εξόδου επίσης μέση (μεταξύ 50Ω και $50k\Omega$). Η ενίσχυση ρεύματος είναι πολύ μεγαλύτερη από τη μονάδα ($A_i = \beta \approx 20-100$), η ενίσχυση τάσης επίσης πολύ μεγαλύτερη από τη μονάδα ($A_V = \beta^2 \cdot R_{out} / R_{in}$) και κατά συνέπεια και η ενίσχυση ισχύος είναι υψηλή. Τα σήματα εισόδου και εξόδου έχουν αντίθετη φάση (διαφορά φάσης $\varphi=180^\circ$). Είναι η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη ενισχυτική συνδεσμολογία ιδιαίτερα στις ακουστικές και μέτρια υψηλές συχνότητες.

Συνδεσμολογία κοινού συλλέκτη: Το σήμα εισόδου εφαρμόζεται μεταξύ βάσης και συλλέκτη και το σήμα εξόδου λαμβάνεται μεταξύ εκπομπού και συλλέκτη. Η αντίσταση εισόδου είναι μεγάλη (μεταξύ $20k\Omega$ και $500k\Omega$) και η αντίσταση εξόδου μικρή (μεταξύ 20Ω και $1.5k\Omega$). Η ενίσχυση ρεύματος είναι μεγάλη ($A_i = \beta + 1$), η ενίσχυση τάσης μικρή, αλλά μεγαλύτερη της μονάδας ($A_V \approx (\beta + 1) \cdot R_{out} / R_{in}$) και κατά συνέπεια η ενίσχυση ισχύος μέση. Τα σήματα εισόδου και εξόδου είναι ομοφασικά (διαφορά φάσης $\varphi=0^\circ$). Η συνδεσμολογία αυτή χρησιμοποιείται πολύ σε κυκλώματα διαφορικών ενισχυτών, ηλεκτρονικής σταθεροποίησης κλπ. καθώς και σε περιπτώσεις όπου απαιτείται προσαρμογή ενός κυκλώματος υψηλής αντιστάσεως εξόδου σε ένα κύκλωμα χαμηλής αντιστάσεως εισόδου, αναφέρεται δε συχνά με τον όρο "ακόλουθος εκπομπού" (emitter follower).

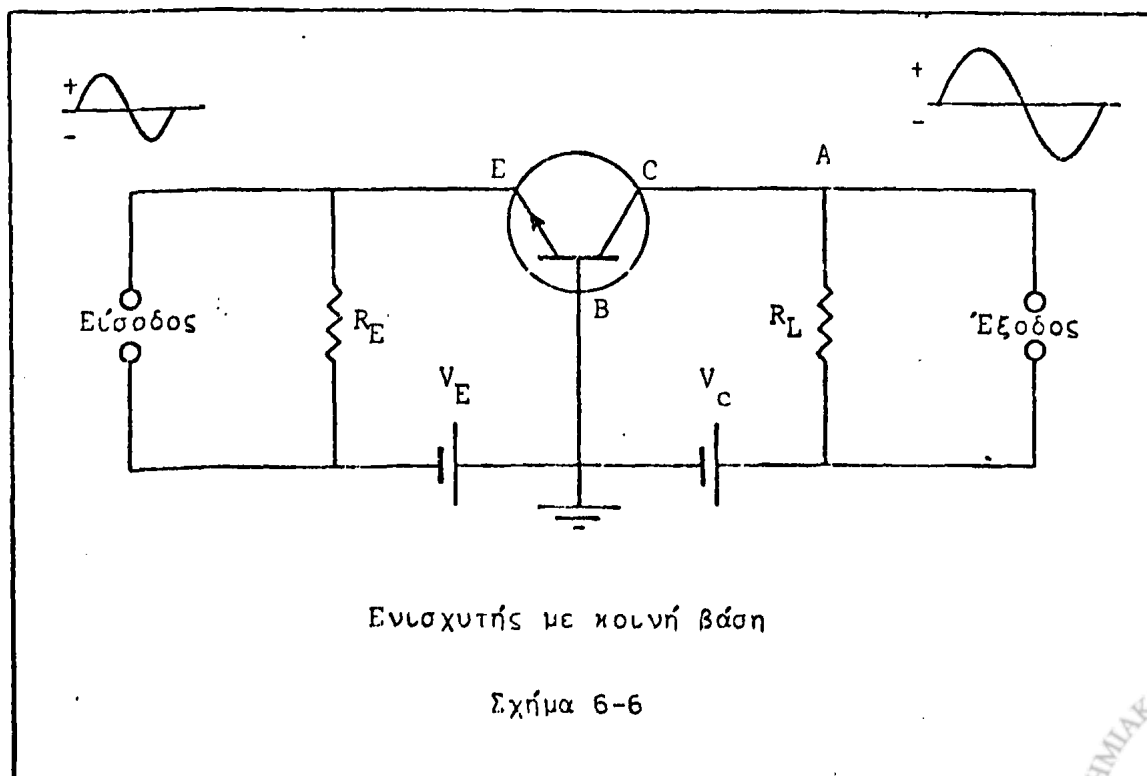
Πρέπει πάντοτε να γίνεται διάκριση μεταξύ των επιδόσεων ή περιορισμών μιας κρυσταλλοτρίοδου και των επιδόσεων ή περιορισμών ενός κυκλώματος, στο οποίο συμμετέχει μια κρυσταλλοτρίοδος έστω και σαν το βασικότερο στοιχείο του. Η διάκριση αυτή είναι ζωτικής σημασίας για τα ενισχυτικά κυκλώματα και ιδιαίτερα για τις αντιστάσεις εισόδου-εξόδου και την καμπύλη αποκρίσεως (περιοχή συχνοτήτων στην οποία παρουσιάζουν ικανοποιητική ενίσχυση). Σχετικά με το τελευταίο είναι απαραίτητο να σημειωθεί, ότι σε όλους τους τύπους ενισχυτών με κρυσταλλοτρίοδους υπεύθυνη για την ελάττωση της απολαβής στις χαμη-

Λές συχνότητες δεν είναι η κρυσταλλοτρίδος, αλλά τα άλλα στοιχεία του κυκλώματος, όπως π.χ. οι πυκνωτές εισόδου. Αυτό σημαίνει, ότι η κρυσταλλοτρίδος ενισχύει με τον ίδιο τρόπο και στον ίδιο βαθμό όλα τα σήματα χαμηλής συχνότητας (π.χ. από 3000Hz μέχρι και συνεχή), αλλά δεν συμβαίνει το ίδιο και για τους πυκνωτές εισόδου, οι οποίοι όσο ελαττώνεται η συχνότητα αυξάνει η χωρητική τους αντίσταση με αποτέλεσμα να εξασθενείται το σήμα εισόδου και να ελαττώνεται η απολαβή. Αντίθετα στις υψηλές συχνότητες κύρια υπεύθυνη για την πτώση της καμπύλης αποκρίσεως είναι η κρυσταλλοτρίδος, ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία του κυκλώματος έχουν πολύ μικρή επίδραση στη διαμόρφωση αυτού του άνω ορίου.

Ενισχυτής τάσης με κοινή βάση

Μελετάται τώρα αναλυτικότερα το κύκλωμα ενισχυτή με κοινή βάση. Στο σχήμα 6-6 φαίνεται το απλοποιημένο κύκλωμα συνδεσμολογίας του για κρυσταλλοτρίοδο ηρη.

Όπως αναφέρθηκε και αιτιολογήθηκε στα προηγούμενα, κάθε μεταβολή του ρεύματος εκπομπού προκαλεί ανάλογη μεταβολή στο ρεύμα συλλέκτη. Η εξάρτηση αυτή μεταξύ των δύο αυτών ρευμάτων εκφράζεται μέσω μιας παραμέτρου, που ο-



νομάζεται στατική παράμετρος α (d-c α ή "ενίσχυση ρεύματος μεγάλου σήματος"
Large signal current gain)

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

ή δυναμική παράμετρος α (α-c α)

$$\alpha = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}$$

ανάλογα με τον τρόπο ορισμού της. Η παράμετρος αυτή εκφράζει, όπως προκύπτει από τον ορισμό της, την ενίσχυση ρεύματος, που μπορεί να επιτευχθεί με τη συνδεσμολογία κοινής βάσης, επειδή, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6-6, ρεύμα εισόδου είναι το ρεύμα εκπομπού και ρεύμα εξόδου το ρεύμα συλλέκτη. Ισχύει λοιπόν για την ενίσχυση ρεύματος η σχέση:

$$A_i = \alpha$$

Οι κατασκευαστές των κρυσταλλοτριόδων δίνουν πάντοτε τις τιμές του α για κάθε κρυσταλλολυχνία, που, όπως προκύπτει από τη συζήτηση των ρευμάτων, που προηγήθηκε, είναι μικρότερες από τη μονάδα (μεταξύ του 0.92 και 0.99 ή και μικρότερη).

Παρ'όλο όμως που η ενίσχυση ρεύματος του ενισχυτή κοινής βάσης είναι μικρότερη της μονάδας, η ενίσχυση τάσης μπορεί να φθάσει σε εξαιρετικά μεγάλες τιμές, που σφαλώς ξεπερνούν κατά πολύ τη μονάδα. Αυτό είναι δυνατόν λόγω της μεγάλης διαφοράς των αντιστάσεων εισόδου και εξόδου. Έστω λοιπόν ότι στην είσοδο του κυκλώματος (άκρα της αντιστάσεως R_E) εφαρμόζεται ένα σήμα πλάτους V_{in} , οπότε σαν αποτέλεσμα της μεταβολής της συνισταμένης τάσης πόλωσης V_{EB} θα μεταβληθεί το ρεύμα εκπομπού κατά ένα ποσό

$$\Delta I_E = V_{in} / R_{in}$$

όπου R_{in} είναι η αντίσταση εισόδου του κυκλώματος. Επειδή η R_E και η R_{EB} (αντίσταση της ορθά πολωμένης επαφής εκπομπού) είναι παράλληλες, προκύπτει ότι:

$$R_{in} = R_E \cdot R_{EB} / (R_E + R_{EB}) \approx R_{EB}$$



διότι πάντοτε η R_{EB} είναι πολύ μικρότερη από την αντίσταση πολώσεως R_E . Άρα λοιπόν:

$$\Delta I_E = V_{in} / R_{EB}$$

Η μεταβολή αυτή του ρεύματος εκπομπού προκαλεί ανάλογη μεταβολή στο ρεύμα συλλέκτη:

$$\Delta I_C = \alpha \cdot \Delta I_E$$

που διαρρέοντας το κύκλωμα εξόδου προκαλεί στα άκρα της αντιστάσεως φόρτου R_L μια επί πλέον πτώση τάσης ίση προς:

$$\begin{aligned} V_{out} &= \Delta I_C \cdot R_L = \alpha \cdot \Delta I_E \cdot R_L = \\ &= \alpha \cdot R_L \cdot V_{in} / R_{EB} \end{aligned}$$

οπότε για την απολαβή τάσης προκύπτει η σχέση:

$$A_V = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \alpha \cdot \frac{R_L}{R_{EB}}$$

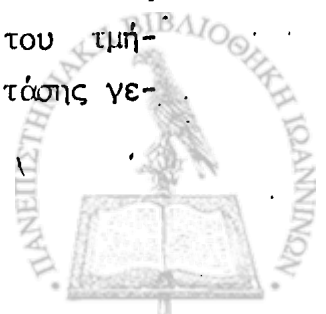
Λόγω του ότι πάντοτε $R_L \gg R_{EB}$ συνάγεται άμεσα πως πράγματι η ενίσχυση τάσης μπορεί να φθάσει σε πολύ υψηλές τιμές.

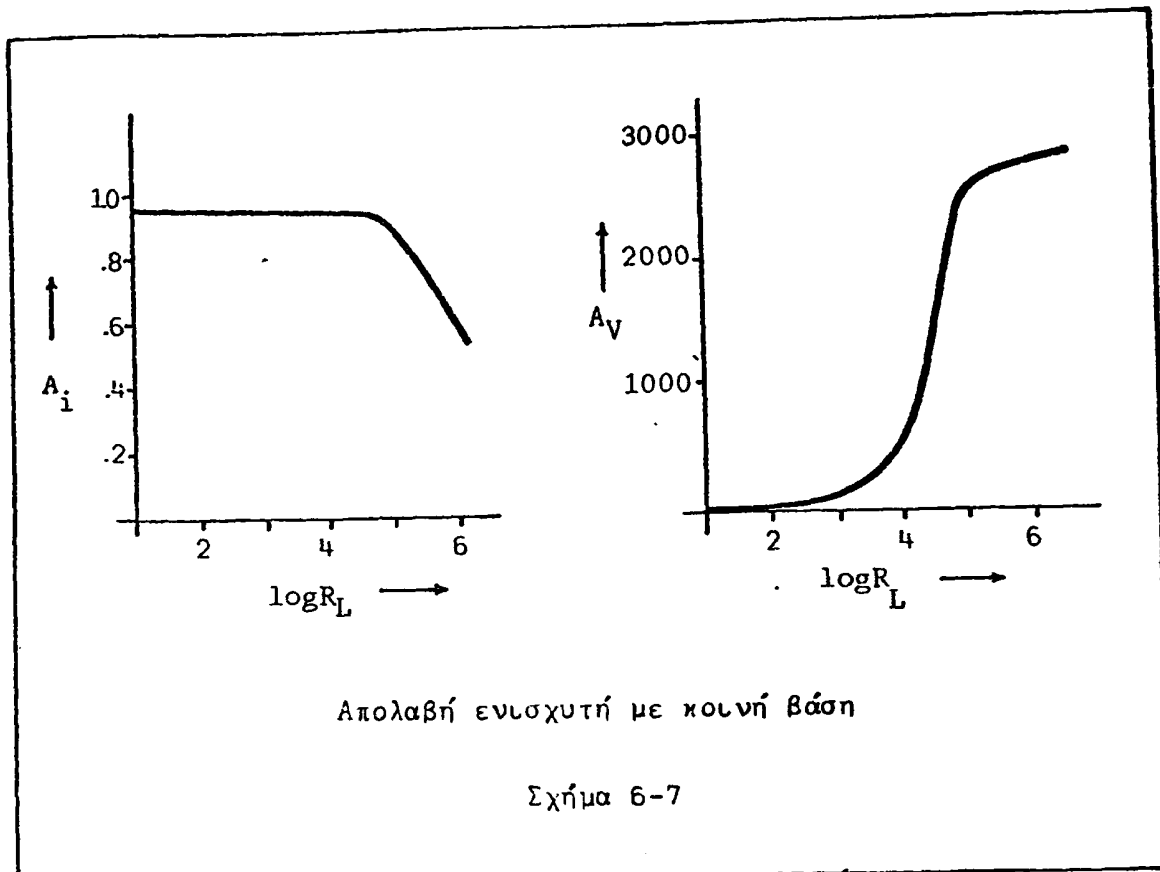
Σύμφωνα με τα παραπάνω η ενίσχυση ισχύος υπολογίζεται ίση προς:

$$A_P = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{I_{out} \cdot V_{out}}{I_{in} \cdot V_{in}} = A_i \cdot A_V = \alpha \cdot \alpha \cdot \frac{R_L}{R_{EB}} = \alpha^2 \cdot \frac{R_L}{R_{EB}}$$

και έχει μέσες τιμές γενικά.

Στο σχήμα 6-7 δίδεται γραφικά η μεταβολή της απολαβής ρεύματος και τάσης συναρτήσει της αντιστάσεως φόρτου (η βαθμολόγηση των αξόνων είναι ενδεικτική). Φαίνεται καθαρά, ότι, όσο αυξάνει η αντίσταση φόρτου R_L ελαττώνεται γενικά η απολαβή ρεύματος. Αυτό οφείλεται στο ότι αυξάνει η ολική αντίσταση του κυκλώματος εξόδου, που ουσιαστικά περιλαμβάνει δύο αντιστάσεις συνδεδεμένες σε σειρά, την αντίσταση φόρτου R_L και την αντίσταση του τμήματος συλλέκτη-βάση της κρυσταλλοτριόδου R_{CB} . Αντίθετα η απολαβή τάσης γε-





νικά αυξάνει όσο αυξάνει η αντίσταση φόρτου, επειδή αυξάνει η διαφορά δυναμικού στα άκρα της (τάση εξόδου).

Τέλος όσον αφορά στη σχέση φάσεων μεταξύ των σημάτων εισόδου και εξόδου αναφέρονται τα εξής: Αν στην είσοδο του κυκλώματος του σχήματος 6-6 εφαρμοσθεί ένα ημιτονικό π.χ. σήμα, τότε κατά το πρώτο μισό της περιόδου του η τάση της πηγής από την οποία προέρχεται (π.χ. γεννήτρια ακουστικών συχνοτήτων - Audio Frequencies - AF) αντιτίθεται στην ορθή πόλωση του τμήματος εκπομπού-βάσης. Σαν αποτέλεσμα αυτού η συνισταμένη πόλωση ελαττώνεται και κατά συνέπεια το ρεύμα εκπομπού ελαττώνεται. Αντίστοιχα ελαττώνεται και το ρεύμα του συλλέκτη, δηλαδή το ρεύμα, που διαρρέει την αντίσταση φόρτου R_L . Αυτό σημαίνει, ότι ελαττώνεται η πτώση τάσης κατά μήκος της αντιστάσεως φόρτου, οπότε το δυναμικό του σημείου Α (συλλέκτη) γίνεται θετικότερο σε σχέση με το δυναμικό, που είχε πριν εφαρμοσθεί το σήμα στην είσοδο. Σε όλο λοιπόν το πρώτο μισό της περιόδου, που το σήμα εισόδου είναι θετικό, και το σήμα εξόδου (στα άκρα της R_L) είναι θετικό.

Αντίστοιχα κατά το δεύτερο μισό της περιόδου του σήματος η τάση της πηγής του προστίθεται στην πόλωση εκπομπού-βάσης με αποτέλεσμα η συνισταμένη πόλωση και το ρεύμα εκπομπού να αυξάνουν. Αυξάνει αντίστοιχα και το

ρεύμα συλλέκτη και η πτώση τάσης κατά μήκος της αντιστάσεως φόρτου, οπότε το δυναμικό του σημείου A ελαττώνεται, γίνεται αρνητικότερο ως προς το δυναμικό, που είχε πριν εφαρμοσθεί σήμα στην είσοδο. Σε όλο λοιπόν το δεύτερο μισό της περιόδου, που το σήμα εισόδου είναι αρνητικό και το σήμα εξόδου είναι αρνητικό.

Επιβεβαιώνεται έτσι αυτό, που αναφέρεται στα συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά της συνδεσμολογίας, ότι δηλαδή η διαφορά φάσης μεταξύ των σημάτων εισόδου και εξόδου είναι μηδέν ($\varphi = 0^\circ$).

Απαραίτητες γνώσεις

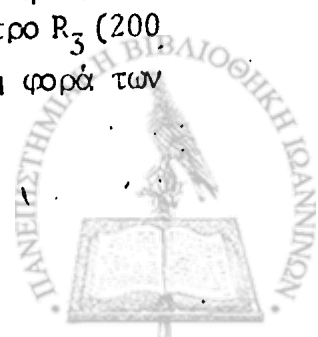
Δ. Μ. Μηλιώτη: Φυσική των Κρυσταλλολυχνιών, σελ. 273.

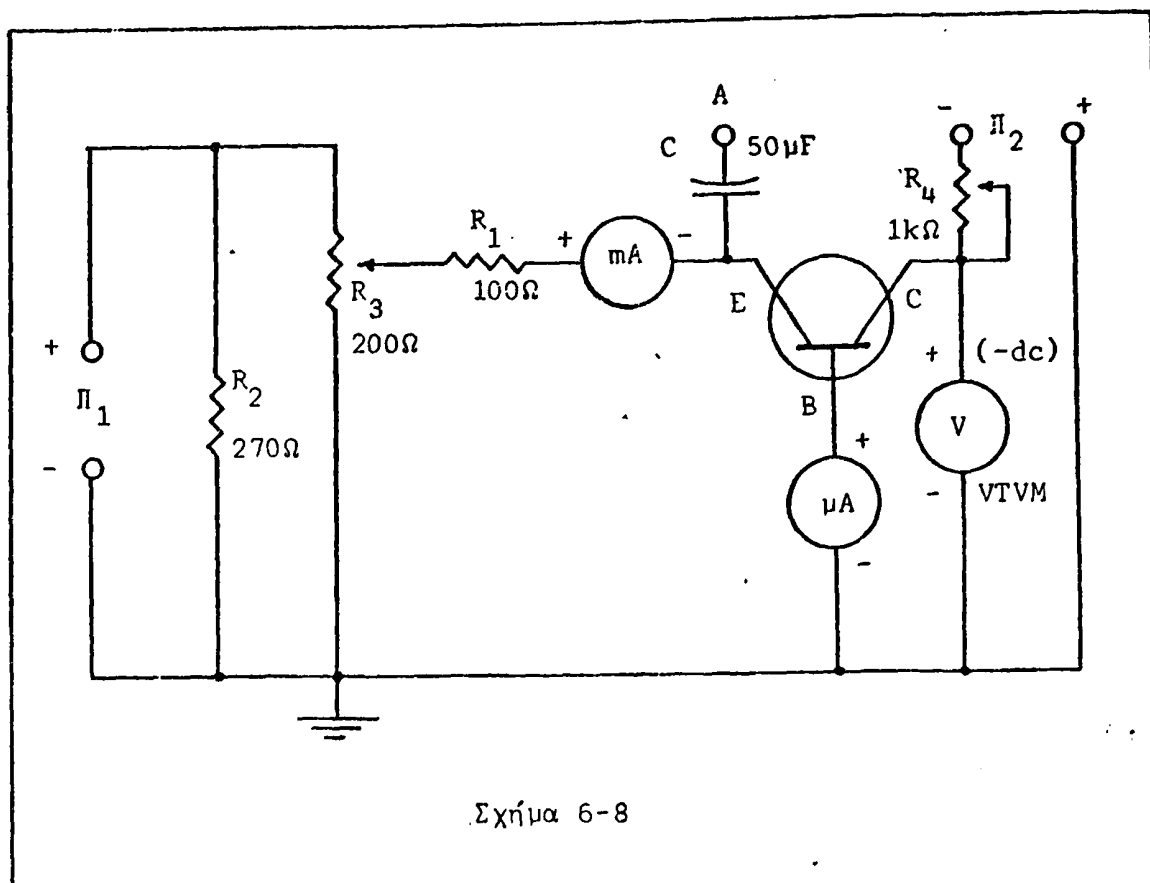
Χρησιμοποιούμενα όργανα:

1. Δύο (2) τροφοδοτικά χαμηλής τάσης.
2. Γεννήτρια ακουστικών συχνοτήτων
3. Παλμογράφος
4. Ηλεκτρονικό βολτόμετρο
5. Δύο πολύμετρα (μιλλιαμπερόμετρο-μικροαμπερόμετρο)
6. Κρυσταλλοτρίοδος r_{hp}
7. Αντιστάσεις: $100\Omega - 0,5W$, $270\Omega - 2W$
8. Ποτενσιόμετρα: $200\Omega - 0.5W$, $1k\Omega - 2W$
9. Πυκνωτής $50\mu F$.

Πειραματικό μέρος

1. Πραγματοποιείτε το κύκλωμα του σχήματος 6-8. Το ποτενσιόμετρο R_4 ($1k\Omega$) συνδεσμολογείται σαν ροοστάτης βραχυκυκλώνοντας δύο γειτονικούς ακροδέκτες του και πριν τοποθετηθεί στο κύκλωμα ρυθμίζεται στην τιμή $R_4 = 500\Omega$ με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού βολτόμετρου. Επίσης το ποτενσιόμετρο R_3 (200Ω) ρυθμίζεται στη μέγιστη τιμή του (στραφή μέχρι το τέρμα κατά τη φορά των





δεικτών του ρολογιού) πριν την έναρξη τροφοδοσίας του κυκλώματος.

2. Ρυθμίστε την τάση πολώσεως εκπομπού-βάσης (τροφοδοτικό Π_1) στην τιμή $V_1 = 5V$. Κατόπιν ρυθμίστε το τροφοδοτικό Π_2 έτσι, ώστε η τάση συλλέκτη-βάσης, όπως μετρείται με το ηλεκτρονικό βολτόμετρο, να έχει τιμή $V_{CB} = 1V$. Ακολουθώντας ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο R_3 , ώστε να λάβετε ρεύμα εκπομπού $I_E = 1mA$ ρυθμίζοντας ταυτόχρονα την πηγή Π_2 έτσι, ώστε η πόλωση συλλέκτη (V_{CB}) να διατηρείται σταθερή (1V) και μετρείστε το ρεύμα βάσης I_B . Συνεχειστε με τράντας το ρεύμα βάσης και για τις υπόλοιπες τιμές ρεύματος εκπομπού του παρακάτω πίνακα.

3. Επαναλάβετε τις μετρήσεις για τάση πολώσεως συλλέκτη-βάσης $V_{CB} = 10V$ σταθερή και καταχωρείστε τις στον ίδιο πίνακα.

4. Χαράξτε τις καμπύλες $I_E = \sigma(I_B)$ στο ίδιο διάγραμμα και για τις δυο τάσεις πολώσεως συλλέκτη.

5. Υπολογίστε για κάθε τιμή ρεύματος εκπομπού του πίνακα την αντίστοιχη τιμή ρεύματος συλλέκτη ($I_C = I_E - I_B$) και χαράξτε στο ίδιο διάγραμμα τις δυο καμπύλες $I_C = \sigma(I_E)$. Από το διάγραμμα υπολογίστε τη δυναμική παράμετρο α .

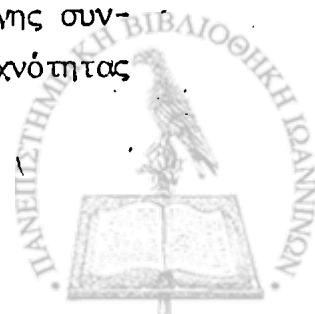
6. Χαράξτε το σμήνος χαρακτηριστικών εξόδου της συνδεσμολογίας λαμ-

	$V_{CB} = 1V$		$V_{CB} = 10V$	
I_E mA	I_B μA	I_C mA	I_B μA	I_C mA
1.0				
1.5				
2.0				
2.5				
3.0				
3.5				
4.0				
4.5				
5.0				
6.0				

Βάνοντας υπ' όψη, ότι οι χαρακτηριστικές είναι παράλληλες προς τον άξονα των τάσεων V_{CB} . Στο σημείον αυτό χαράξτε την ευθεία φόρτου, που αντιστοιχεί σε τάση τροφοδοσίας $V_T = 6V$ και αντίσταση φόρτου $R_L = 500\Omega$.

7. Θεωρείστε ότι στον ενισχυτή εφαρμόζεται ημιτονικό σήμα, που προκαλεί μεταβολή του ρεύματος εκπομπού κατά $\pm 1mA$. Λάβετε σαν σημείο λειτουργίας Q αυτό, που αντιστοιχεί στη χαρακτηριστική των $6mA$ ($I_E = 6mA$) και υπολογίστε γραφικά το μέγεθος του σήματος εξόδου (κατά τάση). Συμβουλευθείτε, αν χρειαστεί, τα αναφερόμενα στην άσκηση 8.

8. Διατηρώντας την τάση τροφοδοσίας $V_1 = 5V$ και την αντίσταση φόρτου $R_4 = 500\Omega$ αποσυνδέστε το ηλεκτρονικό βολτόμετρο και το μικροαμπερόμετρο της βάσης και βραχυκυκλώστε τη βάση με τη γη. Κατόπιν ρυθμίστε το τροφοδοτικό Π_2 στην τιμή $V_2 = 6V$ και το ρεύμα εκπομπού στην τιμή $I_E = 6mA$ (με τη βοήθεια του ποτενσιόμετρου R_3). Μεταξύ των σημείων A και γ συνδέστε τη γεννήτρια ακουστικών συχνοτήτων και εφαρμόστε σήμα συχνότητας



1000Hz. Συνδέστε τον βαθμολογημένο παλμογράφο μεταξύ συλλέκτη και γης και παρατηρείστε την κυματομορφή εξόδου ρυθμίζοντας έτσι την τάση εξόδου της γεννήτριας, ώστε η τάση εξόδου να είναι $2V_{p-p}$.

9. Αποσυνδέστε τον παλμογράφο και συνδέστε τον μεταξύ εκπομπού και γης για να μετρήσετε την τάση εισόδου του ενισχυτή.

$$V_{in} = \quad V_{p-p}$$

10. Υπολογίστε την ενίσχυση τάσης.

$$A_v =$$

11. Επαναλάβετε τις τρεις τελευταίες ερωτήσεις για $R_4 = 1k\Omega$ και $V_2 = 12V$. Συγκρίνετε την νέα απολαβή με αυτήν της ερωτήσεως 10.

Ερωτήσεις

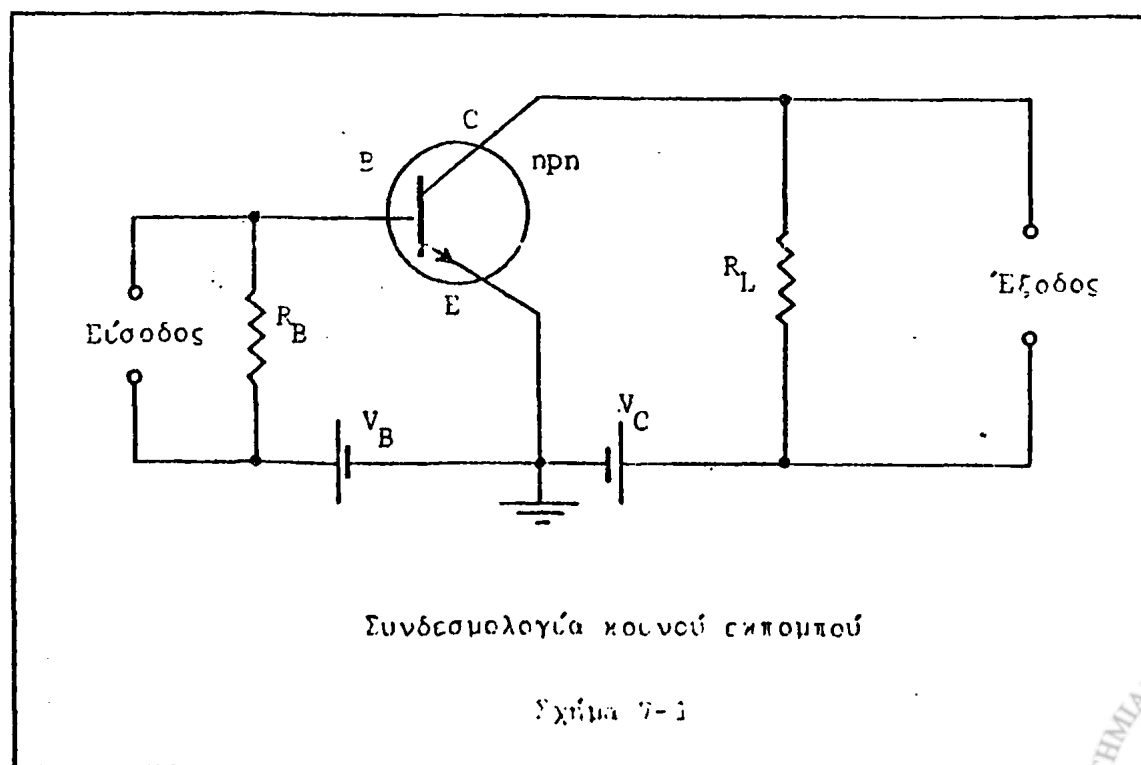
1. Πώς μπορούμε με ένα ωμόμετρο να διακρίνουμε αν μια κρυσταλλοτρίοδος είναι pnp ή npn;
2. Ποιά είναι η προϋπόθεση για την ύπαρξη ρεύματος συλλέκτη σε μια κρυσταλλοτρίοδο;
3. Ποιές είναι οι κυριώτερες χρήσεις της συνδεσμολογίας κοινής βάσης;
4. Ποιές είναι οι σημαντικότερες εφαρμογές της συνδεσμολογίας κοινού συλλέκτη;
5. Προκειμένου να έχετε ικανοποιητική ενίσχυση ισχύος σε ένα κύκλωμα κοινής βάσης, τι αντίσταση φόρτου θα χρησιμοποιούσατε μικρή ή μεγάλη;



ΑΣΚΗΣΗ 7ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΤΡΙΟΔΟΣ ΜΕ ΚΟΙΝΟ ΕΚΠΟΜΠΟΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΚΟΙΝΟΥ ΕΚΠΟΜΠΟΥΕισαγωγή

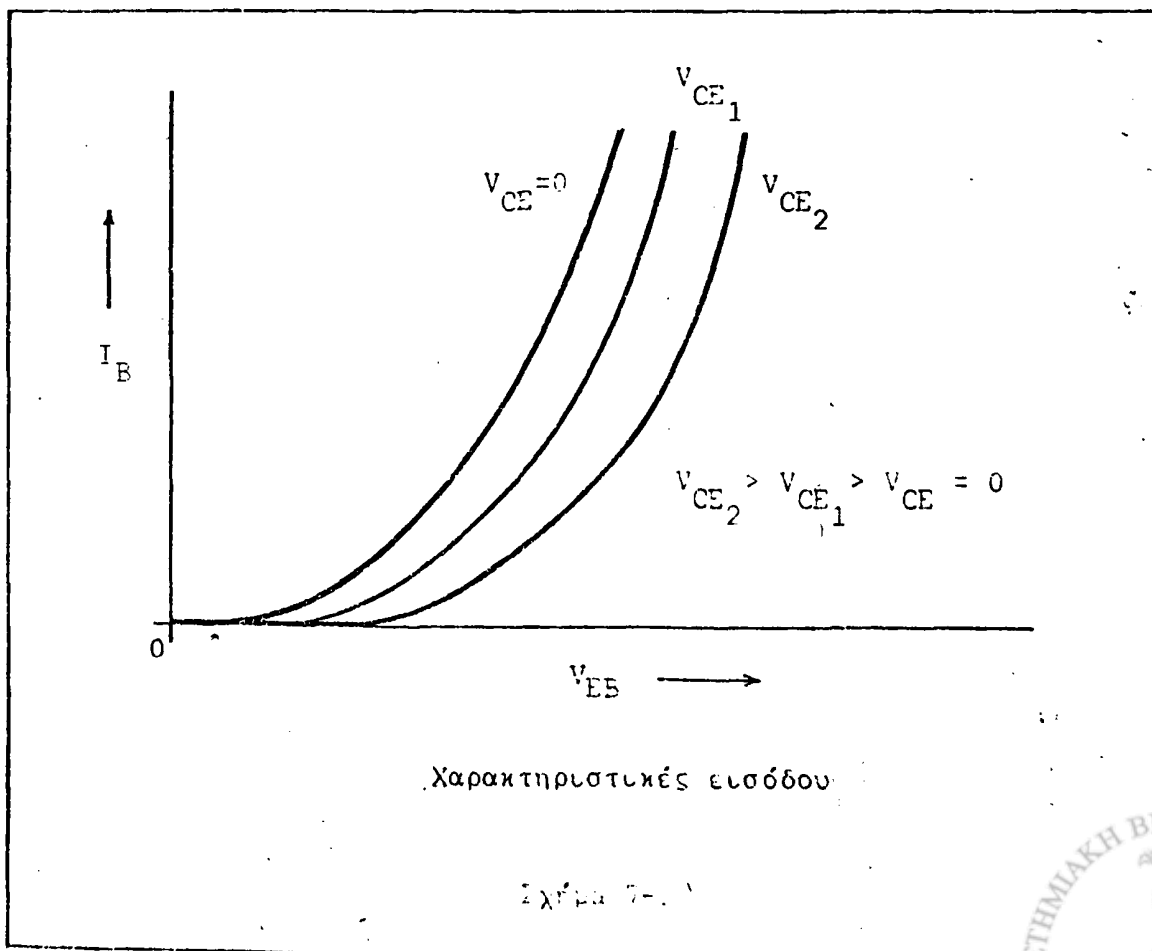
Από τους τρεις τρόπους συνδεσμολογίας μιας κρυσταλλοτριόδου (κοινή βάση-κοινός εκπομπός-κοινός συλλέκτης) η συνδεσμολογία κοινού εκπομπού είναι εκείνη, που χρησιμοποιείται περισσότερο στις εφαρμογές. Κύριοι λόγοι γι' αυτό είναι η μεγάλη ενίσχυση ισχύος, που επιτυγχάνει (πολύ μεγαλύτερη από ότι η συνδεσμολογία κοινής βάσης, που μελετήθηκε στην προηγούμενη άσκηση) και οι παραπλήσιες τιμές των αντιστάσεων εισόδου και εξόδου. Το τελευταίο αυτό γνώρισμα παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας σύνθετων ενισχυτών με διαδοχικές βαθμίδες χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα προσαρμογής αντιστάσεων.

Πριν από οποιαδήποτε όμως αναφορά στις ενισχυτικές της ιδιότητες πρέπει να μελετηθούν τα στατικά χαρακτηριστικά της συνδεσμολογίας. Στο σχήμα 7-1 δίδεται ένα τυπικό απλοποιημένο κύκλωμα κοινού εκπομπού για μια κρυσταλλοτριόδο npn. Οι τάσεις των πηγών τροφοδοσίας V_B και V_C έχουν επιλεγεί έ-



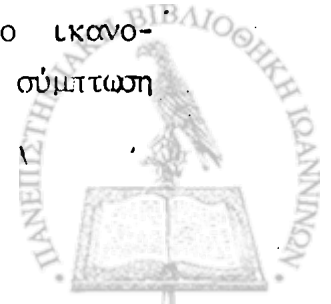
τσι, ώστε λαμβανομένων υπ' όψη και των αντιστάσεων R_B και R_L το τμήμα εκπομπού- βάσης να πολώνεται ορθά και το τμήμα συλλέκτη-βάσης ανάστροφα. Για τη διακίνηση των φορέων πλειονότητας μέσω της κρυσταλλοτριόδου ισχύουν όσα αναφέρονται στην προηγούμενη άσκηση με τίτλο " Μελέτη κρυσταλλοτριόδου με κοινή βάση". Σημαντική για την κατανόηση και διερεύνηση της λειτουργίας, των επιδόσεων και ιδιομορφιών του κυκλώματος είναι η θεώρηση των χαρακτηριστικών καμπυλών εισόδου και εξόδου.

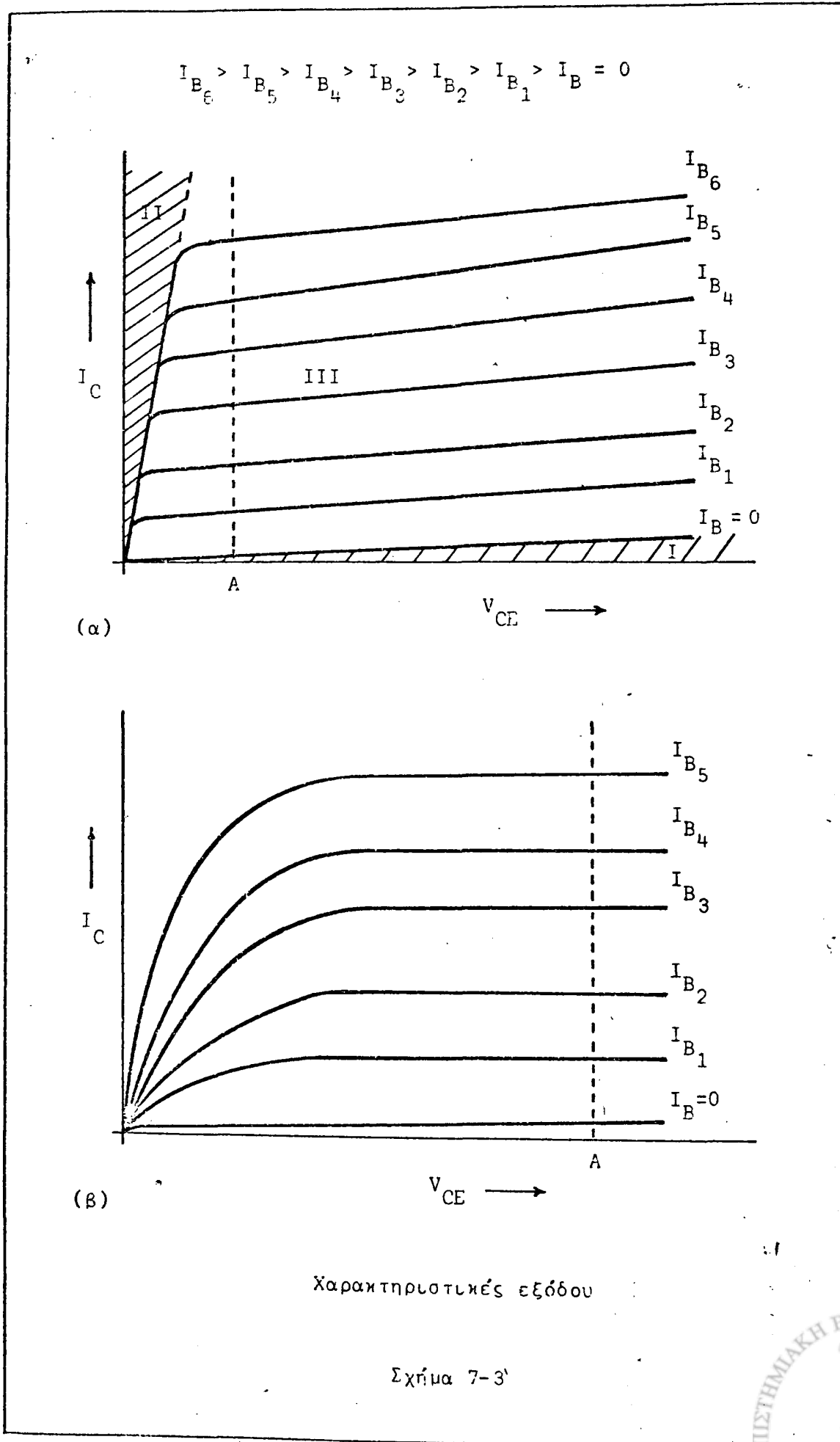
Το σμήνος των χαρακτηριστικών εισόδου δίδεται στο σχήμα 7-2. Χαρακτηριστικές εισόδου ονομάζονται οι καμπύλες, που περιγράφουν τη μεταβολή του ρεύματος βάσης συναρτήσει της τάσης βάσης-εκπομπού για διάφορες σταθερές τιμές της τάσης συλλέκτη-εκπομπού. Φαίνεται άμεσα, ότι για τάση συλλέκτη-εκπομπού $V_{CE} = 0$ (βραχυκυκλωμένος συλλέκτης) η χαρακτηριστική είναι πανομοιότυπη με τη χαρακτηριστική μιας ορθά πολωμένης κρυσταλλοδιόδου (τμήμα εκπομπού-βάσης), όπως άλλωστε και αναμένεται. Όσο όμως αυξάνει η τάση πολώσεως του συλλέκτη (V_{CE}) οι καμπύλες μετατοπίζονται προς τα δεξιά. Αυτό σημαίνει ότι για δεδομένη τάση πολώσεως της βάσης το ρεύμα βάσης ελαττώνεται, ερμηνεύεται δε ως εξής: Όσο αυξάνει η ανάστροφη πόλωση του τμήματος συλλέκτη-



βάσης, που προκαλείται από την αύξηση της V_{CE} , αυξάνει η περιοχή απογυμνώσεως της επαρκής συλλέκτη και κατά συνέπεια ελαττώνεται η δραστική έκταση της βάσης, το τμήμα της δηλαδή εκείνο στο οποίο μπορούν να υπάρξουν φορείς πλειονότητας βάσης (π.χ. οπές προκειμένου για κρυσταλλοτρίοδο pnp), οπότε βέβαια περιορίζεται και ο αριθμός αυτών των φορέων και το ρεύμα βάσης, που συνιστούν. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό σαν φαινόμενο Early.

Στο σχήμα 7-3.α δίδεται το σμήνος των χαρακτηριστικών εξόδου της συνδεσμολογίας, δηλαδή οι καμπύλες, που περιγράφουν τη μεταβολή του ρεύματος συλλέκτη συναρτήσει της τάσης συλλέκτη-εκπομπού για διάφορες σταθερές τιμές του ρεύματος βάσης. Προτιμάται σαν παράμετρος χαράξεως των καμπυλών το ρεύμα βάσης αντί για την τάση πολώσεως βάσης V_{BE} , επειδή η αντίσταση εισόδου της διατάξεως δεν είναι σταθερή με αποτέλεσμα στη δεύτερη περίπτωση η μορφή των καμπυλών να είναι πολύ πιο πολύπλοκη και η συναγωγή συμπερασμάτων πιο δυσχερής. Για τον ίδιο αυτό λόγο και στη συνδεσμολογία κοινής βάσης ως παράμετρος προτιμάται το ρεύμα εκπομπού και όχι η τάση πολώσεώς του. Το διάγραμμα διαιρείται σε τρεις περιοχές. Η περιοχή I ονομάζεται περιοχή αποκοπής. Στην περιοχή αυτή, που το ρεύμα συλλέκτη είναι σχεδόν μηδενικό για κάθε τάση συλλέκτη-εκπομπού, η κρυσταλλοτρίοδος εργάζεται μόνον, όταν χρησιμοποιείται σαν διακόπτης. Η περιοχή II ονομάζεται περιοχή κόρου. Στην περιοχή αυτή, που το ρεύμα συλλέκτη αυξάνει ταχύτατα με την τάση V_{CE} , η κρυσταλλοτρίοδος δεν οδηγείται σχεδόν ποτέ. Τέλος η περιοχή III, που ονομάζεται γραμμική περιοχή, είναι η συνηθισμένη περιοχή λειτουργίας της κρυσταλλοτρίοδου. Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα, όταν το ρεύμα βάσης μηδενιστεί ($I_B=0$, κύκλωμα βάσης ανοιχτό), το ρεύμα συλλέκτη ελαττώνεται, αλλά δεν μηδενίζεται εντελώς· υπάρχει το ρεύμα διαρροής εκπομπού-συλλέκτη, που οφείλεται στους φορείς μειονότητας (I_{CEO}). Κάθε μεταβολή του ρεύματος βάσης (αλλαγή χαρακτηριστικής) επηρεάζει δραστικά το ρεύμα συλλέκτη προκαλώντας σε κάθε αύξηση του πρώτου αντίστοιχη αύξηση του δεύτερου. Αντίθετα η μεταβολή (αύξηση) της τάσης συλλέκτη-εκπομπού προκαλεί πολύ μικρή μεταβολή (αύξηση) του ρεύματος συλλέκτη. Είναι πάντως αξιοπρόσεκτο, ότι η κλίση των χαρακτηριστικών εξόδου αυτών είναι σαφώς μεγαλύτερη από την αντίστοιχη κλίση των χαρακτηριστικών εξόδου της συνδεσμολογίας κοινής βάσης. Αυτό σημαίνει ότι: α) Η αντίσταση εξόδου της συνδεσμολογίας κοινού εκπομπού ($R_{out} = \Delta V_{CE} / \Delta I_C$) είναι μικρότερη από την αντίστοιχη της συνδεσμολογίας κοινής βάσης ($R_{out} = \Delta V_{CB} / \Delta I_C$). β) Η συνδεσμολογία κοινού εκπομπού δεν είναι τόσο ικανοποιητική πηγή σταθερού ρεύματος. Τέλος πρέπει να σημειωθεί, ότι η σύμπτωση





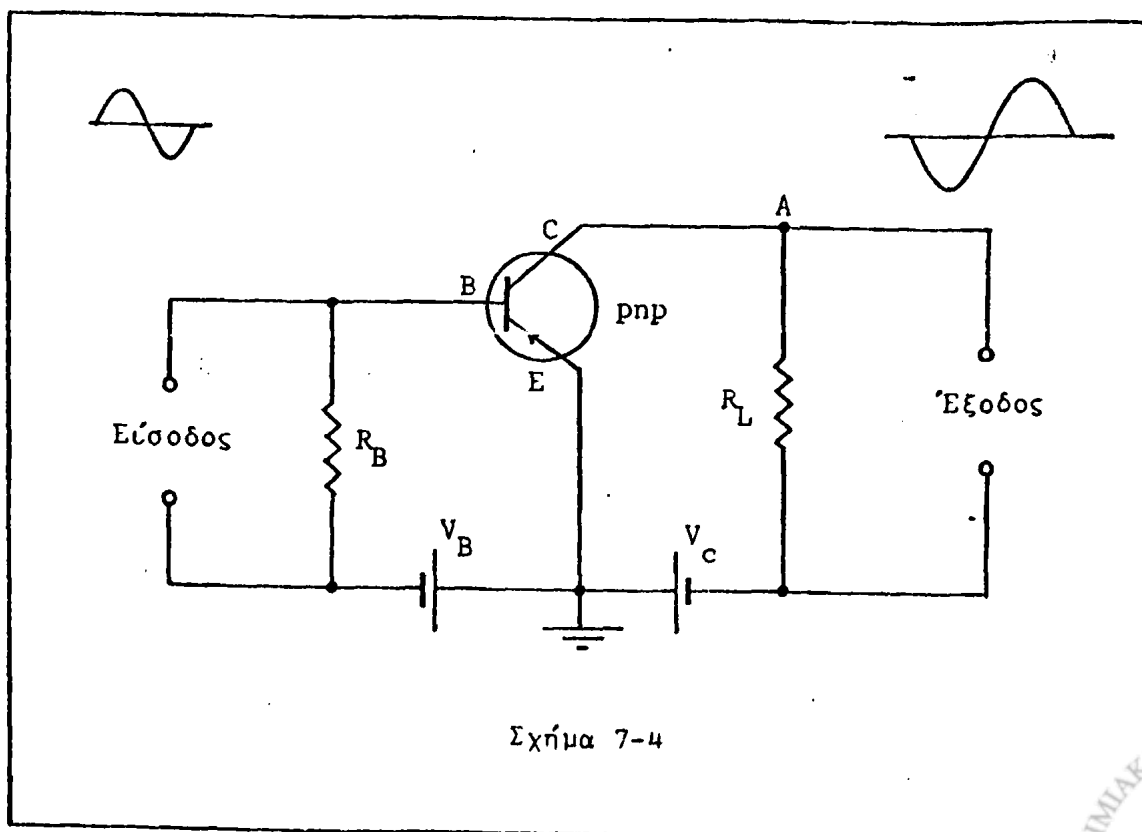
των καμπυλών, που παρατηρείται κοντά στην περιοχή κόρου, οφείλεται αποκλειστικά σε γραφική αδυναμία. Στην πραγματικότητα, όπως δείχνει και το μεγεθυμένο διάγραμμα του σχήματος 7-3.β, πρόκειται για διαφορετικές καμπύλες.

Ενισχυτής με κοινό εκπομπό

Η συνδεσμολογία κοινού εκπομπού χρησιμοποιείται, όπως προγράφηκε ήδη, κύρια σαν ενισχυτής ισχύος. Γίνεται αρχικά αναφορά στη δυνατότητά της για ενίσχυση ρεύματος. Το κύκλωμα εισόδου διαρρέεται γενικά από το ρεύμα βάσης I_B και το κύκλωμα εξόδου από το ρεύμα συλλέκτη I_C (σχήμα 7-4), που κατά τα γνωστά είναι πολύ μεγαλύτερο από το ρεύμα βάσης. Η ακριβής σχέση μεταξύ των ρευμάτων αυτών για κάθε τύπο κρυσταλλοτριόδου περιγράφεται από μια παράμετρο, που ονομάζεται στατική παράμετρος β (d-c β), ορίζεται από τη σχέση:

$$\beta_{d-c} = \frac{I_C}{I_B}$$

και δίδεται από τους κατασκευαστές των κρυσταλλολυσχνιών με την προϋπόθεση ανυπαρξίας αντιστάσεως φόρτου ($R_L = 0$) στο κύκλωμα εξόδου. Συνήθεις τιμές



Σχήμα 7-4



της είναι μεταξύ 20 και 100. Η παράμετρος αυτή σχετίζεται εύκολα με τη γνωστή στατική παράμετρο α , που περιγράφει τη σχέση ρευμάτων εκπομπού και συλλέκτη, ως εξής:

$$\beta_{d-c} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{I_C}{I_E - I_C} = \frac{\alpha I_E}{I_E - \alpha I_E} = \frac{\alpha I_E}{(1-\alpha)I_E} = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$

Από το σμήνος των χαρακτηριστικών εξόδου φαίνεται, ότι για σταθερό ρεύμα βάσης το ρεύμα συλλέκτη δεν παραμένει σταθερό, αλλά αυξάνει όσο αυξάνει η τάση συλλέκτη-εκπομπού. Αυτό σημαίνει απλά, ότι η τιμή της στατικής παραμέτρου β δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από την τάση πόλωσης του συλλέκτη. Άμεση βέβαια συνέπεια της εξάρτησης αυτής είναι το ότι και η τιμή της στατικής παραμέτρου α δεν παραμένει σταθερή, αλλά εξαρτάται από τις τάσεις πόλωσης της κρυσταλλοτρίοδου.

Σημαντικότερη για τη λειτουργία του κυκλώματος σαν ενισχυτή είναι η δυναμική παράμετρος β ($\alpha-c \beta$), που ορίζεται από τη σχέση:

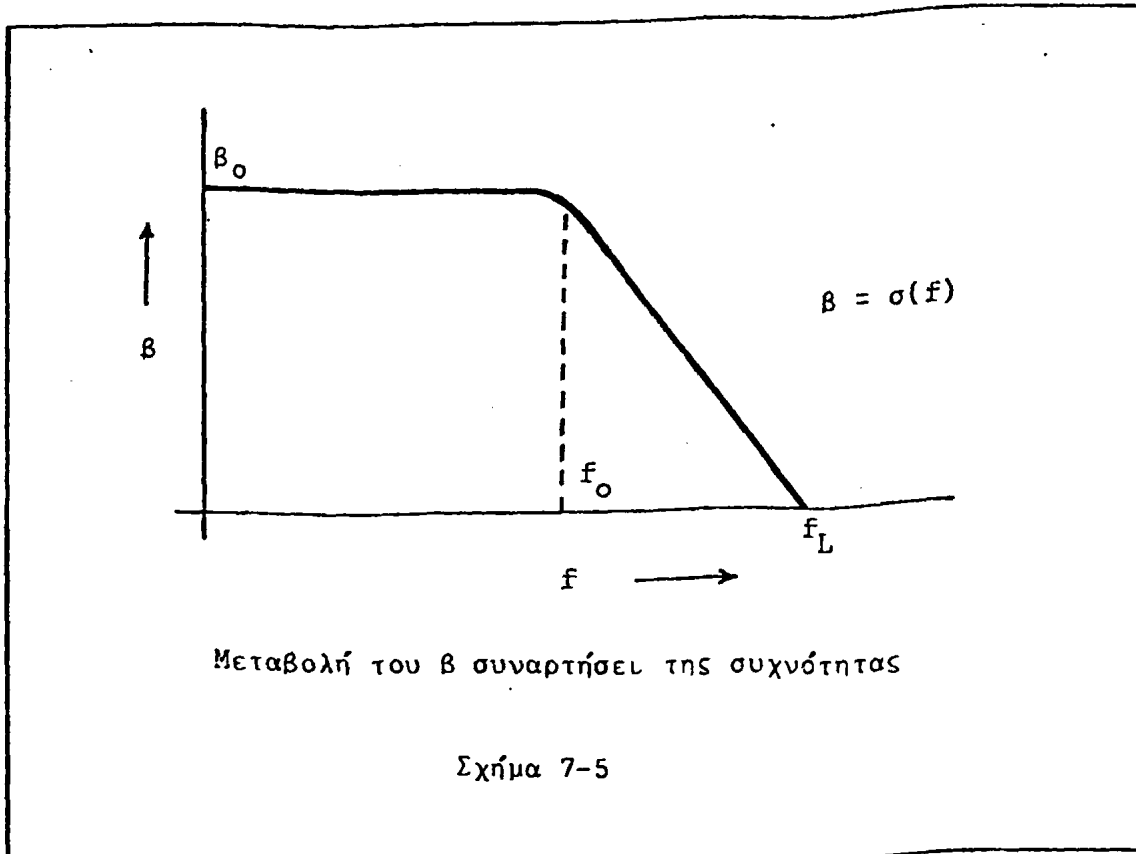
$$\beta_{\alpha-c} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

όπου ΔI_C είναι μια μεταβολή του ρεύματος συλλέκτη και ΔI_B η μεταβολή του ρεύματος βάσης, που την προκαλεί. Η σημασία του $\beta_{\alpha-c}$ οφείλεται στο ότι σχεδόν πάντοτε οι ενισχυτές καλούνται να ενισχύσουν ένα μεταβαλλόμενο μέγεθος (π.χ. σήμα κεφαλής μαγνητοφώνου) και όχι να πολλαπλασιάσουν επί κάποιο παράγοντα ένα σταθερό μέγεθος. Είναι χρήσιμο να αναφερθεί στο σημείο αυτό, ότι το $\beta_{\alpha-c}$ εκτός από την εξάρτησή του από την τάση V_{CE} , που δεν είναι πολύ σημαντική, εξαρτάται ουσιαστικά και από τη συχνότητα του σήματος εισόδου, δηλαδή τη συχνότητα με την οποία πραγματοποιούνται οι μεταβολές του ρεύματος βάσης ΔI_B . Η εξάρτηση αυτή φαίνεται στο σχήμα 7-5. Μέχρι μια ορισμένη συχνότητα f_0 η τιμή του $\beta_{\alpha-c}$ διατηρείται σταθερή, ενώ πέρα από τη συχνότητα αυτή ελαττώνεται σταθερά γεγονός, που σημαίνει, ότι κάθε κρυσταλλοτρίοδος μετά μια συχνότητα παύει να ενισχύει ικανοποιητικά το σήμα εισόδου (ρεύμα κατ' αρχήν και ισχύ κατά συνέπεια).

Από τα προγραφέντα είναι προφανές, ότι η ενίσχυση ρεύματος για τον ενισχυτή κοινού εκπομπού δίδεται από τη σχέση:

$$A_i = \beta_{\alpha-c}$$





Αντίστοιχα η ενίσχυση τάσης δίδεται από τη σχέση:

$$A_V = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} = \frac{\Delta I_C \cdot R_L}{\Delta I_B \cdot R_{in}} = \beta_{\alpha-c} \cdot \frac{R_L}{R_{in}}$$

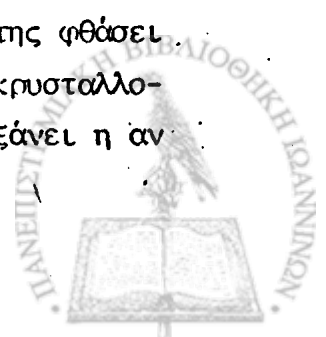
όπου R_L η αντίσταση φόρτου και R_{in} η αντίσταση εισόδου της συνδεσμολογίας. Η ενίσχυση τάσης λαμβάνει σημαντικές τιμές, επειδή και οι δύο παράγοντες του γινομένου υπολογισμού της είναι μεγάλοι ($\beta_{\alpha-c} \gg 1$ και $R_L > R_{in} \sim R_L/R_{in} > > 1$).

Με βάση τα παραπάνω η ενίσχυση ισχύος προκύπτει ίση προς:

$$A_p = A_V \cdot A_i = \beta_{\alpha-c} \cdot \beta_{\alpha-c} \cdot R_L/R_{in} = \beta^2 \cdot R_L/R_{in}$$

και είναι ευνόητο, ότι έχει εξαιρετικά μεγάλες τιμές.

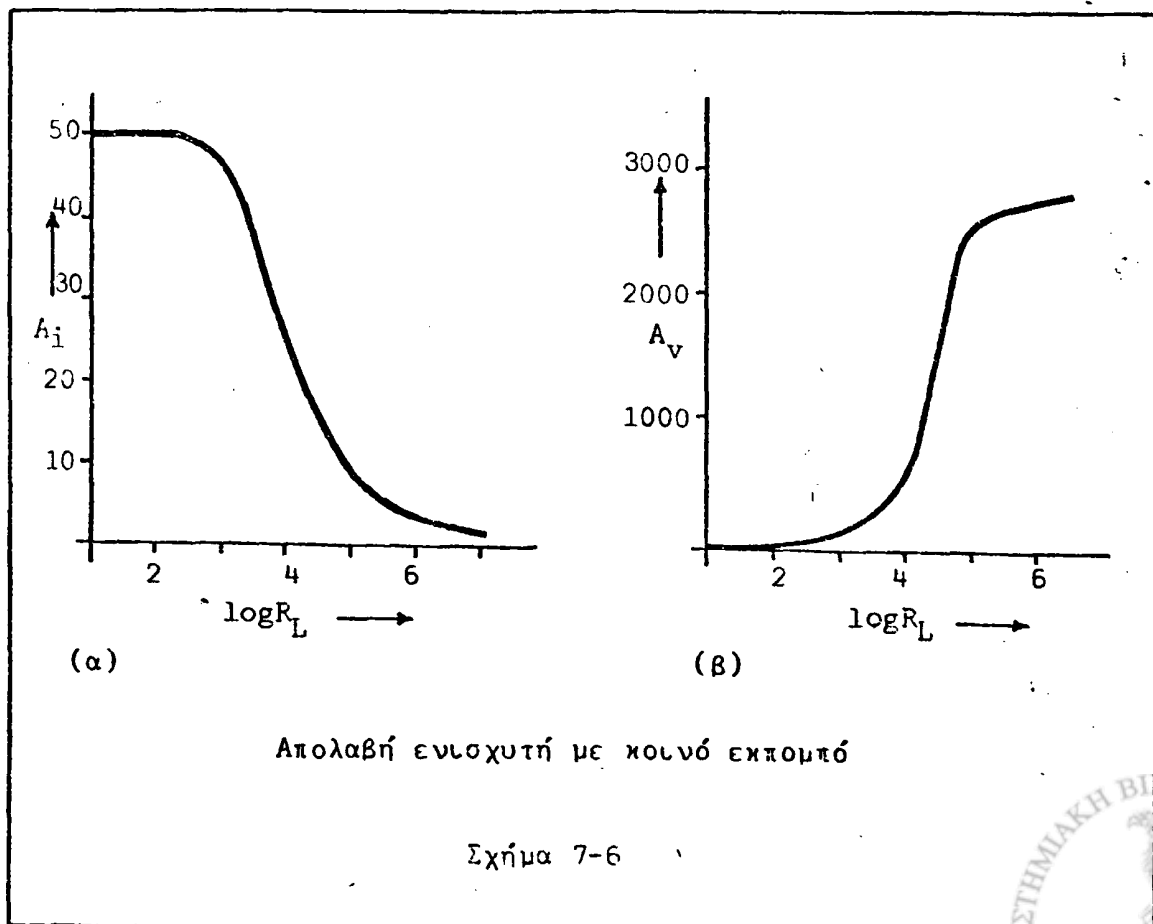
Όσον αφορά στην επίδραση της αντιστάσεως φόρτου και των μεταβολών της στις επιδόσεις του ενισχυτικού κυκλώματος αναφέρονται τα εξής: Η αντίσταση φόρτου επηρεάζει το ρεύμα συλλέκτη, ιδιαίτερα όταν η τιμή της φθάσει και ξεπεράσει την τάξη μεγέθους της αντιστάσεως, που η ίδια η κρυσταλλο- τρίδος παρεμβάλλει στη διέλευση του ρεύματος αυτού. Τότε όσο αυξάνει η αν-



τίσταση φόρτου ελαττώνεται το ρεύμα συλλέκτη (ρεύμα κυκλώματος εξόδου) με αποτέλεσμα να ελαττώνεται η απολαβή ρεύματος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 7-6.α. Αντίστοιχα η απολαβή τάσης αρχικά αυξάνει, όσο αυξάνει η R_L και κατόπιν σχεδόν σταθεροποιείται. Αυτό αιτιολογείται εύκολα, αν ληφθεί υπ' όψη, ότι η τάση εξόδου ισούται προς το γινόμενο

$$V_{out} = I_C \cdot R_L$$

και για μικρές τιμές του R_L το I_C παραμένει σχεδόν αμετάβλητο, με συνέπεια κάθε αύξηση του R_L να προκαλεί ανάλογη αύξηση του V_{out} , ενώ για μεγάλες τιμές του R_L το ρεύμα I_C επηρεάζεται σημαντικά από τις μεταβολές του (R_L) και έτσι κάθε αύξηση του φόρτου αντισταθμίζεται από αντίστοιχη μείωση του ρεύματος συλλέκτη, με αποτέλεσμα η τάση εξόδου και η απολαβή τάσης σχεδόν να σταθεροποιούνται, όπως φαίνεται και στο σχήμα 7-6.β. Συνάγεται λοιπόν άμεσα από τα διαγράμματα, ότι για την επίτευξη της μέγιστης δυνατής ενισχύσεως ισχύος προτιμώτερες είναι οι μέσες τιμές αντιστάσεως φόρτου (μεταξύ του 10^3 και $10^5 \Omega$), για τις οποίες και οι δύο απολαβές έχουν ικανοποιητικά

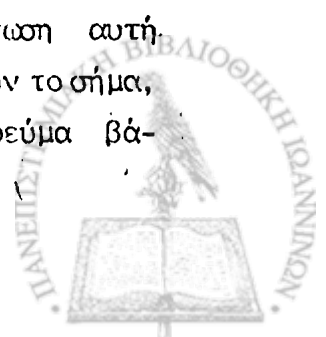


υψηλές τιμές.

Ο ενισχυτής με κοινό εκπομπό προκαλεί αναστροφή της φάσης του σήματος εισόδου, δηλαδή δημιουργεί μεταξύ των σημάτων εισόδου και εξόδου διαφορά φάσης $\varphi=180^\circ$. Η συμπεριφορά αυτή ερμηνεύεται εύκολα. Έστω το κύκλωμα του σχήματος 7-4, στην είσοδο του οποίου εφαρμόζεται προς ενίσχυση μια ημιτονοειδής τάση. Κατά το πρώτο μισό της περιόδου του σήματος (θετική ημιπερίοδος) η τάση της πηγής του σήματος (π.χ. γεννήτριας AF) αντιτίθεται στην τάση πολώσεως της βάσης. Έτσι η συνισταμένη πόλωση βάσης ελαττώνεται με αποτέλεσμα να ελαττώνεται το ρεύμα βάσης και κατ'ακολουθία το ρεύμα συλλέκτη. Ελαττώνεται κατά συνέπεια και η πτώση τάσης κατά μήκος της αντιστάσεως φόρτου R_L . Αυτό σημαίνει, ότι το δυναμικό του σημείου A (δυναμικό συλλέκτη) γίνεται αρνητικότερο από ότι ήταν πριν την εφαρμογή του σήματος. Ο συλλέκτης δηλαδή σε όλο το πρώτο μισό της περιόδου, που το σήμα είναι θετικό, είναι αρνητικότερος απ'ότι πριν την εφαρμογή του σήματος. Άρα το σήμα εξόδου, που λαμβάνεται στα άκρα της R_L (μεταξύ συλλέκτη και γης) είναι αρνητικό.

Αντίστοιχα κατά το δεύτερο μισό της περιόδου, που το σήμα εισόδου είναι αρνητικό, η τάση της πηγής του προστίθεται στην τάση πολώσεως της βάσης και η συνισταμένη πόλωση αυξάνει με επακόλουθο την αύξηση του ρεύματος βάσης και του ρεύματος συλλέκτη. Αυξάνει έτσι η πτώση τάσης κατά μήκος της R_L και το δυναμικό του σημείου A γίνεται θετικότερο (λιγότερο αρνητικό) απ'ότι πριν την εφαρμογή του σήματος. Το σήμα εξόδου λοιπόν στο δεύτερο μισό της περιόδου είναι θετικό. Αυτή όμως η αντίθεση τάσεων μεταξύ των σημάτων εισόδου και εξόδου δεν εκφράζει τίποτε άλλο παρά μια διαφορά φάσης 180° .

Επειδή συχνά συμβαίνει ειδικά σε πειραματικές διατάξεις να οδηγηθεί ένας ενισχυτής εκτός της γραμμικής περιοχής λειτουργίας, είναι σκόπιμο να συζητηθεί περιληπτικά τι συμβαίνει στις περιπτώσεις αυτές. Αν λοιπόν στην είσοδο του ενισχυτή (σχήμα 7-4) εφαρμοσθεί προς ενίσχυση σήμα πολύ μεγάλου πλάτους, τότε μπορεί να συμβούν τα εξής: Κατά τη θετική ημιπερίοδο είναι δυνατόν η τάση του σήματος να αντισταθμίσει (εκμηδενίσει) την τάση πολώσεως της βάσης (πηγή V_B), οπότε το ρεύμα βάσης μηδενίζεται και σχεδόν το ίδιο συμβαίνει στο ρεύμα συλλέκτη. Η κρυσταλλοτρίοδος οδηγείται τότε σε κατάσταση αποκοπής (περιοχή I του σχήματος 7-3.α) και οι θετικές κορυφές του σήματος εισόδου (αρνητικές του σήματος εξόδου) ψαλλιδίζονται, εφ'όσον περαιτέρω ελάττωση του δυναμικού συλλέκτη είναι αδύνατη. Ο ενισχυτής στην περίπτωση αυτή παραμορφώνει. Αντίστοιχα κατά την αρνητική ημιπερίοδο είναι δυνατόν το σήμα, που επαυξάνει την ολική πόλωση βάσης, να προκαλεί τόσο ισχυρό ρεύμα βά-



σης, που η πτώση τάσης κατά μήκος της αντίστασης φόρτου R_L λόγω του ανάλογα αυξημένου ρεύματος συλλέκτη να εξισωθεί προς την τάση της πηγής V_C . Στην περίπτωση αυτή η κρυσταλλοτρίοδος οδηγείται στην περιοχή κόρου (περιοχή II του σχήματος 7-3.α), το σήμα εξόδου είναι αδύνατο να αυξηθεί άλλο, οπότε ψαλλιδίζονται οι θετικές του κορυφές. Και στην περίπτωση αυτή ο ενισχυτής παραμορφώνει. Ανάλογα με τις τιμές των τάσεων V_B και V_C και των αντιστάσεων εισόδου και φόρτου μπορεί αυξανόμενου του σήματος εισόδου να εμφανισθεί πρώτα η ψαλλίδιση των θετικών ή αρνητικών κορυφών ή και των δύο ταυτόχρονα. Σε όλες πάντως τις εφαρμογές λαμβάνεται πρόνοια να μην οδηγούνται οι ενισχυτές σε οριακές καταστάσεις (κόρου-αποκοπής), ώστε να μην παραμορφώνουν.

Απαραίτητες γνώσεις

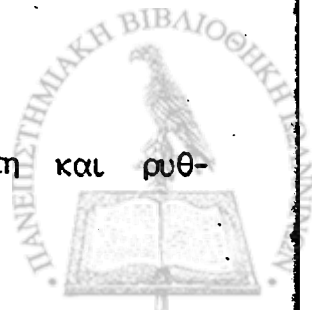
Δ. Μ. Μηλιώτη: Η Φυσική των Κρυσταλλολυχνιών, σελ. 273.

Χρησιμοποιούμενα όργανα

1. Δύο τροφοδοτικά χαμηλής τάσης
2. Παλμογράφος
3. Γεννήτρια ακουστικών συχνοτήτων
4. Ηλεκτρονικό βολτόμετρο
5. Δύο πολύμετρα
6. Αυτομετασχηματιστής (Variac)
7. Κρυσταλλοτρίοδος npn
8. Κρυσταλλοδίοδος
9. Αντιστάσεις: $100\Omega-0.5W$, $270\Omega-2W$, $10k\Omega-0.5W$
10. Ποτενσιόμετρα: $200\Omega-0.5W$, $1k\Omega - 2W$, $100k\Omega-0.5W$
11. Πυκνωτής $0.1\mu F$.

Πείραματικό μέρος

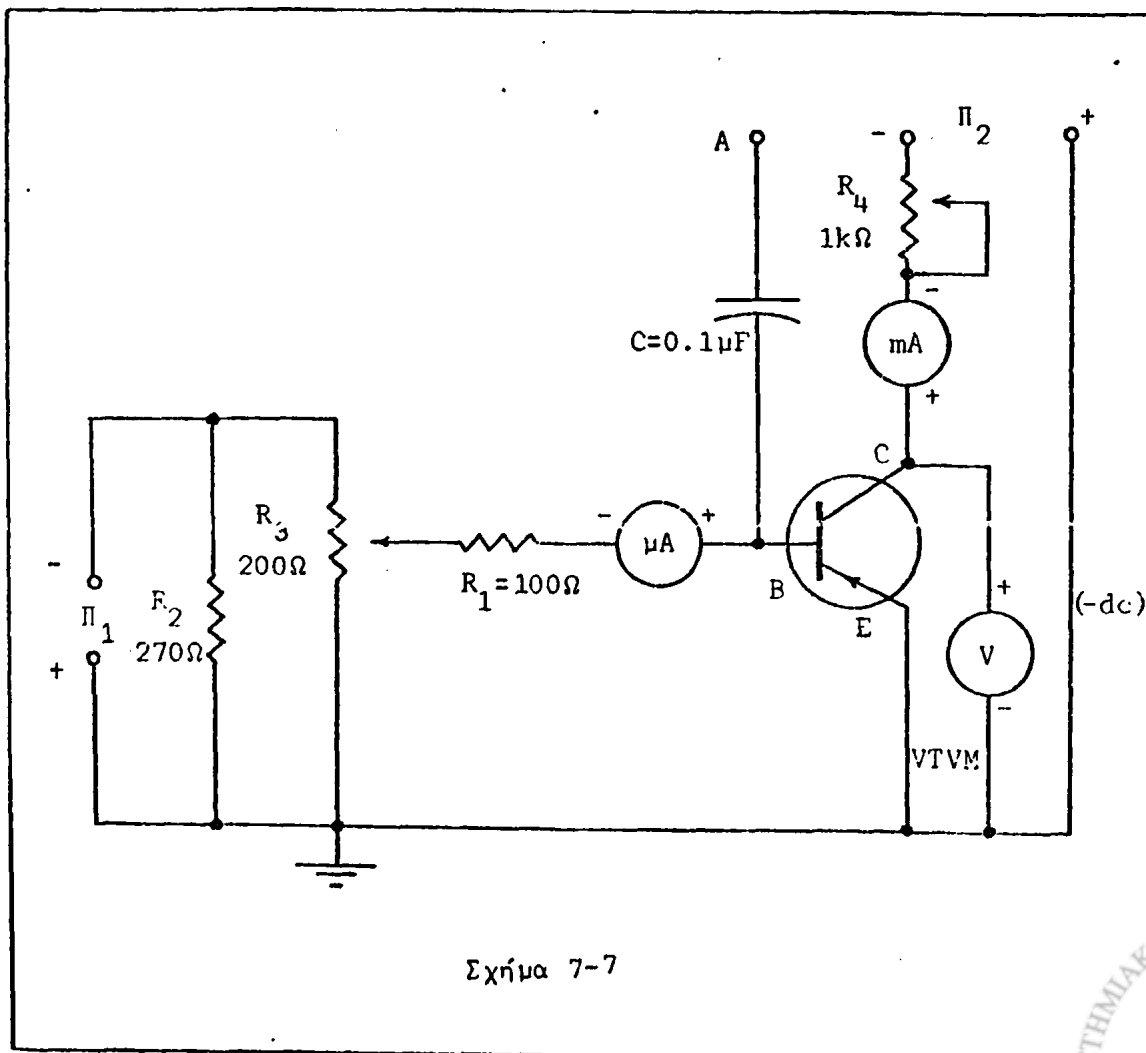
1. Συνδεσμολογήστε το ποτενσιόμετρο $R_4 = 1k\Omega$ σαν ροοστάτη και ρυθ-



μίστε το στην τιμή των 500Ω με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού βολτομέτρου. Πραγματοποιείτε το κύκλωμα του σχήματος 7-7. Ρυθμίστε την πηγή τροφοδοσίας Π_1 για τάση $V_1 = 5V$.

2. Ρυθμίστε με το ποτενσιόμετρο R_3 το ρεύμα βάσης στην τιμή $I_B = 0\mu A$. Κατόπιν ρυθμίστε την τάση V_2 του τροφοδοτικού Π_2 έτσι, ώστε η τάση συλλέκτη εκπομπού V_{CE} μετρούμενη με το ηλεκτρονικό βολτόμετρο να έχει τιμή $V_{CE} = 1V$. Σημειώστε την τιμή του ρεύματος συλλέκτη και συνεχίστε για τις υπόλοιπες τιμές του ρεύματος βάσης του παρακάτω πίνακα. Συχνά για τη λήψη των μετρήσεων αυτών είναι απαραίτητο να επαναλαμβάνονται διαδοχικά πολλές ρυθμίσεις της τάσης του τροφοδοτικού Π_2 και του ποτενσιόμετρου R_3 , επειδή κάθε μεταβολή του I_B επηρεάζει και απορρυθμίζει την τάση V_{CE} και αντίστροφα.

3. Επαναλάβετε τα ίδια για τάση συλλέκτη εκπομπού $V_{CE} = 10V$ και καταχωρείστε τα αποτελέσματα στον ίδιο πίνακα. Χαράξτε στο ίδιο διάγραμμα τις καμπύλες $I_C = f(I_B)$ και για τις δύο τάσεις πολώσεως συλλέκτη και προσδιορίστε από την κλίση τους τη δυναμική παράμετρο $\beta_{\alpha-C}$. Τί συμπέρασμα συνάγετε;



Σχήμα 7-7



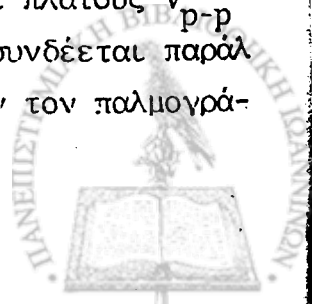
	$V_{CE} = 1V$	$V_{CE} = 10V$
I_B μA	I_C mA	I_C mA
0		
10		
20		
30		
40		
50		
60		
80		
100		

4. Για σταθερή τιμή ρεύματος βάσης $I_B = 20\mu A$ λάβετε μετρήσεις για τη χάραξη της χαρακτηριστικής εξόδου $I_C = f(I_{CE})$ και καταχωρείστε τις στον παρακάτω πίνακα.

5. Επαναλάβετε τα ίδια για ρεύμα βάσης $I_B = 40\mu A$. Χαράξτε και τις δύο καμπύλες στο ίδιο διάγραμμα και φέρτε την ευθεία φόρτου, που αντιστοιχεί σε τάση τροφοδοσίας $V_2 = 6V$ και αντίσταση φόρτου $R_L = 500\Omega$. Υπολογίστε πόση θα είναι η μεταβολή της τάσης εξόδου, αν ένα σήμα στην είσοδο του κυκλώματος προκαλέσει μεταβολή στο ρεύμα βάσης από $20\mu A$ στα $40\mu A$.

$\Delta V_{out} =$	V
--------------------	-----

6. Συνδέστε τη γεννήτρια ακουστικών συχνοτήτων μεταξύ βάσης και εκπομπου (σημείο A). Για ρεύμα βάσης $I_B = 40\mu A$ και τάση συλλέκτη - εκπομπού $V_{CE} = 1V$ εφαρμόστε στην είσοδο σήμα συχνότητας $f=1000Hz$ και πλάτους $V_{p-p} = 50mV$ μετρημένο με τον παλμογράφο, που για το σκοπό αυτό συνδέεται παράλληλα στην έξοδο της γεννήτριας συχνοτήτων. Συνδέστε κατόπιν τον παλμογράφο



	$I_B = 20\mu A$	$I_B = 40\mu A$
V_{CE} V	I_c mA	I_c mA
0		
1		
2		
3		
4		
6		
10		

φο μεταξύ συλλέκτη και γης και μετρείστε το σήμα εξόδου. Υπολογίστε την απολαβή τάσης A_v .

$V_{out} =$ mV	$A_v =$
----------------	---------

7. Μετρείστε την τάση V_{BE} με το ηλεκτρονικό βολτόμετρο και το ρεύμα συλλέκτη I_c . Υπολογίστε τις αντιστάσεις εισόδου R_{in} και εξόδου R_{out} του κυκλώματος και ακολούθως την απολαβή A_v . Συγκρίνετε την τιμή της με την πειραματική τιμή A_v .

$V_{BE} =$ mV	$I_c =$ mA
$R_{in} = \frac{V_{BE}}{I_B} =$ kΩ	$R_{out} = \frac{V_{CE}}{I_c} =$ kΩ
$A_v = \beta \frac{R_{out}}{R_{in}} =$	

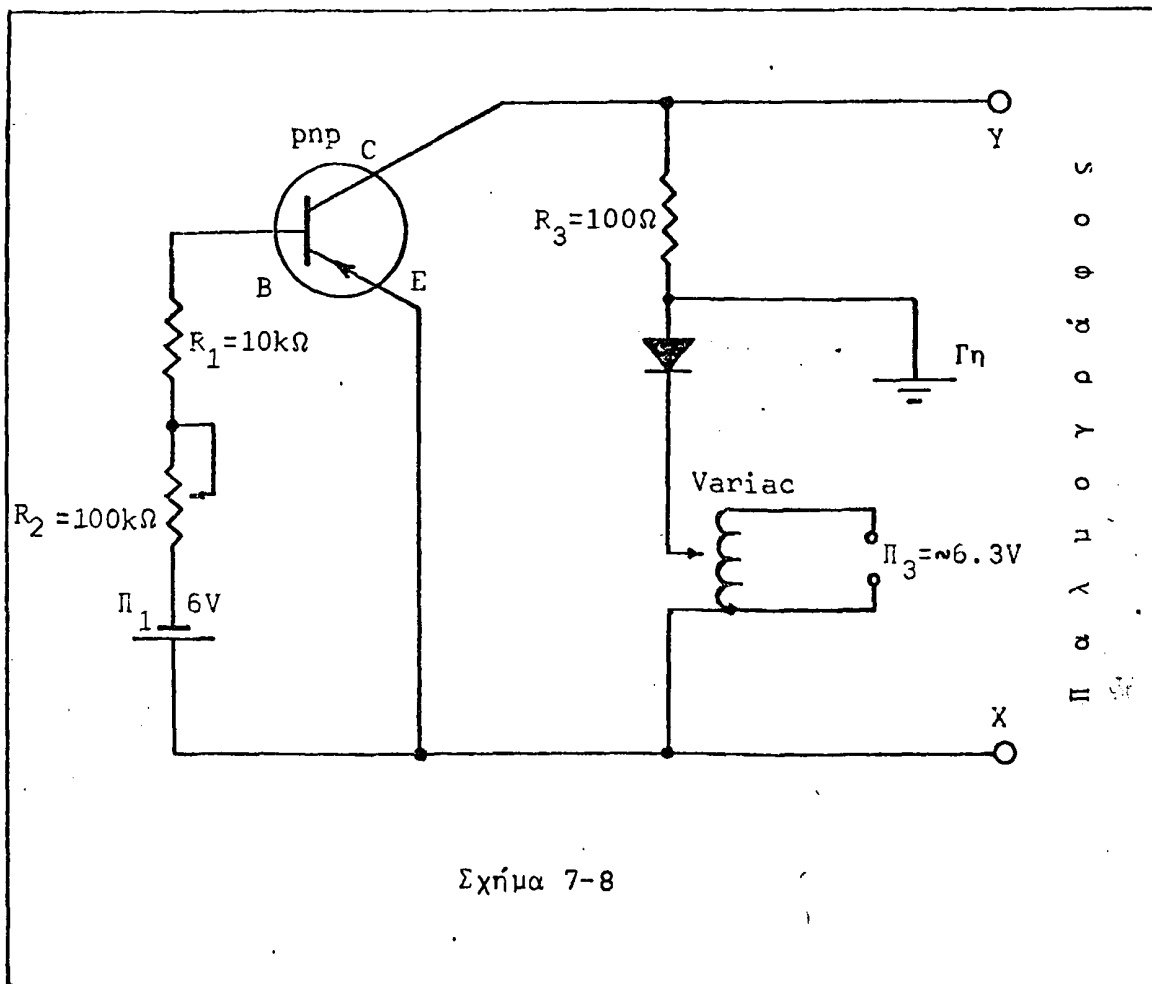
8. Για ποιά τιμή τάσης εισόδου παραμορφώνει ο ενισχυτής; Τι είδους πα



ραμόρφωση υπεισάγει;

$$V_{in} = \quad \text{mV}$$

9. Το παρακάτω κύκλωμα χρησιμοποιείται για την απεικόνιση στον παλμογράφο της χαρακτηριστικής εξόδου της συνδεσμολογίας κοινού εκπομπού. Πραγματοποιείτε το και παρατηρείτε τη χαρακτηριστική. Τι παρατηρείτε μεταβάλλοντας την τιμή αντίστασης του ροοστάτη των $10\text{k}\Omega$; Εξηγείστε τη λειτουργία του κυκλώματος.



Ερωτήσεις

1. Ποιά μεταβολή επηρεάζει περισσότερο την τάση εξόδου στη συνδεσμολογία κοινού εκπομπού, μια μεταβολή του ρεύματος βάσης ή μια μεταβολή της τάσης πολώσεως συλλέκτη.

2. Πώς επηρεάζεται η αντίσταση συλλέκτη-εκπομπού ενός κυκλώματος κοινού εκπομπού, αν το ρεύμα βάσης αυξηθεί;
3. Με ποιούς τρόπους μπορεί να αυξηθεί η απολαβή τάσης σε ένα ενισχυτή κοινού εκπομπού;
4. Πώς είναι δυνατόν μια κρυσταλλοτρίοδος να δράσει σαν ροοστάτης;
5. Τι θα προτιμούσατε να μετρήσετε προκειμένου να προσδιορίσετε τη στατική παράμετρο β_{d-c} μιας κρυσταλλοτριόδου τα I_E και I_C ή τα I_B και I_C ; Αιτιολογήστε την απάντησή σας.
6. Στο κύκλωμα του σχήματος 7-8 τι μεταβολή προκαλεί στην εικόνα της χαρακτηριστικής μια μεταβολή της τάσης του αυτομετασχηματιστή (Variac).



ΑΣΚΗΣΗ 8ΓΡΑΜΜΕΣ ΦΟΡΤΟΥΚΑΜΠΥΛΕΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΕΩΣ ΙΣΧΥΟΣΕισαγωγή

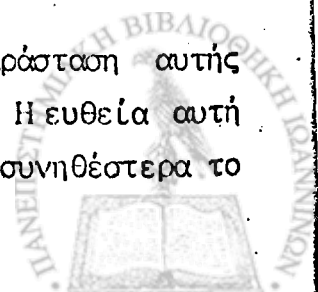
Η άσκηση αυτή δεν έχει πειραματικό μέρος, γιά τη διεξαγωγή του οποίου να απαιτείται οργανολογία, πείραμα και μετρήσεις. Το πειραματικό της μέρος περιλαμβάνει επεξεργασία των στοιχείων, που συνήθως παρέχουν γιά μιά κρυσταλλολυχνία οι κατασκευαστές της, και συναγωγή διαφόρων χρήσιμων συμπερασμάτων. Όπως είναι γνωστό κατά τη σχεδίαση ενός ενισχυτή με κρυσταλλολυχνίες, προκειμένου να προσδιοριστούν διάφορες απαραίτητες παράμετροι και το σημείο λειτουργίας του, μπορεί να ακολουθηθεί είτε η αναλυτική μέθοδος, είτε η γραφική. Επειδή η αναλυτική μέθοδος των ισοδύναμων κυκλωμάτων περιέχει πληθώρα υπολογισμών, προτιμάται συνήθως η γραφική μέθοδος. Με την άσκηση λοιπόν αυτή επιδιώκεται εξοικείωση με αυτή ακριβώς τη γραφική μέθοδο προσδιορισμού του σημείου λειτουργίας και των παραμέτρων ενός ενισχυτή.

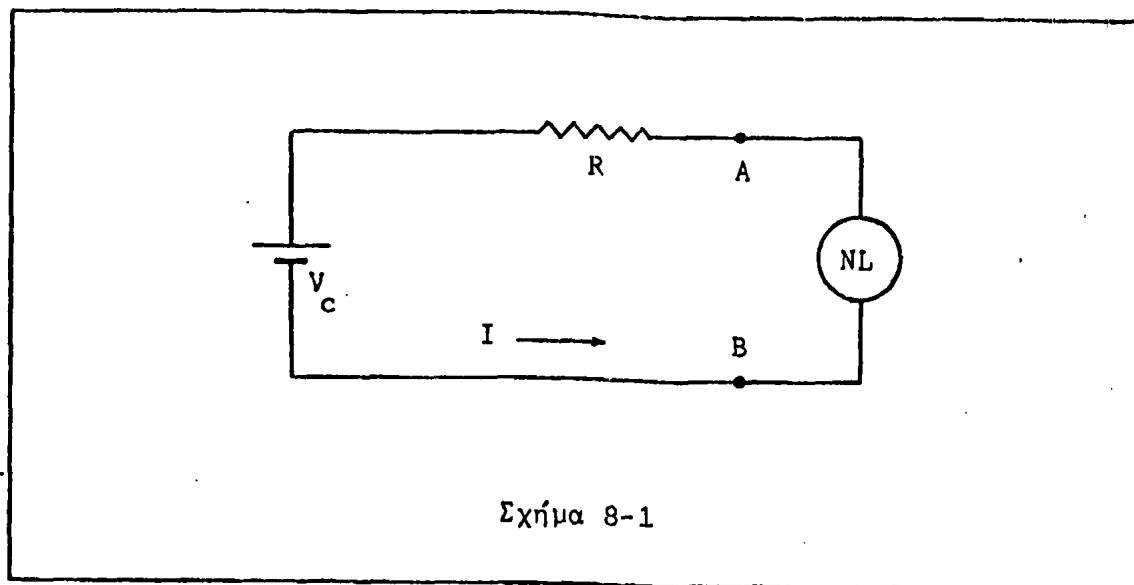
Γραμμή φόρτου

Υπενθυμίζεται αρχικά η έννοια της γραμμής φόρτου. Έστω λοιπόν το κύκλωμα του σχήματος 8-1. Το κύκλωμα αυτό περιλαμβάνει μιά πηγή συνεχούς, ένα γραμμικό στοιχείο R, όπως π.χ. μιά ωμική αντίσταση, και ένα μη γραμμικό στοιχείο NL, όπως π.χ. μιά κρυσταλλολυχνία, λυχνία κενού κλπ. Οποιοδήποτε όμως και αν είναι το μη γραμμικό στοιχείο, θα ισχύει γιά τη διαφορά δυναμικού V στα άκρα του A και B η σχέση:

$$V = V_c - I \cdot R$$

όπου V_c η τάση στα άκρα της πηγής τροφοδοσίας. Η γραφική παράσταση αυτής της εξίσωσης με μεταβλητές τα V και I είναι ευθεία γραμμή. Η ευθεία αυτή γραμμή χαράσσεται στο ίδιο διάγραμμα με τη χαρακτηριστική ή συνηθέστερα το





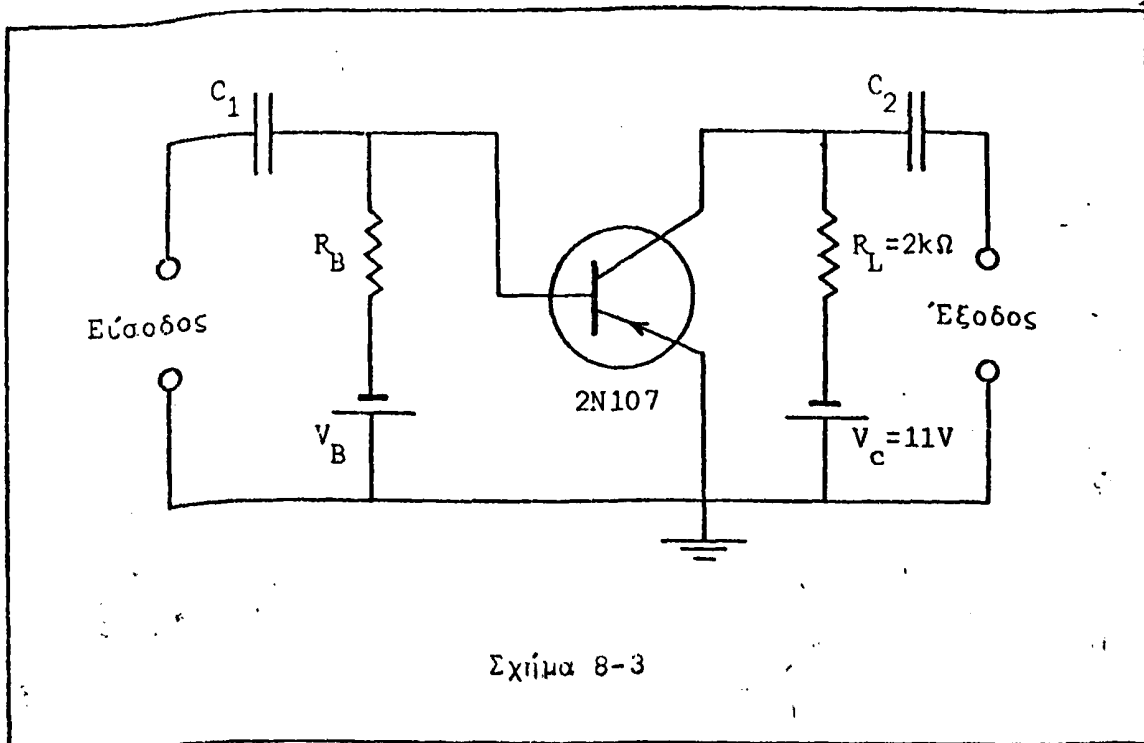
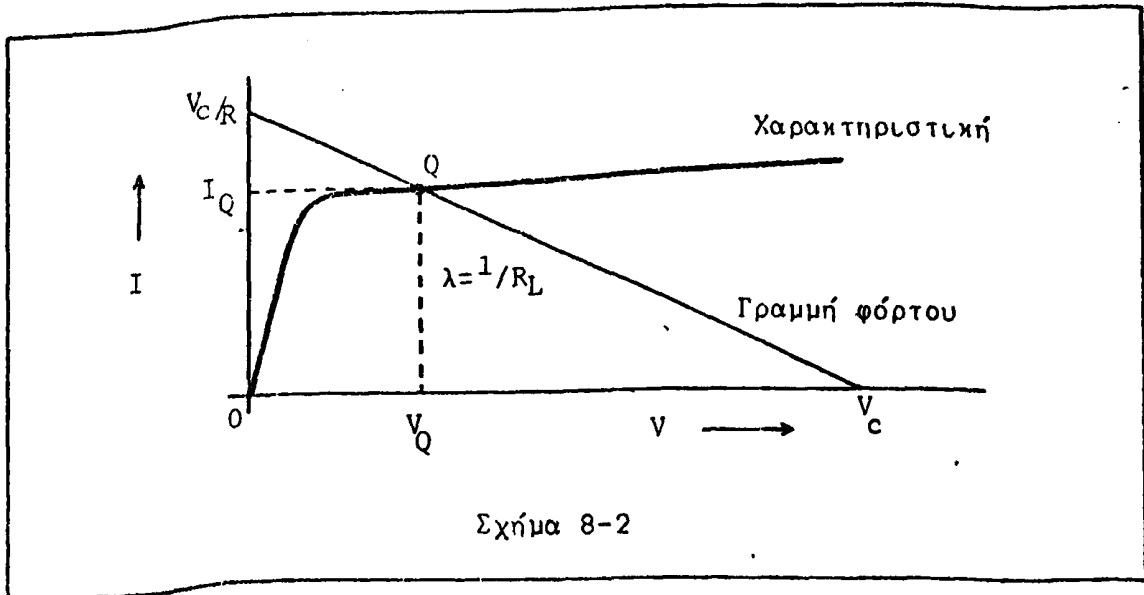
Σχήμα 8-1

σμήνος των χαρακτηριστικών του μη γραμμικού στοιχείου (άξονες $V-I$) και ονομάζεται γραμμή φόρτου. Η εξίσωση αυτή έχει δύο μεταβλητές-αγνώστους και έτσι είναι αδύνατο να επιλυθεί και να προσδιοριστεί με τη βοήθειά της μόνον το ρεύμα του κυκλώματος ή η τάση στα άκρα του μη γραμμικού στοιχείου. Επειδή όμως κάθε χαρακτηριστική καμπύλη του μη γραμμικού αυτού στοιχείου αποτελεί ουσιαστικά τη γραφική παράσταση μιάς εξίσωσης, που αφορά στο κύκλωμα αυτό, προκύπτει, ότι η τομή της με τη γραμμή φόρτου ορίζει ένα σημείο, από τις συντεταγμένες του οποίου μπορούν να συναχθούν το ρεύμα του κυκλώματος και η κατανομή των τάσεων μεταξύ γραμμικού και μη γραμμικού καταναλωτή (σχήμα 8-2). Το σημείο αυτό συμβολίζεται συνήθως με το γράμμα Q και ονομάζεται σημείο λειτουργίας ή σημείο ηρεμίας υπό συνεχή πόλωση. Η τεταγμένη του I_Q δίνει το ρεύμα του κυκλώματος και η τεταγμένη του V_Q την τάση στα άκρα του μη γραμμικού στοιχείου.

Δίδεται τώρα με τη βοήθεια ενός συγκεκριμένου παραδείγματος η μεθοδολογία χαράξεως της γραμμής φόρτου και ο γραφικός τρόπος προσδιορισμού των βασικών στοιχείων λειτουργίας ενός κυκλώματος ενισχυτή με κρυσταλλοτρίοδο σε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού. Έστω λοιπόν το κύκλωμα του σχήματος 8-3. Θεωρώντας αρχικά, ότι στην είσοδό του δεν εφαρμόζεται κανένα σήμα, για το κύκλωμα του συλλέκτη θα ισχύει βάσει του δεύτερου κανόνα του Kirchhoff η σχέση:

$$V_c = V_{CE} + I_c \cdot R_L$$



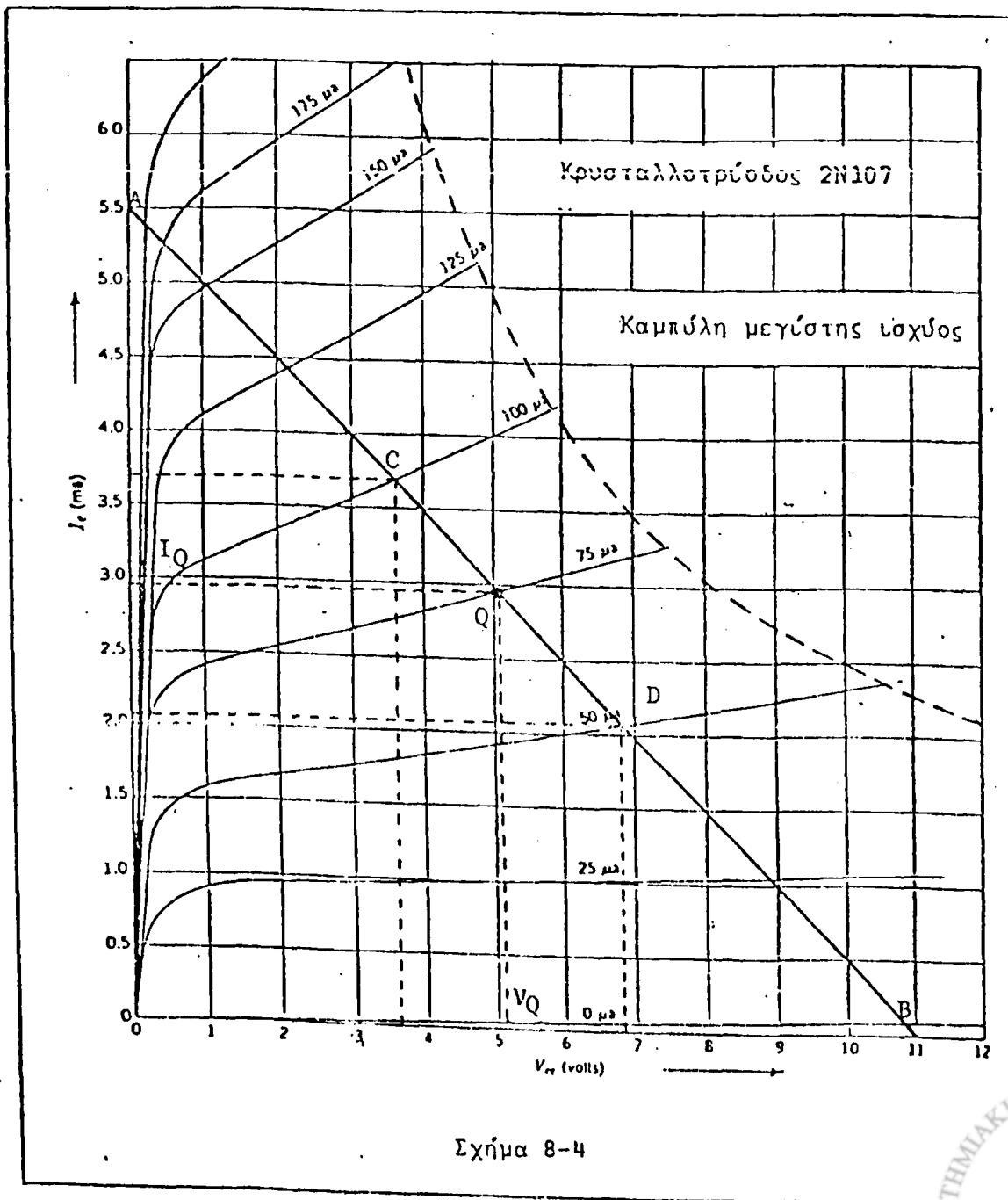


Χωρίζοντας τις μεταβλητές η εξίσωση αυτή γράφεται:

$$I_C = \frac{1}{R_L} \cdot V_{CE} + \frac{V_C}{R_L}$$

Σύμφωνα με όσα αναφέρονται παραπάνω, η εξίσωση αυτή, όπως και η προηγούμενή της, είναι η αναλυτική έκφραση της γραμμής φόρτου. Για τη χάραξη της είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν δύο σημεία της, εφ' όσον πρόκειται για

ευθεία. Τα σημεία αυτά προσδιορίζονται ως εξής: Θεωρείται αρχικά μηδενικό το ρεύμα του κυκλώματος $I_C = 0$, οπότε από την τελευταία σχέση προκύπτει για το V_{CE} η τιμή: $V_{CE} = V_C = 11V$. Ένα σημείο λοιπόν προσδιορίζει το ζεύγος των συντεταγμένων $(11V, 0mA)$. Κατόπιν θεωρείται μηδενική η διαφορά δυναμικού εκπομπού-συλλέκτη $V_{CE} = 0$, οπότε από την ίδια σχέση προκύπτει για το I_C η τιμή: $I_C = V_C/R_L = 11V/2k\Omega = 5.5mA$. Το ζεύγος συντεταγμένων $(0V, 5.5mA)$ προσδιορίζει το άλλο σημείο της γραμμής, που χαράσσεται εύκολα πλέον στο ίδιο διάγραμμα με το σμήνος των χαρακτηριστικών συλλέκτη της κρυσταλλοτρίοδου 2N107 (σχήμα 8-4).



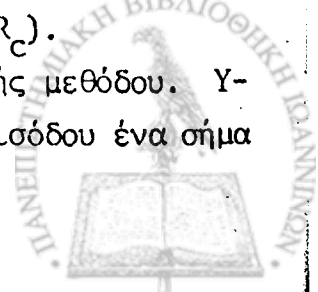
Η κλίση της γραμμής φόρτου παρέχει την τιμή της αντιστάσεως φόρτου ($\lambda = -1/R_L$) που είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο μικρότερη είναι η κλίση.

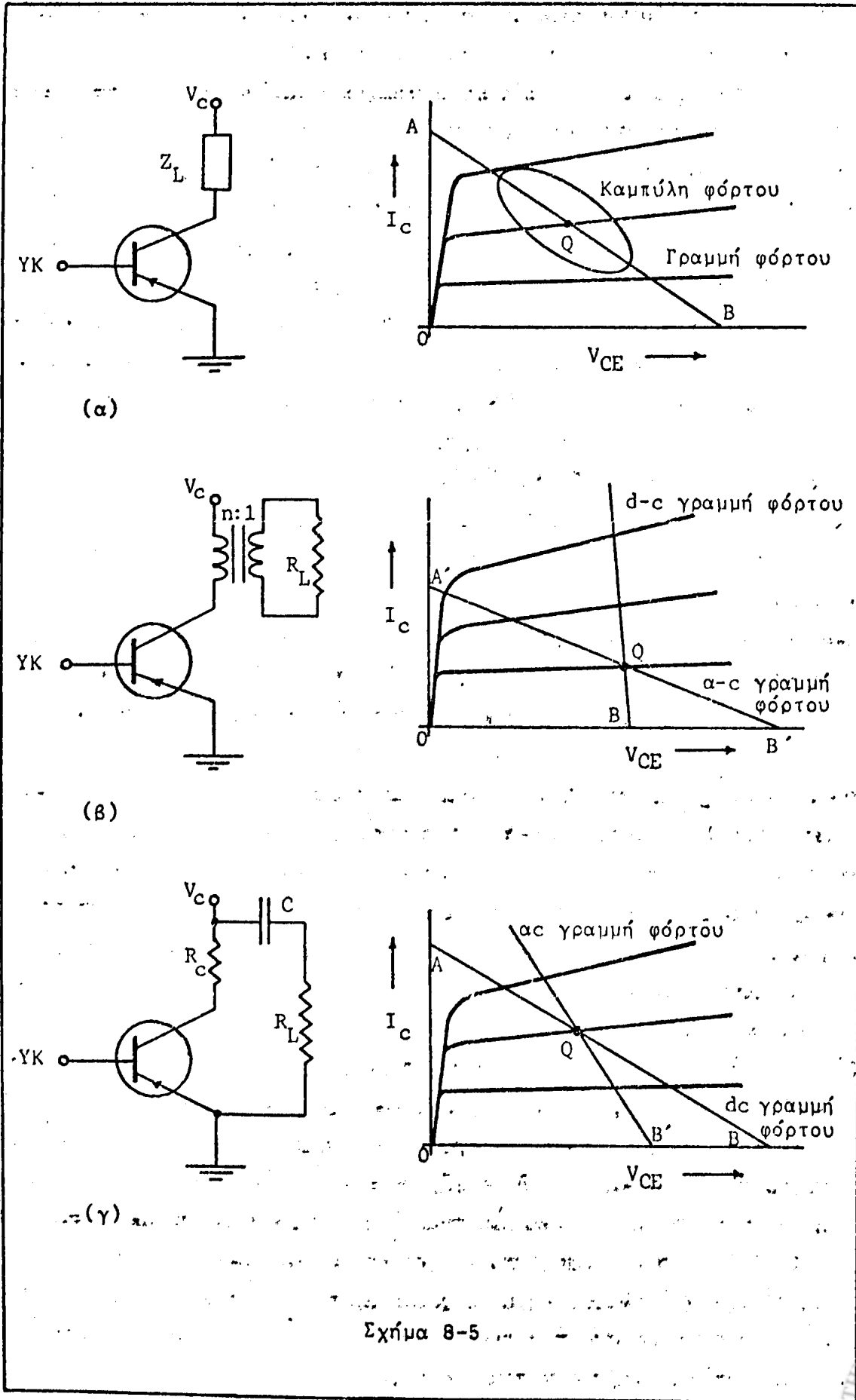
Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα υπάρχουν κατ'αρχήν άπειρα σημεία λειτουργίας για την κρυσταλλοτρίοδο. Η συγκεκριμένη τιμή του ρεύματος βάσης και κατά συνέπεια και η χαρακτηριστική, πάνω στην οποία εργάζεται η κρυσταλλοτρίοδος, καθορίζεται από την τάση V_B και την αντίσταση πολώσεως R_B . Στην πράξη πάντως οι σχεδιαστές ενισχυτικών κυκλωμάτων αποφεύγουν να οδηγούν την κρυσταλλοτρίοδο σε οριακές καταστάσεις λειτουργίας, όπως η κατάσταση αποκοπής ($I_C = 0$) ή η κατάσταση κόρου ($I_C = V_C/R_L$). Σχεδόν πάντα φροντίζουν το σημείο λειτουργίας συνεχούς να βρίσκεται περίπου στο μέσο της ευθείας φόρτου και πάνω στα ευθύγραμμα τμήματα των χαρακτηριστικών, όπως σημειώνεται και στο σχήμα 8-4. Η επιλογή αυτή επιτρέπει τη μεγιστοποίηση πλάτους του σήματος εισόδου, που ενισχύεται χωρίς παραμόρφωση.

Έστω τώρα ότι στην είσοδο του κυκλώματος εφαρμόζεται ένα σήμα για ενίσχυση. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα στη συνεχή τάση πολώσεως της βάσης να επιπροστίθεται η εναλλασσόμενη τάση του σήματος και να προκαλείται έτσι μία περιοδική (ή και μη περιοδική ανάλογα με το σήμα) διακύμανση του ρεύματος της. Το γεγονός αυτό με τη σειρά του προκαλεί μία ολίσθηση του σημείου λειτουργίας Q πάνω στη γραμμή φόρτου και μεταξύ των οριακών της σημείων A και B .

Προτού γίνει αναφορά στα ποσοτικά αποτελέσματα, που προκύπτουν από τη γραφική αυτή μέθοδο, σκόπιμο είναι να υπενθυμισθεί ότι: α) Αν ο φόρτος δεν είναι καθαρά ωμικός, αν δηλαδή η αντίσταση R_L είναι σύνθετη (Z_L), τότε με την εφαρμογή σήματος στην είσοδο του ενισχυτή η γραμμή φόρτου μεταπίπτει σε έλλειψη (σχήμα 8-5α), επειδή μεταξύ τάσης και ρεύματος του κυκλώματος εμφανίζεται μία διαφορά φάσης, που οφείλεται στη σύνθετη αντίσταση Z_L . β) Αν ο φόρτος είναι μεν ωμικός, αλλά συνδέεται επαγωγικά (μέσω μετασχηματιστή) προς το κύκλωμα του συλλέκτη, όπως συμβαίνει συχνά σε βαθμίδες εξόδου ενισχυτών (σχήμα 8-5β), τότε η γραμμή φόρτου χωρίς σήμα (d-c load line) και η γραμμή φόρτου με σήμα (a-c load line) διαφέρουν ουσιαστικά, διότι η δεύτερη αντιστοιχεί σε φόρτο $R_L = n^2 R_L$. γ) Αν ο φόρτος είναι ωμικός, αλλά συνδέεται χωρητικά (μέσω πυκνωτή) με το κύκλωμα συλλέκτη (σχήμα 8-5γ) η γραμμή φόρτου με σήμα (a-c l.l) διαφέρει επίσης από τη γραμμή φόρτου χωρίς σήμα (a-c l.l) και για υψηλές συχνότητες αντιστοιχεί σε φόρτο $R_L = R_L \cdot R_C / (R_L + R_C)$.

Επανερχόμαστε τώρα στα ποσοτικά συμπεράσματα της γραφικής μεθόδου. Υποθέτοντας μία τυπική τιμή αντιστάσεως 500Ω για το κύκλωμα εισόδου ένα σήμα





πλάτους $V_{in} = 12.5\text{mV}$ προκαλεί στην είσοδο αυτή μιά μεταβολή του ρεύματος βάσης ίση προς

$$\Delta I_B = \Delta V_B / R_{in} = V_{in} / R_{in} = 12.5\text{mV} / 500\Omega = 25\mu\text{A}.$$

Από το σχήμα όμως 8-4 φαίνεται, ότι μεταβολή του ρεύματος βάσης κατά $\pm 25\mu\text{A}$ συνεπάγεται ολίσθηση του σημείου λειτουργίας Q μεταξύ των σημείων C και D δηλαδή διακύμανση του ρεύματος συλλέκτη μεταξύ των τιμών $I_{C1} = 3.7\text{mA}$ και $I_{C2} = 2.1\text{mA}$. Το πλάτος λοιπόν της μεταβολής του ρεύματος συλλέκτη είναι

$$\Delta I_C = (I_{C1} - I_{C2}) / 2 = (3.7 - 2.1)\text{mA} / 2 = 0.8\text{mA}$$

Προκύπτει έτσι για την ενίσχυση ρεύματος η τιμή:

$$A_i = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{800\mu\text{A}}{25\mu\text{A}} = 32$$

Από το ίδιο διάγραμμα συνάγεται και η μεταβολή της τάσης συλλέκτη-εκπομπού (τάση εξόδου) V_{CE} για την ολίσθηση αυτή του σημείου λειτουργίας μεταξύ των C και D. Η τάση V_{CE} κυμαίνεται μεταξύ των τιμών: $V_{CE1} = 3.6\text{V}$ και $V_{CE2} = 6.8\text{V}$, άρα το πλάτος μεταβολής της είναι:

$$\Delta V_{CE} = (V_{CE2} - V_{CE1}) / 2 = (6.8 - 3.6)\text{V} / 2 = 1.6\text{V}$$

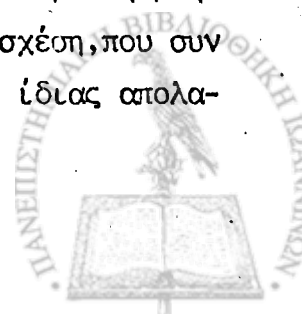
Η ενίσχυση λοιπόν τάσης προκύπτει ίση προς:

$$A_v = \frac{\Delta V_{CE}}{V_{in}} = \frac{1.6\text{V}}{12.5\text{mV}} = 128$$

Εφ'όσον είναι γνωστή η απολαβή τάσης και η απολαβή ρεύματος, υπολογίζεται εύκολα η απολαβή ισχύος:

$$A_p = A_v \cdot A_i = 128 \cdot 32 = 4096 \approx 4.100$$

Στις εφαρμογές η απολαβή ισχύος εκφράζεται σχεδόν πάντοτε με τη βοήθεια μιάς ιδιότυπης μονάδας, που ονομάζεται decibel (dB). Η σχέση, που συνδέει τη γνωστή έκφραση απολαβής ισχύος A_p με την έκφραση της ίδιας απολαβής σε decibel A_p (dB) είναι η εξής:



$$A_p(\text{dB}) = 10 \cdot \log A_p$$

Έτσι η απολαβή σε decibel του ενισχυτικού κυκλώματος, που μελετήθηκε, είναι ίση προς:

$$A_p(\text{dB}) = 10 \cdot \log 4.100 = 36 \text{ dB.}$$

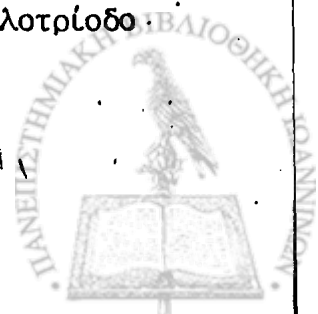
Ο τρόπος μελέτης κυκλώματος, που αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε παραπάνω, είναι γενικός και προσαρμόζεται εύκολα σε όλα τα ανάλογα κυκλώματα, όπως ενισχυτές με κοινή βάση, ενισχυτές με ηλεκτρονικές λυχνίες, κυκλώματα ανορθώσεως κλπ.

Καμπύλη μέγιστης καταναλώσεως ισχύος

Η ισχύς, που αναπτύσσεται κατά τη λειτουργία του ενισχυτή του σχήματος 8-3 στο κύκλωμα συλλέκτη, αποδίδεται στην αντίσταση φόρτου R_L και στην κρυσταλλοτρίοδο. Η κατανάλωση ισχύος στην κρυσταλλοτρίοδο είναι ανεπιθύμητη βέβαια, επειδή πρόκειται για απώλεια, αλλά και αναπόφευκτη. Η ισχύς αυτή εκτός από την ελάττωση της αποδόσεως του ενισχυτή προκαλεί και μιά σειρά άλλα δυσάρεστα αποτελέσματα, από τα οποία σπουδαιότερα είναι η αλλοίωση (μετατόπιση) των χαρακτηριστικών λόγω αυξήσεως της θερμοκρασίας και ο κίνδυνος καταστροφής της κρυσταλλοτρίοδου από υπερθέρμανση.

Υπάρχει πράγματι για κάθε κρυσταλλοτρίοδο ένα μέγιστο όριο ισχύος, που μπορεί να καταναλώνει με ασφάλεια. Το όριο αυτό σχετίζεται με το υλικό του ημιαγωγού, το ποσοστό προσμίξεων, την έκταση των επιφανειών επαφής, και την ικανότητα της κρυσταλλολυχνίας να αποβάλλει θερμότητα. Αν κατά την λειτουργία της το όριο αυτό, που καθορίζεται πάντοτε από τον κατασκευαστή, ξεπεραστεί η κρυσταλλοτρίοδος καταστρέφεται. Πρέπει λοιπόν ο σχεδιαστής ενός κυκλώματος να έχει εξασφαλίσει, ότι σε κάθε στιγμή και κατάσταση λειτουργίας του δεν υπερβαίνεται η μέγιστη αυτή κατανάλωση ισχύος στην κρυσταλλοτρίοδο.

Η πρόβλεψη αυτή μπορεί να γίνει επίσης γραφικά με τον παρακάτω τρόπο (για το κύκλωμα του σχήματος 8-3· ανάλογη μεθοδολογία ακολουθείται για κάθε άλλο κύκλωμα). Η ισχύς, που καταναλώνεται κάθε στιγμή στην κρυσταλλοτρίοδο δίδεται από τη σχέση:



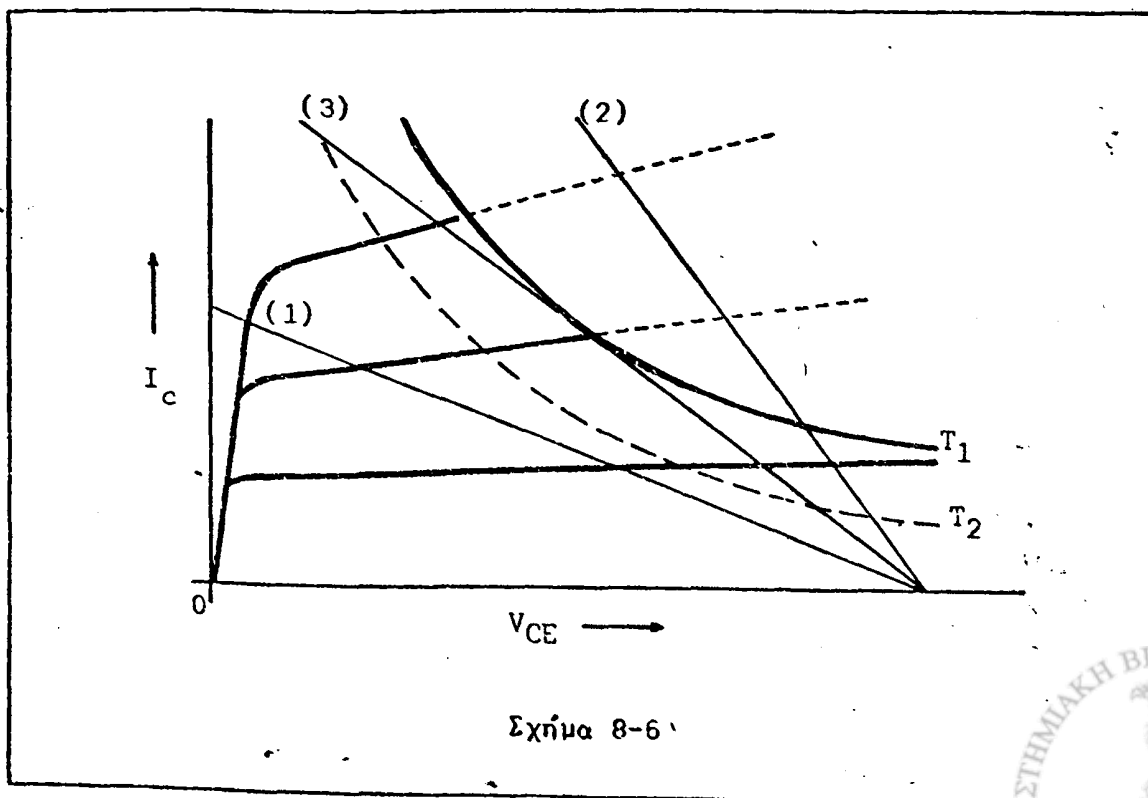
$$P_C = V_{CE} \cdot I_C$$

Επειδή λοιπόν η ισχύς αυτή προσδιορίζεται από τα μεγέθη V_{CE} και I_C χαράσσεται στο διάγραμμα $I_C = f(V_{CE})$ (σμήνος χαρακτηριστικών συλλέκτη) η καμπύλη: $P_C = V_{CE} \cdot I_C$, όπου P_C η μέγιστη επιτρεπόμενη κατανάλωση ισχύος. Η καμπύλη αυτή, επειδή το πρώτο μέλος της είναι μία σταθερά και το δεύτερο γινόμενο των μεταβλητών, είναι ισοσκελής υπερβολή (σχήματα 8-4 και 8-6). Για τη χάραξη της δίνονται αυθαίρετες τιμές στην τάση V_{CE} (πάντα όμως μέσα στα πλαίσια των τιμών του άξονα V_{CE} του διαγράμματος) και δεδομένης της τιμής του P_C προκύπτουν οι αντίστοιχες τιμές των ρευμάτων I_C . Έτσι π.χ. για την κρυσταλλοτρίοδο 2N107 και για μέγιστη κατανάλωση ισχύος 25mW μία σειρά σημείων της καμπύλης ορίζουν τα παρακάτω ζεύγη τιμών:

(10.0V-2.5mA), (9.0V-2.7mA), (8.0V-3.1mA), (7.0V-3.6mA), (6.0V-4.2mA)

(5.0V-5.0mA), (4.0V-6.2mA), (3.0V-8.3mA), (2.0V-12.5mA), (1.0V-25.0mA)

Αφού χαραχθεί η καμπύλη αυτή λαμβάνεται μέριμνα η κατάσταση λειτουργίας της κρυσταλλοτρίοδου να μην περιγράφεται ποτέ από σημεία (V_{CE}, I_C) , που να βρί-



Σχήμα 8-6

σκονται προς το κοίλο μέρος της καμπύλης, διότι θα καταστραφεί. Αυτό σημαίνει απλά, ότι η ευθεία φόρτου λειτουργίας του κυκλώματος δεν πρέπει να τέμνει την καμπύλη μέγιστης καταναλώσεως ισχύος, αλλά πρέπει να βρίσκεται ολόκληρη προς το κυρτό μέρος της. Έτσι λοιπόν στο σχήμα 8-6 η γραμμή φόρτου (1) είναι επιτρεπόμενη, η (2) απαγορευμένη και η (3) οριακή. Λειτουργία σε γραμμή φόρτου εφασπτόμενη της καμπύλης ισχύος, όπως η (3), σημαίνει, ότι επιτυγχάνεται μεγιστοποίηση των επιδόσεων του ενισχυτή, αλλά ταυτόχρονα λειτουργία της κρυσταλλοτρίοδου στα όρια της αντοχής της.

Πρέπει να σημειωθεί, ότι η μέγιστη επιτρεπόμενη κατανάλωση ισχύος μιάς κρυσταλλολυχνίας είναι συνάρτηση και μάλιστα φθίνουσα της θερμοκρασίας της. Έτσι λοιπόν η καμπύλη μέγιστης καταναλώσεως ισχύος σε μιά άλλη θερμοκρασία $T_2 > T_1$, οπότε και $P_2 < P_1$, θα είναι διαφορετική (διακεκομμένη καμπύλη του σχήματος 8-6). Αντίστοιχα βέβαια πρέπει τότε να επιλεγούν διαφορετικές γραμμές φόρτου.

Απαραίτητες γνώσεις

Δ. Μ. Μηλιώτη : Στοιχεία ανάλυσεως κυκλωμάτων και βασικές λειτουργίες ηλεκτρονικών λυχνιών, σελ. 264-279.

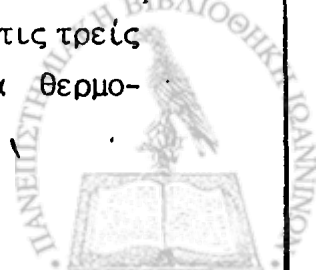
Πειραματικό μέρος

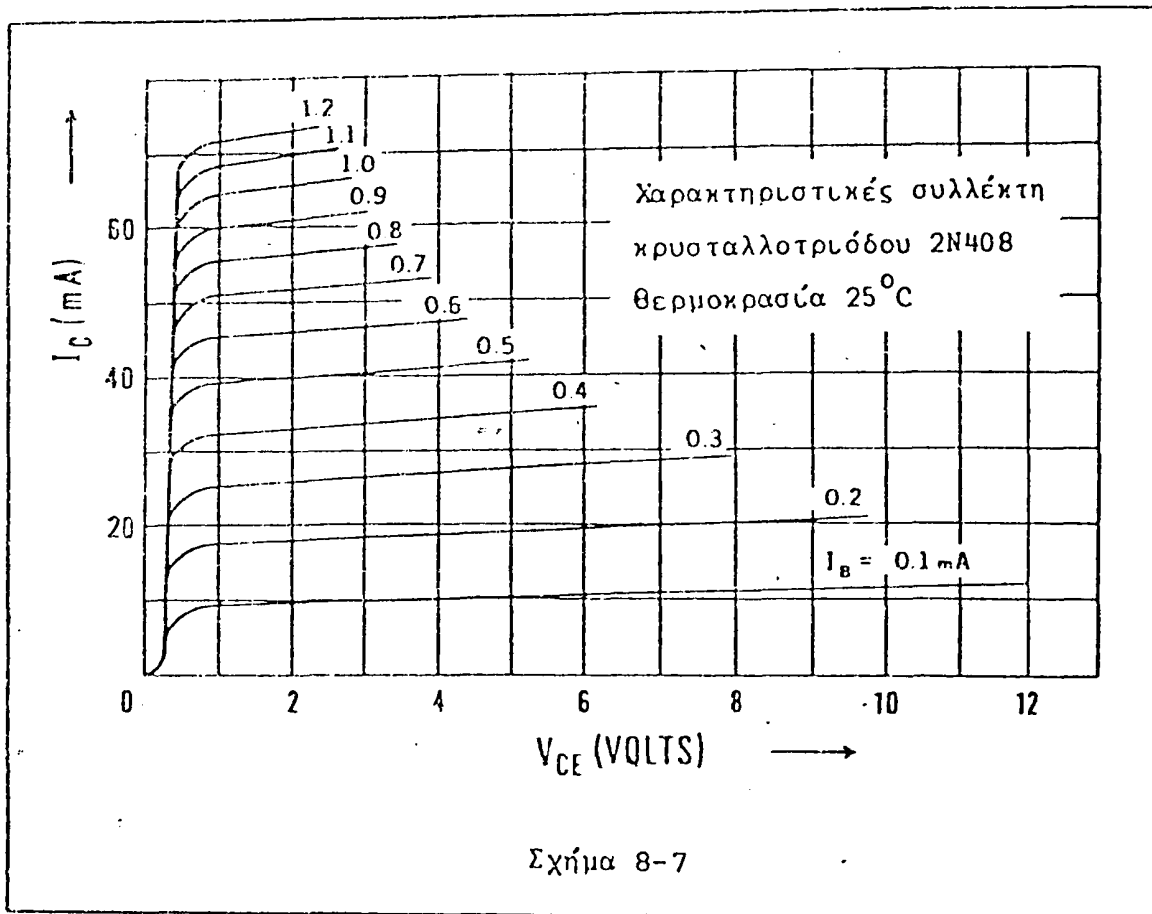
1. Μελετήστε το σμήνος χαρακτηριστικών του σχήματος 8-7. Οι καμπύλες αυτές αφορούν την κρυσταλλοτρίοδο 2N408 και έχουν δοθεί, όπως και για κάθε κρυσταλλολυχνία, από τον κατασκευαστή.

2. Κατασκευάστε τη γραμμή φόρτου που αντιστοιχεί σε τάση τροφοδότησης του κυκλώματος συλλέκτη $V_c = 6V$ και αντίσταση φόρτου $R_L = 100\Omega$.

3. Επιλέξτε σαν σημείο λειτουργίας Q του κυκλώματος το σημείο τομής της παραπάνω γραμμής φόρτου με τη χαρακτηριστική, που αντιστοιχεί σε ρεύμα βάσης $I_B = 0.3mA$ και προσδιορίστε τις συντεταγμένες του V_Q και I_Q .

4. Η μέγιστη ισχύς καταναλώσεως της κρυσταλλοτρίοδου 2N408 σε θερμοκρασία $25^\circ C$ είναι $P_c = 150mW$. Αντίστοιχα η ισχύς αυτή στους $55^\circ C$ είναι $50mW$ και στους $71^\circ C$ είναι $20mW$. Συμπληρώστε τον παρακάτω πίνακα και χαράξτε τις τρεις καμπύλες μέγιστης καταναλώσεως, στο διάγραμμα του σχήματος 8-7. Ποιά θερμο-



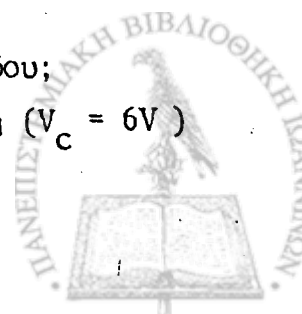


Σχήμα 8-7

V_{CE} V	150	50	20	V_{CE} V	150	50	20
	I_C mA	I_C mA	I_C mA		I_C mA	I_C mA	I_C mA
12.0				4.0			
10.0				3.0			
8.0				2.5			
6.0				2.0			
5.0				1.0			

κρασία είναι προτιμώτερη για τη λειτουργία της κρυσταλλοτριόδου;

5. Για την ίδια τάση τροφοδοσίας του κυκλώματος συλλέκτη ($V_C = 6V$)



κατασκευάστε τη γραμμή φόρτου για $R_L = 200\Omega$. Μπορεί η κρυσταλλοτρίοδος αυτή να εργασθεί σε θερμοκρασία 55°C με φόρτο 200Ω ; Αιτιολογείστε την απάντησή σας.

Ερωτήσεις

1. Αν στο κύκλωμα του σχήματος 8-3 αυξηθεί η θερμοκρασία, προς ποιά διεύθυνση θα μετακινηθεί πάνω στη γραμμή φόρτου το σημείο ηρεμίας Q;
2. Προσδιορίστε γραφικά τι θα συμβεί, αν στο κύκλωμα του σχήματος 8-3 αυξηθεί η αντίσταση φόρτου R_L .
3. Η ισχύς, που καταναλώνει η κρυσταλλοτρίοδος, είναι σταθερή για όλα τα σημεία λειτουργίας της (σημεία της γραμμής φόρτου);
4. Κατά μέσο όρο πόση είναι η μεταβολή της μέγιστης καταναλώσεως ισχύος ανά βαθμό Κελσίου για την κρυσταλλοτρίοδο 2N408;
5. Στο κύκλωμα του σχήματος 8-3 (2N107 αντίσταση εισόδου 500Ω) ποιά είναι το μέγιστο πλάτος, κατά τάση, σήματος, που μπορεί να ενισχυθεί χωρίς παραμόρφωση; Για το μέγιστο αυτό πλάτος πόση είναι η συνεχής συνιστώσα του ρεύματος βάσεως και ποιές οι συντεταγμένες του σημείου λειτουργίας Q;



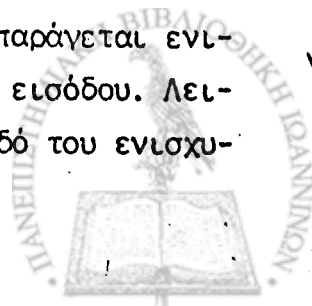
ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΙΑΣ ΒΑΘΜΙΔΑΣΕισαγωγή

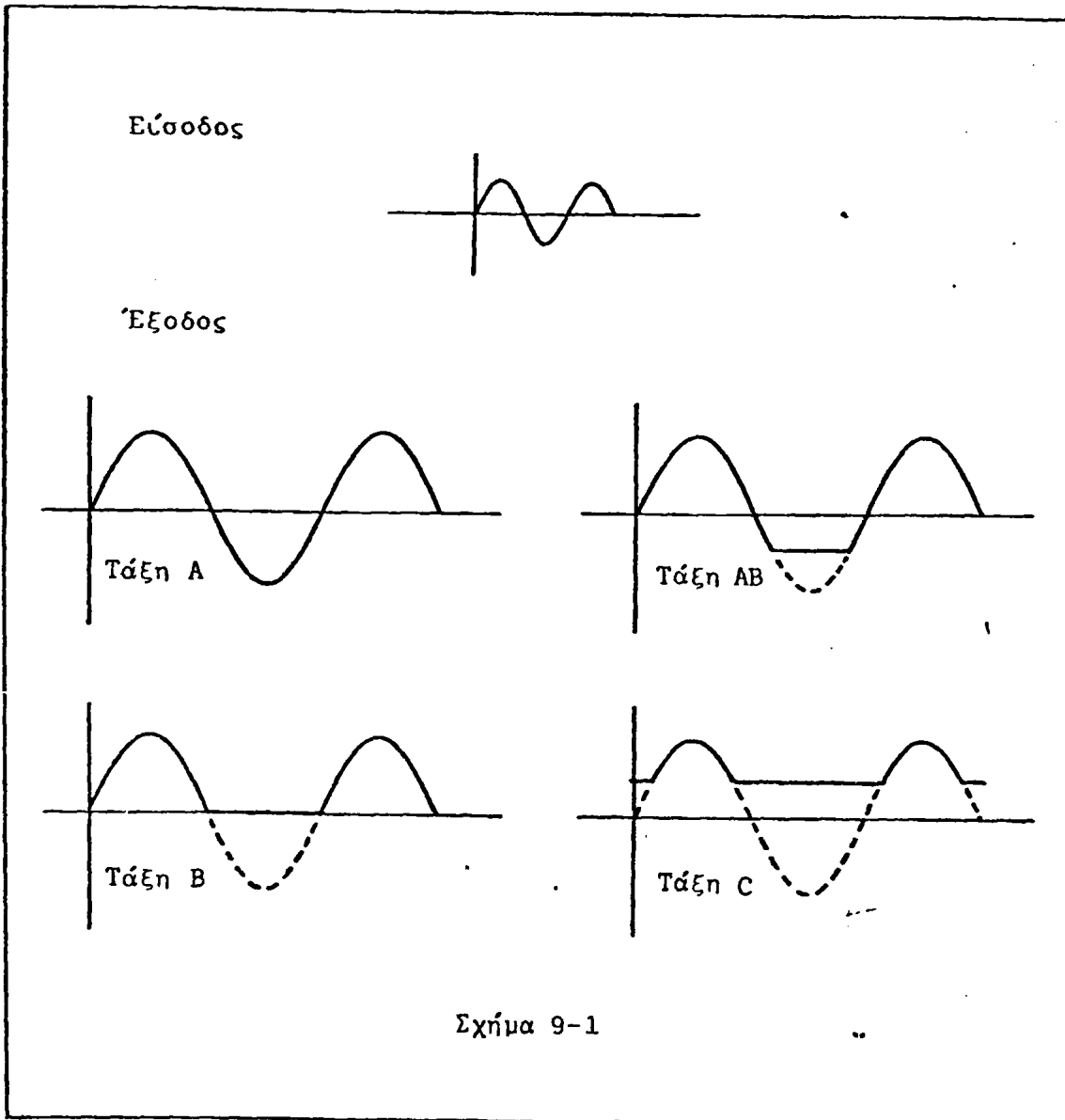
Οι διατάξεις, που στην είσοδό τους δέχονται ένα σήμα και στην έξοδό τους παρέχουν ένα άλλο σήμα με πολύ μεγαλύτερο κατ' αρχήν πλάτος και ίδια ή ανάλογα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του προς το σήμα εισόδου, ονομάζονται ενισχυτές. Ενισχυτών υπάρχουν πολλές κατηγορίες. Η ταξινόμησή τους γίνεται με διάφορα κριτήρια.

Όταν κριτήριο ταξινόμησης είναι το ηλεκτρικό μέγεθος, που κατ' εξοχήν ενισχύουν, διακρίνονται σε ενισχυτές τάσης, ενισχυτές ρεύματος και ενισχυτές ισχύος. Σχετικά με την τελευταία κατηγορία, τους ενισχυτές ισχύος, συμβαίνει συχνότατα μιά παρέκκλιση από τα καθιερωμένα. Ονομάζονται δηλαδή έτσι όχι μόνον οι ενισχυτές, που ενισχύουν την ισχύ του σήματος εισόδου, αλλά κυρίως ενισχυτές, που απλά και μόνο παρέχουν στην έξοδό τους (το φόρτο, που μπορεί να είναι μεγάφωνο, κινητήρας αυτοματισμού κλπ) μεγάλη ισχύ, ανεξάρτητα αν από άποψη ηλεκτρικού μεγέθους οι ενισχυτές αυτοί είναι ρεύματος ή τάσης. Αυτός είναι ο λόγος, για τον οποίο όλες οι τελικές βαθμίδες των ακουστικών ενισχυτών hi-fi π.χ. αναφέρονται σαν ενισχυτές ισχύος, ενώ συνήθως πρόκειται για ενισχυτές ρεύματος.

Όταν το κριτήριο ταξινόμησης είναι η περιοχή συχνοτήτων, που κατ' εξοχήν ενισχύουν, διακρίνονται σε ενισχυτές συνεχούς, ενισχυτές ακουστικών συχνοτήτων, ραδιοφωνικούς ενισχυτές κλπ.

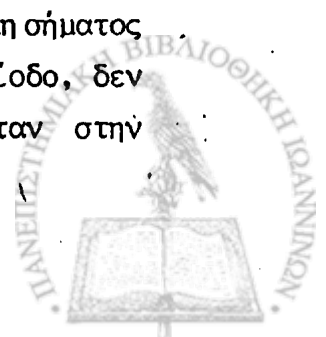
Όταν τέλος κριτήριο ταξινόμησης είναι η θέση του σημείου λειτουργίας του κυκλώματος ενισχύσεως διακρίνονται σε ενισχυτές τάξης Α, τάξης ΑΒ, τάξης Β και τάξης C. Η διαφοροποίηση των τελευταίων αυτών κατηγοριών μπορεί να γίνει και με αναφορά στη μορφή του σήματος εξόδου του ενισχυτή όταν στην είσοδό του εφαρμόζεται σήμα απλής ημιτονοειδούς μορφής. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 9-1, λειτουργία σε τάξη Α σημαίνει, ότι ο ενισχυτής αναπαράγει (ενισχυμένο βέβαια) στην έξοδό του πιστά ολόκληρο το σήμα εισόδου. Λειτουργία σε τάξη ΑΒ σημαίνει, ότι στην έξοδο του ενισχυτή αναπαράγεται ενισχυμένο κάτι περισσότερο από το μισό κατά πλάτος του σήματος εισόδου. Λειτουργία σε τάξη Β σημαίνει, ότι ο ενισχυτής παρέχει στην έξοδό του ενισχυ-





μένο ακριβώς το μισό του σήματος εισόδου. Τέλος λειτουργία σε τάξη C σημαίνει, ότι στην έξοδο του ενισχυτή εμφανίζεται ενισχυμένο κάτι λιγότερο από το μισό του σήματος εισόδου.

Ανάλογα με το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα προτιμάται η λειτουργία ενός ενισχυτή σε τάξη A ή σε τάξη B (λειτουργία σε άλλη τάξη είναι σπανιότερη). Το μεγάλο πλεονέκτημα της λειτουργίας σε τάξη A είναι η πιστότητα αναπαραγωγής του σήματος, δηλαδή η ελαχιστοποίηση της παραμορφώσεως, κάτι ιδιαίτερα σημαντικό προκειμένου για ακουστικούς ενισχυτές hi-fi. Σε αντίστανση η τάξη A έχει διάφορα μειονεκτήματα: α) Η ισχύς, που καταναλώνει ο ενισχυτής, είναι σταθερή και ανεξάρτητη από την ύπαρξη ή μη σήματος στην είσοδό του. β) Η ισχύς, που καταναλώνεται στην κρυσταλλοτρίοδο, δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται και μάλιστα μεγιστοποιείται, όταν στην



είσοδο του ενισχυτή δεν υπάρχει σήμα. Η ισχύς αυτή είναι κρίσιμη επειδή εμφανίζεται υπό μορφή θερμότητας και απ' ενός καταπονεί την κρυσταλλοτρίοδο απ' ετέρου μεταβάλλει τις χαρακτηριστικές της. γ) Έχει τη μικρότερη απόδοση από όλες τις τάξεις λειτουργίας.

Αντίστοιχα η λειτουργία σε τάξη Β πλεονεκτεί κατά το ότι: α) Ο ενισχυτής καταναλώνει ισχύ μόνον εφ' όσον υπάρχει σήμα στην είσοδό του. β) Οι κρυσταλλοτρίοδοι υφίστανται πολύ μικρότερες καταπονήσεις. γ) Επιτυγχάνονται σημαντικά μεγάλοι συντελεστές αποδόσεως. Τα βασικά μειονεκτήματα της λειτουργίας σε τάξη Β είναι η ισχυρή παραμόρφωση του σήματος εξόδου και η πολυπλοκότητα των ενισχυτικών κυκλωμάτων.

Όλα όσα αναφέρονται στη συνέχεια αφορούν στη λειτουργία ενισχυτών σε τάξη Α.

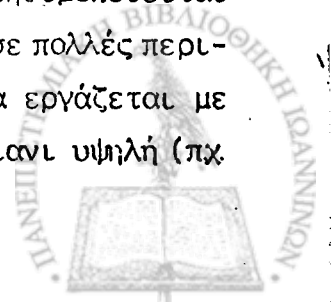
Συνδεσμολογία φόρτου

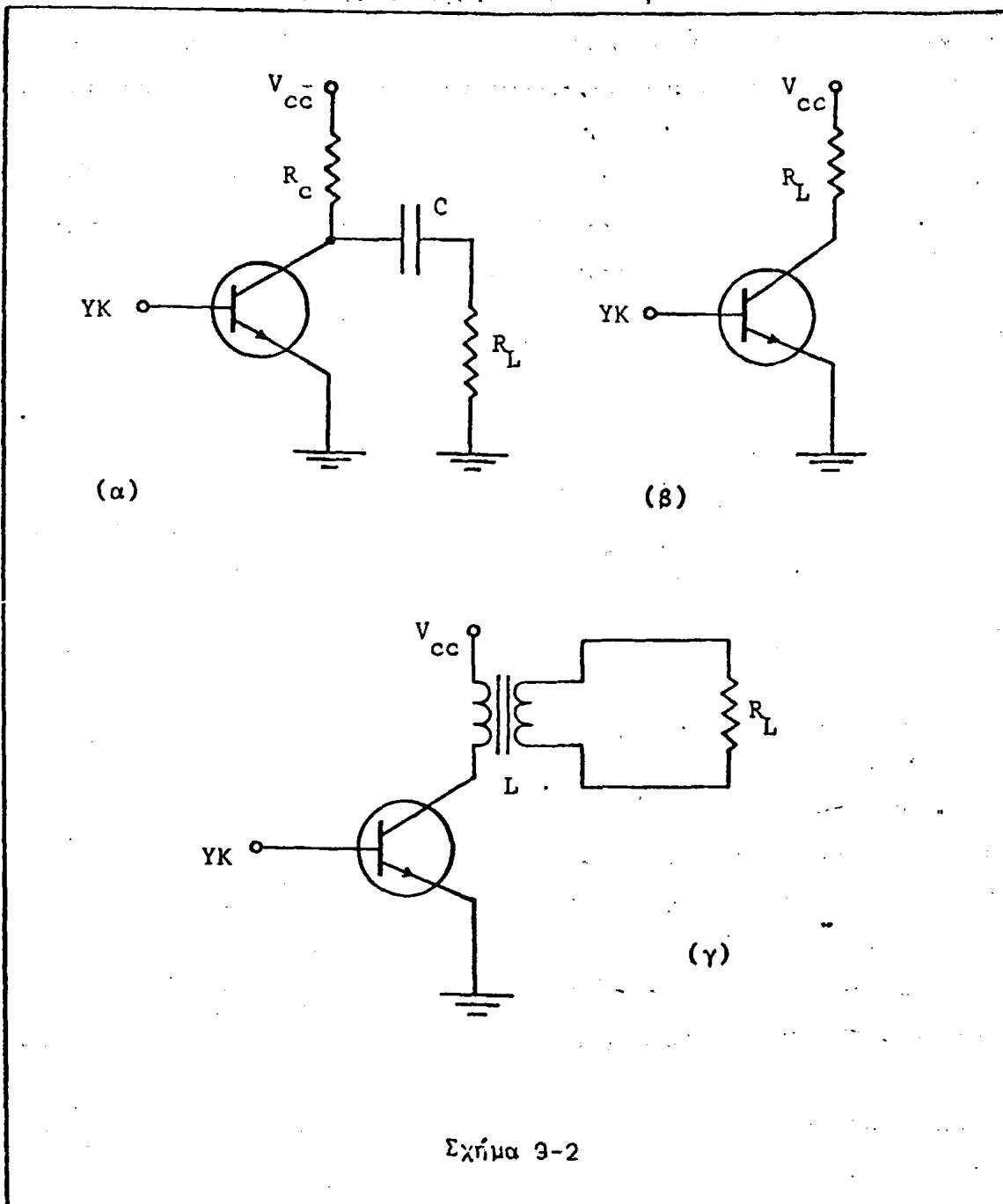
Γενικά η έξοδος ενός ενισχυτή ισχύος συνδέεται προς το φόρτο με έναν από τους παρακάτω τρεις τρόπους: α) Μέσω ενός πυκνωτή, όπως φαίνεται στο σχήμα 9-2α. β) Άμεσα, όπως φαίνεται στο σχήμα 9-2β και γ) Μέσω ενός μετασχηματιστή, όπως φαίνεται στο σχήμα 9-2γ.

Η σύνδεση μέσω πυκνωτή μειονεκτεί κύρια κατά το ότι έχει πολύ μικρή απόδοση. Μόνο το 10% περίπου της ισχύος, που καταναλώνει ο ενισχυτής, αποδίδεται στο φόρτο. Γι' αυτό σπανιότατα χρησιμοποιείται και μόνον όταν οι άλλοι τρόποι είναι αδύνατο να χρησιμοποιηθούν για κάποια συγκεκριμένη αιτία.

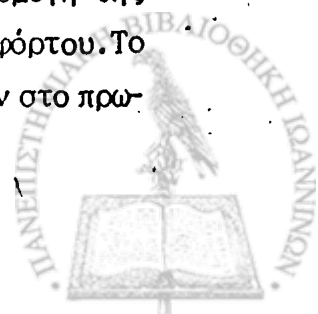
Η άμεση σύνδεση χρησιμοποιείται συχνότερα, επειδή έχει μεγαλύτερη απόδοση (μέχρι 25%) και υπεισάγει τη μικρότερη παραμόρφωση απ' όλες τις συνδεσμολογίες. Ας σημειωθεί, ότι, όπως φαίνεται και στο σχήμα 9-2β, ακόμη και όταν δεν υπάρχει σήμα στην είσοδο του ενισχυτή, το ρεύμα ηρεμίας του συλλέκτη διαρρέει και την αντίσταση φόρτου και αποδίδει ένα μέρος της ισχύος του σ' αυτήν.

Τέλος η σύνδεση μέσω μετασχηματιστή έχει ακόμη μεγαλύτερους συντελεστές αποδόσεως (μέχρι 50% όπως θα αποδειχθεί παρακάτω) και χρησιμοποιείται κυρίως, όταν υπάρχουν προβλήματα προσαρμογής. Συγκεκριμένα: σε πολλές περιπτώσεις η αντίσταση εξόδου του ενισχυτή, προκειμένου αυτός να εργάζεται με ικανοποιητική απόδοση και χαμηλές παραμορφώσεις, πρέπει να είναι υψηλή (πχ.





μεταξύ 500Ω και $5k\Omega$)· αντίστοιχα ο φόρτος είναι συχνά από τη φύση του στοιχείο χαμηλής αντιστάσεως (όπως π.χ. ένα μεγάφωνο, που η αντίστασή του είναι μεταξύ 4Ω και 16Ω). Στις περιπτώσεις αυτές, που κυρίως είναι ακουστικοί ενισχυτές μικρού κόστους και μεγάλης αντοχής, πρέπει να παρεμβληθεί μεταξύ εξόδου και φόρτου κάποιο στοιχείο, που να επιτυγχάνει προσαρμογή της υψηλής αντιστάσεως εξόδου του ενισχυτή στη χαμηλή αντίσταση του φόρτου. Το στοιχείο αυτό είναι ένας μετασχηματιστής με μεγάλο αριθμό σπειρών στο πρω-



τεύον και μικρό στο δευτερεύον. Ο μετασχηματιστής αυτός, αν το πρωτεύον του συνδεθεί σε σειρά με το συλλέκτη της κρυσταλλοτριόδου εξόδου και το δευτερεύον του σε σειρά με το φόρτο, επιτυγχάνει τη ζητούμενη προσαρμογή με την προϋπόθεση, ότι ο λόγος σπειρών πρωτεύοντος-δευτερεύοντος n έχει επιλεγεί κατάλληλα, διότι, ακόμη και αν θεωρήσουμε ιδανικά τα δυο πηνία του, προκαλεί "ανάκλαση" της αντιστάσεως φόρτου στο κύκλωμα του συλλέκτη και μάλιστα πολλαπλασιασμένης επί n^2 . Ουσιαστικά δηλαδή είναι σαν να υπάρχει σε σειρά με το συλλέκτη αντί του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή μια αντίσταση "φόρτου" ίση προς:

$$R_L' = n^2 \cdot R_L$$

ενώ ο πραγματικός φόρτος είναι R_L .

Υπολογίζεται τώρα ο συντελεστής αποδόσεως ενός τέτοιου ενισχυτή. Υπενθυμίζεται αρχικά, ότι για όλους τους ενισχυτές ο συντελεστής αυτός ορίζεται από το πηλίκο της ισχύος, που αποδίδεται στο φόρτο, προς την ισχύ, που παρέχει η πηγή τροφοδοσίας στο κύκλωμα:

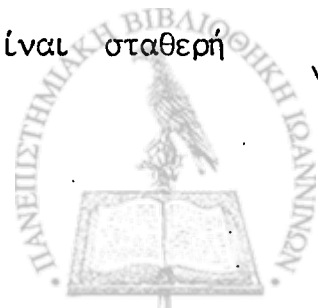
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_s}$$

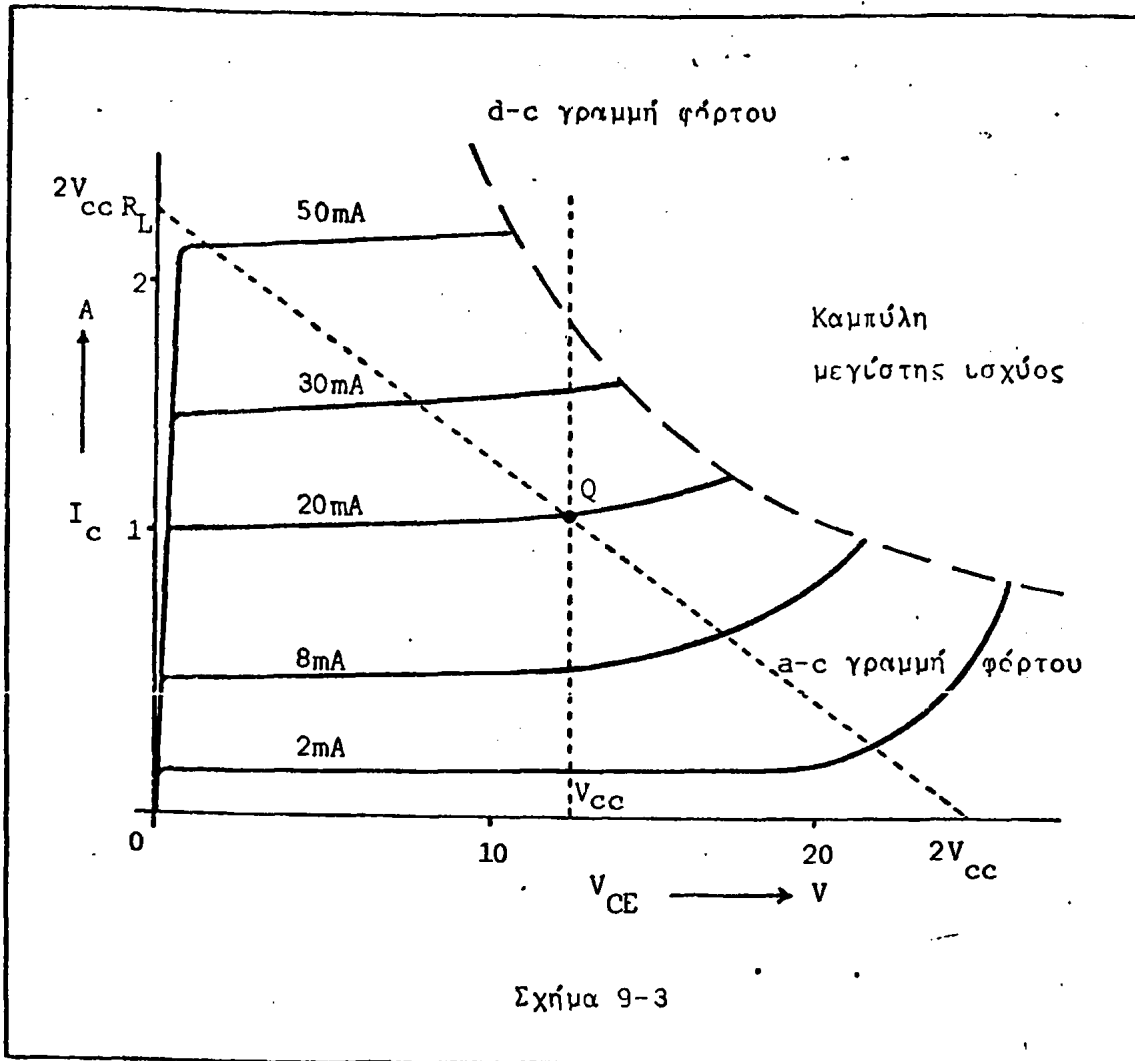
Όσα ακολουθούν αναφέρονται στο απλοποιημένο κύκλωμα του σχήματος 9-2γ, αλλά συγκριτικά μπορεί να αναφέρεται κανείς και στο πλήρες κύκλωμα του σχήματος 9-4.

Αν τα πηνία του μετασχηματιστή υποτεθούν ιδανικά, η αντίσταση του πρωτεύοντος στη διέλευση συνεχούς ρεύματος είναι μηδενική (πρακτικά αμελητέα) και η γραμμή φόρτου συνεχούς (d-c load line), που δίνεται στο σχήμα 9-3 για το σμήνος χαρακτηριστικών μιας τυπικής κρυσταλλοτριόδου ισχύος, είναι κάθετη (πρακτικά σχεδόν κάθετη) στον άξονα των τάσεων V_{CE} στο σημείο V_{CC} . Η γραμμή φόρτου εναλλασσομένου (a-c load line), εφόσον πρόκειται περί πηνίου (δευτερεύον μετασχηματιστή), τέμνει τον άξονα των τάσεων στο σημείο $2V_{CC}$ και τον άξονα των ρευμάτων I_C στο σημείο $2V_{CC}/R_L'$. Το σημείο λειτουργίας Q ορίζεται από την τομή των δύο αυτών ευθειών φόρτου και βέβαια βρίσκεται στο μέσον της γραμμής φόρτου εναλλασσομένου και έχει συντεταγμένες: $V_Q = V_{CC}$ και $I_Q = V_{CC}/R_L'$.

Η ισχύς, που παρέχει η πηγή τροφοδοσίας στον ενισχυτή, είναι σταθερή και δίδεται από τη σχέση:

$$P_s = V_{CC} \cdot I_Q = \frac{V_{CC}^2}{R_L'}$$





Η ισχύς του σήματος εξόδου αντίστοιχα δίδεται από τη σχέση:

$$P_{\text{out}} = \left(\frac{I_p}{2} \right)^2 \cdot R_L' = \frac{I_p^2 \cdot R_L'}{2}$$

όπου I_p είναι το πλάτος ρεύματος του σήματος εξόδου και το οποίο κατά μέγιστο γίνεται ίσο προς:

$$I_p = I_Q = \frac{V_{CC}}{R_L'}$$

συνθήκη για την οποία μεγιστοποιείται και η παρεχόμενη στο φόρτο ισχύς.

Έτσι η απόδοση του ενισχυτή προκύπτει ίση προς:

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_s} = \frac{I_p^2 \cdot R_L' / 2}{V_{CC}^2 / R_L'} = \frac{V_{CC}^2 / 2R_L'}{V_{CC}^2 / R_L'} = 0.5$$



αποτέλεσμα που επιβεβαιώνει την προηγούμενη παρατήρηση, ότι η απόδοση των ενισχυτών αυτών μπορεί να φθάσει μέχρι 50%.

Σημειώνεται, ότι η ισχύς, που καταναλώνεται στην κρυσταλλοτρίοδο, δίνεται από τη σχέση:

$$P_t = P_s - P_{out} = \frac{V_{cc}^2}{R_L} - \frac{I_p^2 \cdot R_L}{2}$$

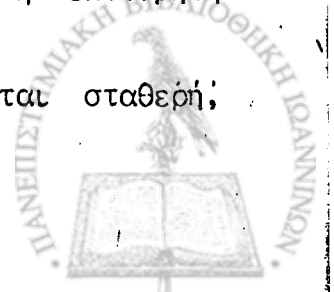
Η ισχύς αυτή μεγιστοποιείται και φυσικά καταπονεί την κρυσταλλοτρίοδο, όταν δεν υπάρχει σήμα στην είσοδο του ενισχυτή, οπότε $I_p = 0$ και ισχύς στο φόρτο μηδενίζεται. Εξ αιτίας αυτού του γεγονότος κατά τη σχεδίαση ενός τέτοιου ενισχυτή ισχύος λαμβάνονται άμεσα υπ' όψη τα θερμοκρασιακά όρια ασφαλούς λειτουργίας της κρυσταλλοτρίοδος και επιδιώκεται να της εξασφαλισθεί ικανότητα αποβολής στο περιβάλλον μεγάλων ποσών θερμότητας ανά μονάδα χρόνου, ώστε να αποφεύγεται υπερθέρμανση και καταστροφή της. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται ειδικά συστήματα ψύξεως, όπως θερμικές καταβόθρες (heat sinks) ανεμιστήρες κλπ.

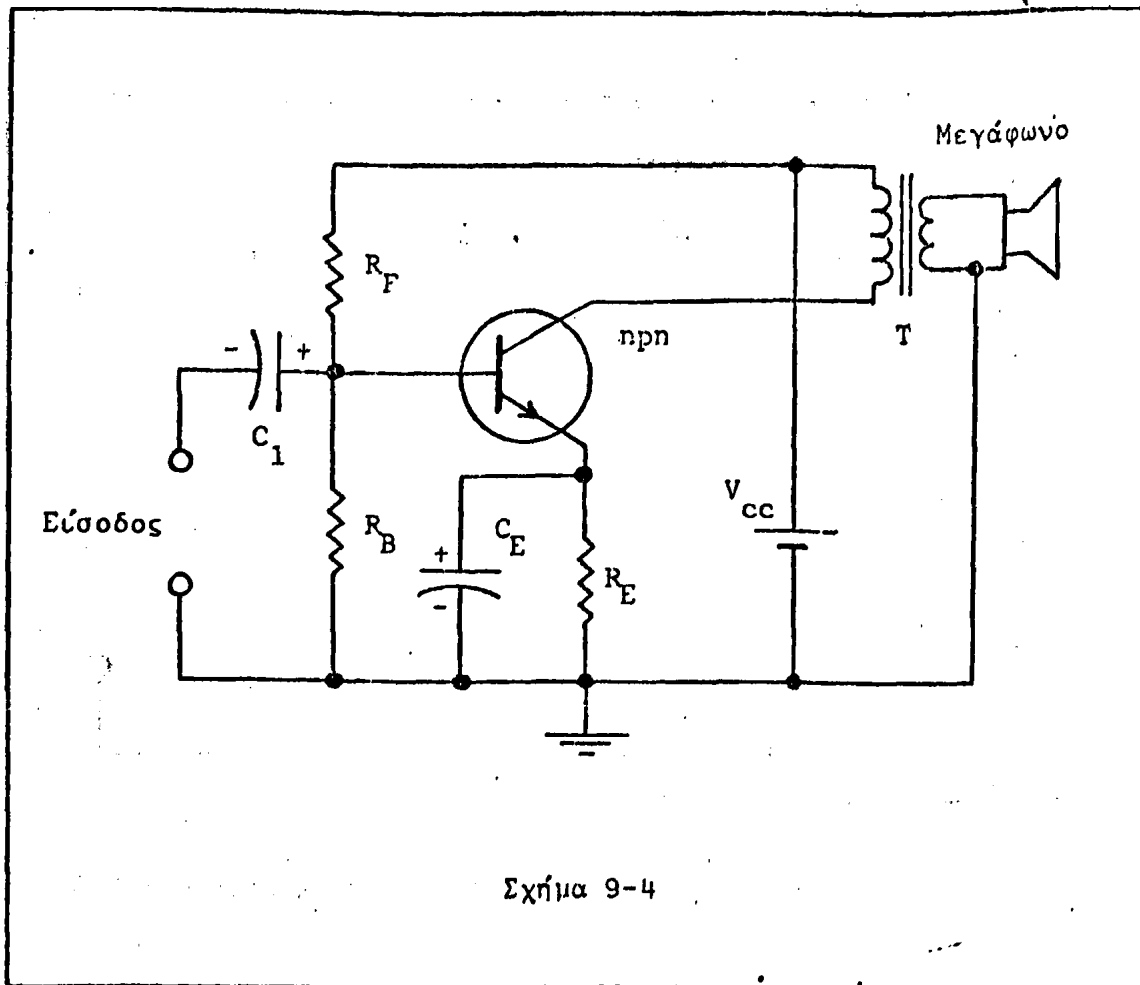
Πλεονέκτημα ακόμη της χρήσης μετασχηματιστή εξόδου είναι η μεταβλητή αντίσταση, που παρουσιάζει το πρωτεύον του, συναρτήσεως της συχνότητας. Συνήθως η απολαβή ενός ενισχυτή με κρυσταλλοτρίοδος ελαττώνεται στις υψηλές συχνότητες λόγω της χωρητικής αντίστασης των επαρών p-n, που μειώνεται, όσο αυξάνει η συχνότητα. Αντίθετα η επαγωγική αντίσταση του πρωτεύοντος αυξάνει με τη συχνότητα και έτσι τα δύο φαινόμενα αλληλοαντισταθμίζονται για μία μεγάλη περιοχή συχνοτήτων με αποτέλεσμα τη βελτίωση της αποκρίσεως του ενισχυτή σε υψηλές συχνότητες.

Εκτός όμως από πλεονεκτήματα η χρησιμοποίηση μετασχηματιστή εξόδου έχει και μειονεκτήματα, από τα οποία το σπουδαιότερο είναι οι παραμορφώσεις του σήματος εξόδου, που προκαλούνται εξ αιτίας των μαγνητικών υστερήσεων, που παρουσιάζει ο πυρήνας του μετασχηματιστή και που είναι ιδιαίτερα έντονες στις υψηλές συχνότητες.

Στο σχήμα 9-4 δίδεται το κύκλωμα ενός ενισχυτή ισχύος μίας βαθμίδας, ο οποίος μέσω ενός μετασχηματιστή προσαρμογής οδηγεί ένα μεγάφωνο. Στο κύκλωμα αυτό η αντίσταση R_E χρησιμεύει για τη δημιουργία και σταθεροποίηση της πολώσεως του εκπομπού της κρυσταλλοτρίοδος, ενώ οι αντιστάσεις R_B και R_E σχηματίζουν ένα διαιρέτη τάσης, μέσω του οποίου εξασφαλίζεται η επιθυμητή στάθμη (δυναμικό) πολώσεως της βάσης της κρυσταλλοτρίοδος.

Το ρεύμα συλλέκτη, εφόσον η πηγή τροφοδοσίας V_{cc} θεωρείται σταθερή,





Σχήμα 9-4

καθορίζεται από τις τιμές των αντιστάσεων εκπομπού-συλλέκτη, πρωτεύοντος και R_E . Η διαφορά δυναμικού μεταξύ συλλέκτη και εκπομπού V_{CE} καθορίζεται από την αντίσταση συλλέκτη-εκπομπού και το ρεύμα συλλέκτη. Η διαφορά αυτή είναι κρίσιμο μέγεθος για τη λειτουργία του ενισχυτή, διότι αν είναι πολύ μικρή, η κρυσταλλοδίοδος θα εργάζεται πολύ κοντά ή και μέσα στην περιοχή κόρου με αποτέλεσμα να συμβαίνουν παραμορφώσεις και ψαλλιδιομοί στο σήμα εξόδου.

Απαραίτητες γνώσεις

- Δ. Μ. Μηλιώτη: Στοιχεία ανάλυσης κυκλωμάτων και βασικές λειτουργίες ηλεκτρονικών λυχνιών, σελ. 279-292
- Δ. Μ. Μηλιώτη: Φυσική των κρυσταλλολυχνιών, σελ. 315-320



Χρησιμοποιούμενα όργανα

1. Τροφοδοτικό χαμηλής τάσης
2. Γεννήτρια ακουστικών συχνοτήτων
3. Παλμογράφος
4. Ηλεκτρονικό βολτόμετρο
5. Πολύμετρο
6. Κρυσταλλοτρίοδος ηρη
7. Μετασχηματιστής εξόδου
8. Μεγάφωνο
9. Διακόπτης
10. Αντιστάσεις $3.9\Omega-0.5W$, $100\Omega-0.5W$, $1k\Omega-0.5W$, $10k\Omega-0.5W$
11. Πυκνωτές (ηλεκτρολυτικοί): $10\mu F$, $50\mu F$.

Πειραματικό μέρος

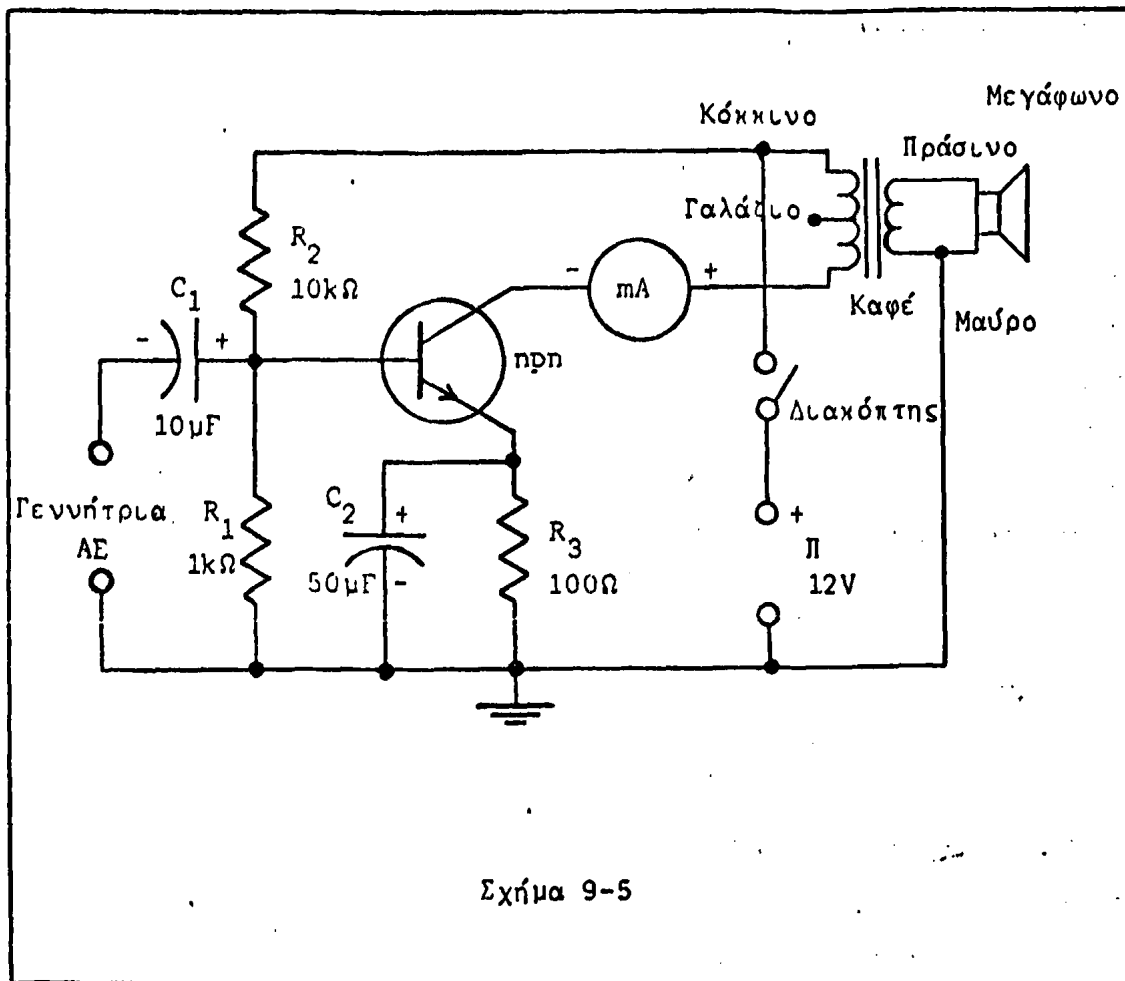
Προσοχή: Κατά τις μετρήσεις των τάσεων με το ηλεκτρονικό βολτόμετρο, επειδή συχνά το κοινό ηλεκτρόδιο (common, -) είναι γειωμένο, υπάρχει κίνδυνος το κύκλωμά σας να γειωθεί σε δύο διαφορετικά και μη ισοδυναμικά σημεία. Στην περίπτωση αυτή ένα μέρος του κυκλώματος βραχυκυκλώνεται και απ' ενός οι μετρήσεις είναι λανθασμένες, απ'ετέρου, που είναι και σπουδαιότερο, υπάρχει κίνδυνος καταστροφής της κρυσταλλοτρίοδου. Προκειμένου λοιπόν να αποφευχθεί ο κίνδυνος αυτός ελέγξτε την ύπαρξη γειώσεων στο ηλεκτρονικό βολτόμετρο, το τροφοδοτικό και τη γεννήτρια συχνοτήτων και αφαιρέστε κατά τη διάρκεια της μετρήσεως όσες προκαλούν βραχυκυκλώσεις στο κύκλωμα.

1. Συνδεσμολογήστε το κύκλωμα του σχήματος 9-5. Μετρήστε το ρεύμα συλλέκτη (I_C) και τη συνεχή πτώση τάσης στα άκρα της αντιστάσεως R_3 (V_R), του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή (V_T) και μεταξύ εκπομπού-συλλέκτη της κρυσταλλοτρίοδου (V_{CE}).

$I_C =$	mA
$V_T =$	V

$V_R =$	V
$V_{CE} =$	V





2. Με τη βοήθεια της σχέσης $P_C = V_{CE} \cdot I_C$ προσδιορίστε την ισχύ που καταναλώνεται στην κρυσταλλοτρίοδο.

$$P_C = \quad \quad \quad W$$

3. Εφαρμόστε στην είσοδο του κυκλώματος ημιτονικό σήμα συχνότητας $f=1\text{kHz}$ και ύψους $V_{in} = 0.1 V_{p-p}$ (η τάση $0.1V_{p-p}$ μετρείται με τον παλμογράφο). Αν ο ενισχυτής λειτουργεί καλά θα ακουστεί από το μεγάφωνο ένας τόνος 1kHz . Συνδέστε τον παλμογράφο μεταξύ συλλέκτη και γης και μετρείστε το δυναμικό εξόδου συλλέκτη V_{out} από κορυφή σε κορυφή. Υπολογίστε την απολαβή δυναμικού $A_V = V_{out}/V_{in}$.

$$A_V = \quad \quad \quad$$



4. Ανοίξτε το διακόπτη και αντικαταστήστε το μεγάφωνο με μιá αντίσταση $3.9\Omega-0.5W$. Η αντίσταση αυτή προσεγγίζει την αντίσταση του μεγαφώνου. Ρυθμίστε με τη βοήθεια του παλμογράφου την έξοδο της γεννήτριας στις τιμές, που αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα, και μετρήστε την τάση εξόδου V_{out} στα άκρα της αντιστάσεως R_4 (από κορυφή σε κορυφή).

V_{in-p-p} mV	$V_{out-p-p}$ mV	V_p mV	P_p mW
20			
50			
80			
100			

5. Υπολογίστε το πλάτος της ισχύος εξόδου P_p από τη σχέση $P_p = \frac{V_p^2}{R}$, όπου $V_p = \frac{1}{2} V_{out-p-p}$, για κάθε τιμή του σήματος εισόδου. Τι συμβαίνει στο πλάτος ισχύος εξόδου, όσο αυξάνει το πλάτος τάσης του σήματος εισόδου; Να γίνει γραφική παράσταση της σχέσης: $P_p = f(V_{in-p-p})$.

Ερωτήσεις

1. Τι θα συμβεί στην απολαβή δυναμικού του ενισχυτή, που μελετήσατε, αν διπλασιασθεί ο αριθμός σπειρών του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή;
2. Ποιός είναι ο ρόλος του πυκνωτή C_1 στο κύκλωμα του ενισχυτή;
3. Αν αντί για τη χρησιμοποίηση μετασχηματιστή εξόδου προστεθεί σε σειρά με το μεγάφωνο κατάλληλη ωμική αντίσταση, ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη υψηλή αντίσταση εξόδου για την κρυσταλλοτρίοδο, ο ενισχυτής λειτουργεί ικανοποιητικά;
4. Ποιός είναι ο ρόλος του πυκνωτή C_2 στο κύκλωμα του ενισχυτή;
5. Τι θα συμβεί στην ισχύ εξόδου του ενισχυτή, αν αυξηθεί η τιμή της αντιστάσεως φόρτου R_L ;

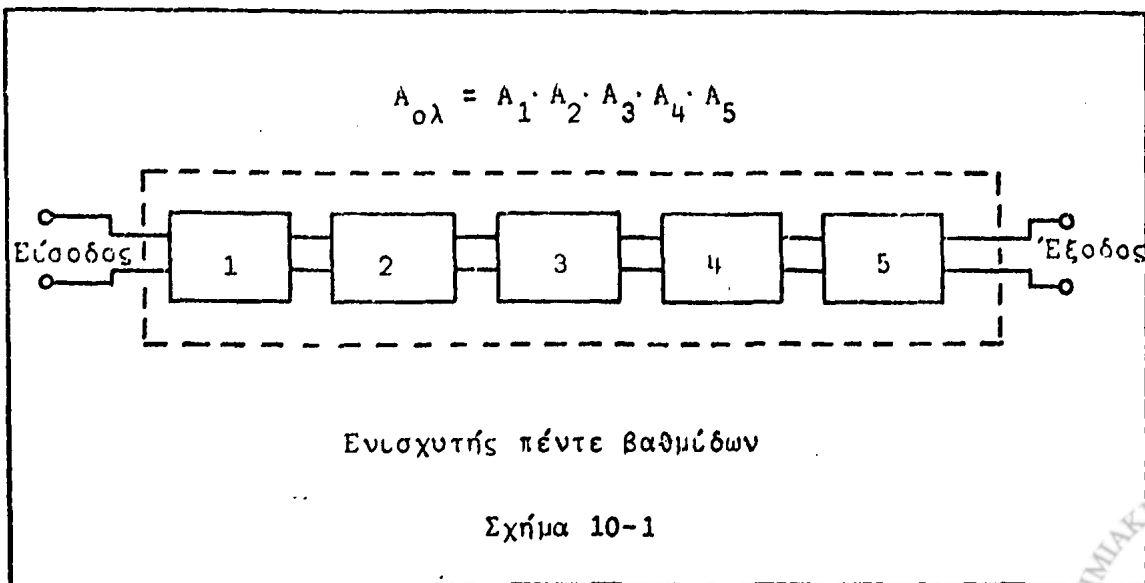


ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΔΥΟ ΒΑΘΜΙΔΩΝ ΜΕ ΣΥΖΕΥΞΗ RC

Εισαγωγή

Στις περισσότερες περιπτώσεις πρακτικών εφαρμογών απαιτούνται ενισχύσεις σήματος, που ξεπερνούν κατά πολύ την ενισχυτική ικανότητα ενός απλού κυκλώματος με μια ηλεκτρονική λυχνία ή κρυσταλλολυχνία. Έτσι π.χ. ακόμη και στην εντελώς συνηθισμένη περίπτωση των ενισχυτών ακουστικών συχνοτήτων οικιακής χρήσης (σε ραδιόφωνα, συγκροτήματα hi-fi κλπ) απαιτείται ενίσχυση ενός σήματος αρχικής ισχύος κλάσματος του microwatt (μW) τόσο, ώστε να φθάσει την τάξη μερικών Watts, δηλαδή απαιτείται ενίσχυση περίπου 10^7-10^8 . Για την επίτευξη τόσο μεγάλων ενισχύσεων συνδέονται διαδοχικά περισσότεροι από ένας απλοί ενισχυτές, έτσι ώστε το σήμα εξόδου καθενός να αποτελεί σήμα εισόδου για τον επόμενο. Δημιουργείται με τον τρόπο αυτόν ένας ενισχυτής πολλών βαθμίδων (σχήμα 10-1), του οποίου η απολαβή είναι κατ' αρχήν ίση προς το γινόμενο των επί μέρους απολαβών κάθε βαθμίδας. Από άποψη ορολογίας συχνά οι πρώτες βαθμίδες χαρακτηρίζονται σαν προενισχυτής και οι τελευταίες (μία έως τρεις) σαν τελικός ενισχυτής.

Κατά το συνδυασμό (σύζευξη) των διαφόρων βαθμίδων εμφανίζονται και πρέπει να επιλυθούν αρκετά προβλήματα, προκειμένου ο ολικός ενισχυτής, που

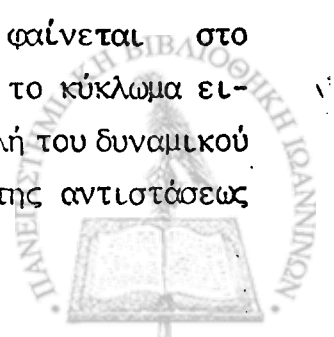


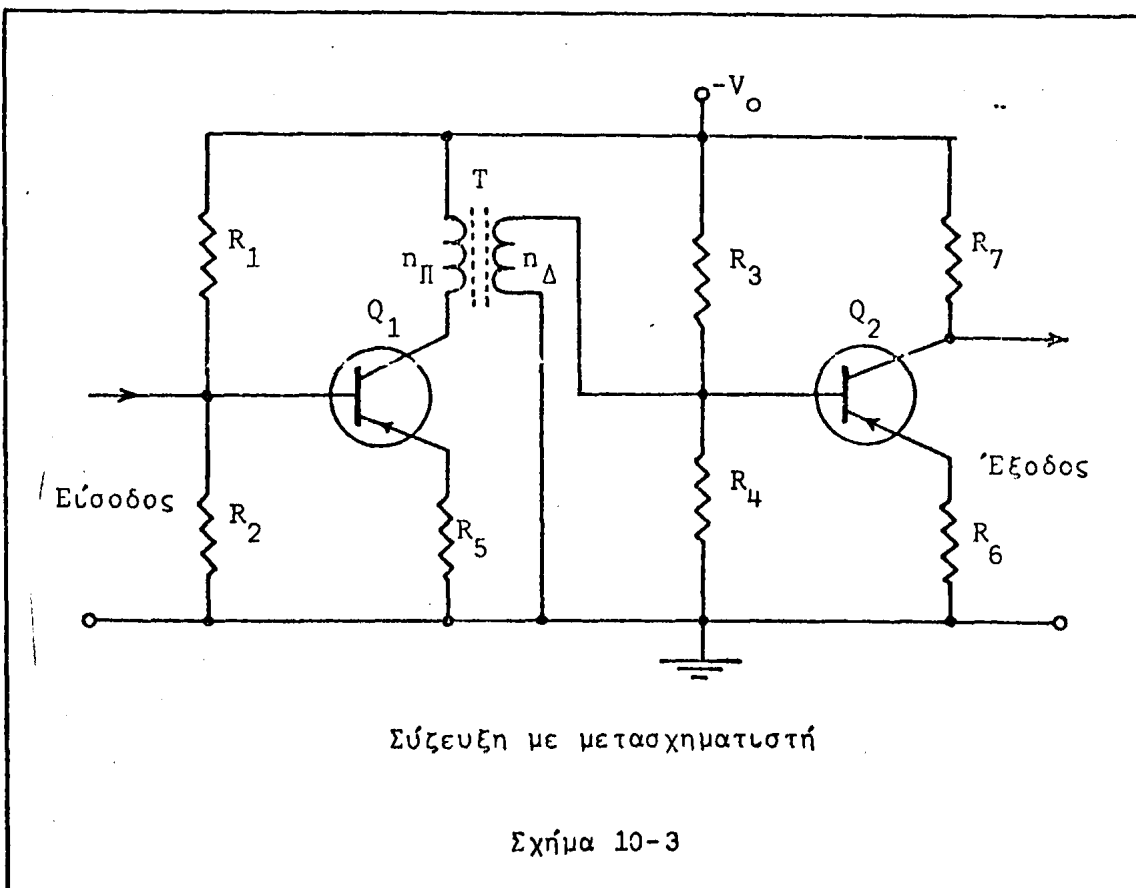
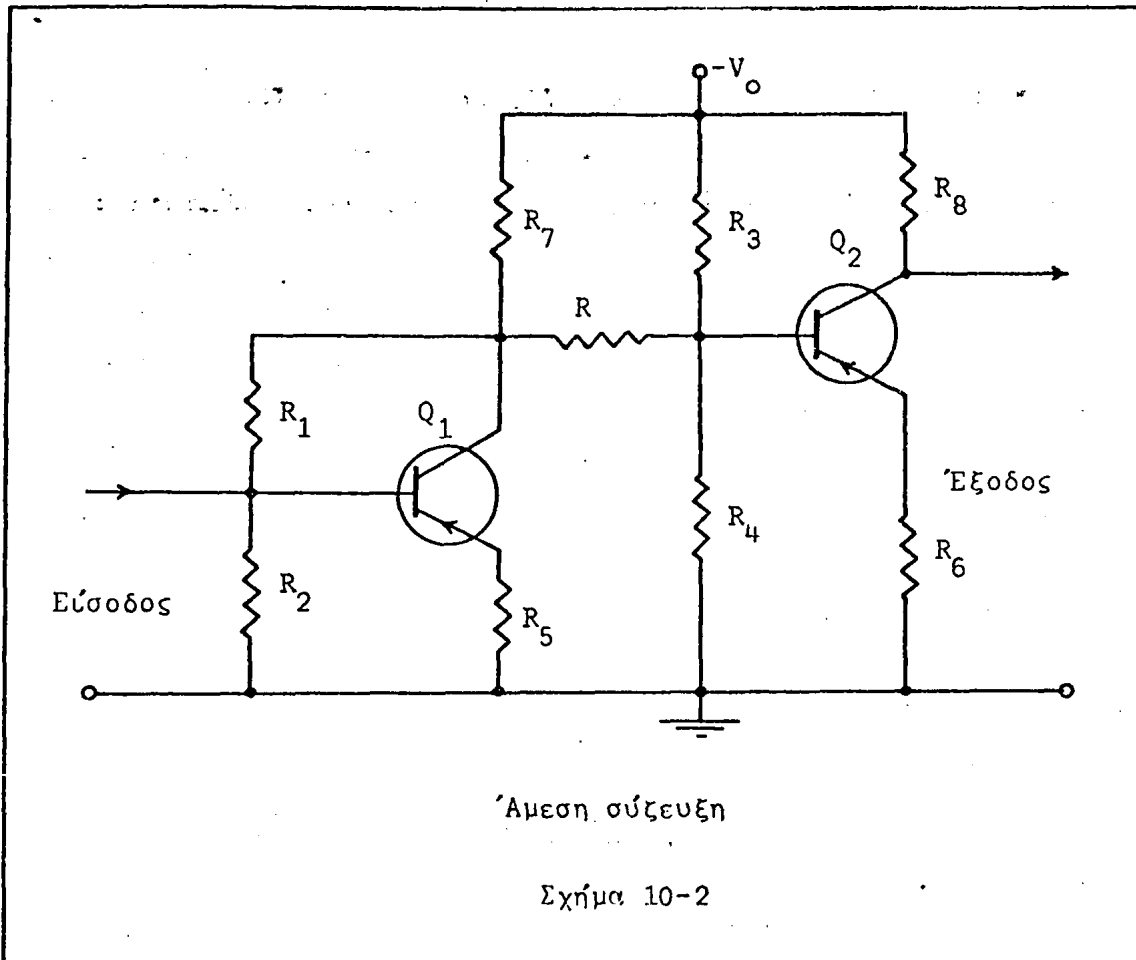
είσοδος του είναι η είσοδος της πρώτης και έξοδος του η έξοδος της τελευταίας βαθμίδας, να έχει την επιθυμητή απολαβή, εύρος ζώνης συχνοτήτων αποκρίσεως, στάθμη παραμορφώσεως κλπ. Η σύζευξη πραγματοποιείται πάντοτε με κάποια παθητικά κυκλώματα, κυκλώματα δηλαδή που δεν έχουν τη δυνατότητα παροχής ισχύος στη διάταξη. Τα κύρια ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά των κυκλωμάτων αυτών είναι η αντίστασή τους, η εξάρτησή της από τη συχνότητα του σήματος και η δυνατότητα προσαρμογής των αντιστάσεων εξόδου κάθε βαθμίδας και εισόδου της επομένης της. Τα χαρακτηριστικά αυτά έχουν μικρή σχετικά σημασία προκειμένου για ενισχυτές με ηλεκτρονικές λυχνίες, στους οποίους οι αντιστάσεις εισόδου και εξόδου είναι πολύ υψηλές και ο βαθμός απομονώσεως των αντίστοιχων κυκλωμάτων πολύ μεγάλος (αυτό σημαίνει απλά, ότι μια μεταβολή των παραμέτρων του κυκλώματος εισόδου αφήνει ουσιαστικά ανεπηρέαστο το κύκλωμα εξόδου και αντίστροφα). Αντίθετα προκειμένου για ενισχυτές με κρυσταλλολυχνίες τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι πολύ σημαντικά, επειδή οι ενισχυτικές βαθμίδες παρουσιάζουν χαμηλότερες αντιστάσεις εισόδου και εξόδου, συχνά μεγάλη διαφορά μεταξύ τους και κάθε μεταβολή παραμέτρων του ενός κυκλώματος (π.χ. εισόδου) επηρεάζει άμεσα το άλλο (π.χ. εξόδου).

Σε γενικές γραμμές η κακή προσαρμογή αντιστάσεων μεταξύ διαδοχικών βαθμίδων έχει σαν αποτέλεσμα ελάττωση των επί μέρους απολαβών και κατ' ακολουθία και της ολικής. Ανάλογο αποτέλεσμα έχει και η ύπαρξη υψηλής αντιστάσεως στα κυκλώματα σύζευξης, ενώ η μεταβολή της αντιστάσεως αυτής με τη συχνότητα επηρεάζει κύρια το εύρος της ζώνης συχνοτήτων αποκρίσεως. Αναμένεται δηλαδή σε κάθε σύνθετο ενισχυτή η ολική απολαβή να είναι μικρότερη από το θεωρητικό γινόμενο των επί μέρους απολαβών και η ζώνη συχνοτήτων, που ενισχύει ικανοποιητικά (ζώνη αποκρίσεως) στενότερη από ότι για κάθε επί μέρους βαθμίδα. Η αντιμετώπιση της ελαττώσεως του εύρους ζώνης συχνοτήτων είναι εξαιρετικά δυσχερής, ενώ η ελάττωση της απολαβής έναντι της θεωρητικά αναμενόμενης αντιμετωπίζεται με προσθήκη περισσότερων ενισχυτικών βαθμίδων.

Πρακτικά έχουν επικρατήσει τρεις τρόποι συζεύξεως διαδοχικών ενισχυτικών βαθμίδων, που καθένας παρουσιάζει ωρισμένα πλεονεκτήματα και ωρισμένα μειονεκτήματα, από την αξιολόγηση των οποίων εξαρτάται η επιλογή σε κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή. Οι τρεις αυτοί τρόποι είναι:

α) Άμεση σύζευξη (d-c coupling): Στη σύζευξη αυτή, που φαίνεται στο σχήμα 10-2, το κύκλωμα εξόδου της μιας βαθμίδας συνδέεται με το κύκλωμα εισόδου της επόμενης με μια ωμική αντίσταση. Έτσι κάθε μεταβολή του δυναμικού (και ρεύματος) συλλέκτη της πρώτης βαθμίδας εισέρχεται μέσω της αντιστάσεως





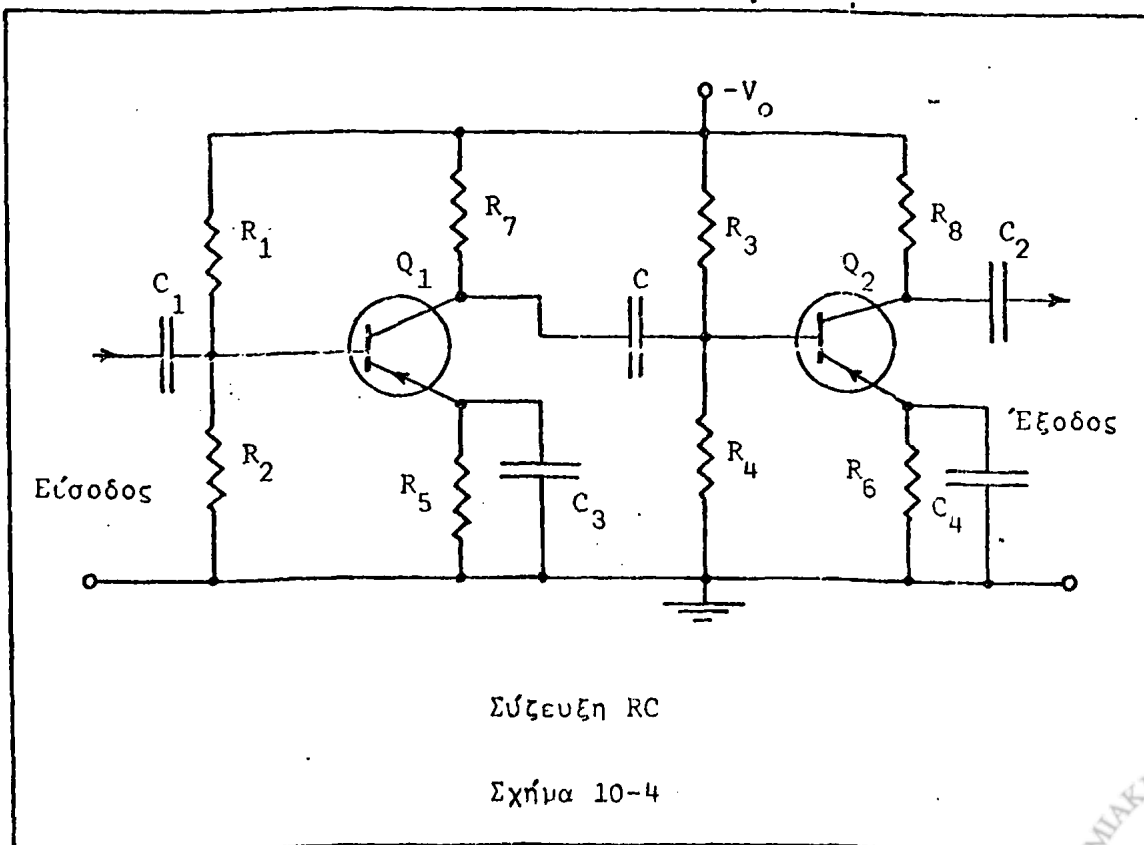
αυτής σαν σήμα εισόδου στη δεύτερη. Συμβαίνει βέβαια κατά μήκος της μια πτώση τάσης, που ισοδυναμεί με απώλεια σήματος και προκαλεί ελάττωση της ολικής απολαβής. Η πτώση τάσης όμως αυτή είναι ανεξάρτητη της συχνότητας του σήματος γεγονός, που αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα, επειδή εξασφαλίζει στους ενισχυτές της κατηγορίας αυτής μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων αποκρίσεως ειδικότερα προς την περιοχή χαμηλών συχνοτήτων. Τα μειονεκτήματα της σύζευξης είναι κυρίως δύο. Πρώτον το ότι στην είσοδο κάθε βαθμίδας εμφανίζεται και η συνεχής συνιστώσα του ρεύματος συλλέκτη της προηγούμενης, που επηρεάζει το σημείο λειτουργίας (πλώσεως-αυξάνει το στατικό ρεύμα βάσης) της κρυσταλλοτριόδου της και δημιουργεί κινδύνους να οδηγηθούν οι κρυσταλλολυχνίες των τελευταίων βαθμίδων σε κατάσταση κόρου. Δεύτερον το ότι έχει μεγάλη θερμική αστάθεια, επειδή κάθε μεταβολή του ρεύματος συλλέκτη μιας βαθμίδας λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών μεταβιβάζεται στην επόμενη και ενισχύεται σαν πραγματικό σήμα με αποτέλεσμα και το αρχικό σήμα να αλλοιώνεται και ο ενισχυτής να εκτρέπεται ευκολότερα από την κατάσταση κανονικής λειτουργίας του. Παρά τα μειονεκτήματά του ο τρόπος αυτός σύζευξης είναι αναντικατάστατος προκειμένου για ενισχυτές πολύ χαμηλών συχνοτήτων (κάτω από 50Hz) και συνεχούς.

β) Σύζευξη με μετασχηματιστή (transformer coupling): Στη σύζευξη αυτή, που φαίνεται στο σχήμα 10-3, για τη μεταφορά του σήματος από τη μια βαθμίδα στην άλλη χρησιμοποιείται μετασχηματιστής. Έτσι κάθε μεταβολή-σήμα στο ρεύμα συλλέκτη της μιας βαθμίδας (πρωτεύον του μετασχηματιστή) προκαλεί επαγωγικά την ανάπτυξη ανάλογης μεταβολής-σήματος στο ρεύμα βάσης της επόμενης (δευτερεύον του μετασχηματιστή). Το κύριο πλεονέκτημα του μετασχηματιστή είναι, ότι προσαρμόζει ιδανικά την αντίσταση εξόδου της μιας βαθμίδας στην αντίσταση εισόδου της επόμενης (με βάση τη γνωστή σχέση $n_{\Delta}^2 \cdot R_{II} = n_{II}^2 \cdot R_{\Delta}$). Επιτυγχάνεται έτσι η μέγιστη δυνατή μεταφορά ισχύος από τη μια βαθμίδα στην άλλη. Επιτυγχάνεται ακόμη ασιμόνωση της συνεχούς συνιστώσας του ρεύματος εξόδου κάθε βαθμίδας και καλή θερμική σταθερότητα. Τα μειονεκτήματα της χρήσης μετασχηματιστή είναι το υψηλό κόστος και βάρος του καθώς και η δημιουργία έντονης παραμορφώσεως κυρίως στις υψηλές συχνότητες λόγω μαγνητικών υστερήσεων. Οι μετασχηματιστές, που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό, είναι ειδικής κατασκευής, πολύ μικρών διαστάσεων και με αριθμό σπειρών πρωτεύοντος μεγαλύτερο από τον αριθμό σπειρών δευτερεύοντος. Το τελευταίο χαρακτηριστικό υποβιβάζει βέβαια την τάση του σήματος, αλλά επαυξάνει το ρεύμα του, που προκειμένου για κρυσταλλολυχνίες είναι και σημαντικότερο.

γ) Σύζευξη με πυκνωτή (RC coupling): Στη σύζευξη αυτή, που φαίνεται στο σχήμα 10-4, για τη μεταφορά του σήματος από τη μια βαθμίδα στην άλλη χρησιμοποιείται πυκνωτής. Το κυριότερο πλεονέκτημα του πυκνωτή είναι, ότι εμποδίζει αποτελεσματικά την εμφάνιση της συνεχούς συνιστώσας του ρεύματος συλλέκτη της πρώτης βαθμίδας στην είσοδο της δεύτερης με αποτέλεσμα αποφυγή πιθανών φαινομένων κόρου και καλή θερμική σταθερότητα. Άλλα πλεονεκτήματα είναι το χαμηλό κόστος και η απλότητα συνδεσμολογίας. Τα βασικά μειονεκτήματα του είναι η κακή προσαρμογή αντιστάσεων των κυκλωμάτων καθώς και η εξάρτηση της αντιστάσεώς του από τη συχνότητα του σήματος, που έχει σαν αποτέλεσμα δραστική μείωση της απολοβής στις χαμηλές συχνότητες. Παρά τα μειονεκτήματά της αυτά η σύζευξη RC χρησιμοποιείται ευρύτατα και κυρίως σε ενισχυτές μέσων ή ακουστικών συχνοτήτων. Για το λόγο αυτό αποτελεί και αντικείμενο της πειραματικής μελέτης της άσκησης και γίνεται εκτενέστερη αναφορά στο κύκλωμά της.

Ενισχυτής με σύζευξη RC

Το κύκλωμα του σχήματος 10-4 παριστά έναν ενισχυτή δύο βαθμίδων. Εντε-

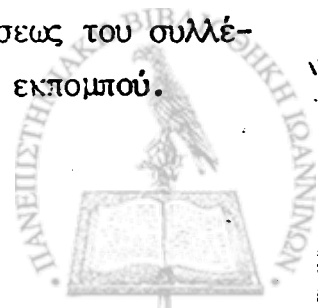


λώς ανάλογα όμως γίνεται επέκταση και σε περισσότερες. Αναφερόμαστε αρχικά στη χρησιμότητα των διαφόρων αντιστάσεων του κυκλώματος, εφ' όσον η ενισχυτική δράση των κρυσταλλοτριόδων είναι από προηγούμενες ασκήσεις γνωστή.

Οι αντιστάσεις R_1 και R_2 σχηματίζουν ένα διαιρέτη τάσης, μέσω του οποίου ρυθμίζεται η επιθυμητή στάθμη (τάση) πολώσεως βάσης της πρώτης κρυσταλλοτριόδου. Η τάση αυτή σε συνδυασμό με την τάση πολώσεως εκπομπού καθορίζει το σημείο λειτουργίας της κρυσταλλοτριόδου. Οι αντιστάσεις αυτές έχουν συνήθως εξαιρετικά μεγάλες τιμές, πολύ μεγαλύτερες από την αντίσταση εισόδου της κρυσταλλολυχνίας, ώστε η απώλεια σήματος εξ αιτίας της παρουσίας τους (διαρροή μέσω της R_2 προς τη γη) να είναι ασήμαντη. Ανάλογος είναι ο ρόλος των αντιστάσεων R_3 και R_4 για τον προσδιορισμό της στάθμης πολώσεως βάσης της δεύτερης κρυσταλλοτριόδου.

Οι αντιστάσεις R_5 και R_6 είναι αντιστάσεις πολώσεως του εκπομπού των αντιστοιχών κρυσταλλοτριόδων και η κύρια δράση τους συνίσταται στο να εξασφαλίζουν ικανοποιητική θερμική σταθερότητα στο ρεύμα εκπομπού. Πιο συγκεκριμένα η αντίσταση του τμήματος εκπομπού-βάσης επηρεάζεται αισθητά από τις μεταβολές θερμοκρασίας, επειδή μεταβάλλεται ο αριθμός των φορέων ενδογενούς αγωγιμότητας του ημιαγωγού, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται αντίστοιχα και το ρεύμα εκπομπού. Έτσι π.χ. σε κάθε αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει ο αριθμός φορέων, ελαττώνεται η αντίσταση και αυξάνει, εφ' όσον οι διαφορές δυναμικού διατηρούνται σταθερές, στο ρεύμα εκπομπού. Έτσι όμως μετατοπίζεται το σημείο λειτουργίας της κρυσταλλοτριόδου και αλλοιώνονται τα ενισχυτικά χαρακτηριστικά του κυκλώματος. Για να αποφευχθεί το δυσάρεστο αυτό φαινόμενο προστίθεται σε σειρά με τον εκπομπό μια αντίσταση, έτσι ώστε η ολική αντίσταση του κυκλώματος εκπομπού να αποτελείται από δύο αντιστάσεις σε σειρά, την αντίσταση R_{EB} του τμήματος εκπομπού-βάσης, που επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, και την εξωτερική αντίσταση έστω R_5 , που είναι πρακτικά ανεπηρέαστη από θερμοκρασιακές μεταβολές. Επειδή η επαφή εκπομπού πολώνεται ορθά, παρουσιάζει μικρή σχετικά αντίσταση R_{EB} . Είναι λοιπόν δυνατόν, αν η R_5 είναι μέτρια υψηλή, θερμοκρασιακά ευαίσθητο να είναι ένα μικρό μόνο τμήμα της ολικής αντιστάσεως, οπότε υποβαθμίζονται ανάλογα και οι μεταβολές του ρεύματος εκπομπού και εξασφαλίζεται θερμική σταθερότητα λειτουργίας του ενισχυτή.

Τέλος οι αντιστάσεις R_7 και R_8 είναι αντιστάσεις πολώσεως του συλλεκτικού με δράση ανάλογη προς τη δράση των αντιστάσεων πολώσεως εκπομπού.



Στο διαφοροποιημένο κάπως πειραματικό κύκλωμα του σχήματος 10-6 υπάρχει ένας ακόμη διαιρέτης τάσης ακριβώς μετά την είσοδό του και πριν από το διαιρέτη πολώσεως βάσης της κρυσταλλοτριόδου Q_1 . Η χρησιμότητα του διαιρέτη αυτού είναι τελείως διαφορετική και σχετίζεται αποκλειστικά με τις πειραματικές ιδιομορφίες του κυκλώματος 10-6. Επειδή δηλαδή το σήμα εισόδου (στη βάση του Q_1) στο συγκεκριμένο πειραματικό κύκλωμα πρέπει να είναι πολύ μικρό ($\approx 1\text{mV}$) αλλιώς προκαλείται παραμόρφωση, η παρατήρηση και μέτρησή του με παλμογράφο είναι ανέφικτη, διότι οι διαθέσιμοι στο Εργαστήριο παλμογράφοι έχουν μέγιστη ευαισθησία 100mV/cm . Ο διαιρέτης τάσης λοιπόν αυτός δίνει τη δυνατότητα εφαρμογής στην είσοδο σημάτων με εκατονταπλάσιο μέγεθος, που η μέτρησή τους είναι δυνατή και ευχερής.

Γίνεται τώρα αναφορά στη δράση των διαφόρων πυκνωτών του κυκλώματος 10-4. Ο πυκνωτής C είναι ο πυκνωτής συζεύξεως. Μέσω αυτού, όπως προαναφέρθηκε, μεταφέρεται το σήμα από τη μια βαθμίδα στην άλλη, ενώ απομονώνεται η συνεχής συνιστώσα του σήματος αυτού. Προκειμένου να μη συμβαίνει εξασθένηση του σήματος κατά τη μεταφορά του αυτή πρέπει η αντίσταση του πυκνωτή να είναι ασήμαντη ή τουλάχιστον όσο το δυνατό μικρότερη. Η απαίτηση αυτή γίνεται ιδιαίτερα επιτακτική εξ αιτίας του ότι η αντίσταση εισόδου της επόμενης βαθμίδας, προς την οποία κατευθύνεται το σήμα, είναι σχετικά χαμηλή. Η χωρητική όμως αντίσταση ενός πυκνωτή είναι συνάρτηση της χωρητικότητάς του και της συχνότητας του διερχόμενου σήματος με βάση τη γνωστή σχέση:

$$X_C = 1/\omega C = 1/2\pi\nu C$$

Είναι λοιπόν προφανές, ότι ενώ στις μέσες και υψηλές συχνότητες η αντίσταση αυτή είναι μικρή, στις χαμηλές αυξάνει, γίνεται συγκρίσιμη με την αντίσταση εισόδου της κρυσταλλοτριόδου Q_2 και προκαλεί ουσιαστική εξασθένηση του σήματος και ελάττωση της απολαβής. Για τον περιορισμό του ανεπιθύμητου αυτού φαινομένου χρησιμοποιούνται πυκνωτές με πολύ μεγάλη χωρητικότητα, π.χ. μεταξύ $1\mu\text{F}$ και $30\mu\text{F}$ ή και μεγαλύτεροι. Οι πυκνωτές αυτοί είναι συνήθως ηλεκτρολυτικοί ειδικής κατασκευής, ώστε να συνδυάζουν τη μεγάλη χωρητικότητα με μικρές εξωτερικές διαστάσεις.

Οι πυκνωτές C_1 και C_2 είναι επίσης πυκνωτές συζεύξεως με την προηγούμενη και επόμενη αντίστοιχα βαθμίδα και έχουν ανάλογη δράση και ιδιότητες προς τον πυκνωτή C. Ειδικά στο πειραματικό κύκλωμα του σχήματος 10-6, όπου δεν υπάρχουν άλλες πλευρικές βαθμίδες, ο πυκνωτής C_1 είναι πυκνωτής



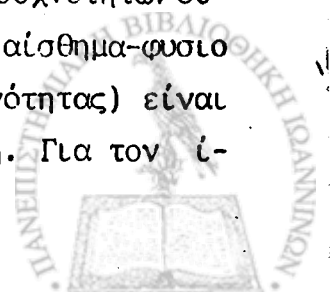
είσοδου, χρησιμεύει δηλαδή στο να εμποδίζει τη συνεχή τάση της γεννήτριας ακουστικών συχνοτήτων να εμφανιστεί στην είσοδο του κυκλώματος, και ο πυκνωτής C_2 πυκνωτής εξόδου, εμποδίζει δηλαδή τη συνεχή τάση του κυκλώματος εξόδου της δεύτερης βαθμίδας να εμφανιστεί στην είσοδο του παλμογράφου παρατηρήσεων.

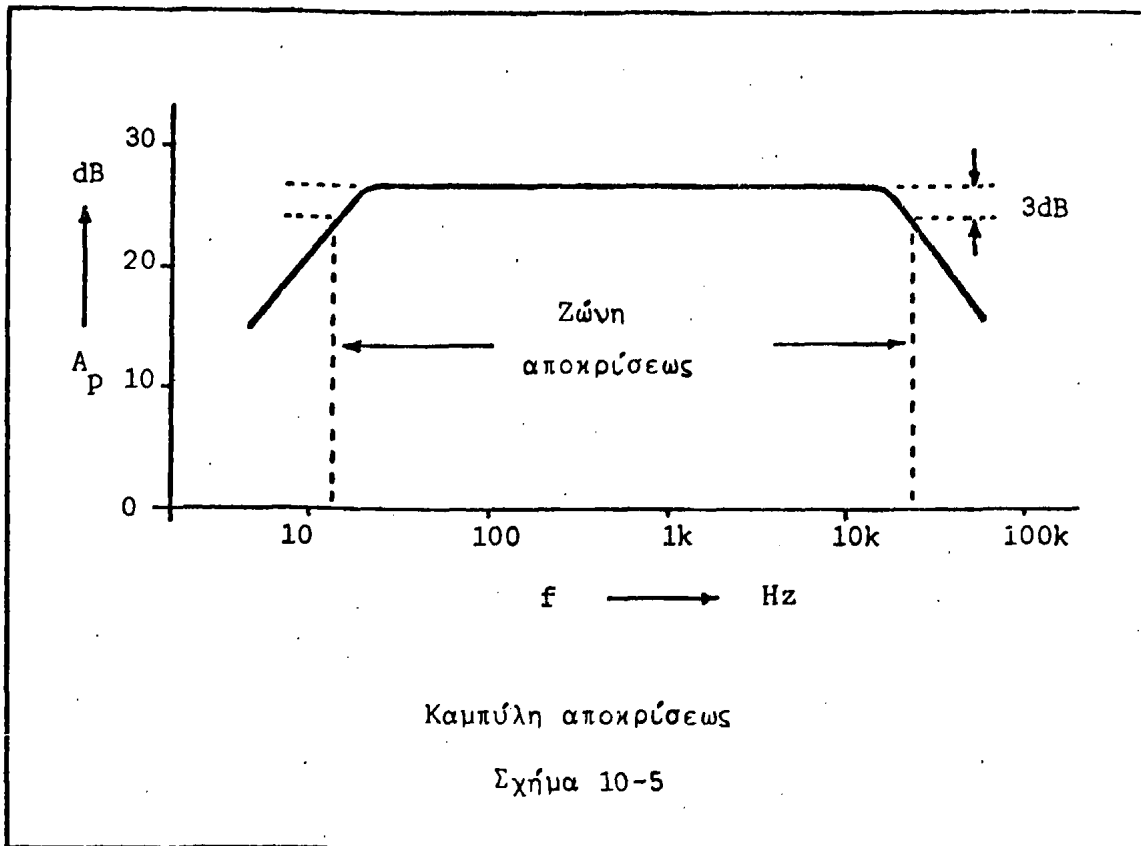
Οι πυκνωτές C_3 και C_4 είναι πυκνωτές διαρροής (παρακάμψεως). Έχουν μεγάλη χωρητικότητα και κατά συνέπεια υποβιβάζουν σημαντικά την αντίσταση του κυκλώματος εκπομπού σε εναλλασσόμενα ρεύματα, γεγονός που επιδρά ευνοϊκά στην απολαβή του ενισχυτή. Παράλληλα μέσω αυτών βραχυκυκλώνονται και διαρρέουν προς τη γη οι παρασιτικές εναλλασσόμενες συνιστώσες (π.χ. ραδιοφωνικές) του ρεύματος εκπομπού, οι οποίες σε αντίθετη περίπτωση θα επηρέαζαν την τάση πολώσεώς του προκαλώντας αστάθεια λειτουργίας και ελάττωση της απολαβής.

Καμπύλες αποκρίσεως

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία περιγραφής των επιδόσεων ενός ενισχυτή είναι η καμπύλη αποκρίσεως συχνοτήτων (frequency response curve), η καμπύλη δηλαδή, που περιγράφει την εξάρτηση της απολαβής του από τη συχνότητα του σήματος. Ιδανικός βέβαια είναι εκείνος ο ενισχυτής, που η απολαβή του είναι ανεξάρτητη από τη συχνότητα. Πρακτικά όμως αυτό είναι ανέφικτο και κάθε ενισχυτής παρουσιάζει μια περιοχή συχνοτήτων (ζώνη αποκρίσεως), στην οποία η απολαβή του είναι ικανοποιητική και σταθερή, ενώ εκτός της περιοχής αυτής ελαττώνεται με γρήγορο ρυθμό. Ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζεται ο ενισχυτής (ηχητικά συγκροτήματα, ραδιοφωνικοί πομποί κλπ.) διαμορφώνονται έτσι τα κυκλωματικά χαρακτηριστικά του, ώστε να παρουσιάζει σταθερή απολαβή (επίπεδη απόκριση) στην επιθυμητή περιοχή συχνοτήτων. Τις μεγαλύτερες βέβαια δυσχέρειες σχεδιασμού και κατασκευής παρουσιάζουν οι ενισχυτές, που χρησιμοποιούνται σε πολύ χαμηλές (κάτω των 10Hz) και πολύ υψηλές (άνω των 10MHz) συχνότητες.

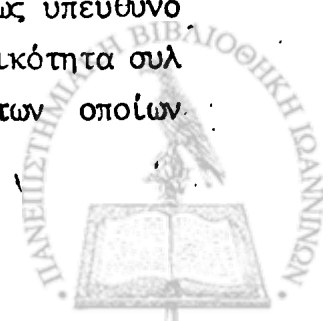
Στο σχήμα 10-5 δίνεται μια τυπική καμπύλη αποκρίσεως για έναν ενισχυτή ακουστικών συχνοτήτων (δηλαδή από 20Hz έως 20kHz) με σύζευξη RC, σαν αυτόν που παρίσταται διαγραμματικά στο σχήμα 10-4. Ο άξονας συχνοτήτων είναι λογαριθμικός κυρίως, επειδή η συχνότητα συνδέεται με το αίσθημα-φυσιολογικό χαρακτηριστικό του ύψους και η σχέση αυτή (ύψους-συχνότητας) είναι σύμφωνα με τον ψυχοφυσικό νόμο των Fechner-Weber λογαριθμική. Για τον ί-





διο λόγο και ο άξονας των απολαβών είναι λογαριθμικός (έκφραση απολαβής σε dB) επειδή η απολαβή για σταθερή ισχύ του σήματος εισόδου σχετίζεται με το φυσιολογικό χαρακτηριστικό της έντασης (ακουστότητας). Η χρησιμοποίηση λογαριθμικών αξόνων για την παράσταση της καμπύλης αποκρίσεως είναι σχεδόν απόλυτα γενικευμένη. Σαν ζώνη αποκρίσεως του ενισχυτή θεωρείται η περιοχή μεταξύ των συχνοτήτων εκείνων για τις οποίες η απολαβή ελαττώνεται κατά 3dB ως προς την κανονική της τιμή, δηλαδή η ενίσχυση ισχύος έχει πέσει στο μισό ή της τάσης στο 70% της κανονικής τιμής. Άξιο παρατηρήσεως είναι, ότι εκτός της ζώνης αποκρίσεως η απολαβή πέφτει γραμμικά τόσο για μεγαλύτερες όσο και για μικρότερες συχνότητες και μάλιστα με ρυθμό 6dB/οκτάβα· η ισχύς δηλαδή του σήματος εξόδου (για σταθερή ισχύ σήματος εισόδου) υποτετραπλασιάζεται για κάθε διπλασιασμό ή υποδιπλασιασμό αντίστοιχα της συχνότητας.

Όπως έχει αναφερθεί και στα προηγούμενα, κύριος υπεύθυνος για την ελάττωση της απολαβής στις χαμηλές συχνότητες είναι ο πυκνωτής συζεύξεως και εν μέρει ο πυκνωτής διαρροής του κυκλώματος εκπομπού. Αντίθετα η ελάττωση απολαβής στις υψηλές συχνότητες οφείλεται στις χωρητικότητες των κρυσταλλοτριόδων, των αγωνών συνδεσμολογίας και του φόρτου με κύριο πάντως υπεύθυνο τις χωρητικότητες των κρυσταλλοτριόδων και συγκεκριμένα τη χωρητικότητα συλλέκτη-εκπομπού της πρώτης και βάσης εκπομπού της δεύτερης μέσω των οποίων



διαρρέει το σήμα (μέρος του σήματος) προς τη γη προκαλώντας αντίστοιχη ελάττωση απολαβής. Οι χωρητικότητες αυτές οφείλονται στην ύπαρξη των περιοχών απογυμνώσεως και είναι κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των κρυσταλλολυχνιών· έτσι για την επέκταση της ζώνης αποκρίσεως σε μεγαλύτερες συχνότητες απαιτείται χρησιμοποίηση κρυσταλλοτριόδων ειδικά σχεδιασμένων, ώστε να παρουσιάζουν εξαιρετικά μικρές χωρητικότητες επαρών.

Χρησιμοποιούμενα όργανα

1. Τροφοδοτικό χαμηλής τάσης
2. Γεννήτρια ακουστικών συχνοτήτων
3. Παλμογράφος
4. Δύο πολύμετρα
5. Δύο κρυσταλλοτρίοδοι ηρη
6. Αντιστάσεις: Τρεις των $10\text{k}\Omega-0.5\text{W}$, τέσσερες των $1\text{k}\Omega-0.5\text{W}$, δύο των $100\Omega-0.5\text{W}$, μία $100\Omega-1\text{W}$.
7. Πυκνωτές: Τρεις των $10\mu\text{F}$, δύο των $50\mu\text{F}$, ένας $0.01\mu\text{F}$ ηλεκτρολυτικοί.
8. Διακόπτης

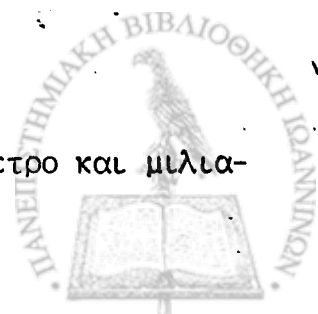
Πειραματικό μέρος

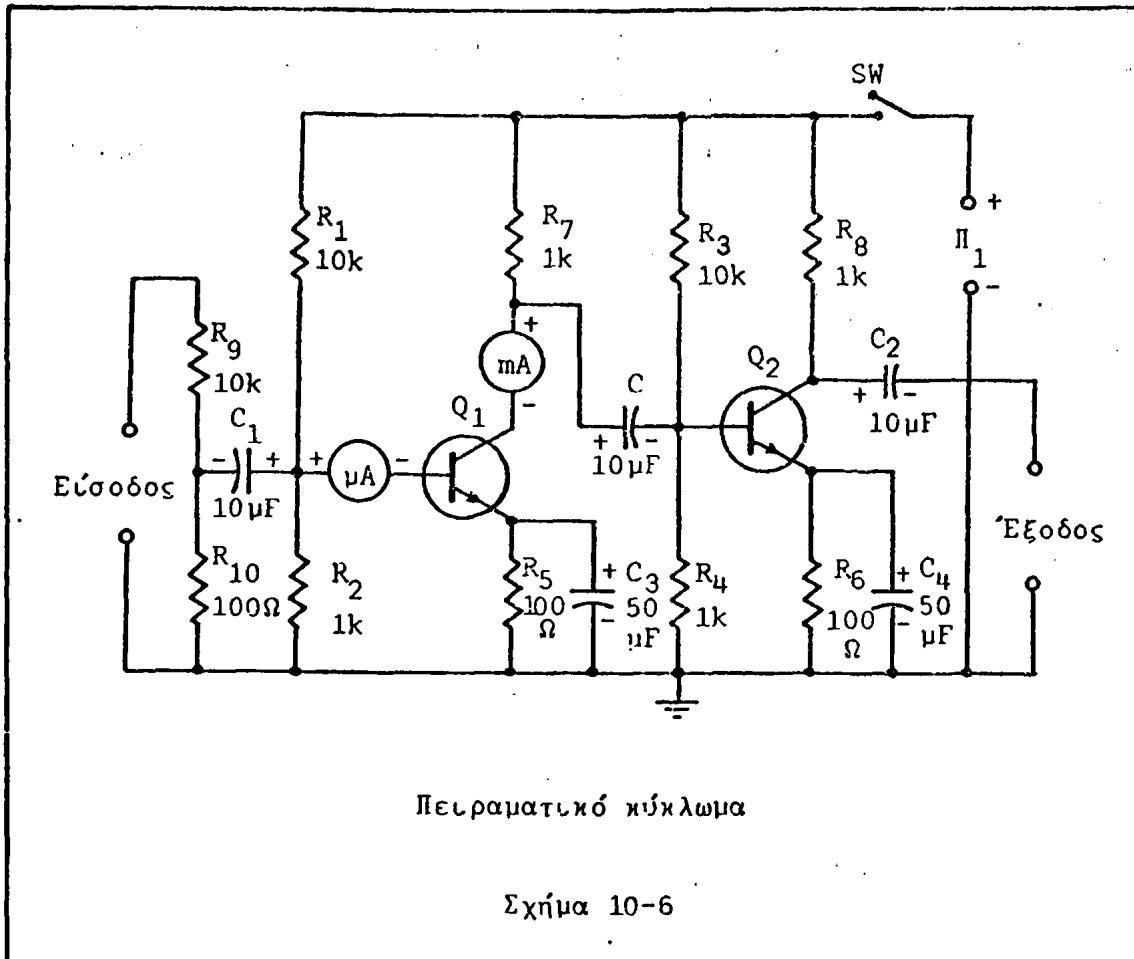
1. Πραγματοποιείτε το κύκλωμα του σχήματος 10-6, προσέχοντας την ορθή πολικότητα των ηλεκτρολυτικών πυκνωτών.

2. Ρυθμίστε την πηγή τροφοδοσίας Π_1 για τάση $V_0 = 6\text{V}$, κλείστε το διακόπτη και μετρείστε το ρεύμα βάσης I_B και ρεύμα συλλέκτη I_C χωρίς σήμα στην είσοδο (στατική λειτουργία). Υπολογίστε τη στατική παράμετρο β της κρυσταλλοτριόδου Q_1 .

	I_B μA	I_C mA	β_{d-c}
Q_1			
Q_2			

3. Ανοίξτε το διακόπτη και αποσυνδέστε το μικροαμπερόμετρο και μιλι-





μερόμετρο από το κύκλωμα της πρώτης βαθμίδας βραχυκυκλώνοντας τις θέσεις στις οποίες προυπήρχαν τα όργανα αυτά. Κατόπιν συνδέστε τα στις αντίστοιχες θέσεις του κυκλώματος της δεύτερης βαθμίδας και επαναλάβετε τις μετρήσεις της ερωτήσεως 2. Υπολογίστε τη στατική παράμετρο β της κρυσταλλοτριόδου Q_2 .

4. Ανοίξτε πάλι το διακόπτη, αποσυνδέστε τα πολύμετρα βραχυκυκλώνοντας τις θέσεις τους και κλείστε ξανά το διακόπτη. Συνδέστε στην είσοδο του κυκλώματος τη γεννήτρια ακουστικών συχνοτήτων και εφαρμόστε σήμα συχνότητας $f = 1000\text{Hz}$ και ύψους $V = 0.1V_{p-p}$ μετρημένο με τον παλμογράφο. Υπολογίστε την πραγματική τιμή του σήματος εισόδου (μετά το διαιρέτη εξασθενήσεως).

$$V_{lin} = \quad \text{mV}_{p-p}$$

5. Συνδέστε τον παλμογράφο μεταξύ συλλέκτη του Q_1 και γης και μετρήστε την τάση εξόδου της πρώτης βαθμίδας.



$$V_{1out} = \quad \text{mV}_{p-p}$$

6. Υπολογίστε την ενίσχυση τάσης της πρώτης βαθμίδας.

$$A_{1v} =$$

7. Συνδέστε τον παλμογράφο μεταξύ της βάσης του Q_2 και γης και μετρήστε το σήμα εισόδου της δεύτερης βαθμίδας. Διαφέρει από το σήμα εξόδου της πρώτης;

$$V_{2in} = \quad \text{mV}_{p-p}$$

8. Συνδέστε τον παλμογράφο μεταξύ συλλέκτη του Q_2 και γης και μετρήστε την τάση εξόδου της δεύτερης βαθμίδας.

$$V_{2out} = \quad V_{p-p}$$

9. Υπολογίστε την ενίσχυση τάσης της δεύτερης βαθμίδας.

$$V_{2v} =$$

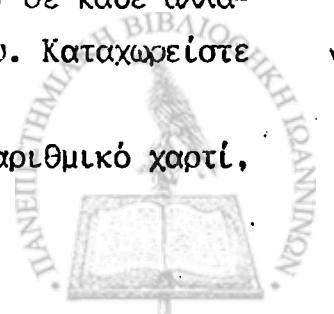
10. Υπολογίστε την ολική απολαβή τάσης του ενισχυτή και με τους δύο δυνατούς τρόπους. Συγκρίνετε και σχολιάστε τα αποτελέσματα.

$$A_v = A_{1v} \cdot A_{2v} =$$

$$A_v = \frac{V_{2out}}{V_{1in}} =$$

11. Μεταβάλλοντας τη συχνότητα του σήματος της ακουστικής γεννήτριας λάβετε μετρήσεις για τη χάραξη της καμπύλης αποκρίσεως του ενισχυτή. Η τάση εισόδου του ενισχυτή (τάση εξόδου της γεννήτριας συχνοτήτων) να επιβεβαιώνεται με τον παλμογράφο ότι διατηρείται σταθερή ($= 0.1V$) σε κάθε αλλαγή συχνότητας. Προσέξτε να μην παραμορφώνεται το σήμα εξόδου. Καταχωρείστε τις μετρήσεις στον παρακάτω πίνακα.

12. Χαράξτε την καμπύλη αποκρίσεως $A_v = \sigma(f)$ σε ημιλογαριθμικό χαρτί,



	C = 10 μ F	C = 0.01 μ F		C = 10 μ F	C = 0.01 μ F
f Hz	V _{out} mV	V _{out} mV	f Hz	V _{out} mV	V _{out} mV
20			5k		
50			10k		
100			20k		
200			30k		
500			50k		
1k			100k		
2k			200k		

με λογαριθμικό τον άξονα των συχνοτήτων.

13. Αντικαταστήστε τον πυκνωτή συζεύξεως των 10 μ F με έναν άλλο των 0.01 μ F και επαναλάβετε τα ζητούμενα στην ερώτηση 11. Καταχωρείστε τις μετρήσεις στον ίδιο πίνακα.

14. Χαράξτε στο ίδιο (ερωτ. 12) διάγραμμα τη νέα καμπύλη αποκρίσεως. Τι παρατηρείτε; Ποιά τιμή πυκνωτή συζεύξεως θα προτιμούσατε για καλύτερη απόκριση στις ακουστικές συχνότητες;

Ερωτήσεις

1. Ποιά είναι τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της σύζευξης με μετασχηματιστή σε σύγκριση με τη σύζευξη RC;
2. Γιατί πρέπει να συνδέονται με ορθή πολικότητα οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές στα διάφορα κυκλώματα;
3. Ποιά είναι η σχέση φάσεων μεταξύ των σημάτων εισόδου και εξόδου στον ενισχυτή, που μελετήσατε;
4. Αν ένας ενισχυτής με δύο όμοιες βαθμίδες στο άνω όριο της ζώνης απόκρισεως έχει ελάττωση ενισχύσεως 3dB, τι ελάττωση έχει στο ίδιο



όριο η κάθε βαθμίδα;

5. Ποιού είδους σύζευξη είναι προτιμότερη προκειμένου για ενισχυτές ραδιοφωνικών συχνοτήτων;

Κλάση	Κλάση	Κλάση	Κλάση



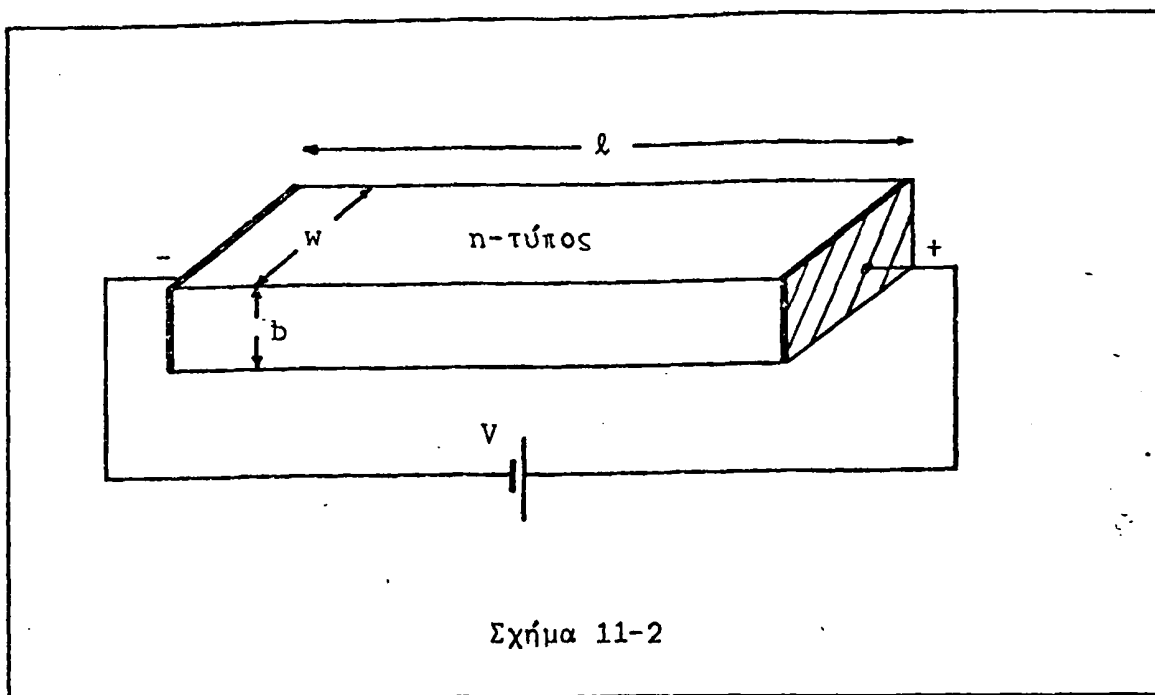
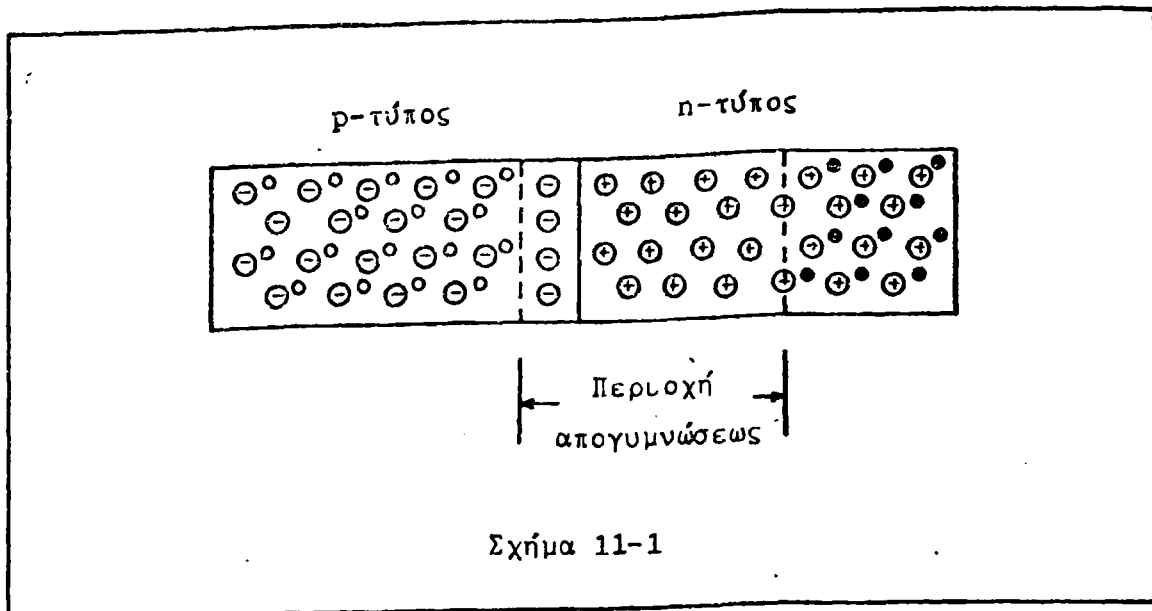
ΜΕΛΕΤΗ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΤΡΙΟΔΟΥ F. E. T.Εισαγωγή

Η κρυσταλλοτρίοδος πέτυχε να αντικαταστήσει στα διάφορα ηλεκτρονικά κυκλώματα την τρίοδο ηλεκτρονική λυχνία εξ αιτίας των πολλών πλεονεκτημάτων, που παρουσιάζει συγκριτικά με αυτήν. Παρέμειναν ωστόσο και ωρισμένα χαρακτηριστικά, όπως η μεγάλη αντίσταση εισόδου και η θερμοκρασιακή σταθερότητα, στα οποία μειονεκτεί. Τα μειονεκτήματα αυτά ξεπεράστηκαν με την ανάπτυξη ενός νέου τύπου κρυσταλλολυχνίας με διαφορετική δομή και αρχή λειτουργίας, που πέτυχε να συνδυάσει τα πλεονεκτήματα τόσο των ηλεκτρονικών τριόδων όσο και των κρυσταλλοτριόδων αποφεύγοντας όλα σχεδόν τα μειονεκτήματά τους. Η κρυσταλλολυχνία αυτή επικράτησε να αναφέρεται σαν "Κρυσταλλοτρίοδος F.E.T." από τα αρχικά της ονομασίας της στην Αγγλική γλώσσα, "Field Effect Transistor". Οι πρώτες μελέτες για τη συγκρότηση και αρχή λειτουργίας της έγιναν το 1928 (Lilienfeld), ενώ οι πρώτες πειραματικές προσπάθειες κατασκευής της άρχισαν πολύ αργότερα το 1952 (Shockley) και ολοκληρώθηκαν το 1962.

Η λειτουργία του F.E.T. στηρίζεται στη δημιουργία και τον έλεγχο της περιοχής απογυμνώσεως, που σχηματίζεται σε κάθε επαφή p-n. Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας αυτής υπενθυμίζονται αρχικά μερικά βασικά στοιχεία δομής και συμπεριφοράς των ημιαγωγών.

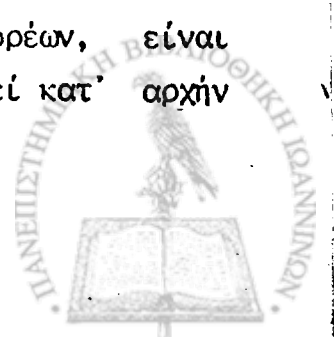
Είναι γνωστό, ότι σε κάθε επαφή p-n δημιουργείται μια περιοχή απογυμνώσεως η χωρική έκταση της οποίας εξαρτάται και από την πυκνότητα προσμίξεων των ημιαγωγών. Προκειμένου για επαφές με το ίδιο ποσοστό προσμίξεων και στα δύο τμήματά τους η περιοχή αυτή εκτείνεται εξ ίσου στο p-τύπου και n-τύπου τμήμα, ενώ αν το ποσοστό προσμίξεων του ενός τύπου (π.χ. του p-τύπου) είναι σημαντικά μεγαλύτερο, εκτείνεται κατ'εξοχήν στο τμήμα του άλλου τύπου ημιαγωγού (π.χ. n-τύπου), όπως φαίνεται και στο σχήμα 11-1. Η έκταση της περιοχής απογυμνώσεως ελέγχεται (μεταβάλλεται) περαιτέρω με την εφαρμογή κατάλληλων πόλσεων στην επαφή και συγκεκριμένα περιορίζεται για ορθή πόλωση και διευρύνεται για ανάστροφη.





Έστω τώρα μια ράβδος από ημιαγωγό n-τύπου, σχήματος ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου, που στα άκρα της έχουν δημιουργηθεί δύο ωμικές επαφές, όπως φαίνεται στο σχήμα 11-2. Αν μεταξύ των επαφών αυτών εφαρμοσθεί μια διαφορά δυναμικού V , από τη ράβδο θα διέλθει ρεύμα ηλεκτρονίων (φορείς πλειονότητας) με πραγματική φορά από τον αρνητικό ακροδέκτη προς το θετικό. Το ρεύμα αυτό, εφόσον η ράβδος είναι ημιαγωγός με ένα είδος φορέων, είναι αποκλειστικά ρεύμα ολισθήσεως και όχι διαχύσεως και ακολουθεί κατ' αρχήν το γνωστό νόμο του Ohm:

$$I = V/R$$



ή

$$I = b \cdot w \cdot e \cdot N_D \cdot \mu_n \cdot E \quad (1)$$

όπου e το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο, b και w οι γεωμετρικές διαστάσεις της ράβδου (ύψος-πλάτος), N_D η πυκνότητα των προσμίξεων, μ_n η ευκινησία των φορέων (ηλεκτρόνια) και E η ένταση του πεδίου στη ράβδο, που συνδέεται με τη διαφορά δυναμικού στα άκρα της με τη σχέση:

$$E = V/l$$

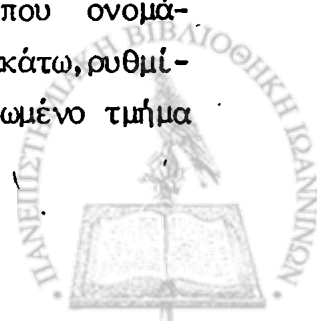
όπου l το μήκος της.

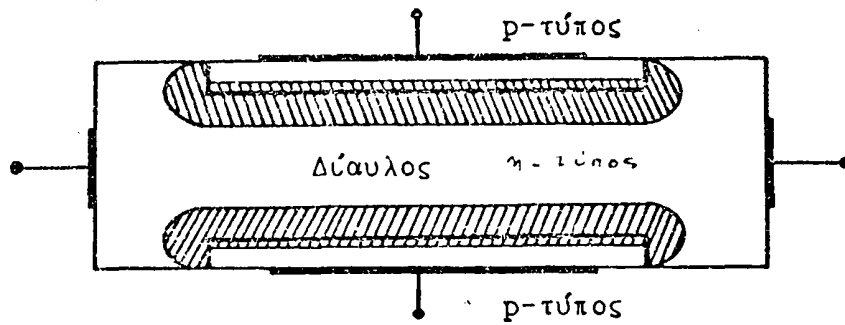
Όσον αφορά δε στην κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της ράβδου, παρατηρείται ελάττωσή του (πτώση τάσης) από το θετικό άκρο προς το αρνητικό.

Δομή και λειτουργία

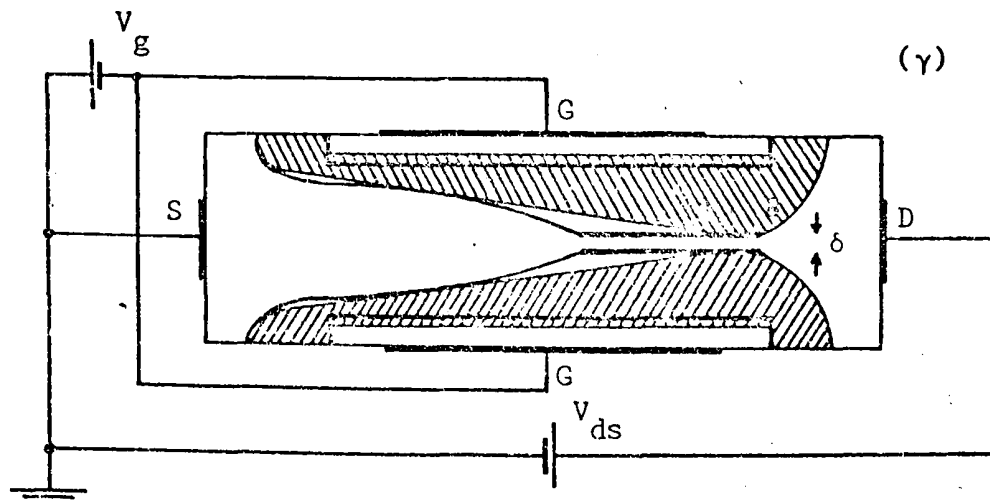
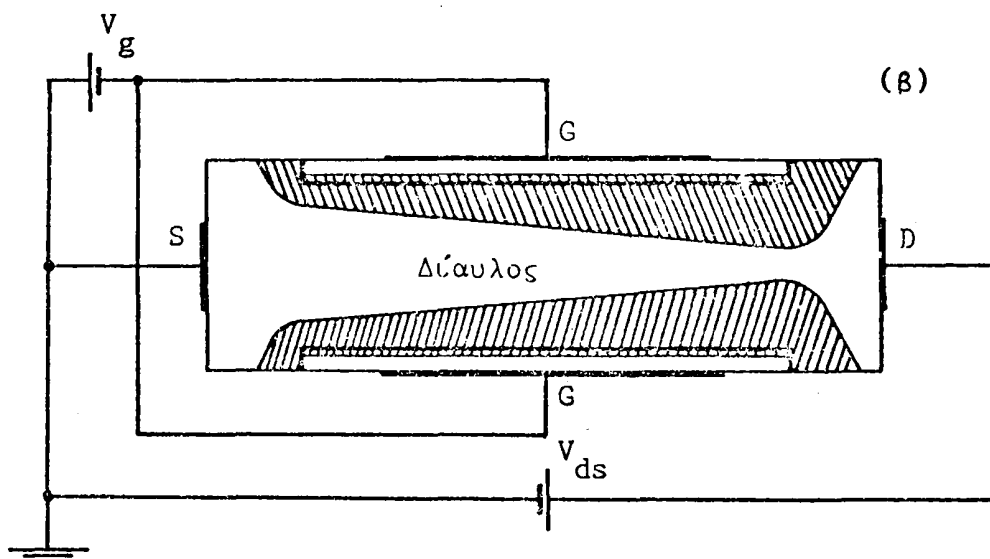
Μετά την εισαγωγή, που προηγήθηκε, εξετάζεται η δομή, ο τρόπος λειτουργίας και η μορφή των χαρακτηριστικών μιας κρυσταλλοτριόδου F.E.T. Η δομή της φαίνεται στο σχήμα 11-3.α. Το F.E.T. είναι μια ράβδος ημιαγωγού n-τύπου, στις δύο έδρες της οποίας έχουν δημιουργηθεί δυο περιοχές ημιαγωγού p-τύπου με συγκέντρωση προσμίξεων πολύ μεγαλύτερη από τη συγκέντρωση προσμίξεων του n-τύπου. Δημιουργούνται έτσι δυο επαφές p-n, που οι αντίστοιχες περιοχές απογυμνώσεάς τους εκτείνονται κυρίως στο n-τύπου τμήμα. Αποτέλεσμα αυτού είναι η ελάττωση της διατομής της ράβδου, μέσα από την οποία μπορούν να κινηθούν φορείς, εφ'όσον κατά τα γνωστά η ύπαρξη φορέων στις ζώνες απογυμνώσεως είναι αδύνατη.

Έστω τώρα ότι στα άκρα της ράβδου εφαρμόζεται μια διαφορά δυναμικού V_{ds} καθώς και μια τάση πολώσεως των τμημάτων p-τύπου V_g , όπως φαίνεται στο σχήμα 11-3.β. Το άκρο του F.E.T., που συνδέεται με τον αρνητικό πόλο της ηλεκτρικής πηγής, ονομάζεται πηγή (source-S), επειδή από το άκρο αυτό εισέρχονται τα ηλεκτρόνια στον ημιαγωγό. Το άκρο, που συνδέεται με το θετικό πόλο, ονομάζεται αποχέτευση (drain-D), επειδή από αυτό εξέρχονται τα ηλεκτρόνια από τον ημιαγωγό. Τα δύο τμήματα του ημιαγωγού p-τύπου ονομάζονται πύλη (gate-G), επειδή μέσω αυτών, όπως θα εξηγηθεί παρακάτω, ρυθμίζεται το ποσό των διερχόμενων ηλεκτρονίων. Τέλος το μη απογυμνωμένο τμήμα





α) Δομή F.E.T. χωρίς πόλωση



(β)-(γ) Δομή F.E.T. με πόλωση

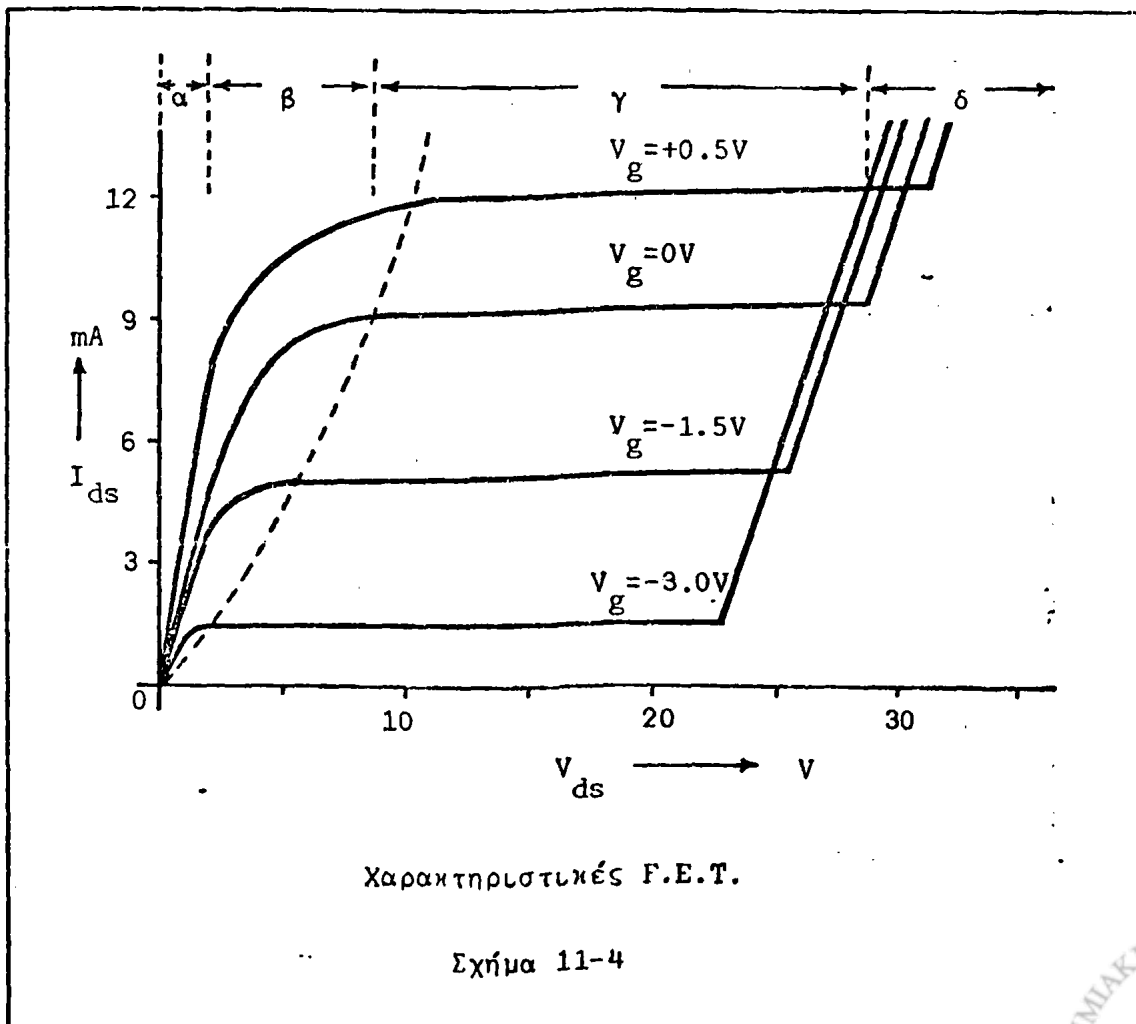
Σχήμα 11-3



του ημιαγωγού n-τύπου, μέσω του οποίου και μόνον μπορούν να διακινηθούν τα ηλεκτρόνια, ονομάζεται διάωλος (channel).

Στο σχήμα 11-4 δίνεται το σμήνος των χαρακτηριστικών του F.E.T., δηλαδή το σμήνος των καμπυλών που περιγράφουν τη μεταβολή του ρεύματος διαώλου I_{ds} συναρτήσει της τάσης πηγής-αποχετεύσεως V_{ds} για διάφορες σταθερές τιμές της τάσης πολώσεως πύλης V_g . Με βάση το δομικό πρότυπο του σχήματος 11-3 δίνουμε μια ερμηνεία της μορφής τους.

Θεωρούμε αρχικά, ότι η τάση $V_g = 0$ (χαρακτηριστική για $V_g = 0$), δηλαδή ότι η πύλη είναι βραχυκυκλωμένη προς την πηγή και έχει δυναμικό μηδέν (γης). Μόλις εφαρμοσθεί μια διαφορά δυναμικού V_{ds} μεταξύ πηγής-αποχετεύσεως αρχίζει η διέλευση ρεύματος ηλεκτρονίων μέσω του διαώλου. Ταυτόχρονα όμως κατά μήκος του διαώλου εμφανίζεται μια κατανομή δυναμικού, τέτοια ώστε το δυναμικό να αυξάνει όσο πλησιάζουμε την αποχέτευση. Έτσι η διαφορά δυναμικού (τάση πολώσεως των επακών p-n) είναι μεταβλητή κατά μήκος της ράβδου. Αρχίζει από μια σχεδόν μηδενική τιμή - εφόσον η πύλη βραχυκυκλώνεται προς

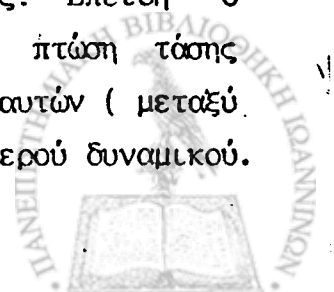


την πηγή - και αυξάνει μέχρι μια τιμή ίση σχεδόν προς την τάση V_{ds} , είναι δε διαρκώς ανάστροφη. Σαν αποτέλεσμα της αυξανόμενης αυτής ανάστροφης πόλωσης διευρύνονται αντίστοιχα οι περιοχές απογυμνώσεως προς την πλευρά της αποχετεύσεως και ο δίαυλος παίρνει τη σφηνοειδή μορφή, που φαίνεται στο σχήμα 11-3.β. Ευνόητο είναι, ότι όσο αυξάνει η τάση V_{ds} αυξάνουν και οι επιμέρους ανάστροφες πολώσεις των επαφών p-n και επεκτείνονται αντίστοιχα οι περιοχές απογυμνώσεως.

Για μικρές τιμές της τάσης V_{ds} (περιοχή α της χαρακτηριστικής) το στένεμα του διαύλου είναι σχεδόν αμελητέο και το ρεύμα αυξάνει σχεδόν γραμμικά με την ένταση πεδίου (άρα και τάση V_{ds}) ακολουθώντας τη σχέση (1). Η μόνη διαφοροποίηση είναι, ότι το b δεν συμβολίζει πλέον το πάχος της ράβδου, αλλά μόνον το πάχος του μη απογυμνωμένου n-τύπου τμήματός της.

Για μεγαλύτερες τιμές της τάσης V_{ds} (περιοχή β της χαρακτηριστικής) ο δίαυλος στενεύει ουσιαστικά και η αντίστασή του αυξάνει σημαντικά. Στη σχέση (1) αυτό σημαίνει, ότι παράλληλα με την αύξηση του πεδίου E ελαττώνεται το πάχος b (γίνεται φθίνουσα συνάρτηση τόσο του V_{ds} , όσο και της αποστάσεως από την πηγή x , όπου $x_{max} = l$), οπότε σαν αποτέλεσμα ελαττώνεται και το ρεύμα I_{ds} σε σχέση με τις τιμές, που θα έπαιρνε για αμετάβλητο πάχος διαύλου. Αυτό βέβαια σημαίνει συνεχή ελάττωση του ρυθμού αυξήσεως του ρεύματος ώσπου τελικά για μια τιμή της τάσης V_{ds} , που ονομάζεται δυναμικό λαβίδας, τα δύο φαινόμενα (αύξηση λόγω πεδίου και ελάττωση λόγω αποστενώσεως) αλληλοαντισταθμίζονται και το ρεύμα παύει να αυξάνει. Η διακεκομμένη παραβολική καμπύλη στο σχήμα 11-4 εκφράζει το γεωμετρικό τόπο των δυναμικών λαβίδας για διάφορες τάσεις πολώσεως πύλης.

Θα περίμενε κανείς, ότι περαιτέρω αύξηση της τάσης V_{ds} θα προκαλούσε περαιτέρω στένωση του διαύλου και αντίστοιχη ελάττωση ή και διακοπή του ρεύματος I_{ds} , όταν οι περιοχές απογυμνώσεως συνενώνονται. Κάτι τέτοιο όμως, όπως φαίνεται και από τη μορφή των χαρακτηριστικών, δεν συμβαίνει, αλλά το πάχος διαύλου σταθεροποιείται στο ελάχιστο όριο δ , που αντιστοιχεί στο δυναμικό λαβίδας (σχήμα 11-3.γ). Η πλήρης ερμηνεία για την ύπαρξη αυτού του ελάχιστου πάχους διαύλου είναι περίπλοκη και οπωσδήποτε αδύνατο να δοθεί με βάση το μονοδιάστατο ως προς τα πεδία πρότυπο λειτουργίας, που θεωρήσαμε. Ποιοτικά πάντως σχολιάζοντας το φαινόμενο παρατηρούμε τα εξής: Επειδή ο δίαυλος λαμβάνει σχήμα σφήνας, είναι ευνόητο, ότι η μέγιστη πτώση τάσης συμβαίνει μεταξύ των σημείων A και B, ενώ οι περιοχές εκτός αυτών (μεταξύ πηγής και A ή αποχετεύσεως και B) είναι περιοχές σχεδόν σταθερού δυναμικού.



Στην περιοχή λοιπόν μέγιστης στενώσεως του διαύλου τα ηλεκτρόνια υπόκεινται στην επίδραση δύο πεδίων. Ενός πεδίου, που τείνει να τα απωθήσει εκτός της περιοχής στενώσεως και οφείλεται στην αναστρεφόμενη πόλωση των επαφών p-n και ενός πεδίου, που τείνει να τα συγκρατήσει στην περιοχή αυτή κινώντας τα από το A προς το B και που οφείλεται στην τάση πηγής-αποχέτευσεως. Και τα δύο πεδία αυξάνουν όσο αυξάνει η τάση V_{ds} , αλλά το δεύτερο αυξάνει ταχύτερα, διότι υποβοηθείται και από τη διαρκώς αυξανόμενη ανισοκατανομή του δυναμικού κατά μήκος της ράβδου, που όπως προαναφέρθηκε, δημιουργεί μέγιστο εντάσεως πεδίου μεταξύ των A και B. Τα ηλεκτρόνια λοιπόν θα συνεχίσουν να κινούνται από το A προς το B (ουσιαστικά από την πηγή προς την αποχέτευση) ανεξάρτητα από τη διαμόρφωση των πεδίων, δυναμικών ή περιοχών απογυμνώσεως στην περιοχή στενώσεως και γενικότερα στο δίαυλο. Εφ'όσον όμως από το δίαυλο θα διέρχεται διαρκώς ρεύμα, αυτό σημαίνει, ότι το πάχος του δεν μπορεί να ελαττώνεται διαρκώς, διότι, αν συνέβαινε κάτι τέτοιο, θα έπρεπε η πυκνότητα του ρεύματος

$$J_{ds} = I_{ds}/S = I_{ds}/b.w$$

να τείνει προς το άπειρο, εφ'όσον αποτελεί πηλίκον ενός πεπερασμένου μεγέθους (I_{ds}) και ενός, που τείνει στο μηδέν (b). Ο απειρισμός όμως της πυκνότητας του ρεύματος είναι απαράδεκτη από φυσική άποψη κατάσταση, επειδή σημαίνει π.χ. απειρισμό της συγκεντρώσεως ηλεκτρονίων στο χώρο ή απειρισμό της ταχύτητάς τους μέσα στον ημιαγωγό κλπ. Είναι λοιπόν αναγκαίο ο δίαυλος και στην περιοχή μέγιστης στενώσεως να διατηρεί ένα ελάχιστο πάχος δ .

Έχοντας υπόψη την ύπαρξη του ελάχιστου πάχους διαύλου αναμένεται για μεγαλύτερες τάσεις V_{ds} (περιοχή γ της χαρακτηριστικής) μια αύξηση του ρεύματος γραμμική σύμφωνα με τη σχέση (1). Από τις χαρακτηριστικές φαίνεται, ότι κάτι τέτοιο δε συμβαίνει και το ρεύμα διατηρείται σχεδόν σταθερό. Αυτό οφείλεται σε δυο λόγους: α) Η ένταση του πεδίου E , που είναι η μεταβλητή στη σχέση (1), δεν αυξάνει πλέον ανάλογα προς την τάση V_{ds} , αλλά αρκετά βραδύτερα, επειδή συμβαίνει ταυτόχρονα και μια επέκταση του μήκους του ελάχιστου διαύλου προς την πλευρά της πηγής (έντονη γραμμή στο σχήμα 11-3.γ) και β) η βραδεία αυτή αύξηση της εντάσεως του πεδίου E δεν προκαλεί αντίστοιχη αύξηση του ρεύματος, επειδή για τόσο μεγάλες εντάσεις πεδίου, σαν αυτές που επικρατούν στον αποστενωμένο δίαυλο (πάνω από 10^3 V/cm), παύει να

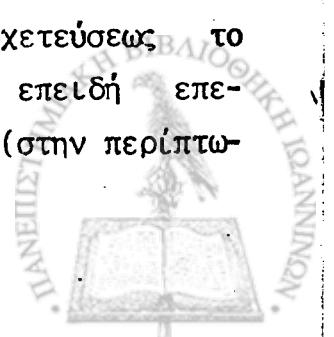


ισχύει ο νόμος του Ohm και η ευκινησία των ηλεκτρονίων μ_n που αρχικά (για πεδίο από 0 έως 10^3 V/cm) είναι σταθερή, γίνεται αντίστροφα ανάλογη του \sqrt{E} (μεταξύ των 10^3 V/cm και 10^4 V/cm) και τελικά αντίστροφα ανάλογη του E (πάνω από 10^4 V/cm), οπότε, όπως και από την (1) προκύπτει το ρεύμα σταθεροποιείται. Άλλωστε μια διαρκής αύξηση του ρεύματος I_{ds} συναρτήσει του E και για σταθερή διατομή διαώλου $w \cdot \delta$ θα οδηγούσε πάλι στον απαράδεκτο από φυσική άποψη απειρισμό της πυκνότητας ρεύματος.

Το τελευταίο τμήμα της χαρακτηριστικής (περιοχή δ) παρουσιάζει μια απότομη και ραγδαία αύξηση του ρεύματος συναρτήσει της τάσης. Η απότομη αυτή αύξηση αντιστοιχεί και οφείλεται στην κατάρρευση των επαρών p-n λόγω της ισχυρής ανάστροφης πολώσεώς τους (υπέρβαση της τάσης Zener) και βέβαια σημαίνει και την καταστροφή της κρυσταλλολυχνίας.

Αν τώρα η πύλη πολωθεί αρνητικά ως προς την πηγή, μεσολαβήσει δηλαδή στο κύκλωμα και η πηγή V_g , είναι ευνόητο, ότι οι περιοχές απογυμνώσεως για κάθε τιμή της V_{ds} θα επεκταθούν περισσότερο από ότι πριν την εφαρμογή της V_g . Αυτό βέβαια σημαίνει, ότι το ρεύμα διαώλου θα πρέπει να είναι γενικά μικρότερο για τις διάφορες τιμές τάσης V_{ds} και να φθάσει σε κατάσταση κόρου ταχύτερα (για μικρότερες τάσεις V_{ds}) και με μικρότερη τιμή ρεύματος κόρου, μια και η επέκταση των περιοχών απογυμνώσεως ισοδυναμεί με αύξηση της αντιστάσεως του διαώλου. Επίσης και η κατάρρευση των επαρών p-n θα πρέπει να προκληθεί για μικρότερη τάση V_{ds} , εφ' όσον τώρα στην ανάστροφη πόλωση λόγω κατανομής δυναμικού προστίθεται και η ανάστροφη πόλωση λόγω της πηγής V_g . Αντίθετα αν η πύλη πολωθεί θετικά ως προς την πηγή οι περιοχές απογυμνώσεως θα περιοριστούν και όλες οι παραπάνω τάσεις και ρεύματα αναμένεται να αυξηθούν. Η διάταξη των διαφόρων χαρακτηριστικών στο σμήνος του σχήματος 11-4 επιβεβαιώνει πλήρως τις προβλέψεις αυτές, που βασίζονται στο δομικό πρότυπο λειτουργίας. Πρέπει πάντως να σημειωθεί, ότι η πύλη σπανιώς τα πολώνεται θετικά ως προς την πηγή και, όταν αυτό γίνεται, πάντοτε με πολύ μικρές τάσεις, επειδή σε αντίθετη περίπτωση το F.E.T. μεταβάλλεται ουσιαστικά σε ορθά πολωμένη κρυσταλλοδιόδο και ο κύριος όγκος του ρεύματος πηγής κατευθύνεται προς την πύλη.

Από τα προγραφέντα συνάγεται άμεσα-φαίνεται άλλωστε και από το σμήνος των χαρακτηριστικών - ότι για μια οποιαδήποτε τάση πηγής-αποχετεύσεως το ρεύμα I_{ds} μειώνεται όσο αυξάνει η αρνητική πόλωση της πύλης, επειδή επεκτείνονται οι περιοχές απογυμνώσεως, και τελικά μηδενίζεται (στην περίπτω-



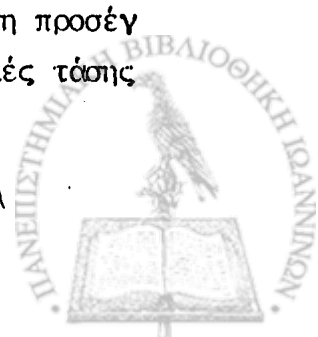
ση αυτή δεν υπάρχει ελάχιστο πάχος διαώλου, επειδή αυξάνει μόνον το πεδίο πύλης-αποχετεύσεως και όχι και το πεδίο πηγής-αποχετεύσεως). Η τάση πύλης πηγής, που απαιτείται για τη διακοπή του ρεύματος του F.E.T. ονομάζεται τάση αποκοπής (pinch-off voltage- V_p) και εξαρτάται από τις γεωμετρικές διαστάσεις, τη διηλεκτρική σταθερά και τη συγκέντρωση φορέων πλειονότητας του ημιαγωγού n-τύπου.

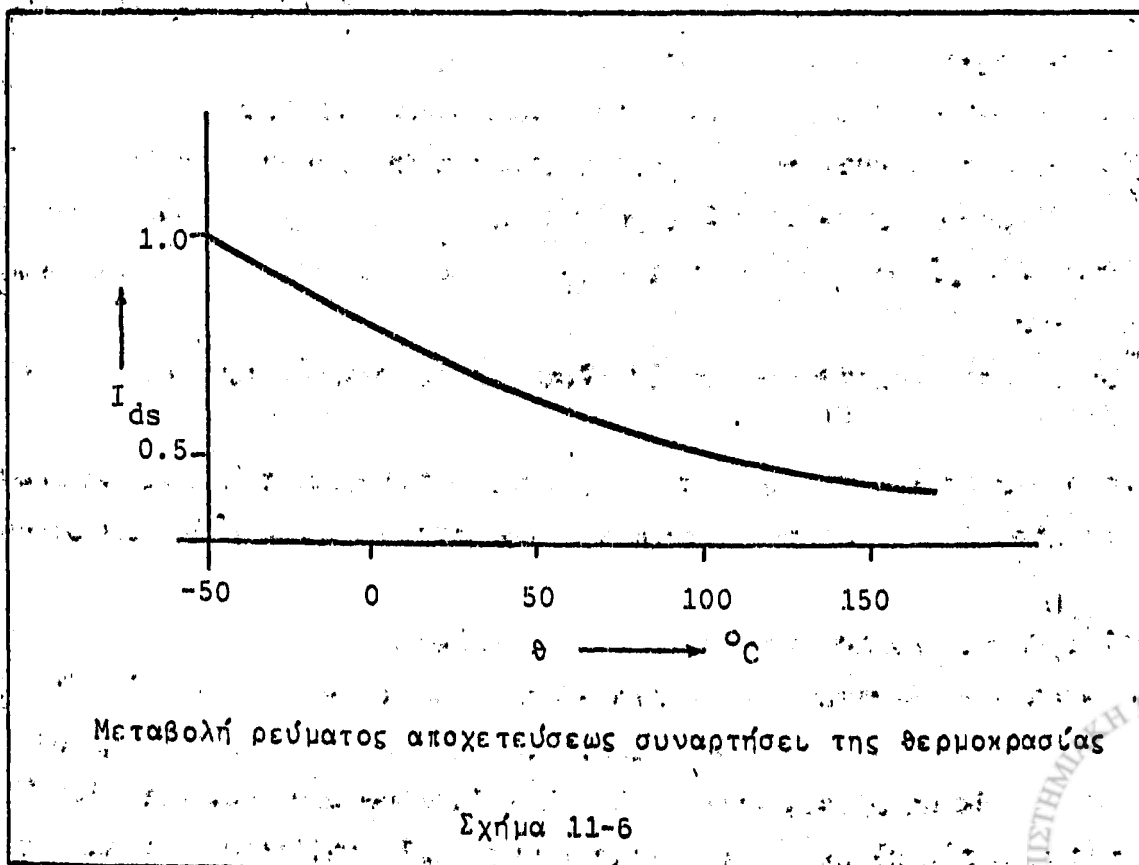
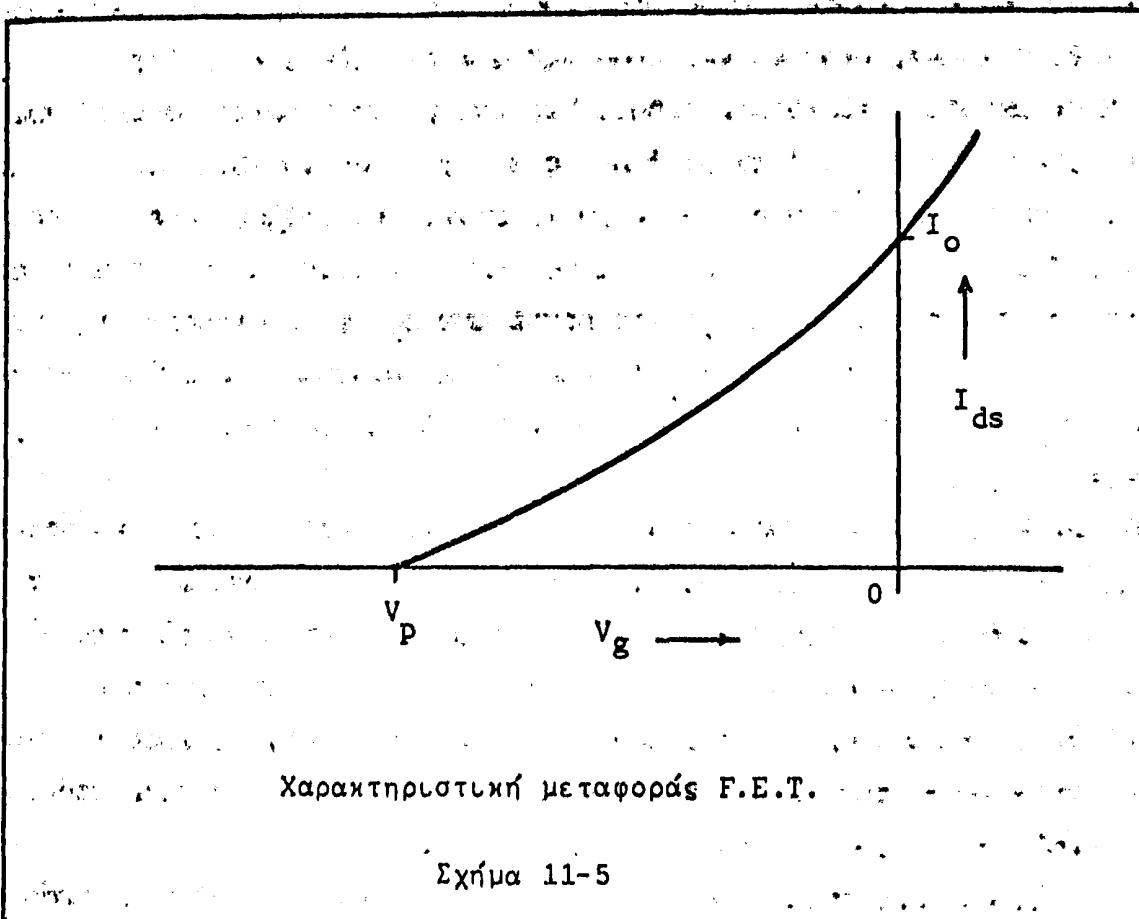
Τελειώνοντας παρατηρούμε, ότι το σμήνος των χαρακτηριστικών $I_{ds} = f(V_{ds})$ είναι εντελώς ανάλογο προς το σμήνος των χαρακτηριστικών πεντόδου ηλεκτρονικής λυχνίας και υποδηλώνει σαφώς ότι: α) Το F.E.T. μετά το δυναμικό λαβίδας μπορεί να θεωρηθεί μια εξαιρετικά ικανοποιητική πηγή σταθερού ρεύματος και β) Έχει πολύ μεγάλη δυναμική αντίσταση εξόδου $R_d = \Delta V_{ds} / \Delta I_{ds}$.

Εκτός βέβαια από την ποιοτική συζήτηση της λειτουργίας του F.E.T., που προηγήθηκε, είναι δυνατή και η ποσοτική μελέτη της, αφού όμως πραγματοποιηθούν ωρισμένες απλουστεύσεις, όπως η θεώρηση της λειτουργίας χωριστά για κάθε περιοχή της χαρακτηριστικής, και παραδοχές, όπως η απότομη μετάβαση από τον p-τύπο στον n-τύπο ημιαγωγού. Από τα συμπεράσματα της ποσοτικής αυτής μελέτης ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σχέση:

$$I_{ds} = I_0 \left(1 - \frac{V_g}{V_p}\right)^2 \quad (2)$$

που περιγράφει τη μεταβολή του ρεύματος διαώλου I_{ds} συναρτήσει της τάσης πολώσεως πύλης V_g μετά το δυναμικό λαβίδας, δηλαδή για το ευθύγραμμο τμήμα των χαρακτηριστικών (κατάσταση κόρου). V_p είναι κατά τα γνωστά το δυναμικό αποκοπής και I_0 το ρεύμα διαώλου για τάση πολώσεως μηδέν. Από τη σχέση αυτή προκύπτουν άμεσα ο μηδενισμός του ρεύματος I_{ds} για τάση πύλης ίση προς την αποκοπής και η ανεξαρτησία του ρεύματος I_{ds} από την τάση V_{ds} στην περιοχή κόρου. Η κύρια σημασία όμως της εξίσωσης αυτής οφείλεται στο ότι αποτελεί την αναλυτική έκφραση της χαρακτηριστικής μεταφοράς του F.E.T., της καμπύλης δηλαδή, που περιγράφει την ενισχυτική δράση και ικανότητα της κρυσταλλολυχνίας (ανάλογη προς τη χαρακτηριστική $I_a = f(V_g)$ για μια τρίοδο ηλεκτρονική λυχνία). Η χαρακτηριστική αυτή είναι παραβολική (εξίσωση 2^{ου} βαθμού) και δίνεται στο σχήμα 11-5. Είναι ενδιαφέρον, ότι σε πρώτη προσέγγιση (σχέση (2)) η καμπύλη αυτή είναι κοινή (μία) για όλες τις τιμές τάσης V_{ds} και όχι σμήνος, όπως στην περίπτωση της ηλεκτρονικής τριόδου.





Μετά από όσα αναφέρθηκαν συνάγεται εύκολα, ότι τα κύρια σημεία υπεροχής ενός F.E.T. έναντι μιας κοινής κρυσταλλοτρίοδου είναι τα εξής:

α) Έχει μεγάλη αντίσταση εισόδου. Σχετικά με το χαρακτηριστικό αυτό θα συζητήσουμε παρακάτω κατά τη μελέτη της ενισχυτικής του δράσης.

β) Είναι λιγότερο ευαίσθητο σε θερμοκρασιακές μεταβολές, επειδή η λειτουργία του βασίζεται σε ένα μόνο είδος φορέων, αντίθετα από ότι συμβαίνει στην κοινή κρυσταλλοτρίοδο. Μάλιστα το ρεύμα του I_{ds} (για σταθερά V_g και V_{ds}) μειώνεται συναρτήσει της θερμοκρασίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 11-6. Η μείωση αυτή οφείλεται στην ελάττωση της ευκινησίας των ηλεκτρονίων μ_n όσο αυξάνει η θερμοκρασία.

γ) Είναι λιγότερο ευαίσθητο στην επίδραση ακτινοβολιών (π.χ. κοσμική, γάμμα κλπ.) για τον ίδιο λόγο, που αναφέρθηκε παραπάνω. Είναι ως εκ τούτου κατάλληλο για χρήση σε συστήματα δορυφόρων, διατάξεις απαριθμητών κλπ.

δ) Υπεισάγει λιγότερο θόρυβο στα κυκλώματα, που χρησιμοποιείται.

ε) Έχει καλύτερη συμπεριφορά σαν διακόπτης (chopper), επειδή το ρεύμα αποκοπής του είναι πρακτικά της τάξης μερικών nA, δηλαδή αρκετές τάξεις μεγέθους μικρότερο απ'ότι σε μια κρυσταλλοτρίοδο.

Το βασικότερο μειονέκτημα του F.E.T. απέναντι στην κρυσταλλοτρίοδο είναι το μικρό γινόμενο απολαβής επί εύρος ζώνης αποκρίσεως.

Συνάγεται επίσης, ότι μεταξύ μιας τριόδου ηλεκτρονικής λυχνίας και ενός F.E.T. υπάρχουν μερικά κοινά στοιχεία, όπως:

α) Και οι δύο διατάξεις έχουν μεγάλη αντίσταση εισόδου

β) Και οι δύο ελέγχονται από τάσεις (τάση πλέγματος-τάση πύλης αντίστοιχα). Η ιδιομορφία αυτή αιστελεί χαρακτηριστικό στοιχείο διαφοροποίησης από την κρυσταλλοτρίοδο, που ελέγχεται από ρεύμα, και σημαντικό πλεονέκτημα απέναντί της.

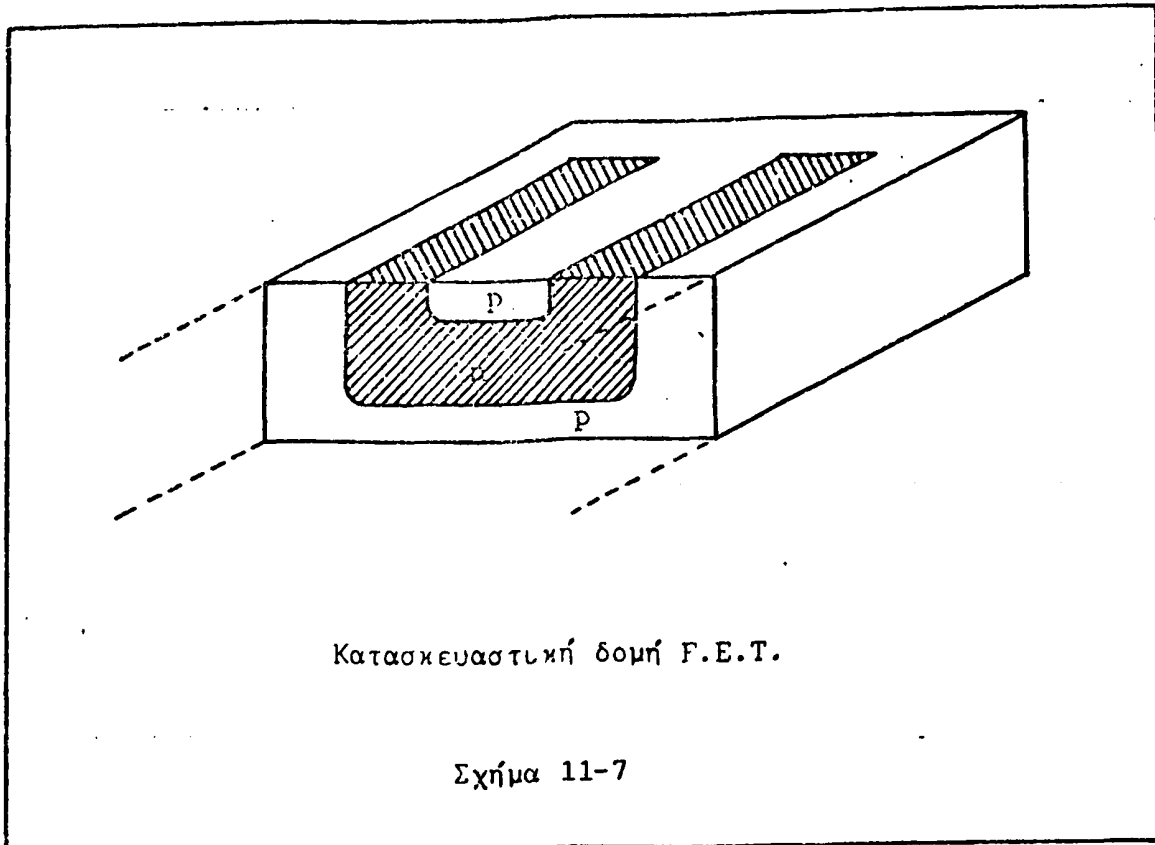
γ) Και οι δύο διαρρέονται και βασίζουν τη λειτουργία τους σε ένα είδος φορέων.

Ανάμεσα στα δομικά στοιχεία μιας τριόδου ηλεκτρονικής λυχνίας και μιας κρυσταλλοτρίοδου F.E.T. είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί η εξής αντιστοιχία:

Κάθοδος-Πηγή, Άνοδος-Αποχέτευση, Πλέγμα-Πύλη.

Στο σχήμα 11-7 δίνεται διαγραμματικά η πραγματική δομή ενός F.E.T. Η δομή αυτή προτιμάται, επειδή είναι κατασκευαστικά ευχετέστερη η δημιουργία των επαρών. Εκτός βέβαια από τα F.E.T. π-διαώλου υπάρχουν και F.E.T. p-διαώλου (και n-πύλης) με ανάλογη λειτουργία, αλλά αντίθετες πολώσεις.

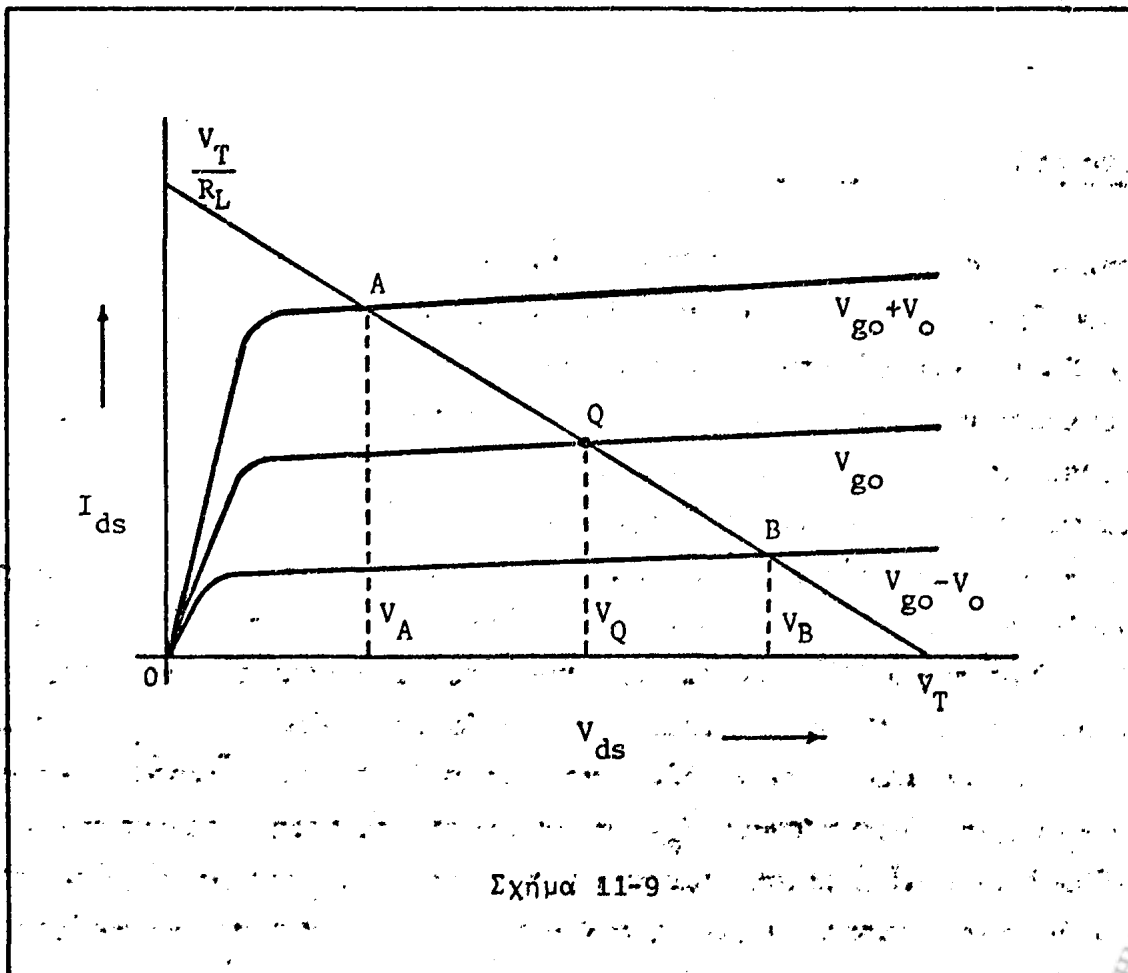
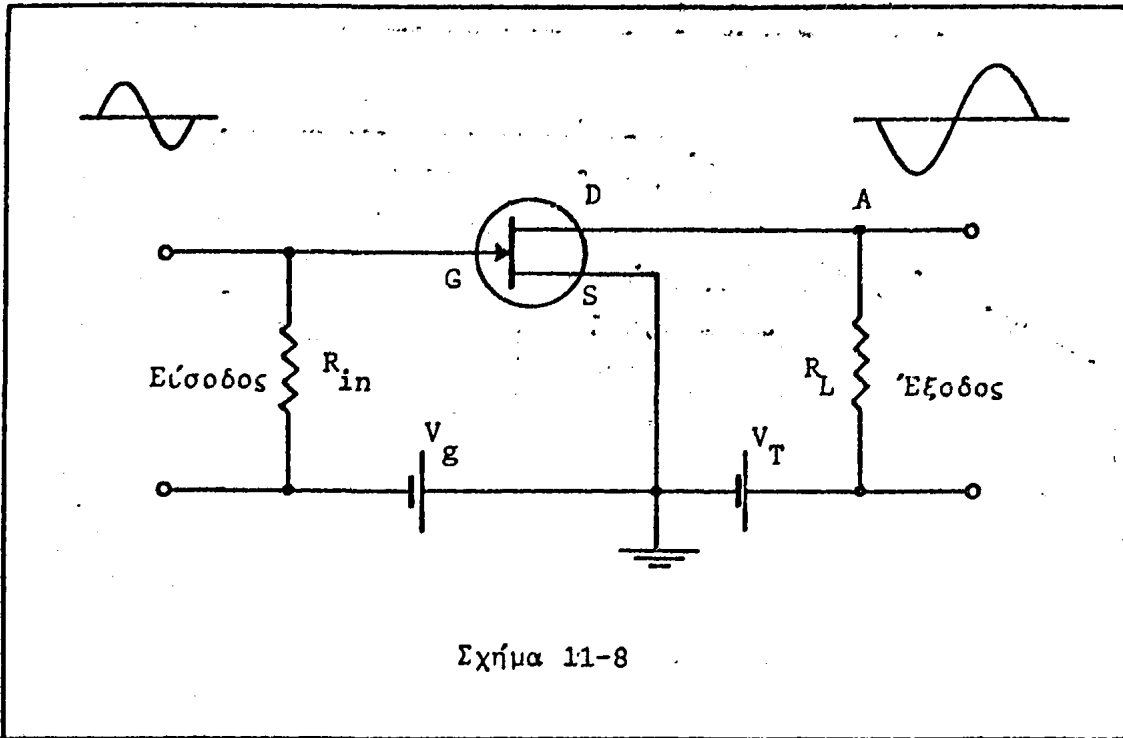




Ενισχυτική δράση

Η σημαντικότερη χρήση του F.E.T. είναι σε ενισχυτικά κυκλώματα. Η ενισχυτική του δράση βασίζεται στο ότι κάθε μεταβολή της τάσης πύλης -πηγής (τάση εισόδου) προκαλεί αντίστοιχες μεταβολές στο ρεύμα διαύλου (ρεύμα εξόδου). Η συμπεριφορά αυτή είναι τελείως ανάλογη προς τη συμπεριφορά τριόδου ηλεκτρονικής λυχνίας και η γραφική μελέτη της μπορεί να γίνει με τη βοήθεια της χαρακτηριστικής μεταφοράς του σχήματος 11-5 (παραβάλετε συγκριτικά και το σχήμα 2-2.5). Προτιμώτερη είναι όμως η μέθοδος της γραμμής φόρτου.

Έστω λοιπόν το απλοποιημένο τυπικό κύκλωμα ενισχυτή με F.E.T. του σχήματος 11-8. Στο σχήμα 11-9 δίνεται το σημείο των χαρακτηριστικών εξόδου του και η γραμμή φόρτου. Θεωρούμε στατική τάση πολώσεως πύλης $V_g = V_{go}$, οπότε σημείο λειτουργίας του ενισχυτή είναι το σημείο Q. Αν στην είσοδο εφαρμοσθεί εναλλασσόμενο σήμα πλάτους V_o , θα προκληθεί ολίσθηση (παλινδρόμηση) του σημείου λειτουργίας μεταξύ των σημείων A και B της ευθείας φόρτου, που αντιστοιχούν στις χαρακτηριστικές για $V_g = V_{go} + V_o$ και $V_g = V_{go} - V_o$ αντίστοι-



χα. Η πολυδρόμηση αυτή προκαλεί, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα, πολυδρόμηση της τάσης V_{ds} μεταξύ των τιμών V_A και V_B , άρα και της τάσης εξόδου V_{RL} μεταξύ των $V_T - V_A$ και $V_T - V_B$. Εμφανίζεται δηλαδή στην έξοδο σήμα πλάτους $V'_0 = (V_B - V_A)/2$.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα ενός ενισχυτή με F.E.T. είναι η πολύ υψηλή αντίσταση εισόδου. Η υψηλή αυτή αντίσταση οφείλεται στο ότι το κύκλωμα εισόδου (κύκλωμα πύλης-πηγής) είναι στην ουσία μια ανάστροφα πολωμένη επακή p-n (κρυσταλλοδίοδος), που κατά τα γνωστά έχει πολύ μεγάλη αντίσταση (τάξης των Ω) και διαρρέεται από πολύ χαμηλό ρεύμα (ρεύμα εισόδου). Στο σημείο αυτό το F.E.T. υπερέχει κατά πολύ ως προς την κρυσταλλοτρίοδο. Υπερέχει όμως και ως προς την τρίοδο ηλεκτρονική λυχνία, επειδή ο συντελεστής ενισχύσεώς του μ (ορίζεται εντελώς ανάλογα όπως σε μια τρίοδο) έχει τιμές μεταξύ 500 και 5000 σε αντίθεση με την λυχνία, που έχει τιμές μ μεταξύ 20 και 100.

Όσον αφορά στη σχέση φάσεων των σημάτων εισόδου και εξόδου του ενισχυτή αναφέρουμε τα εξής: Έστω ότι στην είσοδο του κυκλώματος (σχήμα 11-8) εφαρμόζεται ημιτονικό σήμα από κάποια γεννήτρια συχνοτήτων. Σε όλο το πρώτο μισό της περιόδου, που το σήμα είναι θετικό, η τάση της γεννήτριας αντιτίθεται στην τάση πολώσεως πύλης V_g , με αποτέλεσμα η συνισταμένη πόλωση πύλης να ελαττώνεται (γίνεται δηλαδή η πύλη λιγότερο αρνητική) και το ρεύμα διαύλου I_{ds} να αυξάνει. Αυξάνει έτσι η πτώση τάσης κατά μήκος της αντιστάσεως φόρτου R_L και το σημείο A γίνεται αρνητικότερο από ότι ήταν πριν την εφαρμογή σήματος. Άρα το σήμα εξόδου για όλη την πρώτη ημιπερίοδο είναι αρνητικό.

Αντίστοιχα κατά τη δεύτερη ημιπερίοδο, που το σήμα εισόδου είναι αρνητικό, η τάση της γεννήτριας επιπροστίθεται στην τάση πολώσεως πύλης V_g με αποτέλεσμα η συνισταμένη πόλωση να αυξάνει (η πύλη δηλαδή γίνεται αρνητικότερη) και το ρεύμα διαύλου I_{ds} να ελαττώνεται. Ελαττώνεται έτσι η πτώση τάσης κατά μήκος της αντιστάσεως φόρτου R_L και το σημείο A γίνεται θετικότερο από ότι πριν την εφαρμογή του σήματος. Σε όλη λοιπόν τη δεύτερη ημιπερίοδο το σήμα εξόδου είναι θετικό. Προκύπτει έτσι, ότι μεταξύ των σημάτων εισόδου και εξόδου υπάρχει μια αντίθεση πολικότητας (προσήμου), δηλαδή μια διαφορά φάσης $\varphi=180^\circ$.

Τελειώνοντας είναι σκόπιμο να αναφέρουμε, ότι η ανάπτυξη της κρυσταλλοτρίοδος F.E.T. δημιούργησε μια νέα λογική και μεθοδολογία στους τομείς κατασκευής, λειτουργίας και χρήσης των κρυσταλλολυχνιών. Το F.E.T. αποτέλεσε το πρώτο μέλος μιας ολόκληρης οικογένειας κρυσταλλοδιατάξεων ανάλογης λογικής, όπως τα MOSFET κλπ, που σήμερα χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε ηλεκ

τρονικές κατασκευές υψηλών προδιαγραφών και στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές.

Απαραίτητες γνώσεις

Δ. Μ. Μηλιώτη: Η Φυσική των Κρυσταλλολυχνιών, σελ. 322

Χρησιμοποιούμενα όργανα

1. Δύο τροφοδοτικά χαμηλής τάσης
2. Ηλεκτρονικό βολτόμετρο
3. Πολύμετρο
4. Παλμογράφος
5. Γεννήτρια ακουστικών συχνοτήτων
6. Κρυσταλλοτρίοδος F.E.T. n-channel
7. Αντιστάσεις: 470kΩ-0.5W, 100kΩ-0.5W
8. Ποτενσιόμετρο: 100kΩ-0.5W
9. Πυκνωτές: 50μF, 10μF, 0.01μF ηλεκτρολυτικοί

Πειραματικό μέρος

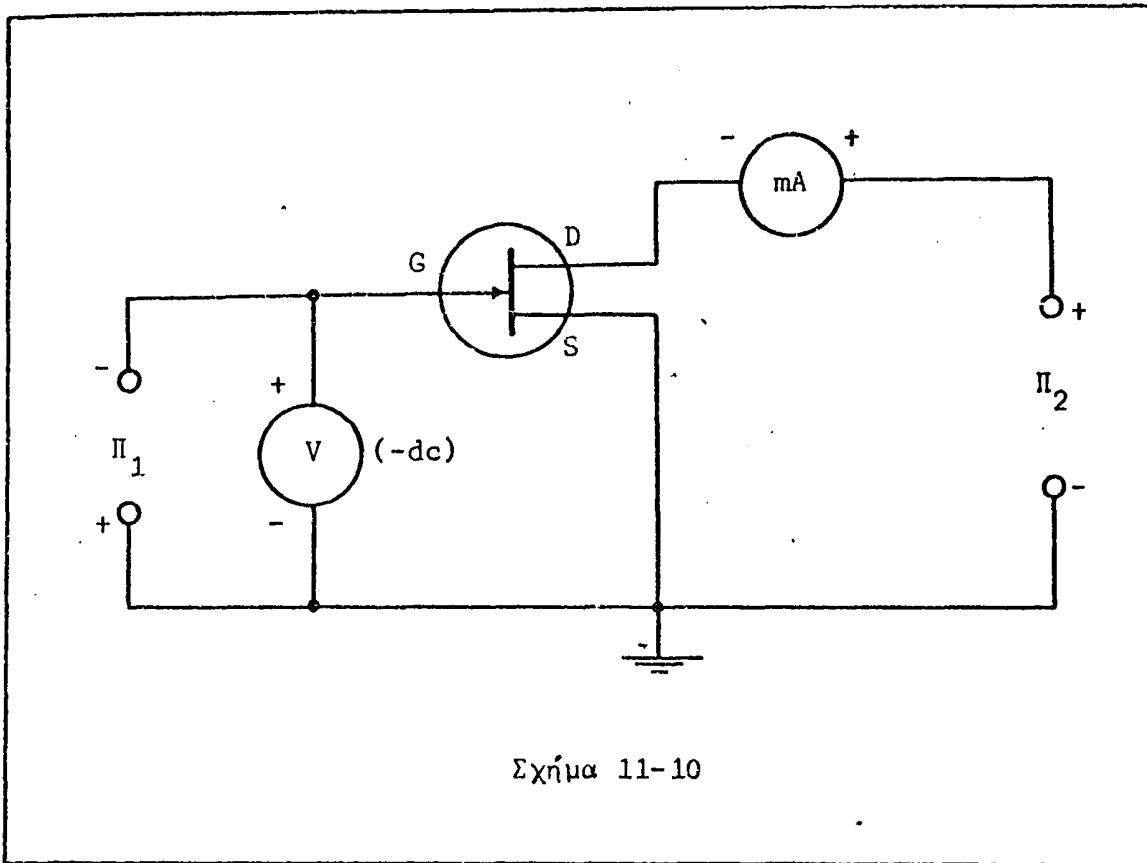
Προσοχή: Σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων οι τάσεις των τροφοδοτικών δεν πρέπει να ξεπεράσουν την τιμή των 20V, επειδή υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του F.E.T.

1. Πραγματοποιείτε το κύκλωμα του σχήματος 11-10.
2. Ρυθμίστε το τροφοδοτικό Π₁ σε τάση E₁=0V και το Π₂ σε τάση E₂ = 5V και μετρήστε το ρεύμα πηγής-αποχετεύσεως (διαύλου) I_{ds}.

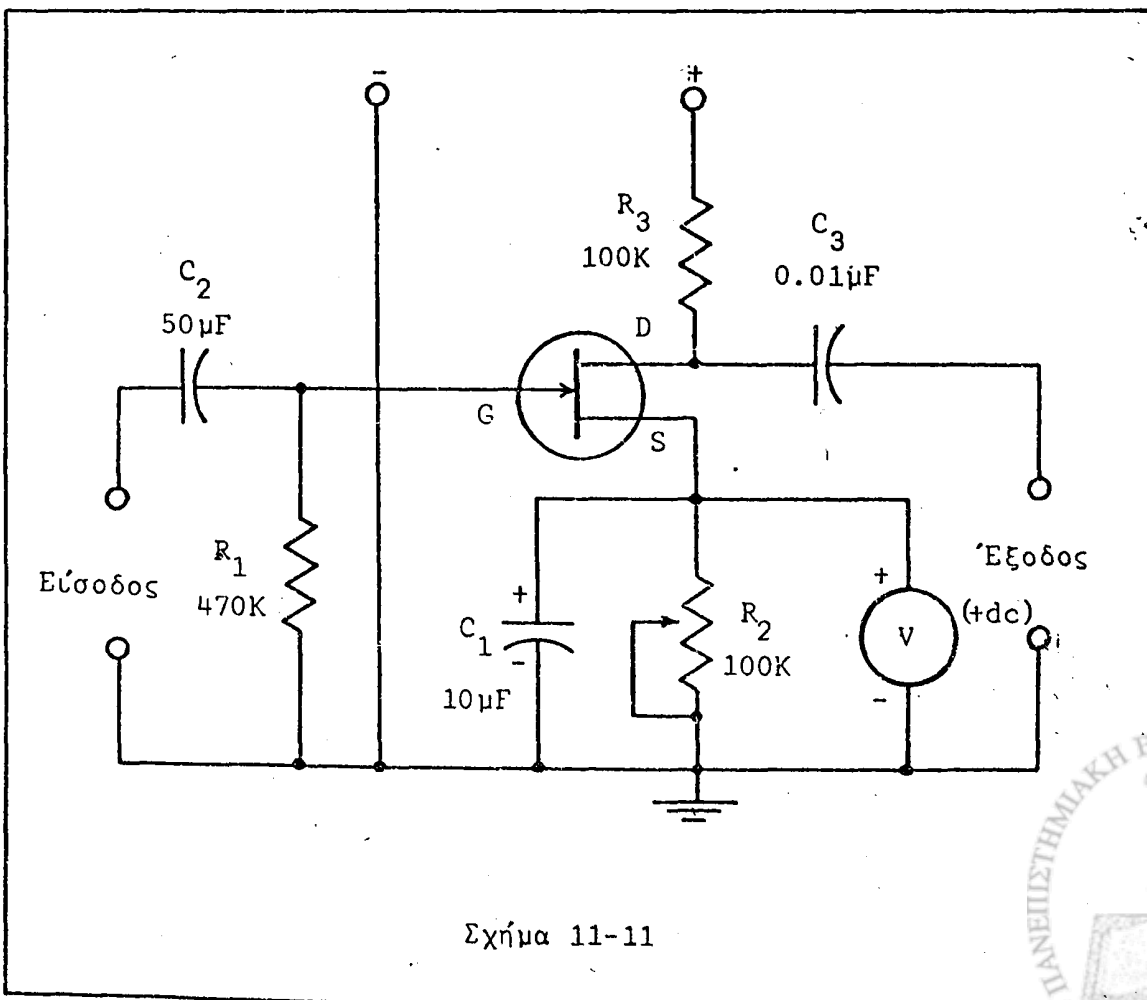
I _{ds} =	mA
-------------------	----

3. Με τάση E₂=5V αυξήστε την E₁ (τάση πύλης-πηγής) μέχρις ότου μηδενιστεί το ρεύμα I_{ds} και μετρήστε την τάση αποκοπής V_p (pinch off voltage) του F.E.T. με το ηλεκτρονικό βολτόμετρο.





Σχήμα 11-10



Σχήμα 11-11



$$V_p = \quad V$$

4. Με τάση $E_1 = V_p$ να μεταβάλετε την τάση E_2 μέχρι τα 12V. Τι παρατηρείτε στο ρεύμα I_{ds} ; Γιατί;

Μηδενίστε τις τάσεις E_1 και E_2 .

5. Λάβετε μετρήσεις για τη χάραξη των χαρακτηριστικών $I_{ds} = f(V_{ds})$ για δυο τιμές της τάσης V_{gs} , $V_{gs} = 0V$ και $V_{gs} = -2V$. Οι μετρήσεις να καταχωρηθούν στον παρακάτω πίνακα.

Μηδενίστε πάλι τις τάσεις E_1 και E_2 .

6. Συνδεσμολογίστε το κύκλωμα του σχήματος 11-11 (ενισχυτής τάσης κοινής πηγής με F.E.T.).

7. Τροφοδοτήστε τη διάταξη με τάση $V = 10V$ και ρυθμίστε το ροοστάτη για πόλωση πύλης V_{gs} ίση προς την τάση αποκοπής V_p (μετρούμενη με το ηλεκτρονικό βολτόμετρο). Συνδέστε στην είσοδο του κυκλώματος τη γεννήτρια ακουστικών συχνοτήτων και εφαρμόστε σήμα πλάτους $V_{in} = 0.2V_{p-p}$ (μετρημένο με τον παλμογράφο) και συχνότητας $f = 1000Hz$. Συνδέστε τον παλμογράφο στην έξοδο του κυκλώματος και μετρήστε την τάση εξόδου V_{out} . Υπολογίστε την απολαβή τάσης.

$$V_{out} = \quad V_{p-p}$$

$$A_v = \quad$$

	$V_{gs} = 0V$	$V_{gs} = -2V$		$V_{gs} = 0V$	$V_{gs} = -2V$
V_{ds} V	I_{ds} mA	I_{ds} mA	V_{ds} V	I_{ds} mA	I_{ds} mA
0.5			4.0		
1.0			5.0		
1.5			6.0		
2.0			7.0		
2.5			8.0		
3.0			10.0		



8. Τι παρατηρείτε στο σήμα εξόδου μεταβάλλοντας την τιμή του ροοστάτη;
Γιατί;

Ερωτήσεις

1. Ποιές είναι οι κυριότερες διαφορές ενός F.E.T. και μιας κρυσταλλοτριόδου;
2. Ποιές παράμετροι (μεγέθη) ελέγχουν το ρεύμα διαύλου ενός F.E.T.;
3. Πού οφείλεται η μεγάλη αντίσταση εισόδου ενός F.E.T.;
4. Πώς θα ορίζατε την εσωτερική αντίσταση, τη διαγωγιμότητα και το συντελεστή ενισχύσεως ενός F.E.T.;
5. Γιατί στα συστήματα ηλεκτρονικών υπολογιστών προτιμάται η χρησιμοποίηση F.E.T. αντί των κοινών κρυσταλλοτριόδων;



ΜΕΛΕΤΗ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟΥ ΑΝΟΡΘΩΤΗ ΠΥΡΙΤΙΟΥΕισαγωγή

Σε πολλές εφαρμογές είναι απαραίτητο να υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου ή ρυθμίσεως του ρεύματος, που διέρχεται από ένα κύκλωμα ή μια συσκευή. Διατάξεις, που εξασφαλίζουν τη δυνατότητα αυτή υπάρχουν πάρα πολλές, πιο απλές από τις οποίες είναι οι διακόπτες και οι ροοστάτες. Στόχος της Ηλεκτρονικής Τεχνολογίας ήταν πάντα να αντικαταστήσει τις διατάξεις αυτές με άλλες λιγότερο απλές ίσως που δεν θα περιείχαν όμως κινούμενα μέρη και θα επιλύγχαναν τον έλεγχο ή τη ρύθμιση μέσω κάποιου σήματος (μεταβολής ηλεκτρικού μεγέθους) εξασφαλίζοντας έτσι παράλληλα και τη δυνατότητα τηλεχειρισμού, προγραμματισμού, αυτοματισμού κλπ. Η τεχνολογία των Ηλεκτρονικών Λυχνιών σαν τέτοια διάταξη ανέπτυξε και χρησιμοποίησε κυρίως την τρίοδο ηλεκτρονική λυχνία αερίου, γνωστότερη με την ονομασία thyatron. Η τεχνολογία των Ημιαγωγών ανέπτυξε μια ολόκληρη οικογένεια από τέτοιες διατάξεις, που χαρακτηρίζονται με το γενικό όνομα thyristors και όλα τα μέλη της παρουσιάζουν δύο σταθερές καταστάσεις λειτουργίας· μία στην οποία εμφανίζουν πολύ υψηλή αντίσταση και μία στην οποία εμφανίζουν πολύ χαμηλή αντίσταση. Τέτοιες διατάξεις είναι τα SCRs, τα TRIACs, τα DIACs κλπ.

Η πιο σημαντική και αντιπροσωπευτική από τις διατάξεις αυτές τόσο από άποψη χρησιμότητας όσο από άποψη τρόπου λειτουργίας είναι ο ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου (Silicon Controlled Rectifier-SCR). Λειτουργικά αντιστοιχεί προς τη γνωστή λυχνία thyatron, πλεονεκτεί όμως ως προς αυτήν στα παρακάτω σημεία:

1) Η πτώση τάσης κατά μήκος του SCR σε κατάσταση λειτουργίας είναι μόλις το 1/10 της αντιστοιχίας πτώσης τάσης σε μια λυχνία thyatron.

2) Έχει πολύ μικρότερο χρόνο μεταπτώσεως από την κατάσταση υψηλής αντιστάσεως (κατάσταση αποκοπής-off) στην κατάσταση χαμηλής αντιστάσεως (κατάσταση λειτουργίας - on) και αντίστροφα.

3) Έχει όλα τα γνωστά πλεονεκτήματα των κρυσταλλολυχνιών έναντι των ηλεκτρονικών λυχνιών (χρόνο ζωής, αντοχή, χαμηλή κατανάλωση, μικρό όγκο

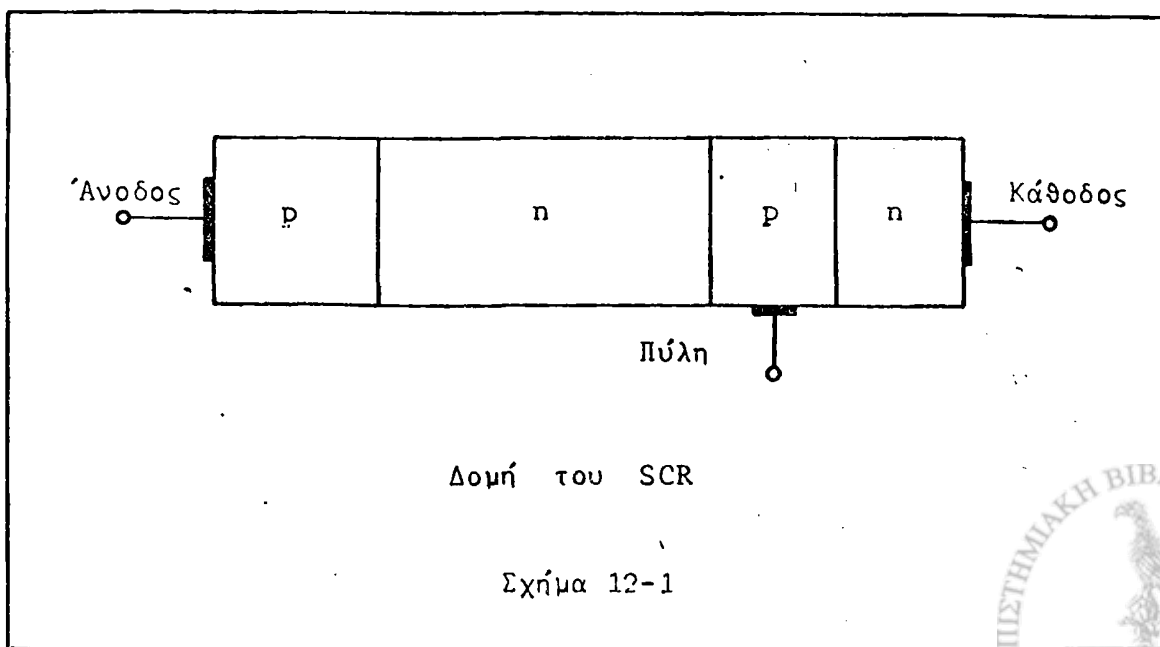


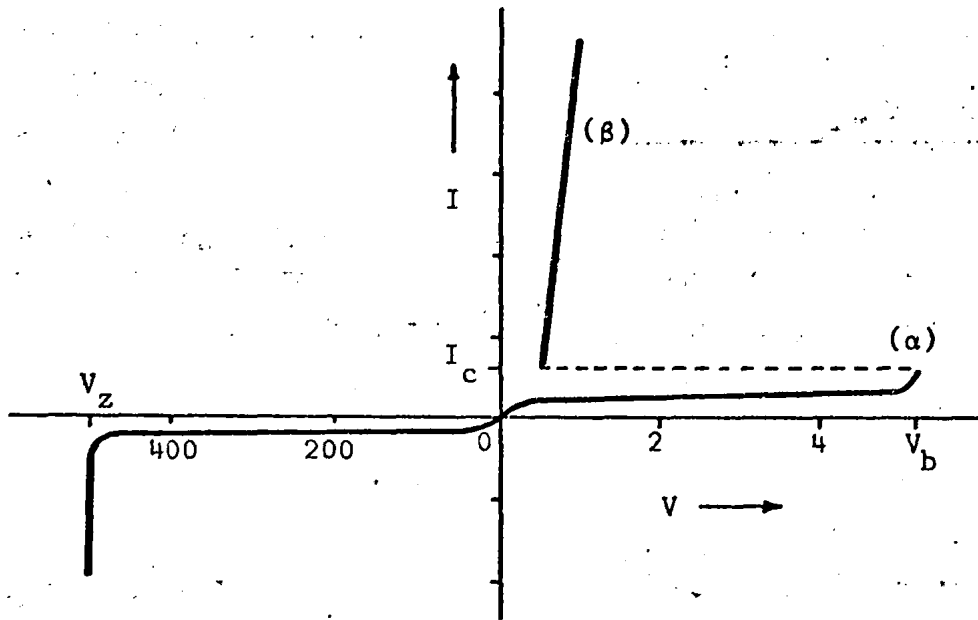
και βάρος κλπ.)

Δομή και λειτουργία

Ο ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου αποτελείται από μία ράβδο ημιαγωγού υλικού, στην οποία έχουν προστεθεί κατάλληλες προσμίξεις, έτσι ώστε να δημιουργηθούν τέσσερες περιοχές p- και n-τύπου ημιαγωγού σε διαδοχή p-n-p-n και να σχηματισθεί μια δομή, σαν αυτή που φαίνεται στο σχήμα 12-1. Οι περιοχές αυτές δεν έχουν ούτε την ίδια συγκέντρωση προσμίξεων ούτε την ίδια έκταση όλες. Την υψηλότερη συγκέντρωση προσμίξεων έχει η εσωτερική περιοχή p-τύπου. Αντίστοιχα η εσωτερική περιοχή n-τύπου έχει τη μεγαλύτερη έκταση και τη χαμηλότερη συγκέντρωση προσμίξεων. Από άποψη ονοματολογίας η ακραία p-τύπου περιοχή ονομάζεται άνοδος, η ακραία n-τύπου περιοχή κάθοδος και η εσωτερική p-τύπου περιοχή πύλη. Συνήθως η άνοδος συνδέεται προς το θετικό πόλο της πηγής τροφοδοσίας και η κάθοδος προς τον αρνητικό, ενώ στην πύλη εφαρμόζεται θετικό δυναμικό. (δυναμικό ελέγχου).

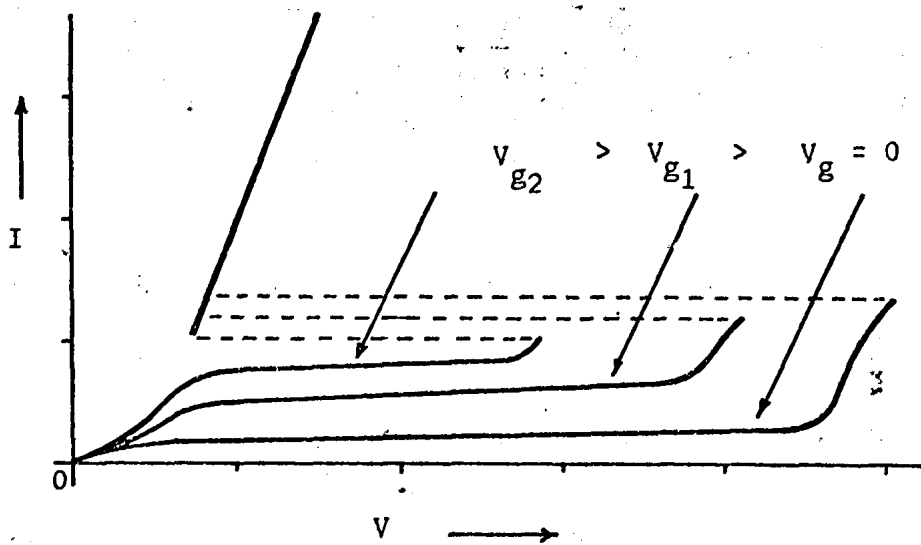
Πριν οποιαδήποτε αναφορά στον τρόπο λειτουργίας του SCR αναφερόμαστε στη χαρακτηριστική του, δηλαδή την καμπύλη που περιγράφει τη μεταβολή του ρεύματος, που το διαρρέει, συναρτήσεως της τάσης, που εφαρμόζεται στα άκρα του. Η χαρακτηριστική αυτή φαίνεται στο σχήμα 12-2. Παρατηρούμε, ότι σε ανάστροφη πόλωση το SCR ουσιαστικά δεν άγει (έχει ένα πολύ μικρό ρεύμα διαρροής) μέχρι μια μέγιστη ανάστροφη τάση πέρα από την οποία η διάταξη καταρρέει και το ρεύμα αυξάνει απότομα. Η κατάρρευση αυτή, που συνήθως επι-





Χαρακτηριστική SCR

Σχήμα 12-2



Σμήνος χαρακτηριστικών ορθής πολώσεως

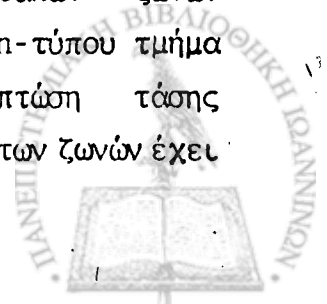
Σχήμα 12-3

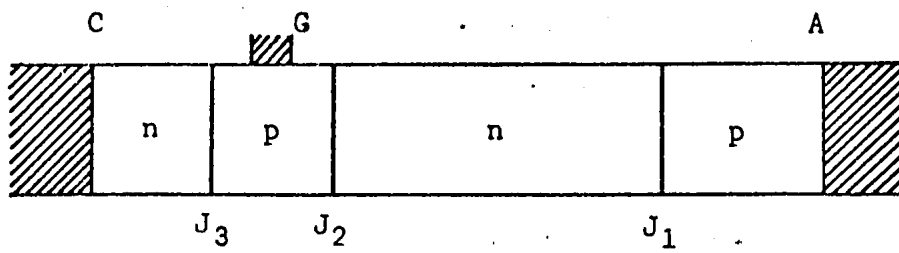


φέρει και καταστροφή του SCR, οφείλεται στα ίδια φαινόμενα, που προκαλούν την κατάρρευση μιας κοινής κρυσταλλοδιόδου (Zenper-χιονοστιβάδας). Αντίθετα σε ορθή πόλωση η διάταξη εμφανίζει δύο σαφώς διακεκριμένες καταστάσεις. Μία κατάσταση υψηλής αντιστάσεως (περιοχή α της χαρακτηριστικής), στην οποία το ρεύμα της είναι μικρό παρά τις σημαντικού μεγέθους εφαρμοζόμενες τάσεις και στην οποία το SCR ουσιαστικά επίσης δεν άγει, και μια κατάσταση χαμηλής αντιστάσεως (περιοχή β της χαρακτηριστικής) στην οποία το ρεύμα αυξάνει ταχύτατα για μικρές διαφορές δυναμικού και στην οποία το SCR αποτελεί ουσιαστικά βραχυκύκλωμα μεταξύ των σημείων, στα οποία συνδεσμολογείται. Στην τελευταία κατάσταση το ρεύμα του SCR περιορίζεται κυρίως από την αντίσταση του εξωτερικού κυκλώματος. Αξιοσημείωτο είναι, ότι η μέγιστη τάση υψηλής αντιστάσεως (τάση υπερεκκενώσεως, V_b) είναι σημαντικά μικρότερη από την τάση ανάστροφης καταρρεύσεως. Διαφέρουν βέβαια οι τάσεις αυτές από κρυσταλλολυχνία σε κρυσταλλολυχνία, ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζεται κάθε μια, αλλά πάντοτε ο λόγος τους είναι της τάξης του 100, δηλαδή η τάση υπερεκκενώσεως είναι 100 περίπου φορές μικρότερη από την τάση ανάστροφης καταρρεύσεως.

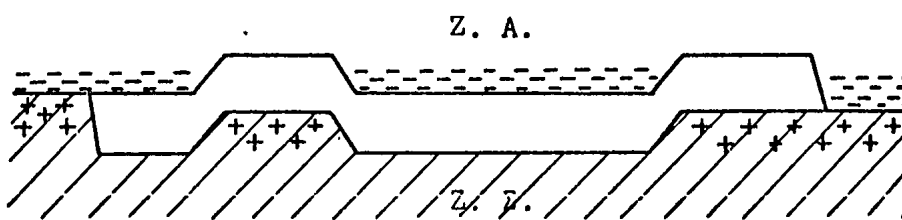
Στο σχήμα 12-3 δίδεται ένα σμήνος χαρακτηριστικών ορθής πόλωσης, που υποδεικνύει, ότι είναι δυνατόν η υπερεκκένωση να συμβεί νωρίτερα (για μικρότερες τάσεις ανόδου-καθόδου) αρκεί να πολωθεί θετικά η πύλη της διατάξεως, μάλιστα όσο αυξάνει η θετική αυτή πόλωση, τόσο μειώνεται η τάση υπερεκκενώσεως. Πρέπει όμως να σημειωθεί, ότι το δυναμικό του τρίτου ηλεκτροδίου (πίλης) ελέγχει την έναρξη της υπερεκκενώσεως, αλλά όχι και τη λήξη της. Μετά δηλαδή την έναρξή της οποιαδήποτε μεταβολή του δυναμικού πύλης δεν μπορεί να διακόψει το ισχυρό ρεύμα, που διέρχεται.

Προκειμένου τώρα να μελετηθεί η λειτουργία του SCR και να ερμηνευθεί η ιδιόζουσα μορφή της χαρακτηριστικής του εξετάζεται η διαμόρφωση των ενεργειακών ζωνών του σε διάφορες καταστάσεις πόλωσης. Στο σχήμα 12-4 φαίνεται η διαδοχική διαμόρφωση των ενεργειακών ζωνών για μετάβαση από κατάσταση μη πόλωσης σε κατάσταση ορθής πόλωσης υψηλής αντιστάσεως. Συγκεκριμένα το σχήμα 12-4.α παριστά τη χωρική δομή του SCR με τις μεταλλικές επαφές ανόδου και καθόδου. Το σχήμα 12-4.β παριστά το ενεργειακό διάγραμμα του χωρίς πόλωση, ενώ στο σχήμα 12-4.γ φαίνεται η διαμόρφωση των ενεργειακών ζωνών για την έναρξη της ορθής πόλωσης. Λόγω του ότι το εσωτερικό n-τύπου τμήμα έχει μεγάλη έκταση και μικρό ποσοστό προσμίξεων η μεγαλύτερη πτώση τάσης συμβαίνει κατά μήκος αυτού. Η αύξηση του κεκλιμένου τμήματος των ζωνών έχει

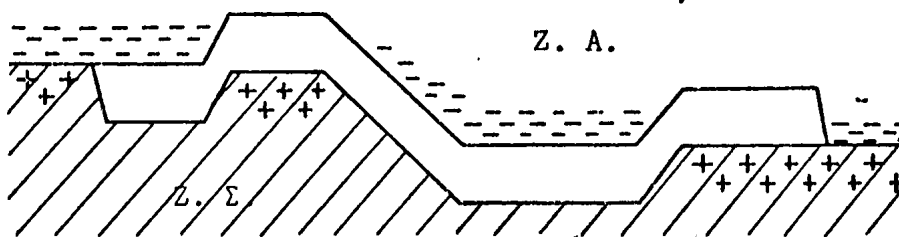




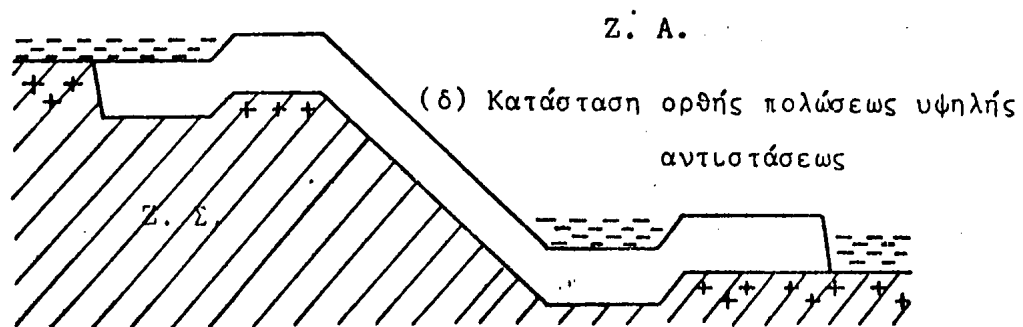
(α) Δομή του SCR



(β) Κατάσταση ισορροπίας



(γ) Μεταβατική κατάσταση ορθής πολώσεως



(δ) Κατάσταση ορθής πολώσεως υψηλής αντιστάσεως

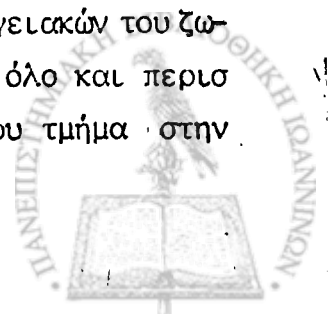
Σχήμα 12-4

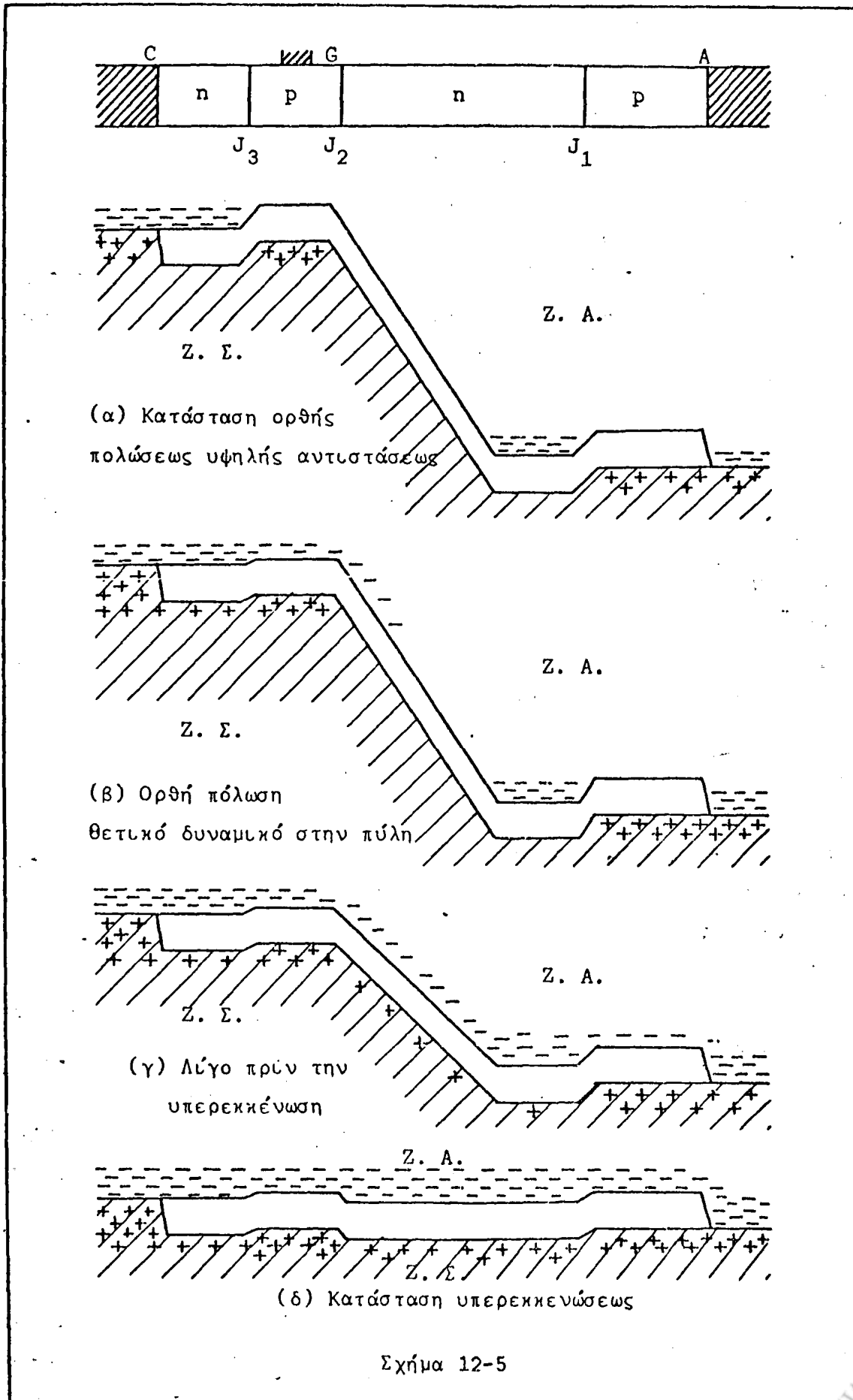


σαν αποτέλεσμα τη διακίνηση των ηλεκτρονίων του n-τύπου (εσωτερικού) προς την άνοδο, ώστε να δημιουργηθεί η μεγάλης έκτασης περιοχή απογυμνώσεως της επαφής J_2 . Δημιουργείται έτσι αμέσως μετά την εφαρμογή της ορθής πολώσεως ένας παλμός ρεύματος μετατοπίσεως (σχήμα 12-7, περιοχή α). Ταχύτατα όμως αποκαθίσταται η κατάσταση ισορροπίας ορθής πολώσεως του σχήματος 12-4.δ. Στην κατάσταση αυτή από τη διάταξη διέρχεται ένα πολύ μικρό ρεύμα (περιοχή β του σχήματος 12-7), διότι οι επαφές J_1 και J_3 είναι πολωμένες ορθά - με μικρές πάντως τάσεις, επειδή το μεγαλύτερο ποσοστό της ολικής τάσης επικρατεί στην ανάστροφα πολωμένη επαφή J_2 - γεγονός, που σημαίνει, ότι οι ενεργειακοί φραγμοί τους υποβιβάζονται λίγο και έτσι αυξάνει ο αριθμός των ηλεκτρονίων της καθόδου, που στατιστικά έχουν επαρκή ενέργεια, ώστε να "ανέλθουν" τον πρώτο φραγμό, να "σαρωθούν" κατά μήκος του δευτέρου και τέλος να "ανέλθουν" τον τρίτο και να βρεθούν στην άνοδο. Αντίστροφα αλλά με την ίδια βέβαια λογική κινούνται οι οπές. Το ρεύμα αυτό ορθής πολώσεως παραμένει μικρό και δεν εξελίσσεται (αυξάνει) γρήγορα, όπως σε μια κοινή κρυσταλλοδίοδο, επειδή, όπως αναφέρθηκε ξανά παραπάνω, η κύρια πτώση τάσης συμβαίνει κατά μήκος της ανάστροφα πολωμένης επαφής J_2 και του μικρού συγκεντρώσεως προσμίξεων εσωτερικού n-τύπου ημιαγωγού· έτσι οι επαφές J_1 και J_3 είναι διαρκώς ορθά μεν πολωμένες, αλλά με σχετικά πολύ μικρές διαφορές δυναμικού.

Στο σχήμα 12-5 δίνεται η σταδιακή διαμόρφωση του ενεργειακού διαγράμματος για μετάπτωση του SCR από κατάσταση ορθής πολώσεως υψηλής αντιστάσεως σε κατάσταση χαμηλής αντιστάσεως με την εφαρμογή κατάλληλου θετικού δυναμικού πύλης.

Έστω λοιπόν η κατάσταση ορθής πολώσεως υψηλής αντιστάσεως (σχήμα 12-5.α). Αν στην πύλη εφαρμοσθεί ένα θετικό δυναμικό ως προς την κάθοδο, μεγέθους π.χ. 0.8-1.0V, το αποτέλεσμα θα είναι ο υποβιβασμός του ενεργειακού ύψους των ζωνών πύλης και κατά συνέπεια η ελάττωση του ενεργειακού φραγμού της επαφής J_3 . Λόγω της ελαττώσεως αυτής το σύνολο σχεδόν των ηλεκτρονίων της καθόδου διέρχεται την επαφή J_3 , "σαρώνεται" δια της επαφής J_2 και εισέρχεται στο n-τύπου εσωτερικό τμήμα της διατάξεως, όπως φαίνεται και στο σχήμα 12-5.β. Η διαρκής αυτή συσσώρευση ηλεκτρονίων (αρνητικού φορτίου) στο πυθμένα του ενεργειακού "πιγαδιού" προκαλεί ανύψωση των ενεργειακών του ζωνών και αντίστοιχη ελάττωση του φραγμού της επαφής J_1 , οπότε όλο και περισσότερα ηλεκτρόνια μπορούν να διέλθουν από το εσωτερικό n-τύπου τμήμα στην



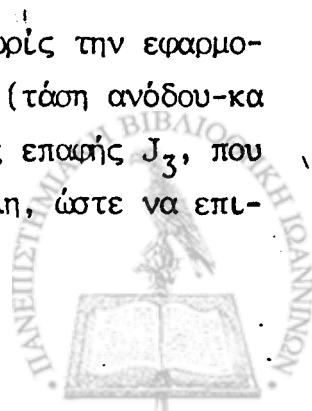


p-τύπου άνοδο. Η ανύψωση αυτή των ζωνών σταματά, όταν το ρεύμα δια της επαφής J_1 εξισορροπεί την παροχή ηλεκτρονίων της καθόδου. Δημιουργείται έτσι η κατάσταση του σχήματος 12-5.γ. Από τα ηλεκτρόνια που εισέρχονται στην p-τύπου άνοδο, ένα μέρος επανασυνδέεται με τις οπές της και ένα μέρος διακινείται προς την μεταλλική επαφή (θετικός πόλος πηγής). Ταυτόχρονα όσες οπές της ανόδου δεν επανασυνδέθηκαν με ηλεκτρόνια διακινούνται προς την κάθοδο της διατάξεως. Η αυξημένη αυτή κίνηση μεγάλου αριθμού φορέων δια του SCR σημαίνει ουσιαστικά, ότι περιορίζεται η έκταση και σημασία των περιοχών απογυμνώσεως (κυρίως στην επαφή J_2), γεγονός που ενεργειακά εκφράζεται με τη διαμόρφωση των ζωνών, έτσι όπως φαίνεται στο σχήμα 12-5.δ. Ισοδύναμα μπορεί να πει κανείς, ότι η εισχώρηση στο αριστερό τμήμα του ημιαγωγού (πύλη-κάθοδος) μεγάλου αριθμού οπών προερχομένων από την άνοδο υποβιβάζει το ενεργειακό ύψος των ζωνών τους και διατηρεί χαμηλό το φραγμό της επαφής J_2 . Το τελευταίο ενεργειακό διάγραμμα είναι σχεδόν τελείως ανάλογο προς το διάγραμμα ισχυρά και ορθά πολωμένης επαφής p-n ή και αγωγού, αν αγνοηθεί το αδιάφορο εν προκειμένω ενεργειακό χάσμα, υποδεικνύει δε, ότι μεταξύ ανόδου και καθόδου επικρατεί ελάχιστη διαφορά δυναμικού και διακινείται ισχυρότατο ρεύμα (συμπεριφορά βραχυκυκλώματος).

Πρέπει στο σημείο αυτό να τονισθούν δύο πράγματα: 1) Τα διακινούμενα δια του SCR ηλεκτρόνια σε κατάσταση υπερεκκενώσεως δεν οφείλονται πλέον και δεν είναι πληθυσμιακά ανάλογα προς τη συγκέντρωση προσμίξεων της p-τύπου καθόδου, αλλά προέρχονται σωρηδόν από τον αρνητικό πόλο της μεταλλικής καθόδου και τελικά "απορροφούνται" από το θετικό πόλο της επίσης μεταλλικής ανόδου (ηλεκτρόδια επαφών), έτσι το ρεύμα, που συνιστούν, είναι εξαιρετικά μεγάλο. 2) Μετά τη διαμόρφωση καταστάσεων του σχήματος 12-5.δ η ύπαρξη θετικού δυναμικού στην πύλη είναι άναφελη, επειδή η ίδια η διακίνηση και παρουσία των φορέων - οπών και ηλεκτρονίων - στη διάταξη εξασφαλίζει τη διατήρηση των φραγμών σε πολύ χαμηλά μεγέθη.

Στο σχήμα 12-7 παρίσταται η χρονική εξέλιξη του ρεύματος SCR για μετάπτωση από κατάσταση υψηλής αντιστάσεως σε κατάσταση χαμηλής αντιστάσεως (περιοχή γ-μεταβατικά φαινόμενα, περιοχή δ-υπερεκκένωση).

Είναι ευνόητο ότι η υπερεκκένωση μπορεί να συμβεί και χωρίς την εφαρμογή θετικού δυναμικού στην πύλη του SCR, αρκεί η ορθή πόλωση (τάση ανόδου-κάθodu) να γίνει τόσο μεγάλη, ώστε η ελάττωση του φραγμού της επαφής J_3 , που συμβαίνει λόγω της ορθής αυτής πολώσεως, να γίνει τόσο μεγάλη, ώστε να επιτρέψει την αθρόα διακίνηση ηλεκτρονίων δια μέσου της.

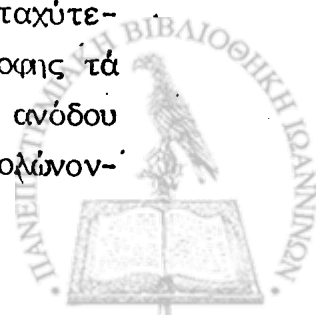


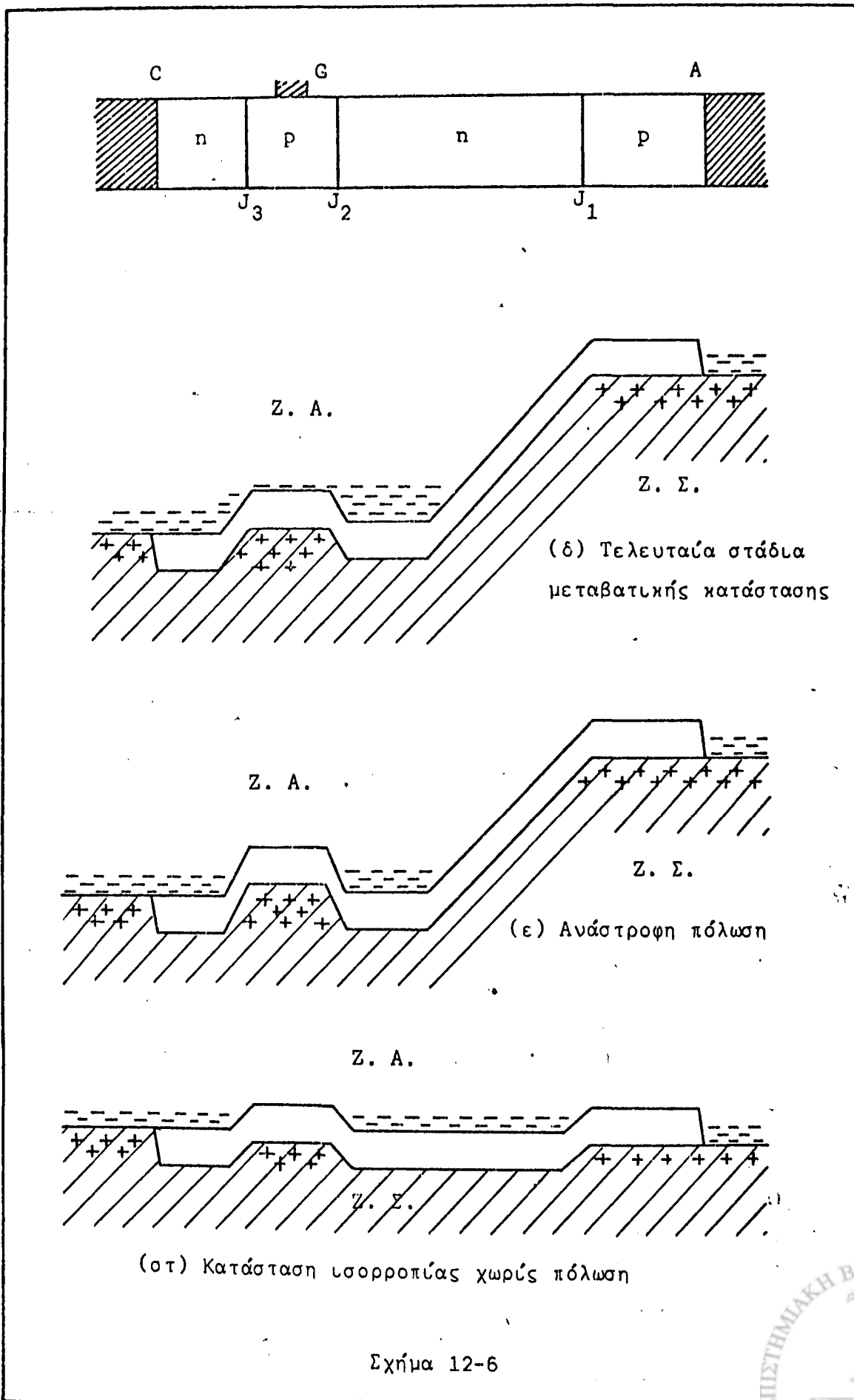
Μετά όσα αναφέρθηκαν παραπάνω γίνεται ευχερής η ερμηνεία της χαρακτηριστικής. Η μορφή της για ανάστροφη πόλωση δεν χρειάζεται κανένα ιδιαίτερο σχόλιο, εφ' όσον αντιστοιχεί πλήρως προς τη χαρακτηριστική ανάστροφα πολωμένης διόδου τόσο μορφολογικά όσο και αιτολογικά. Η μόνη παρατήρηση είναι, ότι η τάση καταρρεύσεως είναι πολύ μεγαλύτερη, εφ' όσον πρόκειται ουσιαστικά για δυο κρυσταλλοδιόδους πολωμένες ανάστροφα στη σειρά (και μία ορθά) και η ολική τάση κατανέμεται μεταξύ τους. Σε ορθή φορά το τμήμα (α) της χαρακτηριστικής αντιστοιχεί στην ενεργειακή κατάσταση, που απεικονίζουν τα σχήματα 12-4.δ ή 12-5.α. Το τελευταίο μέρος (κύρτωση) του τμήματος αυτού αντιστοιχεί στις μεταβατικές καταστάσεις των σχημάτων 12-5.β και 12-5.γ. Τέλος το τμήμα (β) της χαρακτηριστικής αντιστοιχεί στην ενεργειακή κατάσταση του σχήματος 12-5.δ. Ευνόητο είναι ότι η εφαρμογή θετικών δυναμικών στην πύλη ελαττώνει τον ενεργειακό φραγμό της J_3 άρα και την τάση υπερεκκενώσεως V_p και μάλιστα τόσο περισσότερο όσο υψηλότερο είναι το δυναμικό πύλης (σμήνος του σχήματος 12-3).

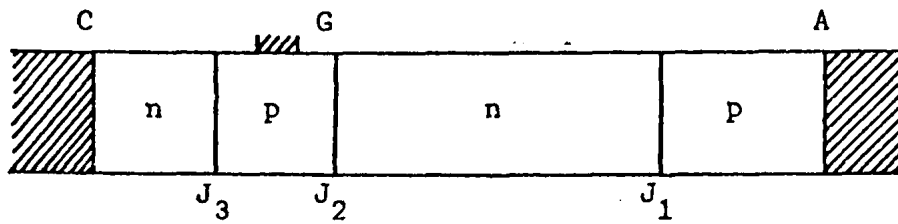
Η επαναφορά τώρα του SCR από την κατάσταση χαμηλής αντιστάσεως στην κατάσταση υψηλής αντιστάσεως μπορεί να πραγματοποιηθεί με δυο τρόπους:

α) Με ελάττωση του διερχόμενου ρεύματος σε πολύ χαμηλό επίπεδο (κάτω από την κρίσιμη ένταση συντηρήσεως I_c) ή και με διακοπή του. Η ελάττωση αυτή του ρεύματος σημαίνει περιορισμό του πλήθους των φορέων, που κινούνται στη διάταξη και επάνοδο στη συνηθισμένη πυκνότητα φορέων του αρχικού ημιαγωγού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την επαναδημιουργία των τυπικών ενεργειακών κατανομών του ημιαγωγού και την μετάπτωση του στην αρχική κατάσταση ορθής πολώσεως-υψηλής αντιστάσεως ή μη πολώσεως. Πρώτα δημιουργείται ο φραγμός της επαφής J_3 , επειδή το τμήμα πύλης έχει το μεγαλύτερο ποσοστό προσμίξεων από όλη τη διάταξη. Στα σχήματα 12-6.α, 12-6.β και 12-6.στ δίδεται η διαδοχική διαμόρφωση των ενεργειακών ζωνών για τη διαδικασία αυτή διακοπής της υπερεκκενώσεως. Είναι απαραίτητο κατά τη διαδικασία αυτή ο περιορισμός ή η διακοπή του ρεύματος να διαρκέσει αρκετά, ώστε να προλάβουν να απομακρυνθούν όλοι οι επί πλέον φορείς ρεύματος από τη διάταξη, αλλιώς υπάρχει κίνδυνος να μεταπέσει πάλι σε κατάσταση χαμηλής αντιστάσεως. Για το λόγο αυτό ο "χρόνος σβέσης" του SCR είναι μεγαλύτερος από τον "χρόνο αψίς" (της τάξης πάντα των μsec).

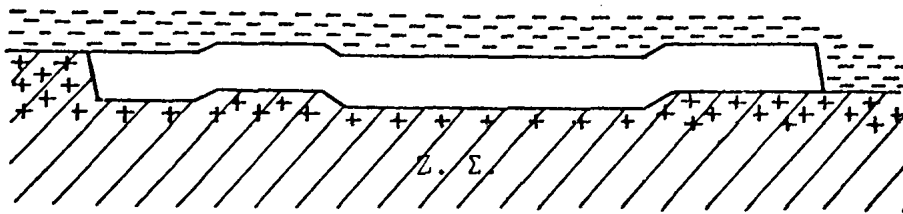
β) Με αναστροφή της εφαρμοζόμενης τάσης. Ο τρόπος αυτός είναι ταχύτερος. Όπως φαίνεται στα σχήματα 12-6.γ και 12-6.δ η εφαρμογή ανάστροφης τάσης στη διάταξη αυξάνει βαθμιαία το ύψος των ενεργειακών ζωνών της ανόδου και τους ενεργειακούς φραγμούς των επαφών J_1 και J_3 , διότι αυτές πολώνον-





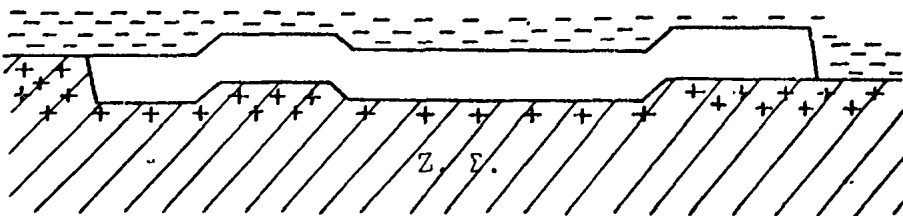


Z. A.



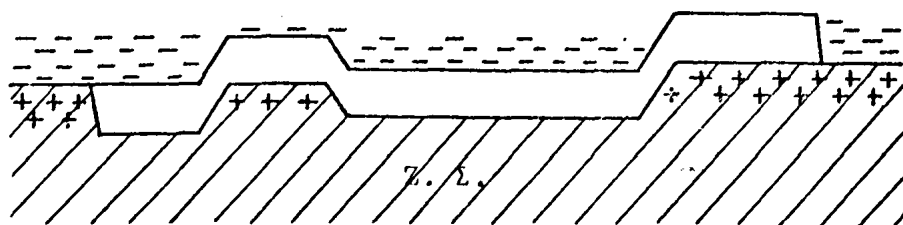
(α) Κατάσταση υπερεκκένωσης

Z. A.



(ζ) Μεταβατική κατάσταση - Περιορισμός ρεύματος

Z. A.



(η) Μεταβατική κατάσταση
Αρχή ανάστροφης πολώσεως

Σχήμα 12-6



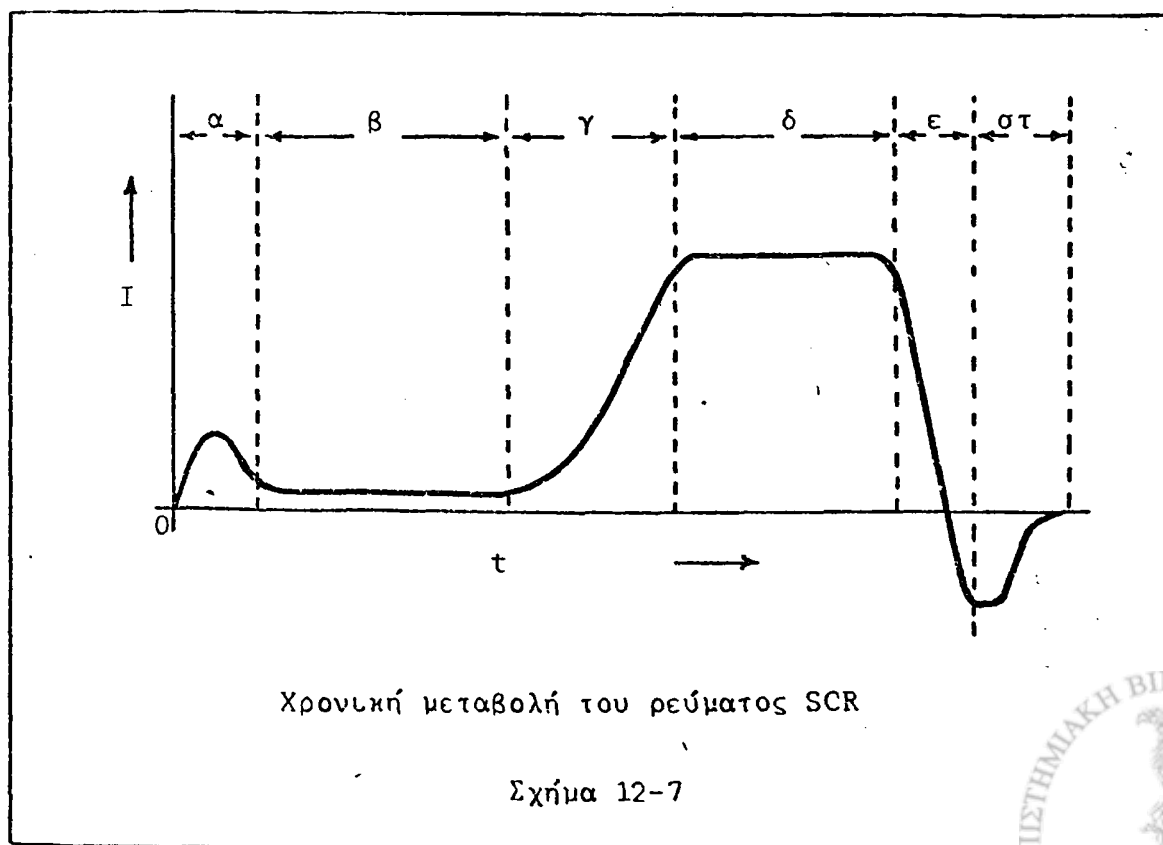
νται πλέον ανάστροφα. Μεταπίπτει έτσι τελικά το SCR σε κατάσταση ανάστροφης πόλωσης και δεν άγει λόγω αυτών ακριβώς των αυξημένων φραγμών των επαφών J_1 και J_3 (σχήμα 12-6.ε). Αν βέβαια κατόπιν διακοπεί η ανάστροφη αυτή πόλωση επανέρχεται η αρχική κατανομή δυναμικών και διαμόρφωση ενεργειακών ζωνών, που αντιστοιχεί σε κατάσταση χωρίς πόλωση (σχήμα 12-6.στ).

Στο σχήμα 12-7 οι περιοχές (ε) και (στ) παριστούν τη χρονική εξέλιξη του ρεύματος μετά την εφαρμογή της ανάστροφης πόλωσης. Αρχικά συμβαίνει ταχεία ελάττωση του ρεύματος, μηδενισμός και αναστροφή του (τρία μεταβατικά στάδια στο σχήμα 12-6) και τελικά νέα αναστροφή και μηδενισμός (σχήμα 12-6.ε-στ).

Υπάρχει και ένας τρίτος τρόπος διακοπής της υπερεκκενώσεως· η εφαρμογή αρνητικού δυναμικού στην πύλη του SCR. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σπάνια, επειδή το μέγιστο ρεύμα, που μπορεί να διακόψει είναι λίγο μεγαλύτερο από τό όριο ρεύματος, για το οποίο η λειτουργία της διατάξεως διακόπτεται από μόνη της.

Μετά όσα αναφέρθηκαν παραπάνω συνάγεται ότι οι βασικές παράμετροι λειτουργίας και επιδόσεων ενός SCR είναι:

α) Τάση υπερεκκενώσεως: Η τάση ανόδου-καθόδου στην οποία το SCR μεταπίπτει από κατάσταση υψηλής σε κατάσταση χαμηλής αντιστάσεως.



β) Ρεύμα συντηρήσεως: Το ελάχιστο ρεύμα, που απαιτείται για να συντηρήσει την υπερεκκένωση.

γ) Τάση καταρρεύσεως: Η μέγιστη ανάστροφη τάση, που μπορεί να αντέξει η διάταξη.

δ) Ρεύμα διαρροής: Το ρεύμα, που διαρρέει τη διάταξη σε κατάσταση ορθής πολώσεως υψηλής αντιστάσεως (επηρεάζεται από τη θερμοκρασία).

ε) Χρόνος αψής: Ο χρόνος που απαιτείται για τη μετόπτωση της διατάξεως από κατάσταση υψηλής αντιστάσεως (off) σε κατάσταση χαμηλής αντιστάσεως (on). Συνήθως είναι περί τα 2μsec.

στ) Χρόνος αποκαταστάσεως (ή σβέσης): Ο χρόνος που απαιτείται για την αντίστροφη μετόπτωση είναι συνήθως περί τα 5μsec.

ζ) Δυναμική αντίσταση: Η αντίσταση του SCR σε κατάσταση υπερεκκενώσεως.

η) Χωρητικότητα: Η χωρητικότητα της διατάξεως (επηρεάζει κυρίως το χρόνο αποκαταστάσεως).

Συχνά η μελέτη της λειτουργίας, των χαρακτηριστικών και των επιδόσεων ενός ελεγχόμενου ανορθωτή πυριτίου πραγματοποιείται με τη βοήθεια κάποιου ισοδύναμου κυκλώματος με κρυσταλλοτρίοδους, επειδή η μελέτη με τη βοήθεια των ενεργειακών διαγραμμάτων είναι αρκετά δυσχερής και μη πρακτική. Ένα τέτοιο ισοδύναμο κύκλωμα υποδεικνύει η ίδια η δομή του SCR και φαίνεται στο σχήμα 12-8. Οι δύο κρυσταλλοτρίοδοι (pnp και npn αντίστοιχα) είναι πολωμένες κατά το συμβατικό τρόπο - επαφή εκπομπού ορθά, επαφή συλλέκτη ανόστροφα-και για τα ρεύματά τους (I_E , I_B , I_C) ισχύουν οι γνωστές εξισώσεις (ασκήσεις 6 και 7). Με βάση τις εξισώσεις αυτές προκύπτει εύκολα, ότι το ολικό ρεύμα του κυκλώματος δίδεται από τη σχέση:

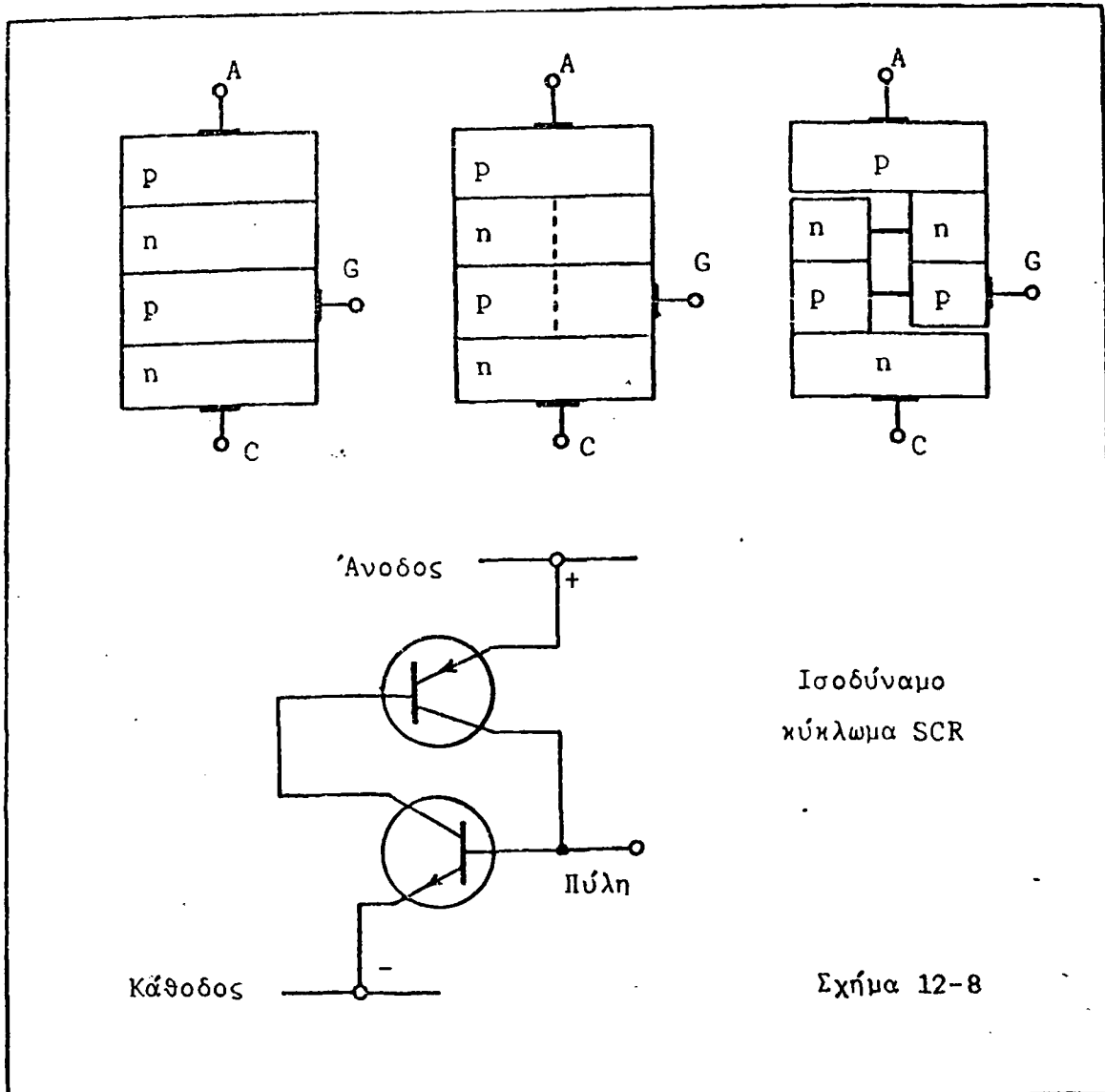
$$I = I_{CO} / (1 - \alpha_1 - \alpha_2)$$

όπου α_1 και α_2 οι δυναμικές παράμετροι α της κάθε κρυσταλλοτρίοδου. Η λεπτομερής μελέτη της εξαρτήσεως των παραμέτρων αυτών από το ρεύμα εκπομπού της κάθε κρυσταλλοτρίοδου δείχνει, ότι πέρα από τη μικρολογική του ισοδυναμία το κύκλωμα των δύο κρυσταλλοτρίοδων ισοδυναμεί και λειτουργικά με ελεγχόμενο ανορθωτή πυριτίου.

Εφαρμογές του ελεγχόμενου ανορθωτή πυριτίου

Τα SCRs χρησιμοποιούνται κυρίως σε κυκλώματα συνεχούς σαν διακόπτες ή



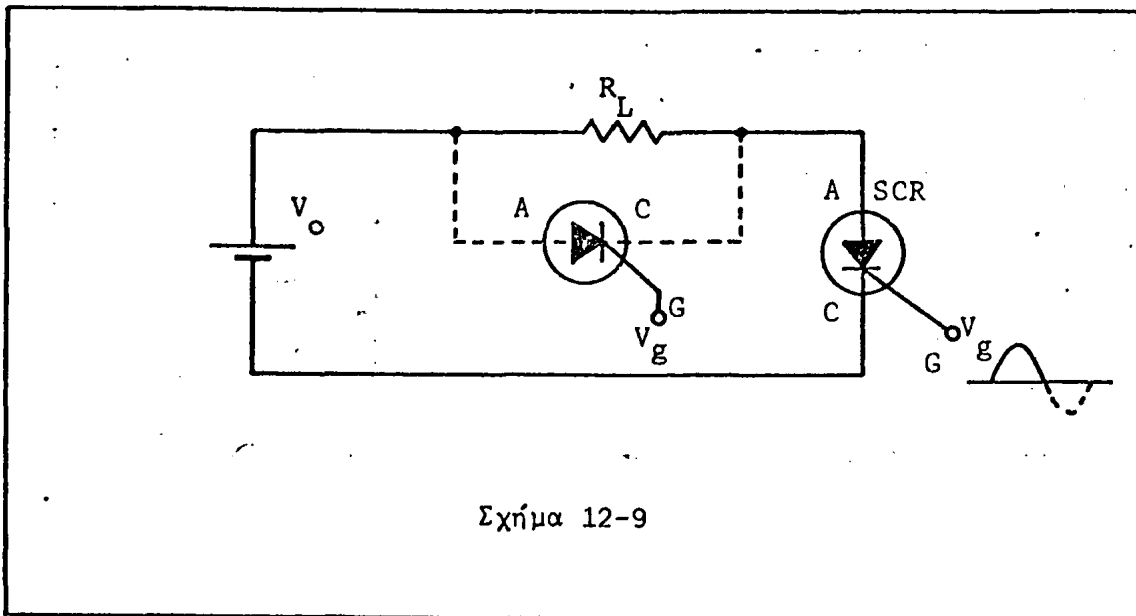


για την παραγωγή προνοητών τάσεων και σε κυκλώματα εναλλασσομένου σαν ανορθωτές και ρυθμιστές της παρεχόμενης σε κάποιο φόρτο ή διάταξη ισχύος.

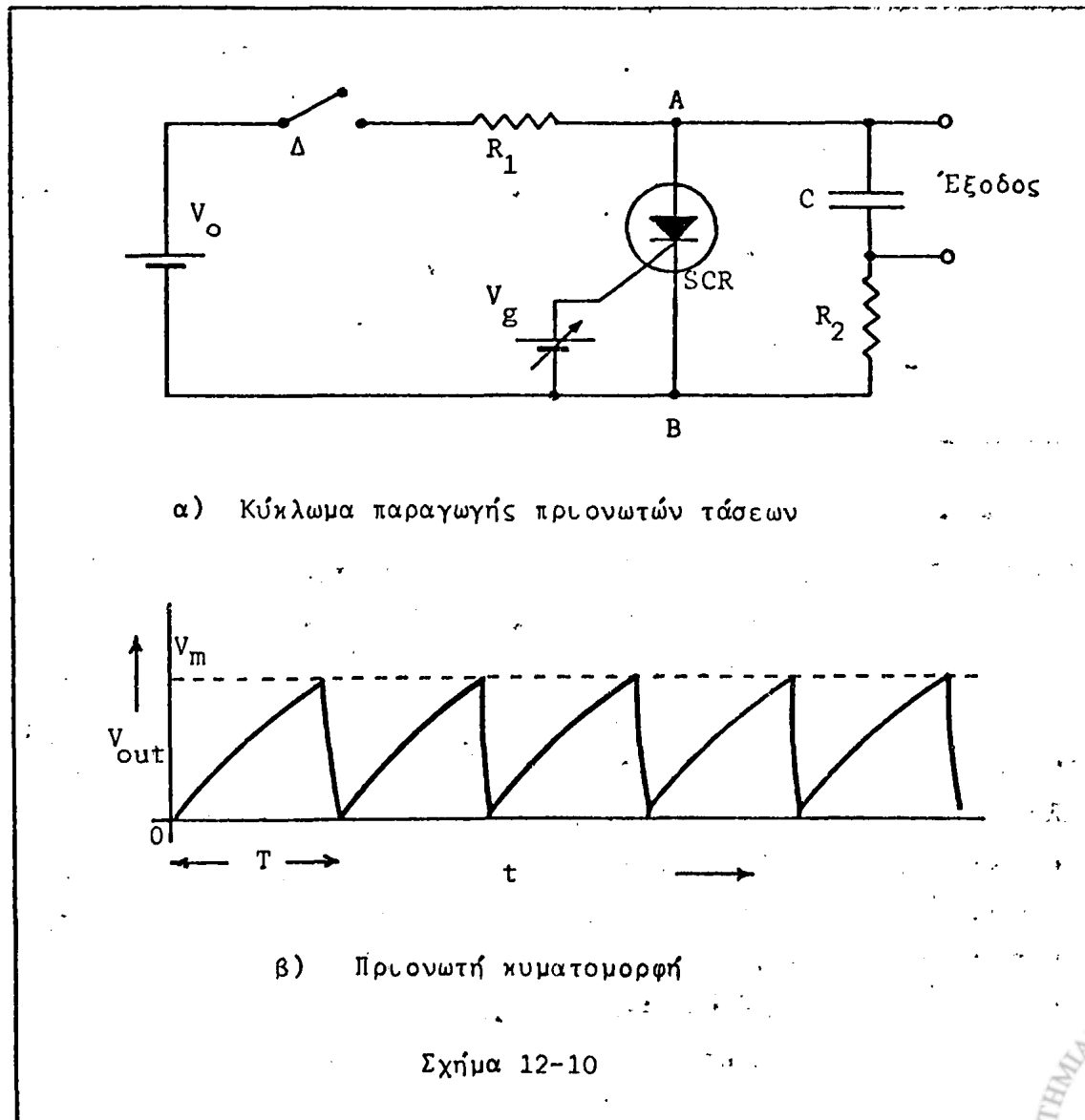
Η χρήση του σαν διακόπτη είναι προφανής. Όπως φαίνεται και στο απλοποιημένο κύκλωμα του σχήματος 12-9, εφ' όσον η τάση στα άκρα του είναι μικρότερη από την τάση υπερεκκένωσης χωρίς δυναμικό πύλης, το SCR δεν άγει και ο φόρτος R_L δεν διαρρέεται από ρεύμα. Μόλις όμως στην πύλη εφαρμοσθεί κατάλληλος θετικός παλμός το SCR ενεργοποιείται, άγει και ο φόρτος διαρρέεται από ρεύμα. Με κατάλληλη μετατροπή του κυκλώματος (διακεκομμένη γραμμή) μπορεί το SCR να χρησιμοποιηθεί σαν ασφάλεια είτε υπερχορτάσεως (οπότε η πύλη έχει σταθερό προκαθορισμένο δυναμικό) είτε ενεργοποιήσεως (οπότε η πύλη οδηγείται από κατάλληλο παλμό).

Στο σχήμα 12-10.α φαίνεται ένα κύκλωμα παραγωγής προνοητών τάσεων με





Σχήμα 12-9

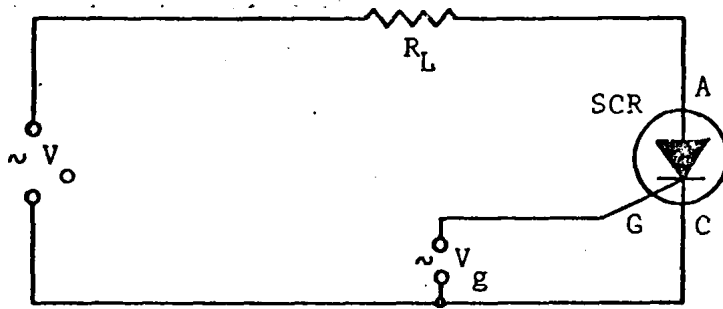


Σχήμα 12-10

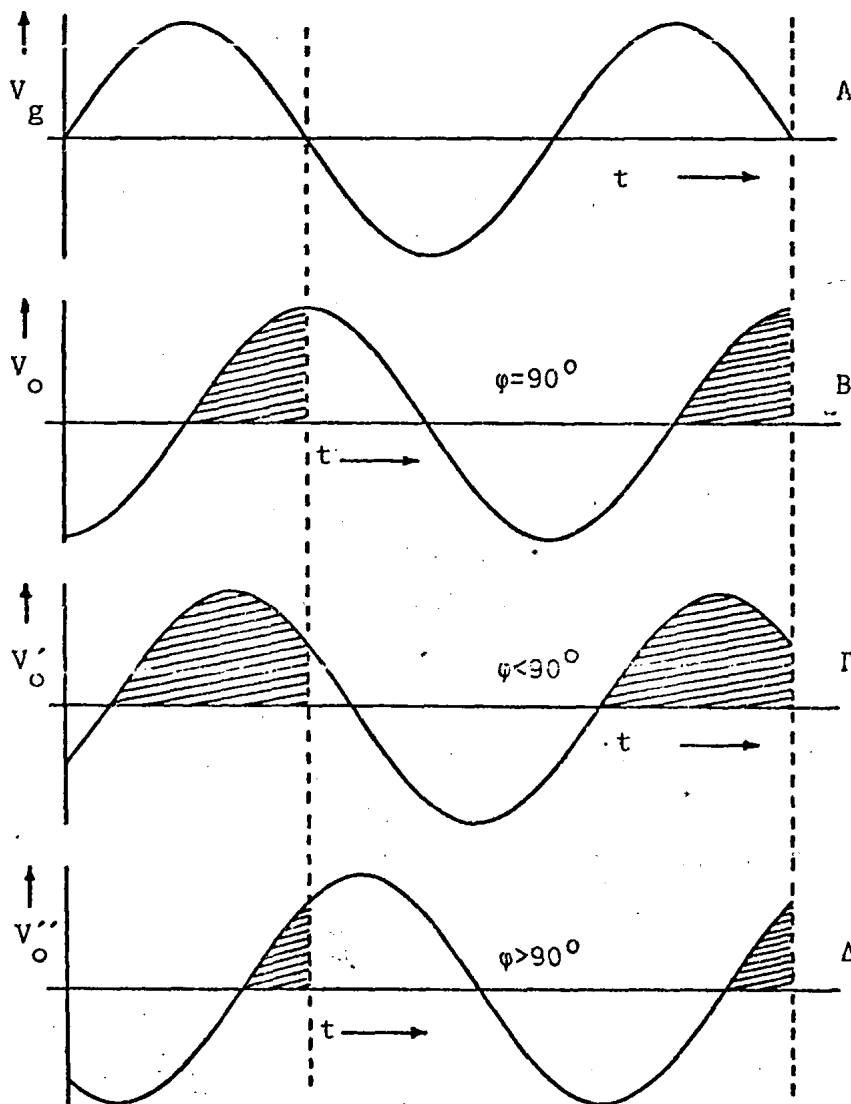


SCR. Μόλις κλείσει ο διακόπτης Δ ο πυκνωτής C αρχίζει να φορτίζεται μέσω των αντιστάσεων R_1 και R_2 . Το SCR δεν άγει επειδή αρχικά η τάση στα άκρα του είναι μικρότερη από την απαιτούμενη για υπερεκκένωση. Η τάση βέβαια στα άκρα του πυκνωτή αυξάνει εκθετικά μετά του χρόνου, ενώ το ρεύμα του κυκλώματος ελαττώνεται εκθετικά. Σε κάποια χρονική στιγμή λοιπόν, εφ'όσον η τάση V_0 της πηγής είναι επαρκώς μεγάλη, η τάση στα άκρα του πυκνωτή (και ουσιαστικά τάση στα άκρα του SCR, εφ'όσον η πτώση τάσης στην R_2 είναι ασήμαντη λόγω του ελαττωμένου ρεύματος) φθάνει την τάση υπερεκκένωσης και το SCR αρχίζει να άγει. Απότομα λοιπόν τα σημεία A και B πρακτικά βραχυκυκλώνονται και ο πυκνωτής εκφορτίζεται μέσω της R_2 ελαττώνοντας εκθετικά την τάση στα άκρα του. Όταν η τάση αυτή μηδενιστεί σχεδόν το SCR παύει να άγει, επειδή με κατάλληλη επιλογή της R_1 έχει ρυθμιστεί το ρεύμα συντηρήσεώς του να είναι μεγαλύτερο του $i = V_0/R_1$ και αρχίζει νέος κύκλος λειτουργίας. Επιλέγοντας την αντίσταση R_2 , έτσι ώστε ο λόγος R_1/R_2 να είναι πολύ μεγάλος επιτυγχάνουμε ο παλμός εκφορτίσεως να είναι πολύ μικρότερης διάρκειας από τον παλμό φορτίσεως. Προκύπτει έτσι η πριονωτή κυματομορφή τάσης του σχήματος 12-10.β. Η μεταβλητή πηγή V_g πολώνει κατάλληλα την πύλη και ρυθμίζει το δυναμικό υπερεκκένωσης, άρα και το ύψος του παλμού V_m .

Έστω τώρα το απλοποιημένο στοιχειώδες κύκλωμα του σχήματος 12-11.α. με τη βοήθεια του οποίου θα μελετηθεί η ρυθμιστική δράση του SCR σε κυκλώματα εναλλασσομένου. Έστω ακόμη ότι μεταξύ πύλης και καθόδου του SCR εφαρμόζεται η κυματομορφή τάσης του σχήματος 12-11A και μεταξύ ανόδου-καθόδου η κυματομορφή τάσης του σχήματος 12-11B. Γενικά βέβαια το πλάτος V_0 είναι πολύ μεγαλύτερο του V_g , αλλά μικρότερο της τάσης υπερεκκένωσης χωρίς πόλωση πύλης. Όπως και από τη χαρακτηριστική του SCR φαίνεται σε όλη την αρνητική ημιπερίοδο της τάσης V_0 η διάταξη είναι ανάστροφα πολωμένη και δεν άγει. Έτσι στον φόρτο R_L στα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα δεν αποδίδεται ισχύς. Κατά τη θετική τώρα ημιπερίοδο το SCR επίσης δεν άγει για όσο τουλάχιστον χρονικό διάστημα η τάση πόλωσης πύλης είναι αρνητική, επειδή όπως προαναφέρθηκε $V_0 < V_b$. Αντίθετα σε όλο σχεδόν το χρονικό διάστημα, που η πύλη είναι θετική, εφ'όσον βέβαια και το δυναμικό ανόδου είναι θετικό, άγει. Ουσιαστικά λοιπόν στο φόρτο R_L αποδίδεται ισχύς για όσο χρονικό διάστημα και οι δύο τάσεις (κυματομορφές) είναι θετικές. Ρυθμίζοντας κατάλληλα τη διαφορά φάσης των δύο κυματομορφών επιτυγχάνουμε το χρονικό αυτό διάστημα να είναι μικρό ή μεγάλο κλάσμα της περιόδου, άρα και το ποσό της αποδιδόμενης ισχύος μικρό ή μεγάλο αντίστοιχα. Γραφικά αυτό



α) Στοιχειώδες κύκλωμα SCR



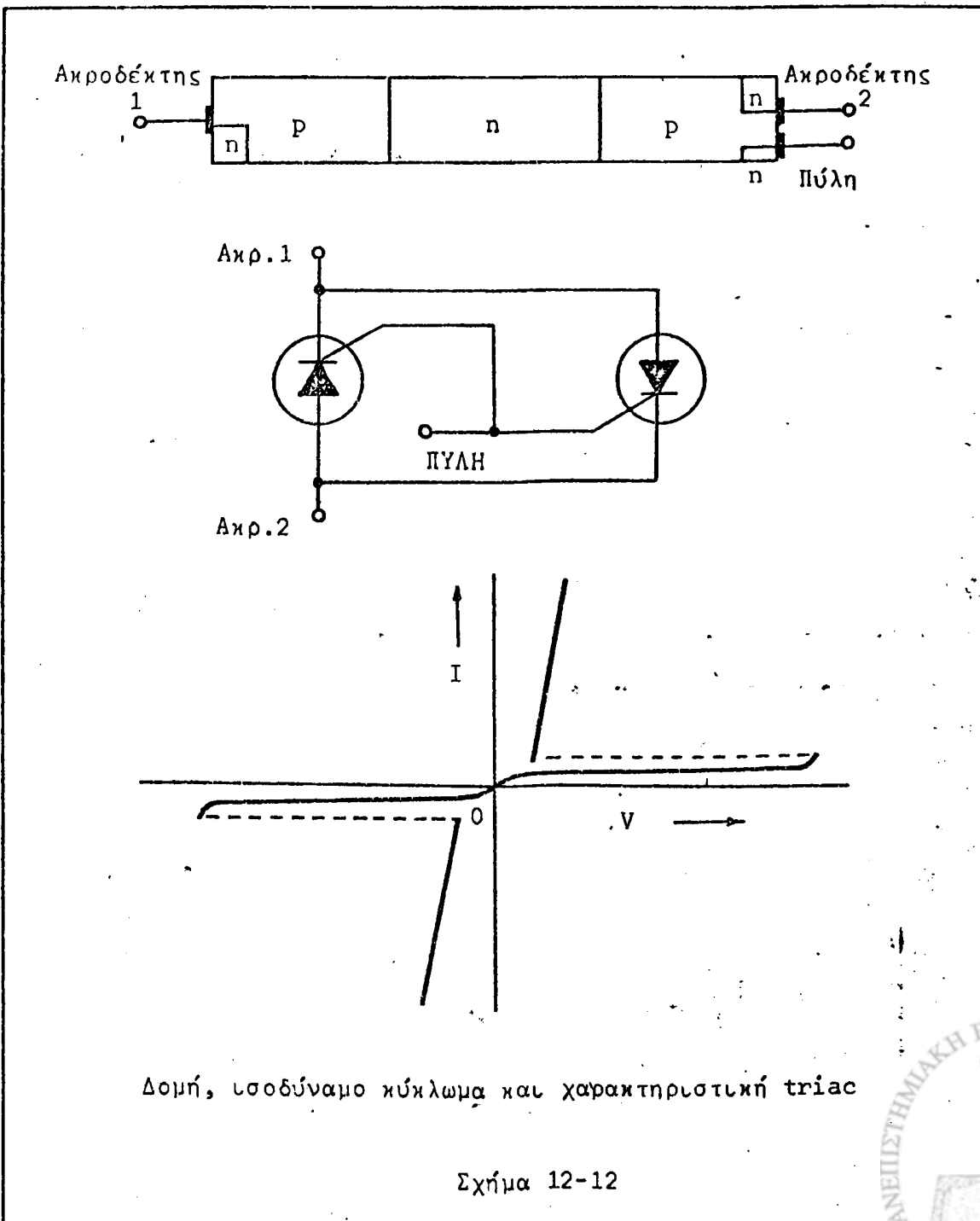
Σχήμα 12-11



παρίσταται στο σχήμα 12-11.Α-Δ (γραμμιοσκιασμένα τμήματα των καμπυλών). Συμπληρωματικά σημειώνουμε, ότι για διακρορά φάσης 180° το SCR δεν άγει καθόλου και βρίσκεται μόνιμα σε κατάσταση υψηλής αντιστάσεως (off).

Συγγενικές διατάξεις

Όπως προαναφέρθηκε εκτός από τα SCRs στην οικογένεια των thyristors ανήκουν και άλλες διατάξεις, όπως τα triacs και τα diacs.



Το *triac* είναι ουσιαστικά ένας συνδυασμός δύο SCRs ανάστροφα τοποθετημένων. Έτσι παρουσιάζει όλα τα χαρακτηριστικά του SCR εκτός από τη μονοπολικότητα, άγει δηλαδή αμφίδρομα. Στο σχήμα 12-12 δίνεται η δομή, η χαρακτηριστική και το ισοδύναμο κύκλωμα ενός *triac*. Χρησιμοποιείται κυρίως σε κυκλώματα εναλλασσομένου για τον έλεγχο της ισχύος, που αποδίδεται σε κάποιο φόρτο.

Το *diac* είναι σύστημα δύο επαρών p-n και δύο ηλεκτροδίων. Πρόκειται ουσιαστικά για μια κρυσταλλοτρίοδο χωρίς ηλεκτρόδιο βάσης. Επειδή στερείται πύλης, η τάση υπερεκκενώσεώς του είναι μη ρυθμιζόμενη. Στο σχήμα 12-13 δίδεται η δομή και η χαρακτηριστική του.

Τέλος στο σχήμα 12-14 δίδεται η πραγματική δομή ενός SCR. Η δομή αυτή ευκολύνει τη δημιουργία των επαρών καθόδου και πηγής προς την ίδια πλευρά της διατάξεως.

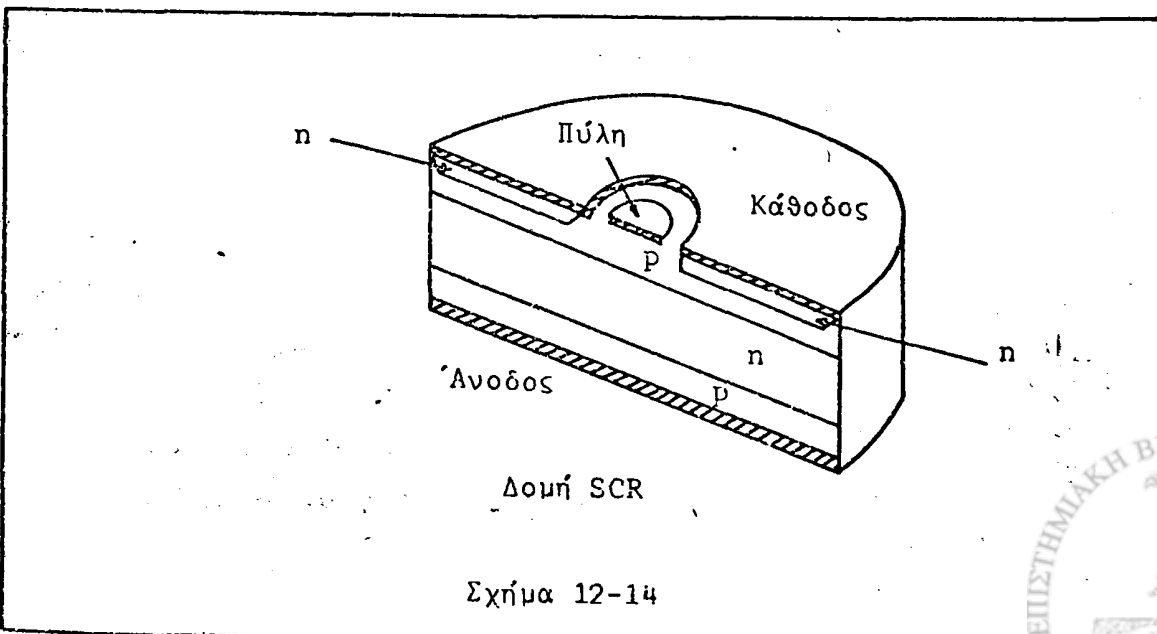
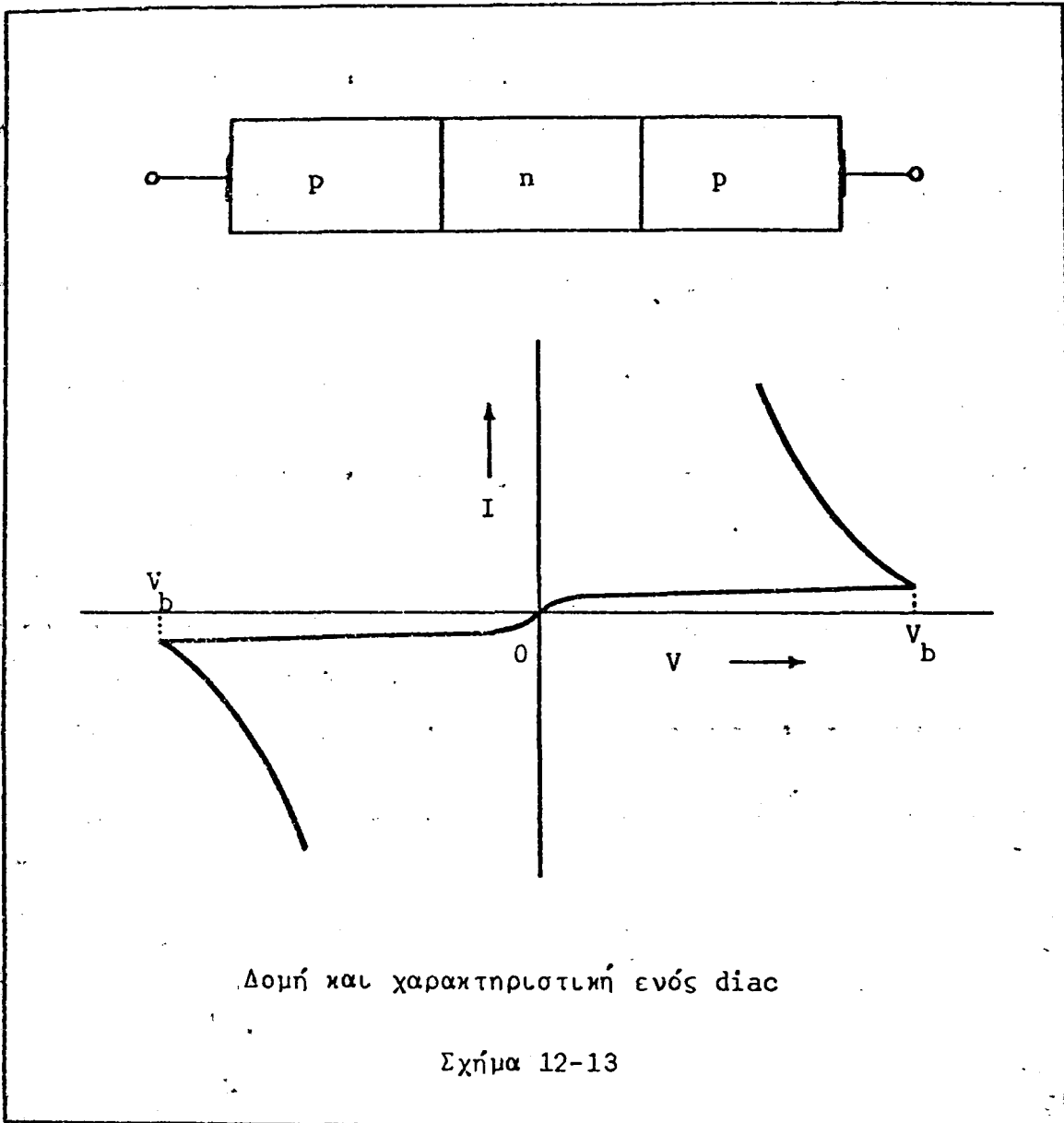
Απαραίτητες γνώσεις

Δ. Μ. Μηλιώτη: Η Φυσική των Κρυσταλλολυχνιών, σελ. 265

Χρησιμοποιούμενα όργανα

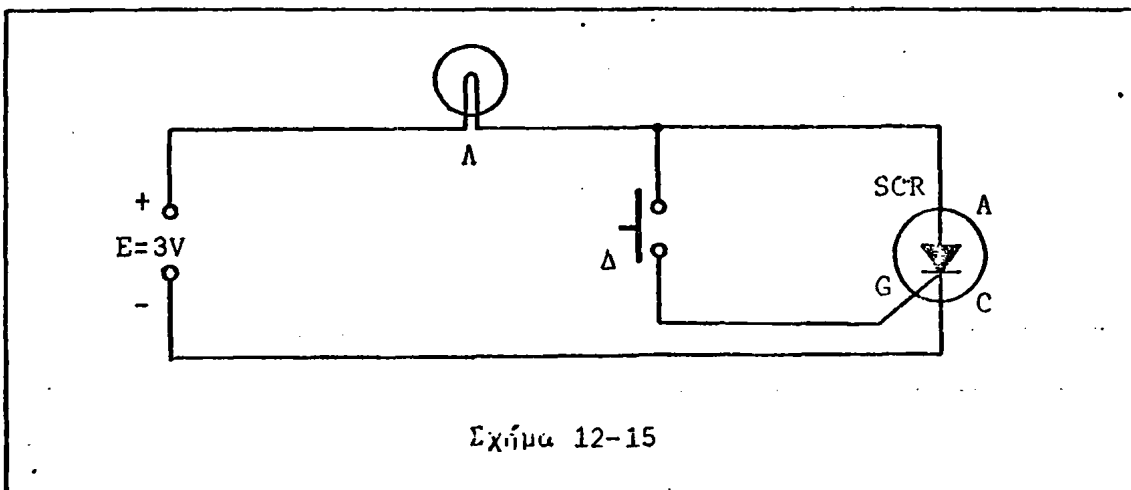
1. Δύο τροφοδοτικά χαμηλής τάσης
2. Τροφοδοτικό υψηλής τάσης
3. Δύο ηλεκτρονικά βολτόμετρα
4. Παλμογράφος
5. Πολύμετρο
6. Ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου
7. Λαμπτήρας
8. Δύο διακόπτες
9. Τρεις κρυσταλλοδιόδοι πυριτίου (50V-250mA)
10. Αντιστάσεις: 100Ω-0.5W, 1kΩ-0.5W, 12Ω-2W
11. Ποτενσιόμετρο 50kΩ-0.5W
12. Πυκνωτές: 0.5μF και 50μF ηλεκτρολυτικοί





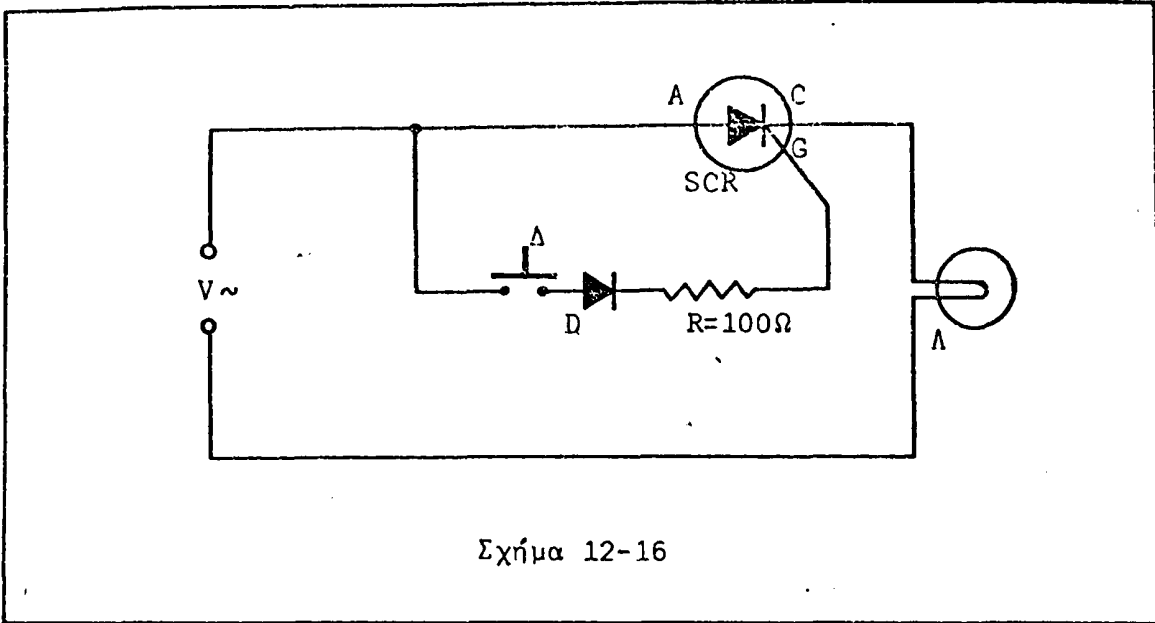
Πειραματικό μέρος

1. Συνδεσμολογείστε το κύκλωμα του σχήματος 12-15. Πιέστε στιγμαιαία τον διακόπτη. Ανάβει ο λαμπτήρας; Παραμένει αναμμένος; Εξηγείστε γιατί.
2. Αντιστρέψτε την πολικότητα της πηγής και πιέστε πάλι τον διακόπτη. Ανάβει ο λαμπτήρας; Εξηγείστε γιατί.
3. Συνδεσμολογείστε το κύκλωμα του σχήματος 12-16. Τροφοδοτείστε το με τάση 6.3V εναλλασσόμενη. Ανάβει ο λαμπτήρας; Πιέστε στιγμαιαία τα διακόπτη. Παραμένει ο λαμπτήρας αναμμένος, όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός; Γιατί;
4. Συνδεσμολογείστε το κύκλωμα του σχήματος 12-17. Η πηγή E_g είναι αρχικά μηδενισμένη ($E_g = 0$). Ανάβει ο λαμπτήρας, όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός; Μετρήστε την τάση ανόδου-καθόδου και πύλης-καθόδου με το ηλεκτρονικό βολτόμετρο. Κλείστε τον διακόπτη και αρχίστε να αυξάνετε την τάση της πηγής E_g (μέχρι 1.5V). Παρατηρήστε το ρεύμα του αμπερόμετρου I_g . Για κάποια τιμή του ρεύματος αυτού I_g το SCR αρχίζει να άγει και ο λαμπτήρας

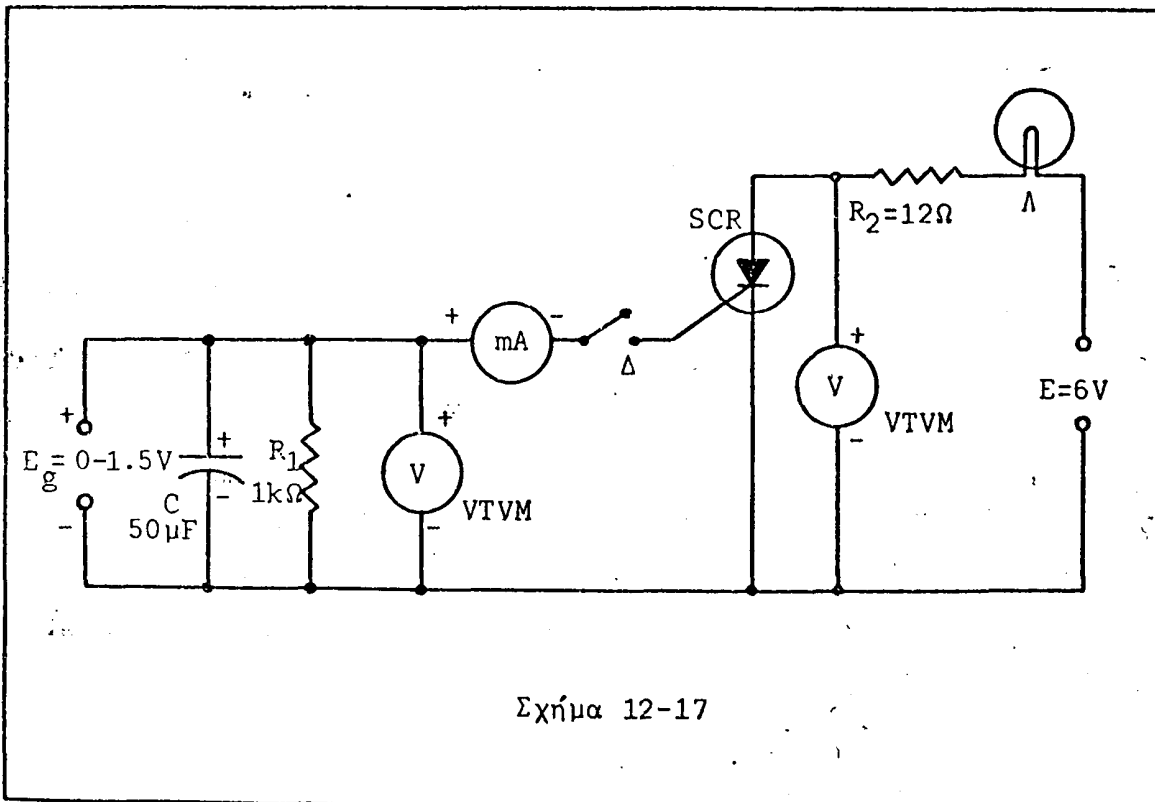


ανάβει. Ταυτόχρονα αναστρέφεται το ρεύμα πύλης I_g . Καταγράψτε την κρίσιμη τιμή ρεύματος πύλης για μετάπτωση του SCR από κατάσταση υψηλής σε κατάσταση χαμηλής αντιστάσεως. Επαναρρυθμίστε την τάση πύλης E_g στο μηδέν ($E_g = 0V$). Το ρεύμα είναι ακόμη ανεστραμμένο; Ανοίξτε το διακόπτη. Εξακολουθεί ο λαμπτήρας να είναι αναμμένος; Μετρήστε πάλι τις τάσεις ανόδου-καθόδου και πύλης-καθόδου. Μπορεί η πύλη να ελέγξει τη λειτουργία ενός SCR σε κατάσταση χαμηλής αντιστάσεως;





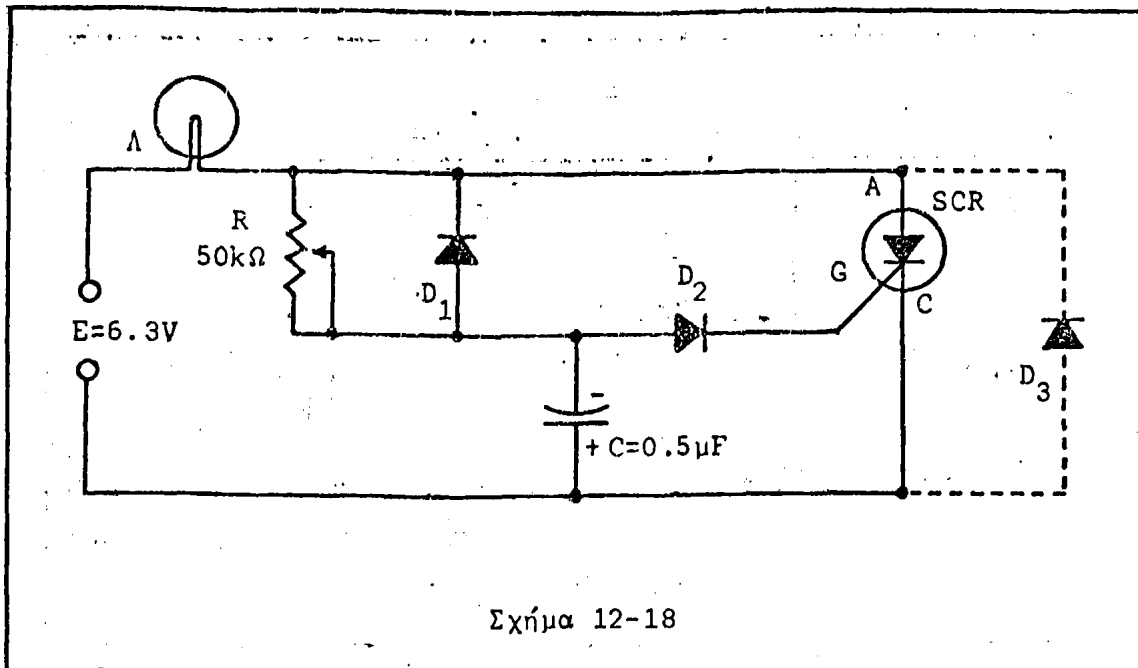
Σχήμα 12-16



Σχήμα 12-17

$E_{AC} =$	V	$E_{GC} =$	V
$I_g =$	mA		
$E_{ACb} =$	V	$E_{Gcb} =$	V





Σχήμα 12-18

5. Συνδεσμολογήστε το κύκλωμα του σχήματος 12-18 (light dimmer). Τροφοδοτήστε το κύκλωμα με τάση 6.3V εναλλασσόμενη. Ρυθμίστε τη φωτεινότητα του λαμπτήρα μεταβάλλοντας την τιμή του ροοστάτη. Πότε ανάβει εντονότερα ο λαμπτήρας για μέγιστη ή για ελάχιστη τιμή αντιστάσεως ροοστάτη; Εξηγήστε αναλυτικά τη λειτουργία του κυκλώματος.

6. Απομακρύντε την κρυσταλλοδίοδο D_1 από το κύκλωμα. Εξακολουθεί το κύκλωμα να λειτουργεί σωστά; Σβήνει ο λαμπτήρας τελείως; Γιατί; Πώς μπορείτε να επιτύχετε πλήρες σβήσιμο του λαμπτήρα χωρίς τη δίοδο D_1 (θεωρητική απάντηση);

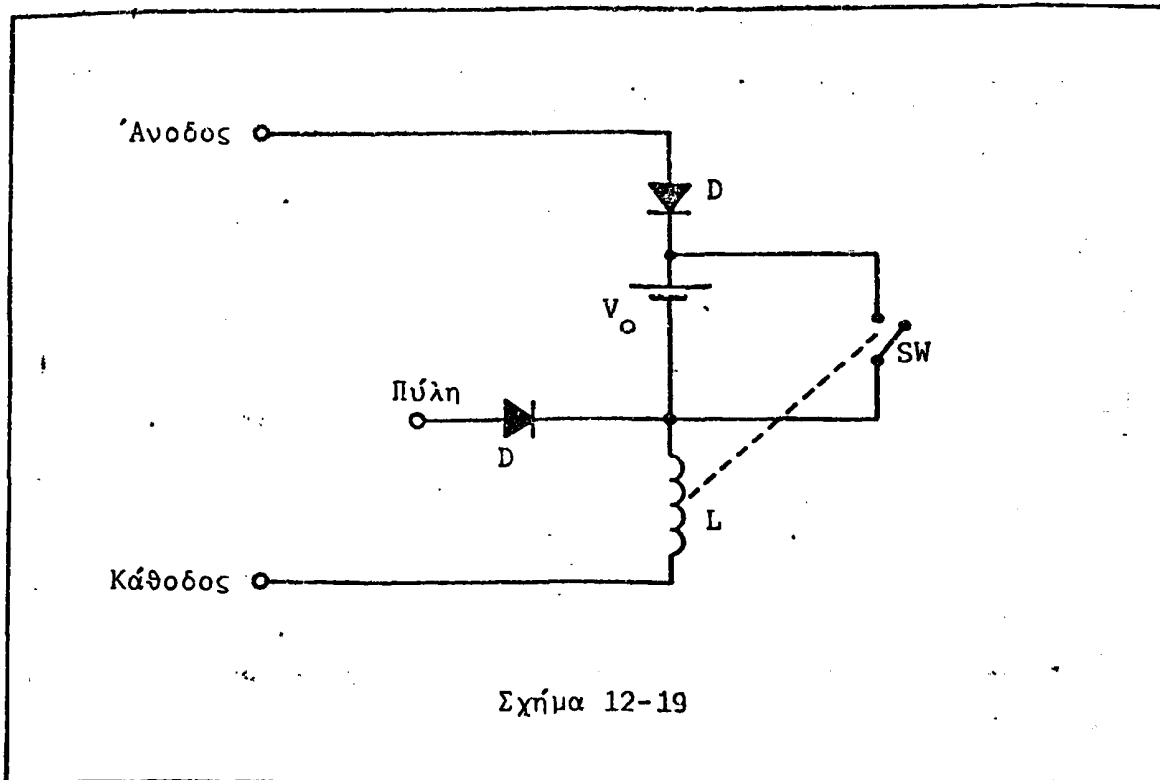
7. Συνδέστε πάλι τη δίοδο D_1 στο κύκλωμα και συνδέστε τον παλμογράφο παράλληλα με το λαμπτήρα. Σχεδιάστε την κυματομορφή, που παρατηρείτε. Μεταβάλλετε την τιμή του ροοστάτη και παρατηρήστε την αλλαγή στην κυματομορφή. Σχολιάστε τις παρατηρήσεις σας.

8. Συνδέστε την κρυσταλλοδίοδο D_3 , όπως φαίνεται στο σχήμα 12-18. Τι συμβαίνει στη φωτεινότητα του λαμπτήρα; Γιατί;

Ερωτήσεις

1. Γιατί το SCR δεν άγει σε ανάστροφη πόλωση;





2. Το κύκλωμα του σχήματος 12-19 είναι λειτουργικά ισοδύναμο προς ένα ιδανικό ελεγχόμενο ανορθωτή πυριτίου. Το πηνίο L ελέγχει τις επαφές του διακόπτη SW. Εξηγήστε τη λειτουργία του.
3. Γιατί ο ρόλος της πύλης εκμηδενίζεται μετά την υπερεκκένωση;
4. Ποιά είναι η βασική διαφορά μεταξύ του SCR, του triac και του diac;
5. Με ποιούς τρόπους μπορεί να διακοπεί η υπερεκκένωση ενός SCR;

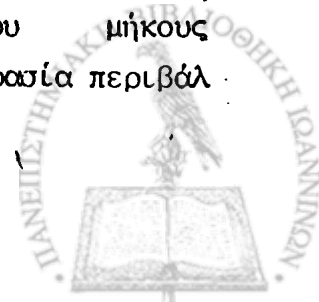
ΜΕΛΕΤΗ ΘΕΡΜΙΣΤΟΡΕισαγωγή

Πολλές φυσικές ιδιότητες και μεγέθη ενός σώματος υφίστανται μεταβολές, όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία. Αρκετά από τα θερμοευαίσθητα αυτά μεγέθη, ιδιαίτερα όσα παρουσιάζουν σημαντική μεταβολή, χρησιμοποιήθηκαν από πολύ νωρίς για τη μέτρηση ή τον έλεγχο της θερμοκρασίας ενός σώματος ή συστήματος. Είναι γνωστά π.χ. τα θερμόμετρα υδραργύρου (μέτρηση θερμοκρασίας, που βασίζεται στη μεταβολή του όγκου ενός υγρού) ή οι θερμικοί διακόπτες των θερμοσιφώνων (έλεγχος θερμοκρασίας, που βασίζεται στην παραμόρφωση ενός διμεταλλικού ελάσματος).

Με ιδιαίτερη προσοχή μελετήθηκε η θερμική εξάρτηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των σωμάτων και για άλλους λόγους, αλλά και επειδή η χρησιμοποίηση των μεταβολών ηλεκτρικών μεγεθών στις εφαρμογές παρέχει τη δυνατότητα τηλεπαρητήσεων, τηλεχειρισμού, αυτοματισμού κλπ. Παρατηρήθηκε έτσι, ότι αρκετές ηλεκτρικές ιδιότητες μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία, αλλά πιο κατάλληλη για μετρήσεις και ελέγχους βρέθηκε η ηλεκτρική αντίσταση, κυρίως λόγω της ευχέρειας προσδιορισμού και συσχέτισμού της με άλλα ηλεκτρικά στοιχεία κυκλώματος.

Είναι γνωστό, ότι η ειδική αντίσταση των καθαρών μετάλλων είναι ανάλογη προς τη θερμοκρασία, εφ' όσον βέβαια δεν αναφερόμαστε σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (κάτω των 50°K). Η αύξηση αυτή της ειδικής αντιστάσεως οφείλεται στην ελάττωση της ευκνησίας των ηλεκτρονίων, επειδή όσο αυξάνει η θερμοκρασία, γίνεται εντονότερη η σκέδασή τους από τα ταλαντούμενα ιόντα του πλέγματος. Ανάλογη συμπεριφορά παρουσιάζουν και τα κράματα. Έχουν όμως πολύ μεγαλύτερες ειδικές αντιστάσεις και μικρότερους θερμικούς συντελεστές αντιστάσεως.

Στην ιδιότητα αυτή (μεταβολή αντιστάσεως καθαρού μετάλλου με τη θερμοκρασία) βασίζεται η λειτουργία των βολομέτρων (bolometers). Τα βολόμετρα αποτελούνται συνήθως από ένα πολύ λεπτό σύρμα - π.χ. λευκοχρύσου μήκους 10mm, διαμέτρου $2.5 \cdot 10^{-3}$ mm, αντιστάσεως περίπου 150Ω σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

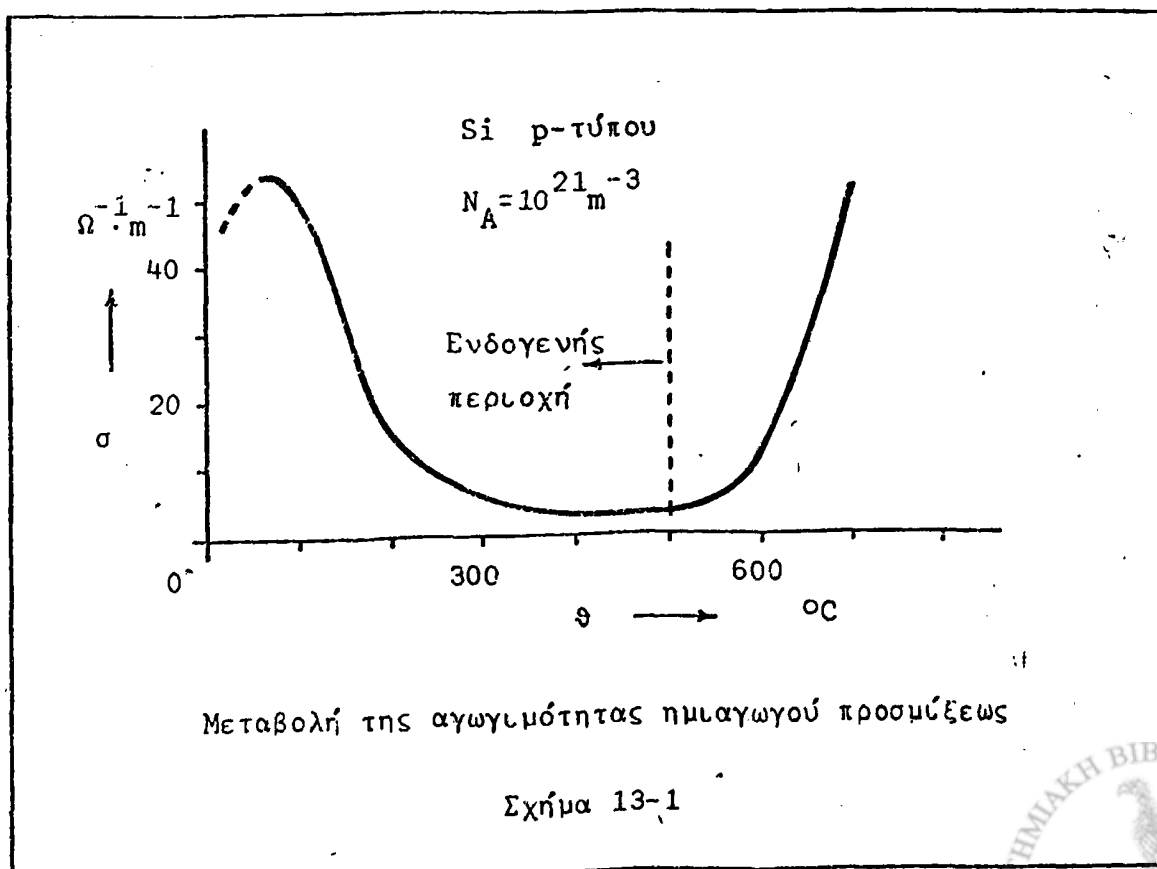


λοντος και χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση ισχύος θερμικών ακτινοβολιών.

Όσον αφορά στους ημιαγωγούς παρουσιάζουν διαφορετική εξάρτηση της ειδικής αγωγιμότητάς τους (αντίστροφο της ειδικής αντιστάσεως) από τη θερμοκρασία ανάλογα με το είδος τους. Έτσι οι συνήθεις ημιαγωγοί προσμίξεων, στους οποίους οι προσμίξεις είναι πλήρως διεγερμένες πάνω από τους 50°K , εμφανίζουν μικρή μεταβολή της αγωγιμότητας με τη θερμοκρασία και συμπεριφορά ανάλογη προς τα μέταλλα, δηλαδή ελάττωση της αγωγιμότητας για αύξηση της θερμοκρασίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 13-1. Αυτό οφείλεται στο ότι ο αριθμός των φορέων δεν μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία, διότι όλες οι προσμίξεις είναι ήδη διεγερμένες, απλώς μεταβάλλεται - ελαττώνεται - η ευκλινησία τους.

Αντίθετα οι ενδογενείς ημιαγωγοί εμφανίζουν ταχύτατη αύξηση της αγωγιμότητας με τη θερμοκρασία. Ο κυριώτερος λόγος γι' αυτό είναι η αύξηση του αριθμού των φορέων όσο αυξάνει η θερμοκρασία. Η συγκέντρωση των φορέων σε έναν ενδογενή ημιαγωγό δίνεται από τη σχέση:

$$n_i = 2 \cdot \left(\frac{2\pi kT}{h^2} \right)^{3/2} \cdot (m_p \cdot m_n)^{3/4} \cdot \exp\left(-\frac{E_x}{2kT}\right) \quad (1)$$



όπου m_p , m_n η ενεργός μάζα οπής και ηλεκτρονίου αντίστοιχα, E_x το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού, k η σταθερά Boltzmann, h η σταθερά Planck και T η απόλυτη θερμοκρασία. Με βάση την (1) η αγωγιμότητα του ενδογενούς ημιαγωγού, που δίνεται από τη γενική σχέση:

$$\sigma = n_i \cdot e \cdot (\mu_p + \mu_n).$$

διαμορφώνεται ως εξής:

$$\sigma = 2e \left(\frac{2\pi kT}{h^2} \right)^{3/2} \cdot (m_n \cdot m_p)^{3/4} \cdot (\mu_n + \mu_p) \exp\left(-\frac{E_x}{2kT}\right) \quad (2)$$

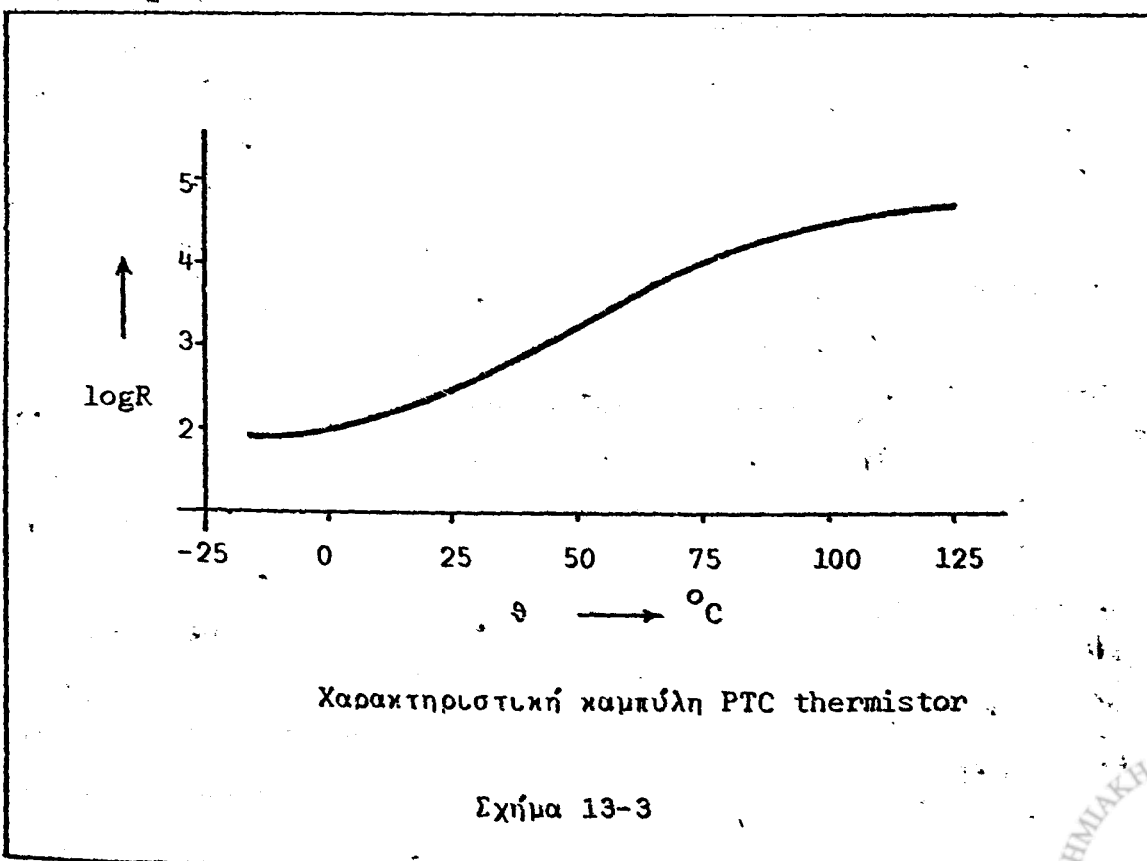
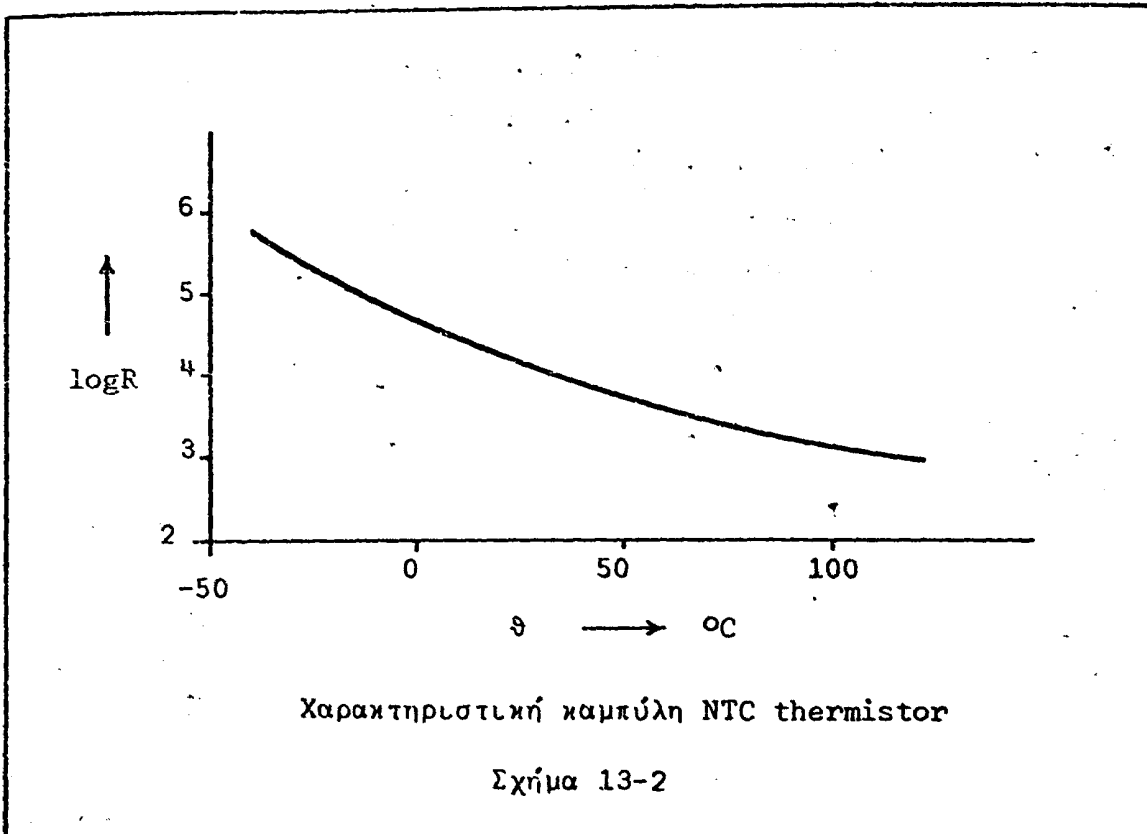
όπου μ_p και μ_n είναι οι ευκινήσιες των οπών και ηλεκτρονίων αντίστοιχα. Η σχέση (2) υποδεικνύει, ότι η αγωγιμότητα είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας σχεδόν εκθετική, επειδή η μεταβολή του εκθετικού όρου της είναι πολύ σημαντικότερη από τη μεταβολή του όρου δυνάμειος $3/2$. Αν μάλιστα ληφθεί υπ' όψη, ότι σε πρώτη προσέγγιση και για συνήθεις θερμοκρασίες η ευκινήσια των φορέων μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη του $T^{-3/2}$ (ελαττώνεται με τη θερμοκρασία), προκύπτει, ότι η αγωγιμότητα αυξάνει καθαρά εκθετικά με τη θερμοκρασία. Κατά συνέπεια η σχετική μεταβολή της αγωγιμότητας δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{\sigma} \left(\frac{d\sigma}{dT} \right) = -\frac{E_x}{2kT^2}$$

Για γερμάνιο (Ge) εξαιρετικής καθαρότητας (δηλαδή εξαιρετικά χαμηλού ποσοστού προσμίξεων) η σχετική αυτή μεταβολή είναι περίπου $-5\%/deg$, ενώ για ένα μέταλλο η μεταβολή αυτή είναι περίπου $0,3\%/deg$. Συνάγεται λοιπόν, ότι η μεταβολή της αντιστάσεως στους ενδογενείς ημιαγωγούς συναρτήσει της θερμοκρασίας είναι πολύ πιο σαφής και σημαντική από ότι στα μέταλλα, άρα και ευχερέστερα μετρήσιμη.

Στην ιδιότητα αυτή, την αύξηση δηλαδή της αγωγιμότητας ενός ενδογενούς ημιαγωγού με τη θερμοκρασία, βασίζεται η λειτουργία των thermistors. Τα thermistors είναι οι απλούστερες διατάξεις Στερεού Σώματος. Αποτελούνται από ένα κομμάτι ενδογενούς ημιαγωγού με δυο ακροδέκτες και χρησιμοποιούνται





σαν θερμοευαίσθητες μεταβλητές αντιστάσεις σε διάφορα ηλεκτρονικά κυκλώματα επιτρέποντας μέτρηση ή έλεγχο μιας θερμοκρασίας.

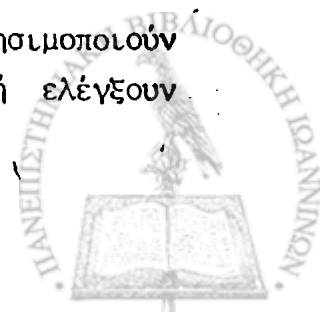
Σήμερα για την κατασκευή των thermistors σπανιότατα χρησιμοποιούνται τυπικά ημιαγωγά στοιχεία σε καθαρή μορφή, όπως π.χ. το πυρίτιο ή το γερμάνιο. Σχεδόν πάντα χρησιμοποιούνται οξειδία με ιδιότητες ανάλογες προς τις ιδιότητες ενδογενούς ημιαγωγού, όπως είναι τα οξειδία των μετάλλων μεταπτώσεως TiO_2 , NiO , Mn_2O_3 , Cr_2O_3 , Fe_3O_4 κλπ. Οι κυριώτεροι λόγοι για τη χρησιμοποίηση αυτή είναι ότι τα οξειδία είναι πολύ λιγότερο ευαίσθητα στην πιθανή παρουσία ακαθαρσιών από ότι τα ημιαγωγά στοιχεία και παρασκευάζονται πολύ ευκολότερα.

Το συνηθέστερο οξείδιο, που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των thermistors, είναι το μονοξείδιο του νικέλιου (NiO). Σε καθαρή μορφή είναι μονωτής· αν όμως στη μάζα του προστεθεί λίθιο (Li) σε ποσοστό 1% περίπου αποκτά αγωγιμότητα της τάξης των $100\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$. Είναι προφανές, ότι δεν πρόκειται για τυπική περίπτωση ημιαγωγού προσμίξεων (η συγκέντρωση της "προσμίξεως" είναι απαράδεκτα υψηλή), αλλά για κάποιο άλλο είδος δομής. Πράγματι από δείχθηκε (Heikes, Johnston 1957), ότι πρόκειται για τη δημιουργία ενός συμπλοκου της γενικής μορφής $Li_x Ni_{1-x} O$, που έχει συμπεριφορά εντελώς ανάλογη προς ενδογενή ημιαγωγό, τουλάχιστον όσον αφορά στην εξάρτηση της αγωγιμότητας από τη θερμοκρασία.

Εφ' όσον η αγωγιμότητα των υλικών αυτών αυξάνει με τη θερμοκρασία (σχέση (2)), συνάγεται, ότι τα thermistors, που κατασκευάζονται από τέτοια υλικά θα έχουν αρνητικό θερμικό συντελεστή αντιστάσεως και η αντίστασή τους θα ελαττώνεται με τη θερμοκρασία. Στο σχήμα 13-2 φαίνεται η μεταβολή της αντιστάσεως ενός τέτοιου NTC thermistor (Negative temperature coefficient thermistor).

Εκτός όμως από τα συνήθη NTC thermistors υπάρχουν και άλλα με θετικό θερμικό συντελεστή αντιστάσεως (PTC - Positive temperature coefficient thermistors), τα οποία κατασκευάζονται επίσης από οξειδία μετάλλων - κυρίως του βαρίου - και παρουσιάζουν θετικό θερμικό συντελεστή αντιστάσεως σε ωρισμένες μόνον περιοχές θερμοκρασιών, ενώ εκτός αυτών παρουσιάζουν αρνητικό ή και μηδενικό θερμικό συντελεστή. Η λειτουργία τους ερμηνεύεται ιδιαίτερα για κάθε υλικό κατασκευής. Στο σχήμα 13-3 δίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη ενός τέτοιου PTC thermistor.

Τελευταία έχει βρεθεί μια ειδική κατηγορία οξειδίων, που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή thermistors προορισμένων να μετρήσουν ή ελέγξουν

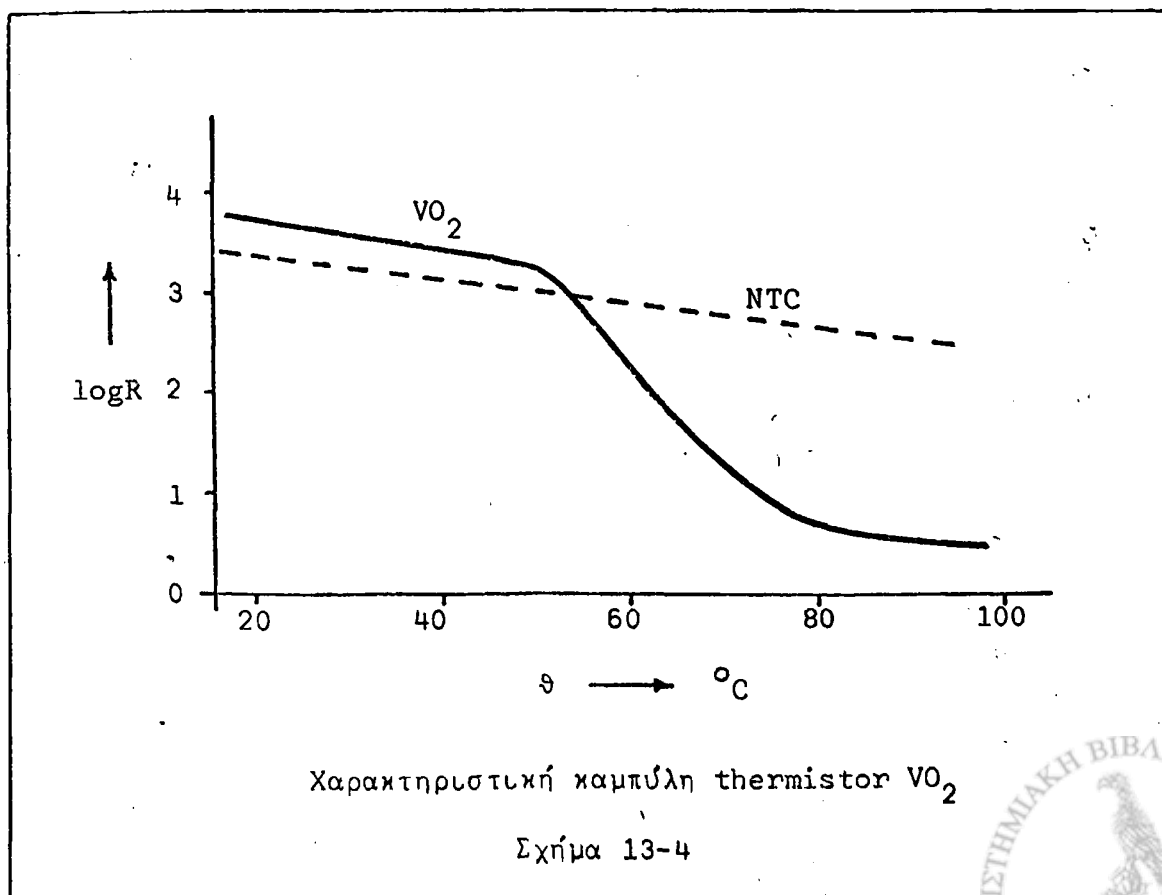


θερμοκρασιακές μεταβολές μέσα σε μια εντελώς καθωρισμένη στενή περιοχή θερμοκρασιών με μεγάλη ακρίβεια. Τέτοιο είναι π.χ. το οξείδιο του βανάδιου (VO_2). Το οξείδιο αυτό στους 68°C μεταπίπτει από την αντισιδηρομαγνητική κατάσταση στην παραμαγνητική και η ειδική του αντίσταση ελαττώνεται 100 περίπου φορές (Martin 1959-Furaki 1965). Στο σχήμα 13-4 φαίνεται η θερμοκρασιακή εξάρτηση της αντιστάσεως ενός κοινού NTC thermistor και ενός thermistor από VO_2 . Είναι προφανές, ότι για μέτρηση ή έλεγχο θερμοκρασιών μεταξύ των 50°C και 80°C το δεύτερο είναι ασύγκριτα ακριβέστερο.

Συνάγεται λοιπόν, από όσα αναφέρθηκαν, ότι ο όρος thermistor περιλαμβάνει πολλές διατάξεις με διαφορετική αρχή λειτουργίας, αλλά κοινό χαρακτηριστικό την εξάρτηση της αντιστάσεώς τους από τη θερμοκρασία και τη μη μεταλλικότητά τους.

Χρήσεις

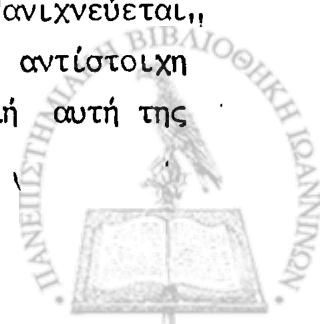
Τα thermistors χρησιμοποιούνται κυρίως σε θερμοκρασίες μεταξύ των 200°K και 600°K , διότι σε κατώτερες δεν λειτουργούν ικανοποιητικά και σε ανώτερες καταστρέφονται, αν και ωρισμένοι ειδικοί τύποι μπορούν και εργάζονται αρκε-

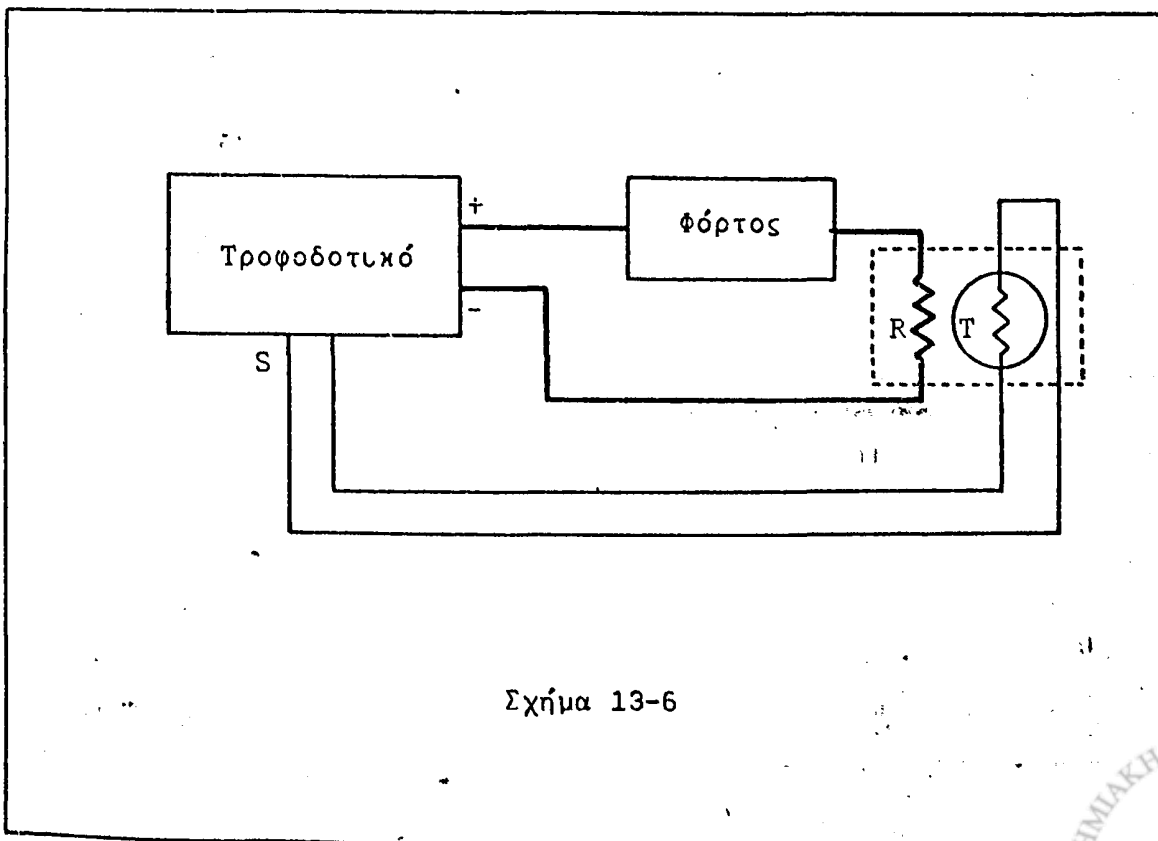
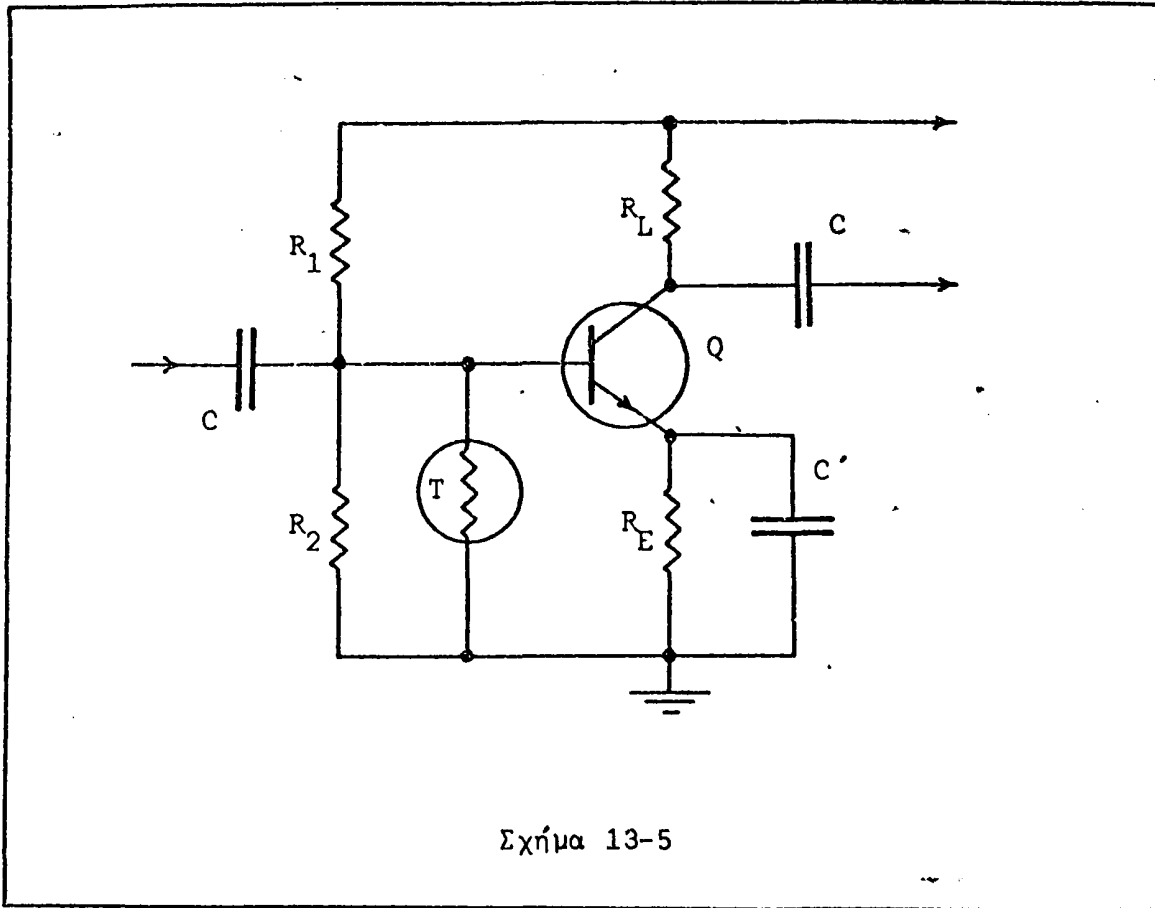


τά έξω από τα παραπάνω όρια. Στα πλεονεκτήματα τους συγκαταλέγονται η μεγάλη μηχανική αντοχή τους, η μεγάλη ονομαστική τιμή αντιστάσεώς τους - χαρακτηριστικό ιδιαίτερα χρήσιμο σε ηλεκτρονικά κυκλώματα -, η απλότητα δομής, η μακροζωία και αξιοπιστία λειτουργίας καθώς και η σημαντική ευαισθησία τους. Αντίστοιχα τα σημαντικότερα μειονεκτήματά τους είναι το μικρό εύρος θερμοκρασιών χρήσης - ειδικότερα η αδυναμία λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες -, η μεγάλη θερμική αδράνεια, που τα καθιστά ανίκανα να παρακολουθήσουν θερμομεταβολές συχνότητας μεγαλύτερης από 1Hz, και η ολίσθηση σημείου λειτουργίας, που συχνά υφίστανται λόγω αυτοθερμάνσεώς τους από το ρεύμα, που τα διαρρέει.

Συνήθως χρησιμοποιούνται για να παρεμποδίσουν την αύξηση του ρεύματος, που προκαλείται στις διατάξεις Στερεού Σώματος -κυρίως κρυσταλλοτριόδους -, όταν αυξηθεί η θερμοκρασία του περιβάλλοντος λειτουργίας τους. Ένα κύκλωμα τέτοιας χρησιμοποίησης φαίνεται στο σχήμα 13-5. Το thermistor συνδέεται μεταξύ βάσης και γης (κύκλωμα κοινού εκπομπού) και η αντίστασή του R_T συμμετέχει μαζί με τις αντιστάσεις R_1 και R_2 στον καθορισμό της πόλωσης βάσης, άρα και του ρεύματος συλλέκτη, που διαρρέει το φόρτο R_L . Αν η θερμοκρασία αυξηθεί, θα πρέπει κατά τα γνωστά (ασκ. 6-7) να αυξηθεί το ρεύμα συλλέκτη. Ταυτόχρονα όμως θα ελαττωθεί η αντίσταση του thermistor με συνέπεια να ελαττωθούν η πόλωση και το ρεύμα βάσης. Με κατάλληλη επιλογή των αντιστάσεων R_1 και R_2 και της αντιστάσεως και θερμοκρασιακής ευαισθησίας του thermistor επιτυγχάνεται η ελάττωση αυτή του ρεύματος βάσης να αντισταθμίζει την αύξηση λόγω θερμοκρασίας στο ρεύμα συλλέκτη. Η μέθοδος χρησιμοποιείται συχνά σε ενισχυτές τάξης AB για να περιοριστεί ή και να εξαλειφθεί η σημασία της θετικής θερμικής ανατροφοδότησεως (positive thermal feedback).

Εκτός όμως από τις εφαρμογές στις οποίες τα thermistors δέχονται και ανταποκρίνονται στις θερμικές διακυμάνσεις και επιδράσεις του περιβάλλοντος, υπάρχουν και εφαρμογές, στις οποίες θερμαίνονται σκόπιμα με τη βοήθεια κάποιου ωμικού συνήθως καταναλωτή, οπότε κάθε μεταβολή της ισχύος, που αποδίδεται στον καταναλωτή αυτόν, έχει σαν αποτέλεσμα τη μεταβολή της θερμοκρασίας, άρα και της αντιστάσεως του thermistor. Έστω π.χ. η διάταξη, που απεικονίζεται δομικά (block-diagram) στο σχήμα 13-6. Ένα τροφοδοτικό σταθερού ρεύματος παρέχει ισχύ σε ένα φόρτο, που ενδιαφέρει. Ταυτόχρονα το ρεύμα του θερμαίνει μια αντίσταση R , η θερμοκρασία της οποίας "ανιχνεύεται", από ένα thermistor. Οποιαδήποτε μεταβολή του ρεύματος προκαλεί αντίστοιχη μεταβολή στη θερμοκρασία και αντίσταση του thermistor. Η μεταβολή αυτή της





αντιστάσεως διεγείρει κατάλληλα το τροφοδοτικό και διορθώνει την παροχή ρεύματος στην αρχική τιμή. Είναι ευνόητο, ότι σε τέτοιου είδους χρήσεις πρέπει να ελαχιστοποιείται η θερμική επίδραση του περιβάλλοντος (καλή θερμική μόνωση - υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας του thermistor). Παλιότερα για τη σταθεροποίηση του ρεύματος των κυκλωμάτων έναντι θερμοκρασιακών μεταβολών χρησιμοποιούσαν ειδικές ηλεκτρονικές λυχνίες σιδηρουδρογόνου, που ονομάζονται λυχνίες αντισταθμίσεως (ballast tubes) και είχαν αρνητικό θερμικό συντελεστή αντιστάσεως.

Απαραίτητες γνώσεις

Δ. Μ. Μηλιώτη: Η Φυσική των Κρυσταλλολυχνιών, σελ. 232

Χρησιμοποιούμενα όργανα

1. Τροφοδοτικό υψηλής τάσης
2. Τροφοδοτικό χαμηλής τάσης
3. Ηλεκτρονικό βολτόμετρο
4. Πολύμετρο
5. Thermistor
6. Κρυστάλλοτρίοδοι pnp (1) npn (1)
7. Διακόπτης
8. Ηλεκτρομαγνητικός διακόπτης (relais)
9. Αντιστάσεις: $47\Omega-0.5W$, $470\Omega-0.5W$, $1k\Omega-0.5W$ (3), $270\Omega-2W$, $100\Omega - 1W$
10. Ποτενομόμετρο: $1k\Omega-2W$

Πειραματικό μέρος

1. Πραγματοποιείτε το κύκλωμα του σχήματος 13-7. Συνδέστε επίσης την πηγή των 12.6Vac του τροφοδοτικού υψηλής τάσης στα άκρα της αντιστάσεως των $100\Omega-1W$. Η αντίσταση υπερθερμαίνεται· μην την αγγίζετε.

2. Τροφοδοτείτε το κύκλωμα με τάση 3V, κλείστε το διακόπτη και μετρήστε την πτώση τάσης κατά μήκος της αντιστάσεως R.



$$V_1 = \quad V$$

3. Πλησιάστε την αντίσταση των $100\Omega-1W$ (θερμαντήρας) στο thermistor και μετρείστε τη νέα πτώση τάσης κατά μήκος της R. Προσέξτε να μη βραχυκυκλώσουν οι ακροδέκτες της πηγής των $12.6V_{ac}$ με το κύκλωμα του thermistor. Τι συμβαίνει στο ρεύμα του κυκλώματος και τι στην αντίσταση του thermistor; Αποσυνδέστε το κύκλωμα και διακόψτε την τροφοδοσία του θερμαντήρα.

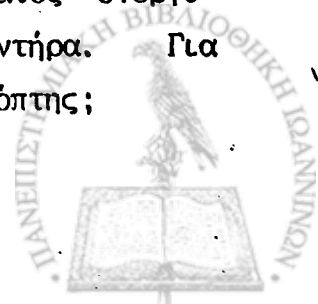
$$V_2 = \quad V$$

4. Αφού κρυώσει το thermistor μετρείστε την αντίστασή του με το ηλεκτρονικό βολτόμετρο. Συνδεσμολογείστε κατόπιν το κύκλωμα του σχήματος 13-8 και ρυθμίστε την τάση τροφοδοσίας στα $20V$. Κλείστε το διακόπτη για δύο περίπου λεπτά ($2min$) και παρατηρείστε τις πτώσεις τάσης κατά μήκος του thermistor και της αντιστάσεως. Τι συμβαίνει; Ανοίξτε το διακόπτη και μετρείστε την αντίσταση του θερμού thermistor.

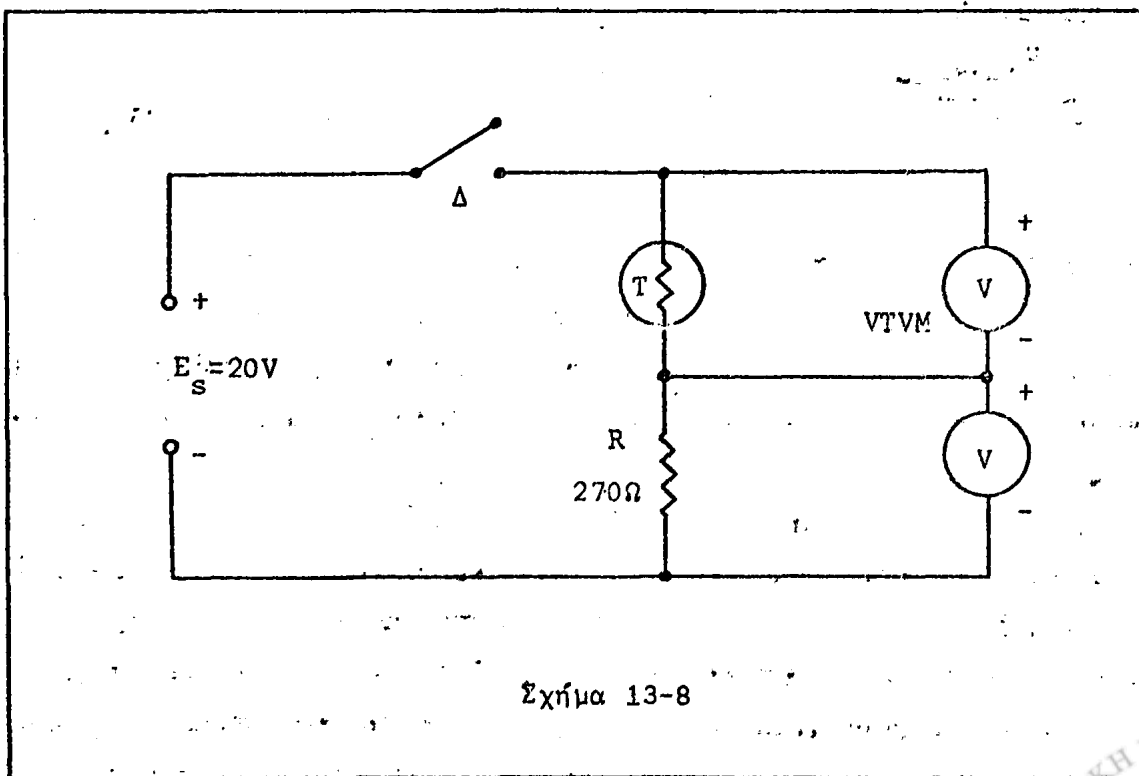
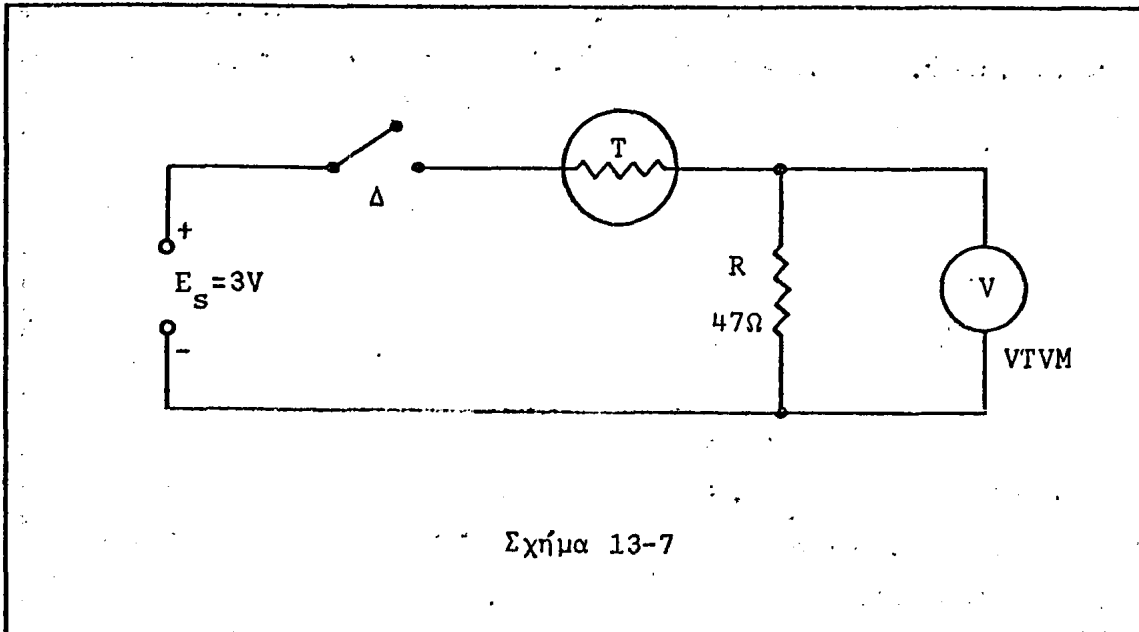
$R_{th-\psi} =$	Ω	$R_{th-\theta} =$	Ω
$V_{th-αρχ} =$	V	$V_{th-τελ} =$	V
$V_{R-αρχ} =$	V	$V_{R-τελ} =$	V

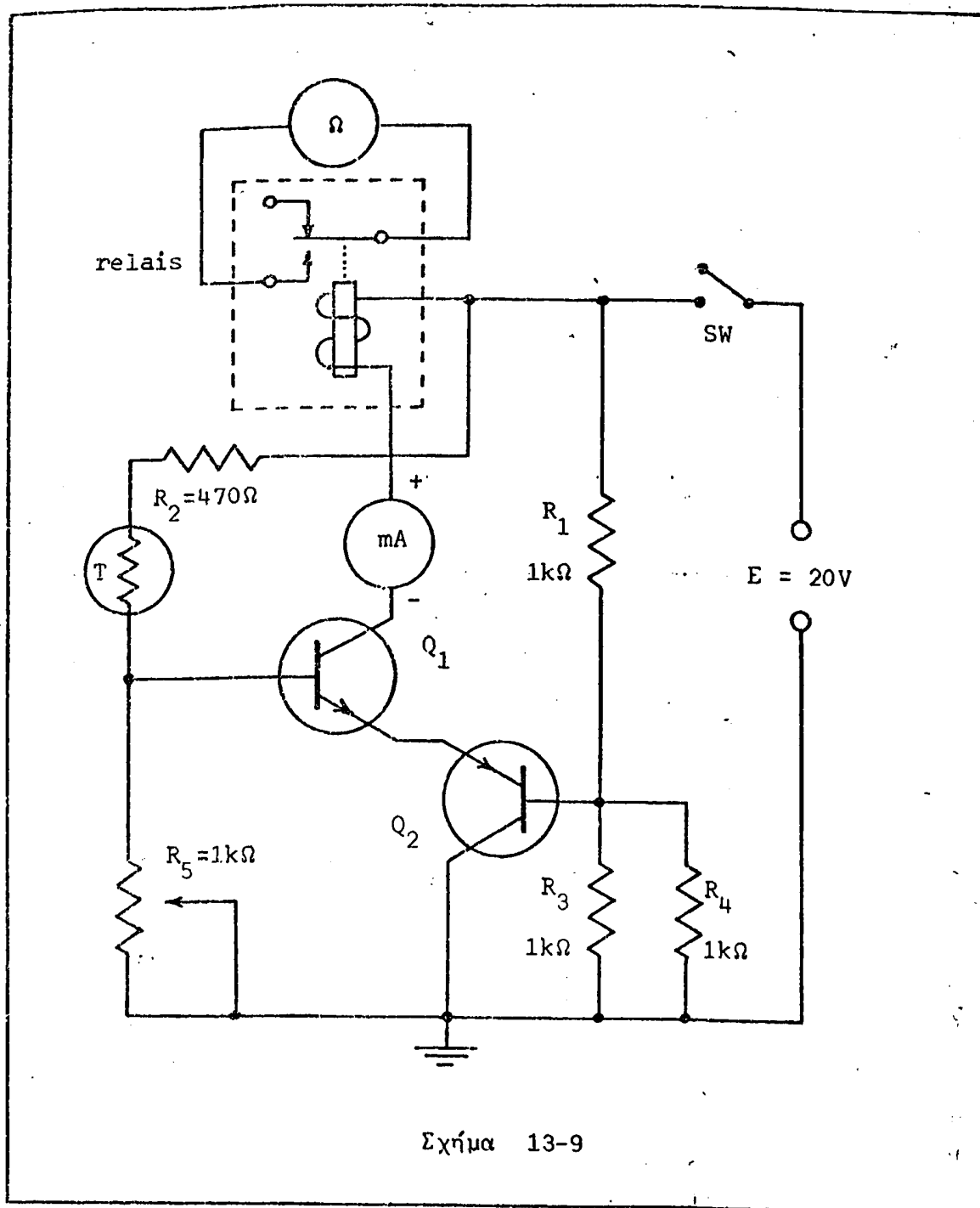
5. Συνδεσμολογείστε πάλι το θερμαντήρα (αντίσταση των $100\Omega-1W$ στην πηγή $12.6V_{ac}$). Πραγματοποιείστε το κύκλωμα του σχήματος 13-9. Το ωμόμετρο (ηλεκτρονικό βολτόμετρο στην κλίμακα $R \times 10$) συνδεσμολογείται μεταξύ των ακροδεκτών του ηλεκτρομαγνητικού διακόπτη, που κανονικά (χωρίς τροφοδοσία) παραμένουν ανοιχτοί.

6. Ρυθμίστε την τάση του τροφοδοτικού στα $20V$ και κλείστε το διακόπτη. Ρυθμίστε το ροοστάτη, έτσι ώστε το μιλλιαμπερόμετρο να δείχνει ρεύμα λίγο μικρότερο από $1mA$. Πλησιάστε το θερμαντήρα στο thermistor και παρατηρείστε το ρεύμα συλλέκτη της κρυσταλλοτριόδου Q_1 . Για ποιά τιμή ρεύματος ενεργοποιείται ο ηλεκτρομαγνητικός διακόπτης; Απομακρύντε τον θερμαντήρα. Για ποιά τιμή ρεύματος αποενεργοποιείται ο ηλεκτρομαγνητικός διακόπτης;



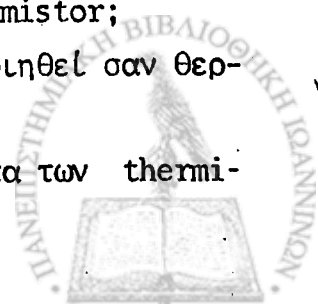
$I_{act} =$	mA	$I_{deact} =$	mA
-------------	----	---------------	----





Ερωτήσεις

1. Το thermistor, που μελετήσατε, είναι NTC ή PTC thermistor;
2. Πώς μπορεί το κύκλωμα του σχήματος 13-7 να χρησιμοποιηθεί σαν θερμομόμετρο;
3. Ποιά είναι τα πλεονεκτήματα και ποιά τα μειονεκτήματα των thermi-



stors σχετικά με άλλες θερμοηλεκτρικές διατάξεις (π.χ. θερμοζεύγη);

4. Εξηγήστε, πώς δρα το thermistor στο κύκλωμα του σχήματος 13-9.
5. Γιατί χρησιμοποιούνται οξειδία μετάλλων και όχι κοινά ημιαγωγά στοιχεία για την κατασκευή των thermistors;



ΑΣΚΗΣΗ 14ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣΕισαγωγή

Με τον όρο φωτοηλεκτρικές διατάξεις χαρακτηρίζονται όλες οι διατάξεις, που εμφανίζουν μεταβολές σε κάποιο από τα ηλεκτρικά μεγέθη περιγραφής τους, όταν μεταβάλλεται ο φωτισμός τους. Χρησιμοποιούνται σήμερα ευρύτατα τόσο στην καθημερινή ζωή (συστήματα συναγερμού, αυτόματες θύρες κ.λ.π.) όσο και στη Βιομηχανία (συστήματα ασφάλειας βαρέων μηχανημάτων, αυτόματοι καταμετρητές κλπ) και στις εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας (όργανα μετρήσεως φωτεινής ροής, ενεργειακή τροφοδοσία δορυφόρων κλπ).

Ταξινομούνται σε τρεις γενικές κατηγορίες:

α) Φωτολυχνίες: Είναι ειδικές ηλεκτρονικές λυχνίες, που εμφανίζουν αγωγιμότητα μόνον, όταν η κάθοδός τους φωτίζεται κατάλληλα.

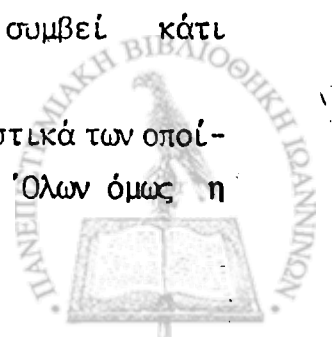
β) Φωτοστοιχεία (ή φωτοαντιστάσεις): Είναι διατάξεις Στερεού Σώματος, των οποίων η αντίσταση μεταβάλλεται, όταν μεταβάλλεται ο φωτισμός τους.

γ) Φωτοβολταϊκά στοιχεία: Είναι διατάξεις Στερεού Σώματος, οι οποίες αναπτύσσουν διαφορά δυναμικού (ηλεκτρεγερτική δύναμη) στα άκρα τους, όταν εκτίθενται σε φως.

Φωτολυχνίες

Είναι οι παλιότερες φωτοηλεκτρικές διατάξεις. Ακόμη και σήμερα όμως οι εξελιγμένες μορφές τους (φωτοπολλαπλασιαστές) χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας και στην έρευνα. Ο βασικότερος λόγος γι' αυτό είναι η μεγάλη ευαισθησία στην ανίχνευση φωτός και η σταθερότητα έναντι θερμοκρασιακών μεταβολών, χαρακτηριστικά, που δεν πέτυχαν μέχρι σήμερα να υποκαταστήσουν οι διατάξεις Στερεού Σώματος. Δεν προβλέπεται δε να συμβεί κάτι τέτοιο στα άμεσα επόμενα χρόνια.

Σήμερα υπάρχουν διάφοροι τύποι φωτολυχνιών, τα χαρακτηριστικά των οποίων ποικίλουν ανάλογα με τη χρήση, για την οποία προορίζονται. Όλων όμως η



Λειτουργία βασίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Το φαινόμενο αυτό είναι αρκετά γνωστό και έτσι εδώ υπενθυμίζονται μόνον η βασική του αρχή και οι νόμοι, που το διέπουν από πειραματική κυρίως άποψη.

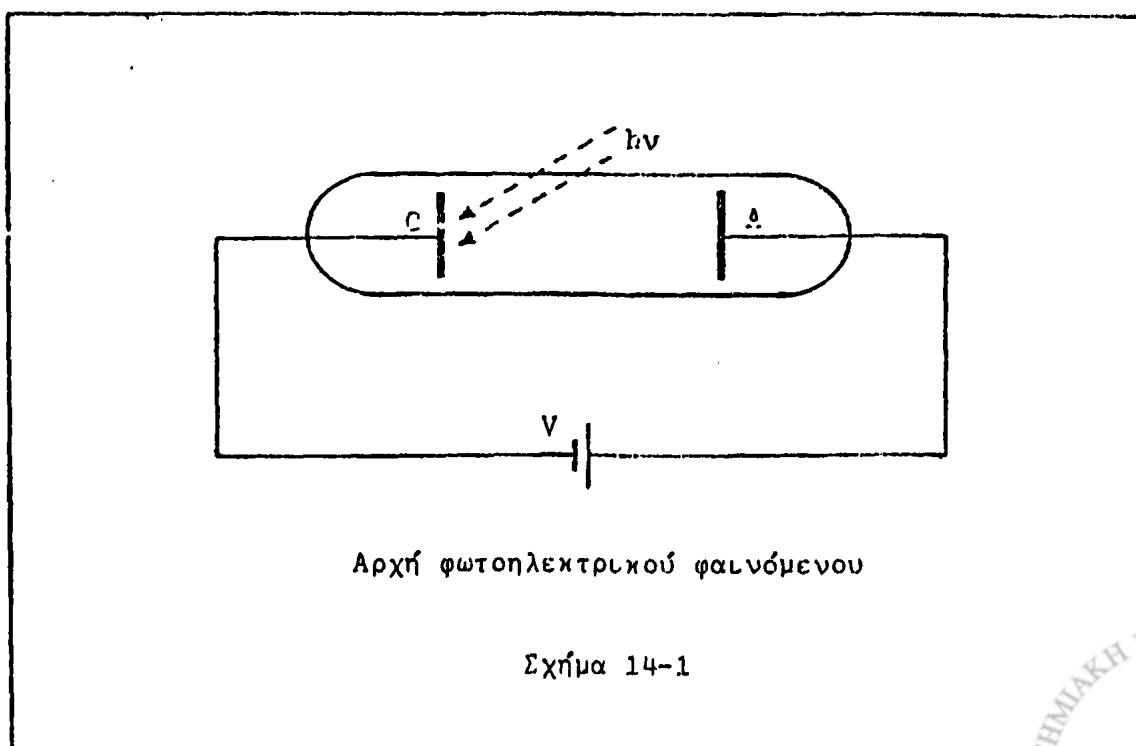
Στο σχήμα 14-1 φαίνεται η βασική αρχή του φαινομένου. Σε έναν αερόκενο σωλήνα υπάρχουν δύο ηλεκτρόδια, που συνδέονται με τους πόλους μιας ηλεκτρικής πηγής συνεχούς τάσης. Η διάταξη κανονικά δεν διαρρέεται από ρεύμα. Αν όμως η κάθοδος φωτιστεί με φως κατάλληλης φασματικής κατανομής, εκπέμπει ηλεκτρόνια, τα οποία, λόγω του ηλεκτρικού πεδίου που επικρατεί, κινούνται προς την άνοδο και η διάταξη -και το κύκλωμα- διαρρέεται από ρεύμα. Οι κύριες ιδιότητες (νόμοι) του φαινομένου είναι:

1. Από την κάθοδο αρχίζουν να εκπέμπονται ηλεκτρόνια (φωτοηλεκτρόνια) μόνον εφόσον η συχνότητα του φωτός, που προσπίπτει, είναι μεγαλύτερη μιας ωρισμένης τιμής (ορική συχνότητα).

2. Τα φωτοηλεκτρόνια εκπέμπονται με διάφορες αρχικές ταχύτητες, που αρχίζουν από τη μηδενική και φθάνουν μέχρι μια μέγιστη v_{max} . Η μέγιστη αυτή ταχύτητα είναι ανεξάρτητη από τη φωτεινή ροή, που προσπίπτει στην κάθοδο, και εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα αυξάνοντας με αυτήν.

3. Ο αριθμός των εκπεμπόμενων ανά μονάδα χρόνου φωτοηλεκτρονίων είναι ανάλογος προς τη φωτεινή ροή, που προσπίπτει στην κάθοδο.

Η ερμηνεία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου και των νόμων του δόθηκε, όπως είναι επίσης γνωστό, από τον Einstein, που για την εργασία του αυτή



πήρε το Nobel Φυσικής του 1921. Για την ερμηνεία αυτή ο Einstein βασίστηκε στην υπόθεση του Planck για την ύπαρξη κβάντων (quanta) ενεργείας. δέχτηκε δηλαδή, ότι μια δέσμη φωτός αποτελεί ουσιαστικά μια ροή σωματίων - των φωτονίων -, που το καθένα τους έχει ενέργεια $E=hn$, όπου h η σταθερά δράσης του Planck και ν η συχνότητα του φωτός της δέσμης. Τα φωτόνια αυτά, όταν προσπίπτουν στην επιφάνεια της καθόδου απορροφώνται κατά ένα μεγάλο ποσοστό και αποδίδουν την ενέργειά τους στο υλικό της. Ο Einstein δέχτηκε, ότι η ενέργεια καθενός από τα απορροφώμενα φωτόνια αποδίδεται ολόκληρη σε ένα μόνον ηλεκτρόνιο του υλικού, το οποίο αποκτά έτσι αρκετή ενέργεια, ώστε να υπερνικήσει το φραγμό δυναμικού της επιφάνειας της καθόδου και να εξέλθει από αυτήν. Διατύπωσε δε την περίφημη πια φωτοηλεκτρική εξίσωση (ορθότερα ανισοσύτητα):

$$\frac{1}{2} m v^2 \leq h\nu - E_b$$

όπου m και v είναι αντίστοιχα η μάζα και ταχύτητα του φωτοηλεκτρονίου και E_b το έργο εξαγωγής.

Είναι λογικά προφανές -συνάγεται άλλωστε και από την παραπάνω σχέση-, ότι, για να αποσπασθούν φωτοηλεκτρόνια από την κάθοδο, θα πρέπει η ενέργεια του φωτονίου να είναι τουλάχιστον ίση προς το έργο εξαγωγής $h\nu=E_b$. Προκύπτει έτσι η ύπαρξη μιας οριστικής συχνότητας ή ισοδύναμα ενός οριστικού μήκους κύματος πέρα από το οποίο (για μεγαλύτερα μήκη κύματος) δεν συμβαίνει φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, όπως ορίζει και ο πρώτος νόμος. Το οριστικό αυτό μήκος κύματος υπολογίζεται ίσο προς:

$$h\nu = E_b \rightsquigarrow \nu = \frac{E_b}{h} \rightsquigarrow \frac{c}{\lambda} = \frac{E_b}{h} \rightsquigarrow \lambda = \frac{c \cdot h}{E_b}$$

ή $\lambda = \frac{1240}{E_b}$

εφ'όσον το μήκος κύματος εκφράζεται σε nm και το έργο εξαγωγής σε eV. Από την τελευταία σχέση συνάγεται, ότι, για να είναι ευαίσθητη η κάθοδος (φωτοκάθοδος) στο ορατό φως ($380 \text{ nm} < \lambda < 760 \text{ nm}$), πρέπει το έργο εξαγωγής του υλικού της να είναι μικρότερο από 1.6eV. Τόσο μικρό όμως έργο εξαγωγής μόνον τα αλκάλια και μερικές ιδιότυπες ενώσεις τους έχουν.

Συνάγεται ακόμη από τη φωτοηλεκτρική σχέση, ότι για δεδομένη συχνότη-



τα της ακτινοβολίας διεγέρσεως οι ταχύτητες εξόδου των φωτοηλεκτρονίων είναι μικρότερες ή ίσες μιας μέγιστης ταχύτητας, που αντιστοιχεί στο $\nu = \nu_0$ της ανισοσύτητας. Όσο αυξάνει η συχνότητα της ακτινοβολίας διεγέρσεως αυξάνει και η μέγιστη ταχύτητα των φωτοηλεκτρονίων, όπως ορίζει ο δεύτερος νόμος. Από φυσική άποψη η ύπαρξη και μικρότερων ταχυτήτων φωτοηλεκτρονίων αιτιολογείται αφ' ενός από το ότι όλα τα ηλεκτρόνια στο υλικό της φωτοκαθόδου δεν βρίσκονται στην ίδια ενεργειακή στάθμη, με αποτέλεσμα όσο χαμηλότερη είναι η ενεργειακή στάθμη εκκινήσεως του ηλεκτρονίου, τόσο μικρότερη να είναι η ταχύτητα εξόδου του (κινητική του ενέργεια), αφ' ετέρου από το ότι κατά την πορεία του ηλεκτρονίου από το σημείο αλληλεπιδράσεως με το φωτόνιο μέχρι την επιφάνεια συμβαίνουν και άλλες αλληλεπιδράσεις με τα υπόλοιπα ηλεκτρόνια και άτομα του υλικού, που έχουν σαν αποτέλεσμα τη μερική απώλεια ενέργειας του, άρα και έξοδό του με μειωμένη ταχύτητα.

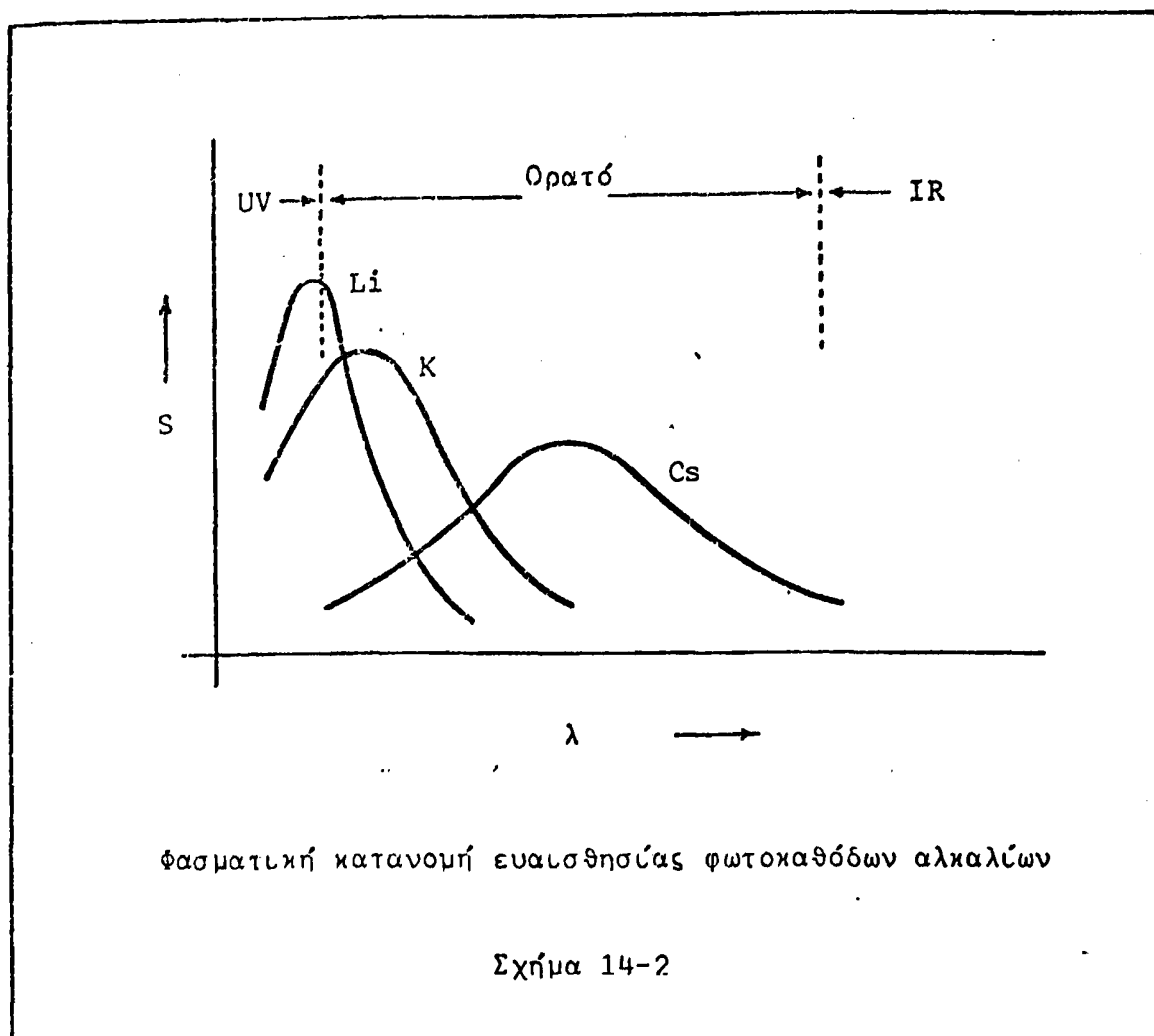
Τέλος όταν αυξάνει η φωτεινή ροή, που προσπίπτει στη φωτοκάθοδο, αυξάνει ο αριθμός των φωτονίων, που προσπίπτουν σ' αυτήν, χωρίς όμως να αυξάνει η ενέργεια του καθενός. Αυξάνει έτσι ο αριθμός των εξερχόμενων φωτοηλεκτρονίων - άρα και το ρεύμα της διατάξεως -, χωρίς να επηρεάζεται η κατανομή των ταχυτήτων τους, όπως ορίζει ο τρίτος νόμος.

Σημαντικά ακόμη χαρακτηριστικά του φωτοηλεκτρικού φαινομένου είναι τα εξής:

1) Είναι πρακτικά ανεξάρτητο από τη θερμοκρασία για πολύ μεγάλη περιοχή θερμοκρασιών. Αυτό οφείλεται στο ότι η μεταβολή της ενέργειας των ηλεκτρονίων λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών είναι ασήμαντη ($kT \approx 0.03\text{eV}$) συγκριτικά με το έργο εξαγωγής ($E_p \approx 1.5\text{eV}$) και την ενέργεια των φωτονίων διεγέρσεως ($h\nu \approx 2\text{eV}$).

2. Κάθε είδος υλικού φωτοκαθόδου παρουσιάζει μια συγκεκριμένη φασματική κατανομή της ευαισθησίας. Ευαισθησία ονομάζεται ο λόγος του αριθμού των εκπεμπομένων από τη φωτοκάθοδο φωτοηλεκτρονίων ανά μονάδα χρόνου, προς τη φωτεινή ροή, που προσπίπτει σ' αυτήν. Η ευαισθησία αυτή μεγιστοποιείται για κάποιο ορισμένο μήκος κύματος, ενώ εκατέρωθεν αυτού ελαττώνεται, όπως δείχνουν οι γραφικές παραστάσεις του σχήματος 14-2 για φωτοκαθόδους αλκαλίων. Για το γεγονός αυτό η πλήρης ποσοτική ερμηνεία ξεφεύγει από τα όρια αυτής της αναφοράς. Ποιοτικά λοιπόν σχολιάζοντάς το παρατηρούμε ότι: Υπάρχει κατ' αρχήν ένα μέγιστο μήκος κύματος, πάνω από το οποίο είναι αδύνατη η εκπομπή φωτοηλεκτρονίων, όπως αναφέρθηκε στα παραπάνω. Κάτω από το όριο αυτό όσο ελαττώνεται το μήκος κύματος αυξάνει η ευαισθησία, επειδή τα φωτόνια έχουν

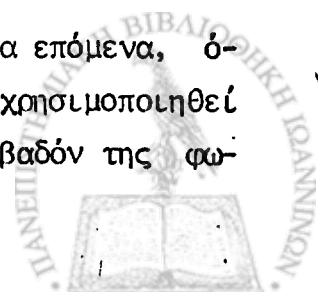




μεγαλύτερη ενέργεια και μπορούν να διεγείρουν και ηλεκτρόνια, που βρίσκονται σε χαμηλότερες ενεργειακές στάθμες. Ταυτόχρονα όμως για σταθερή φωτεινή ροή (ισχύ φωτεινής δέσμης) ελαττώνεται ο αριθμός των φωτονίων, που ανά μονάδα χρόνου προσπίπτουν στη φωτοκάθοδο, εφ' όσον αυξάνει η ενέργεια καθενός. Ελαττώνεται έτσι και ο αριθμός των ανά μονάδα χρόνου εκπεμπομένων φωτοηλεκτρονίων και κατά συνέπεια η ευαισθησία. Το δεύτερο φαινόμενο είναι αντίρροπο προς το πρώτο και σε ένα ωρισμένο μήκος κύματος (μήκος κύματος μεγίστου) το αντισταθμίζει και εν συνεχεία το υπερνικά. Προκύπτει έτσι η καμπύλη ευαισθησίας του σχήματος 14-2.

3. Η χρονική απόσπαση μεταξύ της ενάρξεως φωτισμού και της ενάρξεως εκπομπής φωτοηλεκτρονίων (ταχύτητα αποκρίσεως) είναι εξαιρετικά μικρή, περίπου 3 nsec.

Σημειώνουμε εδώ, ότι σε όλα τα προηγούμενα, όπως και στα επόμενα, όπου χρησιμοποιείται ο όρος "φωτεινή ροή", μπορεί ισοδύναμα να χρησιμοποιηθεί ο όρος "ένταση φωτός", ή "φωτισμός", εφ' όσον το φωτιζόμενο εμβαδόν της φω-



τοκαθόδου θεωρείται σταθερό.

Όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα υπάρχουν πάρα πολλά είδη φωτολυχνιών. Τις φωτολυχνίες αυτές μπορούμε να διακρίνουμε σε τρεις γενικές κατηγορίες: τις φωτολυχνίες κενού, τις φωτολυχνίες αερίου και τους φωτοπολλαπλασιαστές. Στη συνέχεια δίνονται τα κύρια χαρακτηριστικά κάθε μιας κατηγορίας.

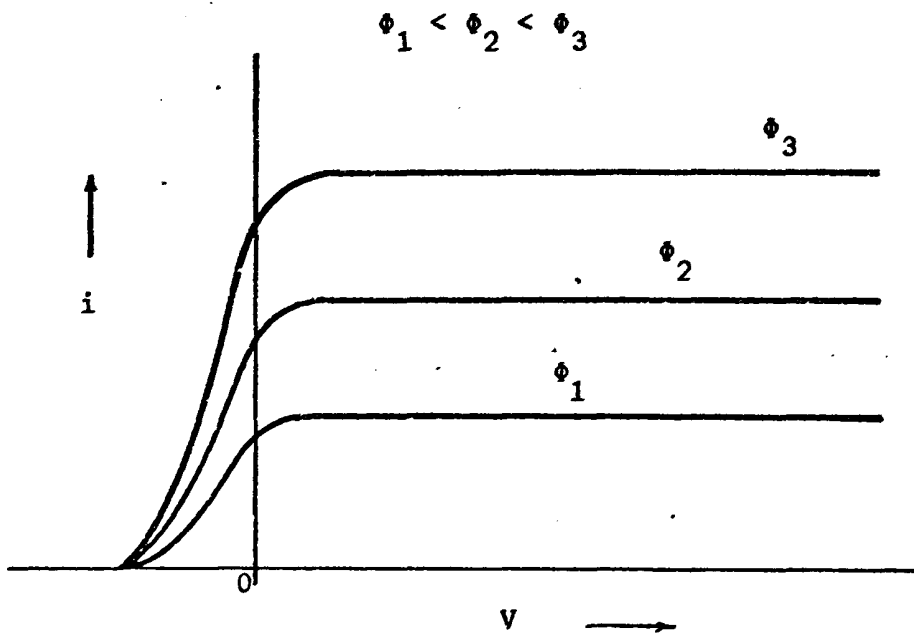
Φωτολυχνίες κενού: Είναι η απλούστερη κατηγορία φωτολυχνιών. Δομικά μοιάζουν πολύ με την κοινή δίοδο ηλεκτρονική λυχνία. Αποτελούνται από αερό κενο γυάλινο σωλήνα, κατά τον άξονα του οποίου εκτείνεται ένα συρματόμορφο ηλεκτρόδιο, που αποτελεί την άνοδο. Η κάθοδος είναι ημικυλινδρική με μεγάλη κατά το δυνατόν επιφάνεια και περιβάλλει κατά το ήμισυ την άνοδο. Αποτελείται από φύλλο χαλκού ή αργύρου και βέβαια δεν θερμαίνεται ούτε άμεσα ούτε έμμεσα. Επικαλύπτεται σχεδόν πάντα από υλικά με χαμηλό έργο εξαγωγής, ώστε να είναι δυνατή η εκπομπή ηλεκτρονίων και με ακτινοβολίες μεγάλου σχετικώς μήκους κύματος. Σήμερα εκτός από τα αλκάλια σαν τέτοια υλικά χρησιμοποιούνται διάφορες ιδιότυπες ενώσεις τους, που είναι σταθερές μόνον απουσία οξυγόνου. Ανάλογα με τη σύστασή της κάθε τέτοια ουσία-φωτοκάθοδος παρουσιάζει διαφορετική τιμή και φασματική κατανομή ευαισθησίας. Σχετικά μάλιστα με την τελευταία είναι δυνατόν, εφόσον πρόκειται για ενώσεις, να εμφανίζονται περισσότερα από ένα μέγιστα.

Οι πιο συνηθισμένες φωτοκάθοδοι είναι: α) Φωτοκάθοδος αργύρου-οξειδίου του καισίου-καισίου (S-1, ευαίσθητη σε ολόκληρο το ορατό με μέγιστο ευαισθησίας στο εγγύς υπερέρυθρο). β) Φωτοκάθοδος αργύρου-οξειδίου του ρουβιδίου-ρουβιδίου (S-3, ευαίσθητη επίσης σε ολόκληρο το ορατό φάσμα με μέγιστο στο εγγύς υπεριώδες) γ) Φωτοκάθοδοι αντιμονιούχου καισίου (S-4, S-20 κλπ, ευαίσθητες κυρίως στο ορατό και υπεριώδες). Οι φωτοκάθοδοι αυτές παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ευαισθησία από κάθε άλλο τύπο για φως φασματικής κατανομής ανάλογης προς το φως ημέρας.

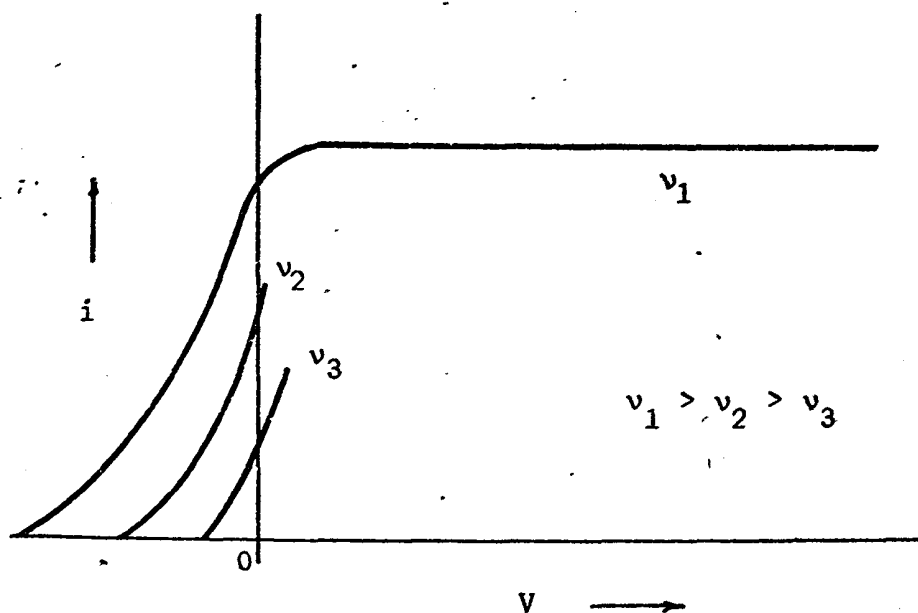
Η παρασκευή των φωτοκαθόδων είναι μια εξαιρετικά πολύπλοκη, δυσχερής και λεπτή εργασία, εξ αιτίας δε του γεγονότος αυτού τα χαρακτηριστικά των φωτολυχνιών παρουσιάζουν κακή επαναληπτικότητα και πρέπει να ελέγχονται για κάθε συγκεκριμένη λυχνία. Διαφορές ευαισθησίας παρουσιάζονται επίσης συχνότατα και από σημείο σε σημείο της φωτοκαθόδου. Είναι για το λόγο αυτό σκόπιμο να φωτίζεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος της καθόδου κάθε φορά.

Στο σχήμα 14-3.α δίνεται το σμήνος των χαρακτηριστικών ανόδου μιας φωτολυχνίας κενού για διάφορες τιμές της φωτεινής ροής, που προσπίπτει στη κάθοδο. Παρατηρούμε ότι: α) Η περιοχή φορτίου χώρου είναι εξαιρετικά πε-





α) Σμήνος χαρακτηριστικών σταθερής συχνότητας



β) Σμήνος χαρακτηριστικών σταθερής φωτεινής ροής

Σχήμα 14-3



ριωρισμένη. β) Η μέγιστη ταχύτητα εκπομπής φωτοηλεκτρονίων (προσδιορίζεται από της σχέση: $\frac{1}{2}mv^2 = e \cdot V_T$, όπου V_T η ανάστροφη τάση για την οποία μηδενίζεται το ρεύμα της λυχνίας) είναι σταθερή και ανεξάρτητη από τη φωτεινή ροή. γ) Το ρεύμα κόρου είναι ανάλογο προς τη φωτεινή ροή. Αντίστοιχα στο σχήμα 14-3.β δίνεται το σμήνος χαρακτηριστικών ανόδου για σταθερή φωτεινή ροή στην κάθοδο και διαφορετικό μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτός. Φαίνεται καθαρά, ότι τώρα η μέγιστη ταχύτητα εκπομπής των φωτοηλεκτρονίων είναι διαφορετική για κάθε καμπύλη.

Οι φωτολυχνίες κενού εργάζονται σχεδόν πάντα στην περιοχή κόρου και χρησιμοποιούνται -όπου χρησιμοποιούνται ακόμη- για τη μέτρηση φωτεινών ροών, που δεν είναι ιδιαίτερα χαμηλές.

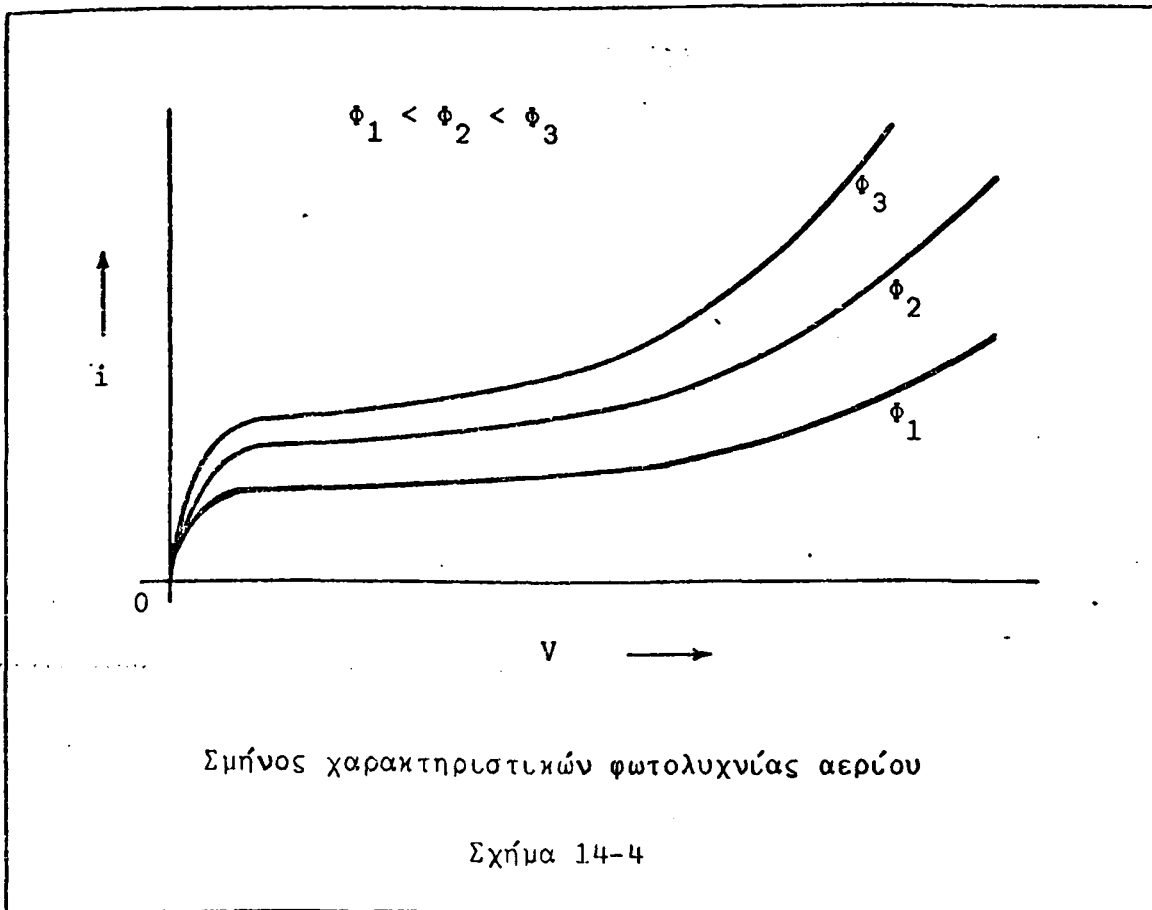
Φωτολυχνίες αερίου: Δομικά είναι τελείως ανάλογες προς τις φωτολυχνίες κενού. Αντί όμως για κενό το εσωτερικό τους περιέχει αδρανές αέριο -συνήθως νέον ή αργόν- με ελαττωμένη πίεση (περίπου 0.5 Torr). Οι φωτολυχνίες αερίου διαρρέονται από μεγαλύτερα ρεύματα από ότι οι φωτολυχνίες κενού για ίση προσπίπτουσα φωτεινή ροή, επειδή στο ρεύμα των φωτοηλεκτρονίων προστίθεται και το ρεύμα ιονισμού λόγω της εκκένωσης Townsend, που συμβαίνει εφόσον στο χώρο κινήσεως των ηλεκτρονίων υπάρχει αέριο με χαμηλή πίεση, και το οποίο ρεύμα ιονισμού αυξάνει διαρκώς, όσο αυξάνει η ανοδική τάση. Έτσι στο σμήνος χαρακτηριστικών ανόδου των λυχνιών αυτών δεν εμφανίζεται περιοχή κόρου, αλλά το ρεύμα αυξάνει συνεχώς (σχήμα 14-4). Είναι σημαντικό δε οι τάσεις ανόδου-καθόδου να διατηρούνται σε τέτοια επίπεδα, ώστε η εκκένωση Townsend να μη μεταπέσει ποτέ σε εκκένωση αίγλης, διότι τότε συμβαίνει ραγδαία αύξηση του ρεύματος και η φωτοκάθοδος καταστρέφεται λόγω του ισχυρού βομβαρδισμού της από θετικά ιόντα.

Οι φωτολυχνίες αερίου πλεονεκτούν έναντι των φωτολυχνιών κενού, επειδή για την ίδια φωτεινή ροή παρέχουν πολύ σημαντικότερα ρεύματα, με αποτελέσματα να μη χρειάζονται ενισχυτικές διατάξεις στα κυκλώματα χρησιμοποιήσεώς τους. Μελονεκτούν κατά το ότι δεν παρουσιάζουν αναλογία μεταξύ ρεύματος και φωτεινής ροής, ιδιαίτερα σε υψηλές ανοδικές τάσεις. Επίσης αποκρίνονται πολύ βραδύτερα στις μεταβολές φωτεινής ροής, με συνέπεια να μην μπορούν να παρακολουθήσουν μεταβολές συχνότητας μεγαλύτερης από 100 kHz.

Όσον αφορά στη φασματική κατανομή της ευαισθησίας τους δεν διαφέρουν καθόλου από τις φωτολυχνίες κενού. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε διατάξεις αυτοματισμού, συναγερωμού και στον ομιλούντα κινηματογράφο.

Φωτοπολλαπλασιαστές: Είναι ειδικής κατασκευής φωτολυχνίες κενού, που

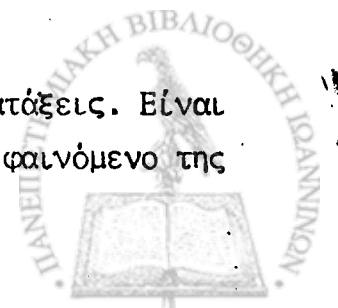




προορίζονται για τη μέτρηση ή φάραση πολύ ασθενών φωτεινών ροών με διάφορες φασματικές κατανομές ή για τη μέτρηση φωτεινών παλμών, που προκαλούνται από σωματία ή υπερενεργειακά φωτόνια σε ένα σπινθήριστή κρύσταλλο. Είναι ευνόητο ότι κυρίως χρησιμοποιούνται στην έρευνα και τις εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας. Η μελέτη της δομής και των ιδιοτήτων τους είναι έξω από τα όρια της αναφοράς αυτής. Γενικά αποτελούνται από μια φωτοκάθοδο, μια άνοδο και ένα σύνολο ηλεκτροδίων (δύνοδοι), που παρεμβάλλονται μεταξύ άνοδου και καθόδου και έχουν κατάλληλη υφή, προσανατολισμό και δυναμικά, ώστε να επιτυγχάνουν πολλαπλασιασμό των εκπεμπόμενων από τη φωτοκάθοδο φωτοηλεκτρονίων με βάση τη δευτερογενή εκπομπή. Επιτυγχάνονται έτσι ενισχύσεις του αρχικού φωτορρεύματος μέχρι 10^6 και βέβαια εξαιρετικές ευαισθησίες.

Φωτοστοιχεία

Τα φωτοστοιχεία είναι οι απλούστερες φωτοευαίσθητες διατάξεις. Είναι διατάξεις Στερεού Σώματος και η λειτουργία του βασίζεται στο φαινόμενο της

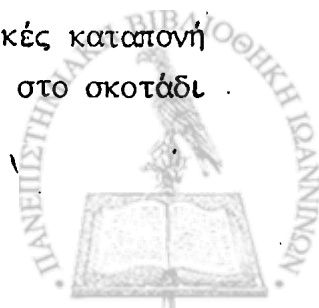


φωτοαγωγιμότητας.

Για να εμφανίζει ένα σώμα αγωγιμότητα, πρέπει στη μάζα του να υπάρχουν φορείς ηλεκτρικού ρεύματος -ηλεκτρόνια, οπές, ελεύθερα ιόντα. Στα υλικά, που χαρακτηρίζονται σαν ημιαγωγοί, οι φορείς είναι ηλεκτρόνια και οπές. Οι φορείς αυτοί προέρχονται -προκειμένου για ενδογενείς ημιαγωγούς- από τη θερμική διάσπαση των ομοιοπολικών δεσμών του κρυστάλλου. Κάθε τέτοια διάσπαση δημιουργεί ένα ζεύγος φορέων (οπή-ηλεκτρόνια). Οι φορείς αυτοί κινούνται σχεδόν ελεύθερα μέσα στον κρύσταλλο και μετά από ωρισμένο χρονικό διάστημα (χρόνος ζωής T_h οπής ή T_e ηλεκτρονίου) επανασυνδέονται -όχι αναγκαστικά μεταξύ τους- δημιουργώντας πάλι τον ομοιοπολικό δεσμό. Επέρχεται έτσι μια κατάσταση ισορροπίας, στην οποία όσοι φορείς δημιουργούνται στη μονάδα του χρόνου, τόσοι επανασυνδέονται και ο ολικός αριθμός φορέων στον κρύσταλλο διατηρείται σταθερός. Σε συνήθη θερμοκρασία ο ρυθμός διασπάσεως των ομοιοπολικών δεσμών είναι χαμηλός και ο ολικός αριθμός φορέων στον κρύσταλλο επίσης χαμηλός, γεγονός που εξηγεί και την υψηλή ειδική αντίσταση των ημιαγωγών σε συνήθη θερμοκρασία.

Αν τώρα ο κρύσταλλος του ημιαγωγού υλικού φωτιστεί με φως κατάλληλου μήκους κύματος, δέχεται ένα "βομβαρδισμό", φωτονίων, μέρος των οποίων απορροφάται και αν η ενέργειά τους $h\nu$ είναι αρκετά μεγάλη, μπορεί το κάθε φωτόνιο απορροφώμενο από ένα ηλεκτρόνιο να του προσδώσει αρκετή ενέργεια, ώστε να "σπάσει", τον ομοιοπολικό δεσμό του και να δημιουργηθεί έτσι ένα ζεύγος φορέων (ηλεκτρόνιο-οπή). Είναι προφανές ότι: α) Για να μπορέσει ένα φωτόνιο να προκαλέσει διάσπαση δεσμού, πρέπει η ενέργειά του να είναι τουλάχιστον ίση προς το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού, διότι ουσιαστικά πρέπει να ανυψώσει ένα ηλεκτρόνιο από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. β) Όσο μεγαλύτερη φωτεινή ροή προσπίπτει στον ημιαγωγό τόσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός διασπάσεων δεσμών -τουλάχιστον κατ' αρχήν, επειδή πάνω από μια ωρισμένη φωτεινή ροή αρχίζουν να εμφανίζονται φαινόμενα κόρου-. Αποτέλεσμα του αυξημένου αυτού ρυθμού διασπάσεων είναι η αυξημένη παρουσία φορέων στον κρύσταλλο, που έχει σα συνέπεια τη ραγδαία αύξηση της αγωγιμότητάς του. Η αύξηση αυτή της αγωγιμότητας ενός ημιαγωγού κρυστάλλου λόγω φωτισμού του με ακτινοβολία κατάλληλου μήκους κύματος αποτελεί το φαινόμενο της φωτοαγωγιμότητας.

Το φωτοστοιχείο λοιπόν δεν είναι τίποτε περισσότερο από ένα κομμάτι κατάλληλα διαμορφωμένου (μεγάλη επιφάνεια-μικρό πάχος) ημιαγωγού υλικού με δυο μεταλλικούς ακροδέκτες, που για να προστατεύεται από μηχανικές καταπονήσεις περικλείεται μέσα σε διαφανές υλικό. Η διάταξη παρουσιάζει στο σκοτάδι



μια ωρισμένη αντίσταση, που ελαττώνεται ταχύτατα, όταν φωτίζεται (φωτοαντίσταση).

Στις εφαρμογές έχει επικρατήσει να χρησιμοποιείται σαν υλικό κατασκευής των φωτοστοιχείων το θειούχο κάδμιο (CdS) με μικρές προσμίξεις αργύρου, αντιμονίου ή ινδίου. Υπάρχουν έτσι διάφορες εμπορικές μορφές και τύποι φωτοστοιχείων. Στο σχήμα 14-5.α δίδεται η γραφική παράσταση της μεταβολής της αντιστάσεως δύο τύπων φωτοστοιχείων συναρτήσει του φωτισμού της επιφανείας τους με λευκό φως 2870^oK. Ενώ στο απόλυτο σκόταδι η αντίστασή τους φθάνει τα 2M Ω , όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, σε έντονο φωτισμό (200 Lux) η αντίσταση αυτή ελαττώνεται στ 50 Ω περίπου.

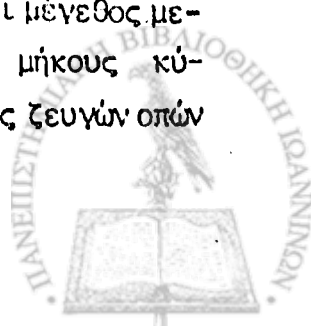
Το βασικό πλεονέκτημα του CdS, εξ αιτίας του οποίου και εκτόπισε όλα τα άλλα υλικά κατασκευής φωτοστοιχείων είναι η φασματική κατανομή της ευαισθησίας του. Η φασματική αυτή κατανομή δίνεται στο σχήμα 14-5.β και , όπως φαίνεται άμεσα, είναι εξαιρετικά ανάλογη προς τη φασματική κατανομή της ευαισθησίας του ανθρώπινου ματιού. Αυτό σημαίνει, ότι τα φωτοστοιχεία CdS επηρεάζονται από τα ίδια μήκη κύματος και με τον ίδιο περίπου τρόπο όπως το ανθρώπινο μάτι.

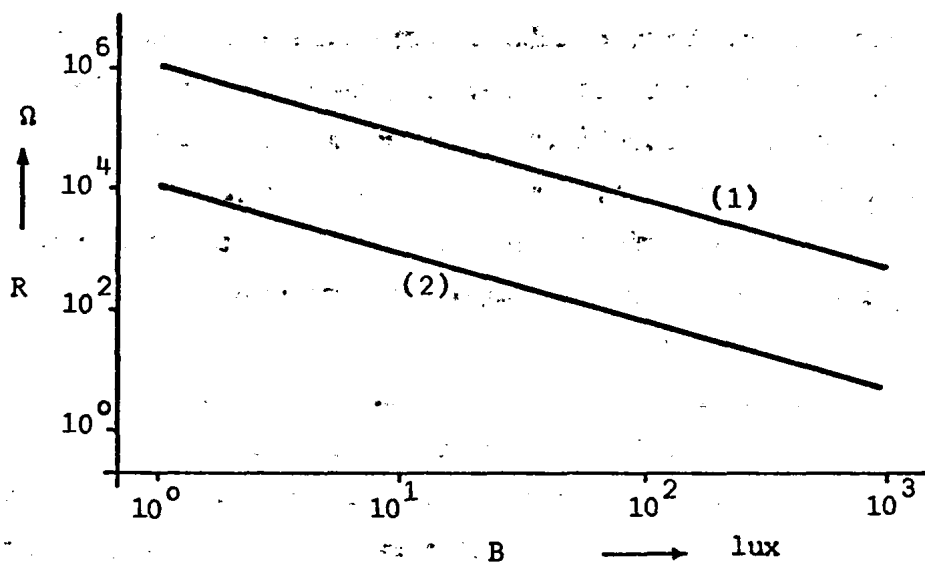
Επίσης λόγω του μεγάλου συντελεστή φαιρότητάς τους τα φωτοστοιχεία CdS αποβάλλουν σημαντικά ποσά θερμικής ισχύος και έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τέτοιες εντάσεις ρεύματος, που δεν απαιτούν περαιτέρω ενίσχυση.

Ειδικά για χρήση στο υπεριώδες υπάρχει το φωτοστοιχείο θειούχου μολύβδου (PbS) με μέγιστο ευαισθησίας στα 290 nm. Ευρέως επίσης χρησιμοποιείται το φωτοστοιχείο σεληνίου (Se), που είναι ευαίσθητο κυρίως στο ορατό και υπεριώδες.

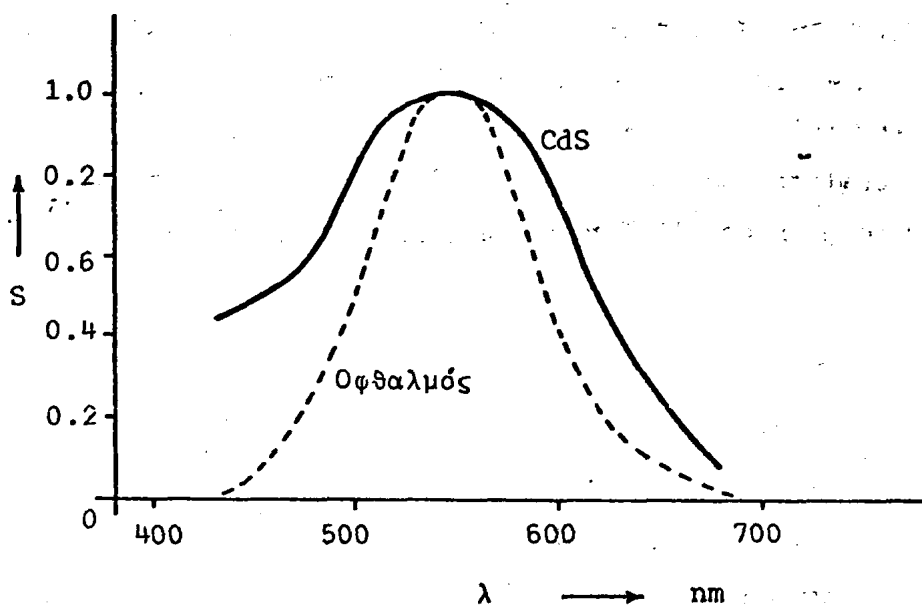
Φωτοβολταϊκά στοιχεία

Έστω μια κρυσταλλοδίοδος πολωμένη ανάστροφα με τάση αρκετή για να προκαλέσει ανάστροφο ρεύμα κόρου. Όπως είναι γνωστό οι φορείς μειονότητας "σπρώνονται," δια της περιοχής απογυμνώσεως, ενώ οι φορείς πλειονότητας εμποδίζονται να τη διέλθουν από το φραγμό δυναμικού. Το ανάστροφο ρεύμα κόρου αφέλλεται αποκλειστικά σε φορείς μειονότητας και έχει μέγεθος μερικά μΑ. Αν η κρυσταλλοδίοδος αυτή φωτιστεί με φως κατάλληλου μήκους κύματος, σύμφωνα με τα προηγούμενα, θα δημιουργηθεί ένας αριθμός ζευγών οπών





α) Μεταβολή αντιστάσεων συναρτήσει του φωτισμού



β) Φασματική κατανομή της ευαισθησίας

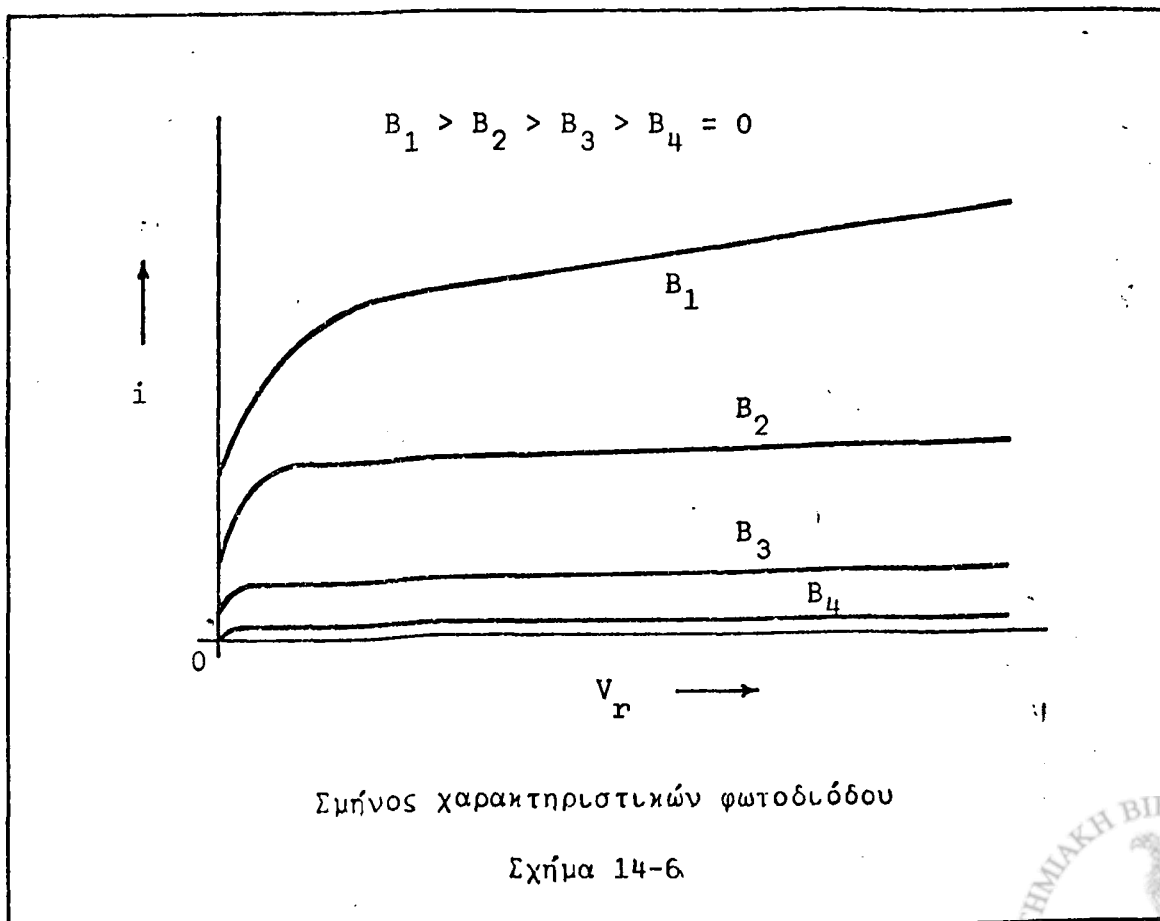
Φωτοστοιχείο CdS

Σχήμα 14-5



και ηλεκτρονίων τόσο στο p-τύπου όσο και στο n-τύπου τμήμα της. Ο αριθμός των φορέων, που δημιουργούνται έτσι, είναι μεγάλος σχετικά με το πλήθος των φορέων μειονότητας, αλλά ασήμαντος σχετικά με το πλήθος των φορέων πλειονότητας. Επειδή λοιπόν η ποσοστιαία μεταβολή των φορέων πλειονότητας είναι αμελητέα, η συμπεριφορά τους σε κάθε τύπο ημιαγωγού παραμένει, αμετάβλητη και μπορεί να μη ληφθεί υπ' όψη. Οι φορείς μειονότητας όμως αυξάνουν εξαιρετικά (τουλάχιστον σχετικά με τον αρχικό αριθμό τους) και έτσι αυξάνει σημαντικά και το ανάστροφο ρεύμα κόρου. Στο σχήμα 14-6 δίνεται ένα σμήνος χαρακτηριστικών μιας τέτοιας φωτοδιόδου για διάφορες εντάσεις φωτισμού της. Αξιοσημείωτο είναι, ότι με εξαίρεση τη χαρακτηριστική απόλυτου σκότους οι υπόλοιπες δεν διέρχονται από την αρχή των αξόνων, γεγονός που σημαίνει, ότι και χωρίς πηγή το κύκλωμά τους διαρρέεται από κάποιο ρεύμα. Στο φαινόμενο αυτό θα αναφερθούμε παρακάτω.

Στη φωτοδίοδο η ευαισθησία εξαρτάται και από τη σχετική θέση της περιοχής απογυμνώσεως και της περιοχής φωτισμού. Είναι ευνόητο, ότι αν η περιοχή φωτισμού απέχει πολύ από την περιοχή διαβάσεως, οι παραγόμενοι φορείς μειονότητας (π.χ. ηλεκτρόνια στην περιοχή p-τύπου) κινούνται για με-



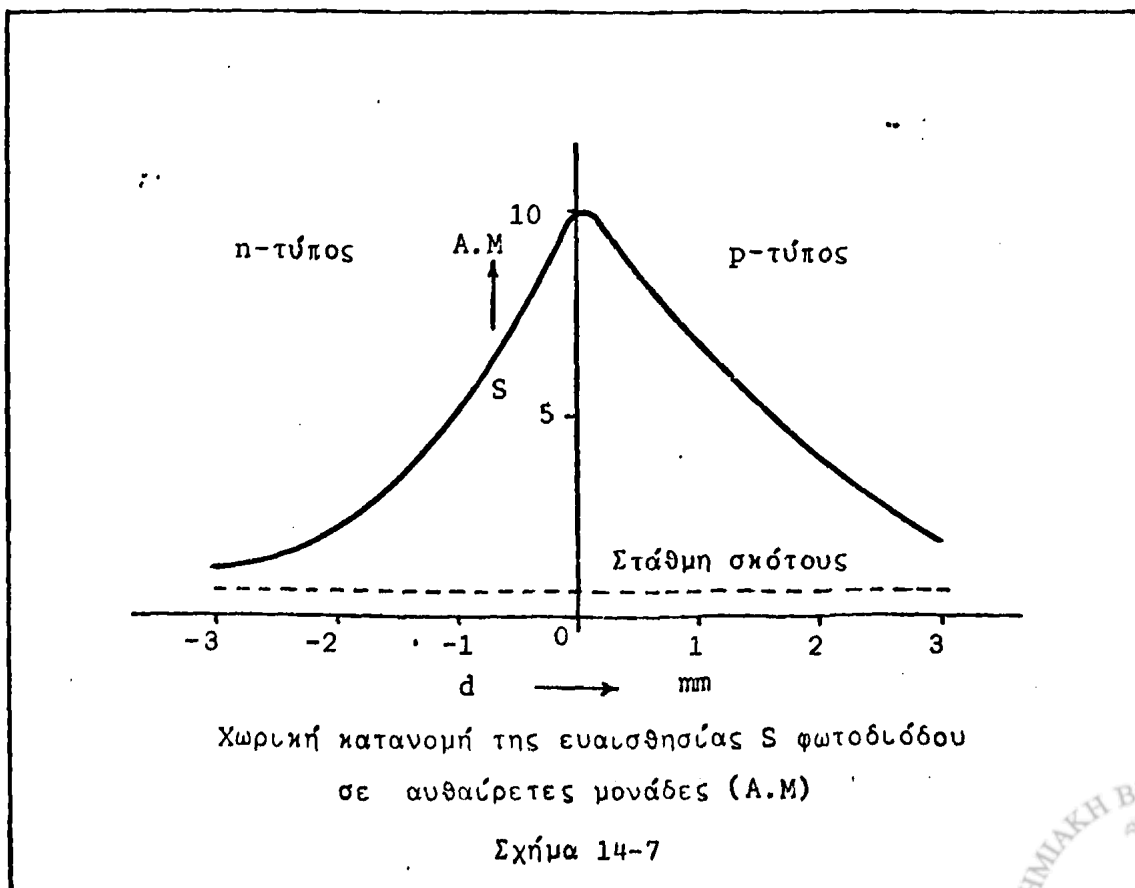
γάλο χρονικό διάστημα μέσα σε χώρο, όπου υπάρχει περίσσεια φορέων άλλου τύπου (π.χ. οπές). Υπάρχει έτσι αυξημένη πιθανότητα επανασυνδέσεώς τους. Η πιθανότητα αυτή ελαττώνεται -με συνέπεια το ρεύμα και η ευαισθησία να αυξάνουν- όσο το σημείο φωτισμού πλησιάζει την περιοχή απογυμνώσεως. Στο σχήμα 14-7 δίνεται η χωρική κατανομή της ευαισθησίας για δεδομένη φωτεινή ροή. Η ασυμμετρία της καμπύλης οφείλεται στη διαφορά ευκινησίας οπών και ηλεκτρονίων.

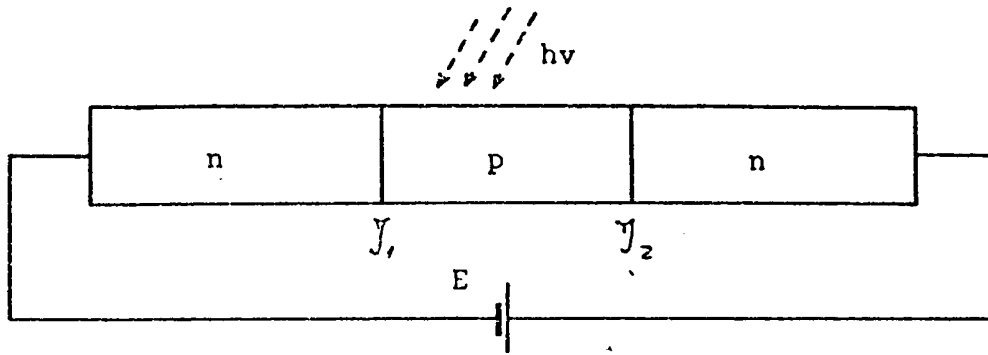
Η φωτοδίοδος είναι ουσιαστικά η αντίστοιχη διάταξη Στερεού Σώματος της δίοδου φωτολυχνίας. Συγκρίνοντας τις δύο διατάξεις παρατηρούμε τα εξής:

Η φωτοδίοδος πλεονεκτεί κατά το ότι: α) Έχει πολύ μεγαλύτερη ευαισθησία (200 περίπου φορές) από την απλή φωτολυχνία όχι όμως και από τον φωτοπολλαπλασιαστή, από τον οποίο υπολείπεται σημαντικά. β) Έχει μικρό μέγεθος, καλύτερη μηχανική αντοχή, χαμηλές τάσεις τροφοδοσίας.

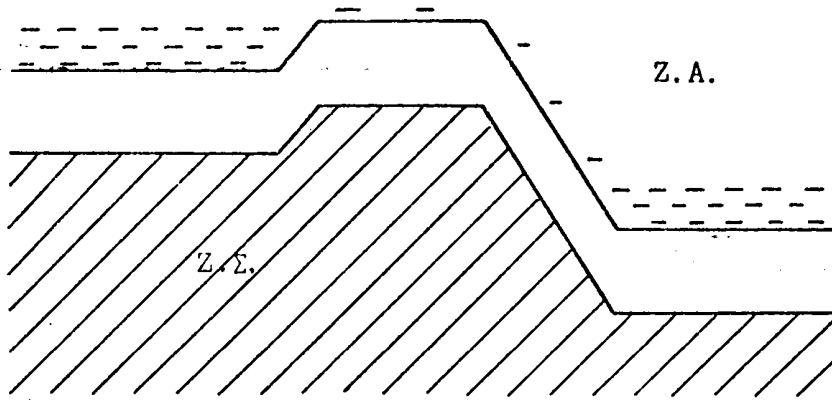
Αντίστοιχα η φωτολυχνία πλεονεκτεί κατά το ότι: α) Έχει πολύ καλύτερη θερμική σταθερότητα β) Έχει μηδενικό ρεύμα σκότους γ) Γερνάει πολύ βραδύτερα. δ) Αποκρίνεται σε υψηλότερες συχνότητες (πάνω από 100MHz ενώ η φωτοδίοδος δύσκολα φθάνει το 1MHz).

Βελτιωμένη μορφή της φωτοδίοδου είναι η φωτοευαίσθητη κρυστολλοτρίο-

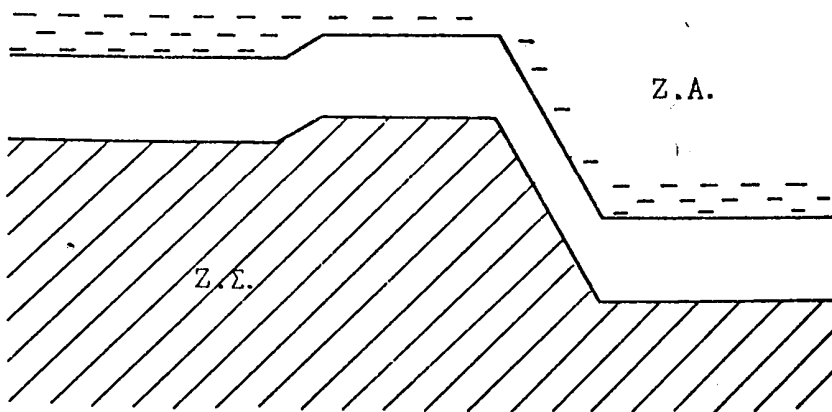




α) Συνδεσμολογία φωτοδιποδιόδου



β) Πόλωση χωρίς φωτισμό



γ) Πόλωση με φωτισμό

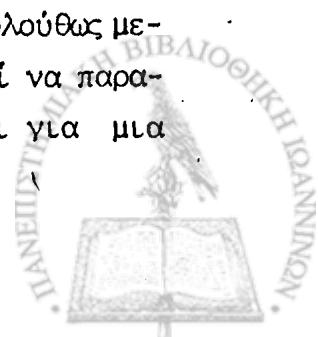
Σχήμα 14-8



δος n-p-n γνωστή με το όνομα φωτο-διπλο-δίοδος. Όπως φαίνεται στο σχήμα 14-8.α συνδεσμολογείται ανάλογα προς ένα diac· έτσι η επαφή J_1 είναι ορθά και η επαφή J_2 ανάστροφα πολωμένη. Τα ηλεκτρόνια λοιπόν της περιοχής n-τύπου, που συνδέεται με τον αρνητικό πόλο της πηγής διέρχονται τον υποβιβασμένο φραγμό της J_1 , διαχέονται δια του p-τύπου τμήματος, "σαρώνονται,, δια της επαφής J_2 και τελικά εισέρχονται στο n-τύπου τμήμα, που συνδέεται με τον θετικό πόλο της πηγής, ολοκληρώνοντας την κίνησή τους στη διάταξη. Το ρεύμα, που κυκλοφορεί έτσι στη διάταξη είναι περιορισμένο (μερικά mA) και το κύριο αίτιο για τον περιορισμό αυτό είναι ο φραγμός της επαφής J_1 . Αν τώρα η περιοχή p-τύπου φωτιστεί με ακτινοβολία κατάλληλου μήκους κύματος, το κάθε απορροφώμενο φωτόνιο προκαλεί τη δημιουργία ενός ζεύγους οπής-ηλεκτρονίου, στην περιοχή αυτή. Τα ηλεκτρόνια "σαρώνονται,, προς τα n-τύπου τμήματα είτε δια της J_1 , είτε δια της J_2 , ενώ οι οπές παγιδεύονται ενεργειακά στην περιοχή αυτή με αποτέλεσμα να φορτίζεται το p-τύπου τμήμα θετικά. Αυτό προκαλεί σταδιακό υποβιβασμό των ενεργειακών του σταθμών και κατά συνέπεια ελάττωση των φραγμών δυναμικού, που έχει μεγαλύτερη σημασία για τον μικρότερο σε μέγεθος φραγμό της επαφής J_1 (μετάπτωση από την κατάσταση του σχήματος 14-8.β στην κατάσταση του σχήματος 14-8.γ). Αποτέλεσμα της ελάττωσης του φραγμού J_1 είναι η δραστική αύξηση της ροής ηλεκτρονίων από το αριστερό n-τύπου τμήμα προς το δεξιό, άρα και ανάλογη αύξηση του ρεύματος, που διαρρέει τη διάταξη.

Η ευαισθησία της φωτοδιπλοδιόδου είναι 100 περίπου φορές μεγαλύτερη από ότι της απλής φωτοδιόδου. Στο σχήμα 14-9 δίδεται το σμήνος χαρακτηριστικών μιας φωτοδιπλοδιόδου για διάφορους φωτισμούς της.

Επανερχόμαστε τώρα στη φωτοδίοδο για να μελετήσουμε ένα άλλο φαινόμενο, που σχετίζεται με αυτήν, το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Στο διάγραμμα του σχήματος 14-6 παρατηρούμε, ότι όσο μειώνεται η ανάστροφη τάση πολώσεως της φωτοδιόδου ελαττώνεται το φωτόρρευμα. Η ελάττωση αυτή οφείλεται στο ότι η ελάττωση της ανάστροφης τάσης επιφέρει μείωση του φραγμού δυναμικού, που παρεμβάλλεται στην πορεία των φορέων πλειονότητας, άρα και σταδιακή αύξηση του ρεύματος των φορέων αυτών, που είναι αντίρροπο του ρεύματος φορέων μειονότητας και προκαλεί μείωσή του. Αν τώρα η ελάττωση αυτή της αναστροφής πολώσεως φθάσει το μηδενισμό -όπως προαναφέρθηκε με εξαίρεση την περίπτωση απόλυτου σκότους το ρεύμα δεν μηδενίζεται τότε- και ακολούθως μετατραπεί σε ορθή πόλωση, το ρεύμα φορέων μειονότητας εξακολουθεί να παραμένει ανεπηρρέαστο, ενώ το ρεύμα φορέων πλειονότητας αυξάνει και για μια



1. Τροφοδοτικό χαμηλής τάσης
2. Τροφοδοτικό υψηλής τάσης
3. Ηλεκτρονικό βολτόμετρο
4. Πολύμετρο
5. Δύο κρυσταλλοτρίοδοι pnp
6. Φωτοστοιχείο
7. Ηλεκτρονόμος (relais)
8. Δύο αντιστάσεις 100Ω-0.5W
9. Ποτενσιόμετρο 1kΩ-2W
10. Λαμπτήρας
11. Διακόπτης

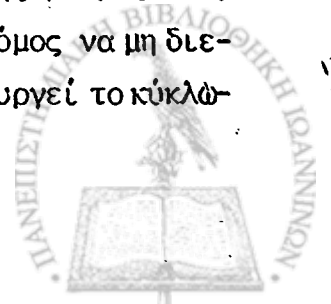
Πειραματικό μέρος

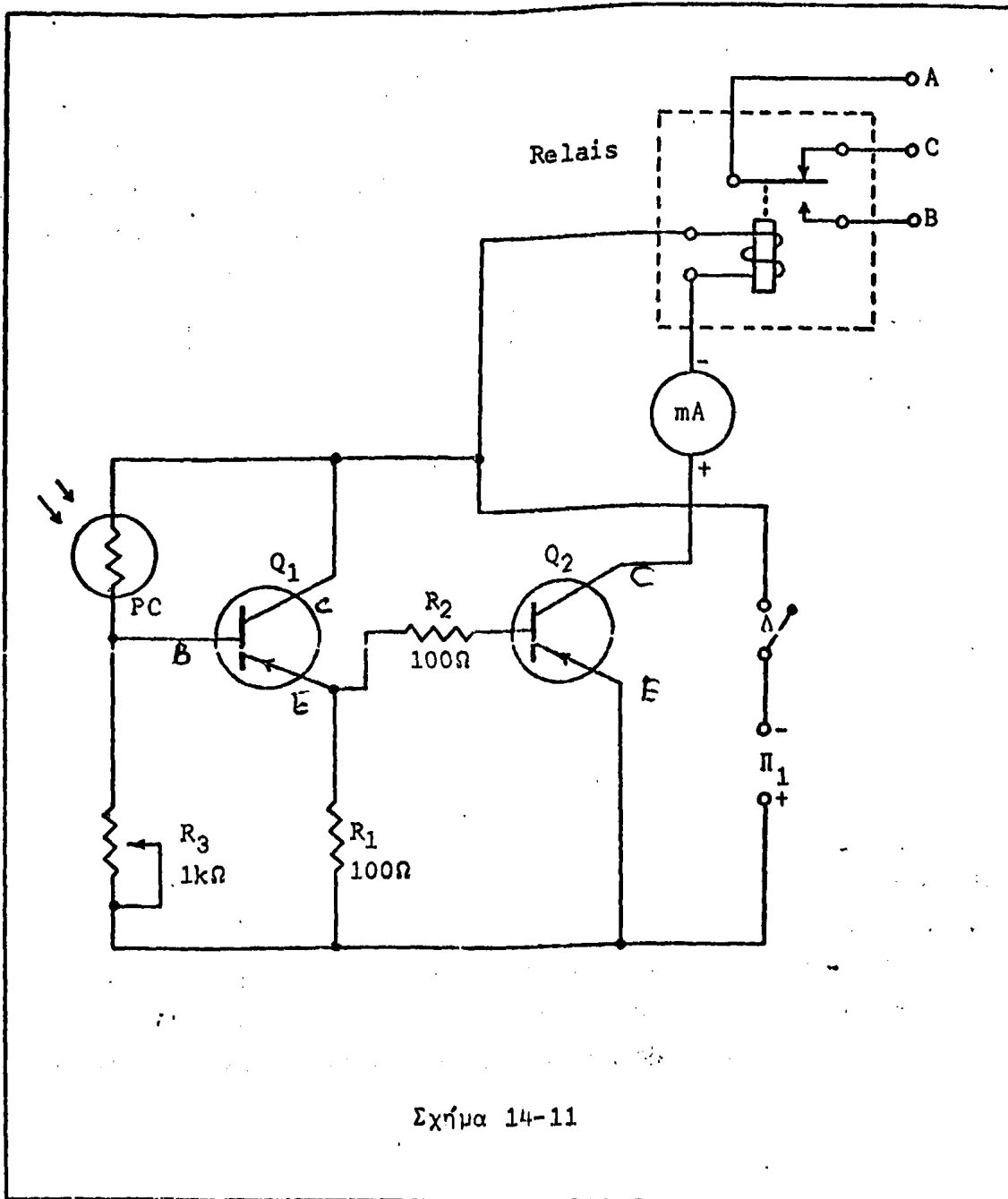
1. Καλύψτε με το χέρι σας το φωτοστοιχείο, ώστε να μην προσπίπτει φως στην επιφάνειά του και μετρήστε την αντίστασή του με το ηλεκτρονικό βολτόμετρο. Συνδέστε κατόπιν τον λαμπτήρα στην πηγή εναλλασσόμενης τάσης 6.3 V του τροφοδοτικού υψηλής τάσης και πλησιάστε τον κοντά στην επιφάνεια του φωτοστοιχείου. Μετρήστε πάλι την αντίστασή του.

$R_{\text{σκοτ}} =$	Ω	$R_{\text{φως}} =$	Ω
---------------------	----------	--------------------	----------

2. Πραγματοποιείτε το κύκλωμα του σχήματος 14-11. Στα άκρα A και B του ηλεκτρονόμου συνδέστε το ηλεκτρονικό βολτόμετρο (κλίμακα $R \times 10$)· το ηλεκτρονικό βολτόμετρο δείχνει αν ο ηλεκτρονόμος διεγείρεται ($R=0$) ή όχι ($R=\infty$). Ο λαμπτήρας παραμένει πάντοτε αναμμένος. Τοποθετείστε αρχικά το φωτοστοιχείο, έτσι ώστε να μη φωτίζεται από το λαμπτήρα.

3. Ρυθμίστε το τροφοδοτικό Π₁ σε τάση 12V και κλείστε το διακόπτη. Φωτίστε το φωτοστοιχείο με τον λαμπτήρα· ο ηλεκτρονόμος θα διεγερθεί και οι επαφές A και B θα βραχυκυκλώσουν. Απομακρύνετε τον λαμπτήρα· ο ηλεκτρονόμος θα αποδιεγερθεί και οι επαφές A και B θα ανοίξουν. Ο ροοστάτης ρυθμίζει την ευαισθησία του κυκλώματος. Ρυθμίστε τον έτσι ώστε ο ηλεκτρονόμος να μη διεγείρεται από το φωτισμό του Εργαστηρίου. Εξηγήστε πώς λειτουργεί το κύκλωμα.





4. Αποσυνδέστε το ηλεκτρονικό βολτόμετρο από τα άκρα του ηλεκτρονόμου. Καλύψτε το φωτοστοιχείο, ώστε να μην προσπίπτει φως στην επιφάνειά του και μετρείστε με το ηλεκτρονικό βολτόμετρο την τάση εκπομπού-βάσης της κρυσταλλοτριόδου Q_1 . Κατόπιν φωτίστε το φωτοστοιχείο με τον λαμπτήρα και επαναλάβετε τη μέτρηση. Αυξάνεται ή ελαττώνεται η τάση V_{EB} του Q_1 , όταν φωτίζεται το φωτοστοιχείο; Γιατί;

$V_{EB_{\text{σκοτ}}}$	=	V	$V_{EB_{\text{φως}}}$	=	V
------------------------	---	---	-----------------------	---	---



5. Συνδέστε πάλι το ηλεκτρονικό βολτόμετρο (κλίμακα $R \times 10$) στα άκρα A και B του ηλεκτρονόμου. Με το λαμπτήρα μακριά από το φωτοστοιχείο (ηλεκτρονόμος αποδεδειγμένος) μετρήστε το ρεύμα συλλέκτη I_C της κρυσταλλοτριόδου Q_2 . Πλησιάστε κατόπιν αργά τον λαμπτήρα στο φωτοστοιχείο και μετρήστε, για ποιά ακριβώς τιμή του ρεύματος συλλέκτη διεγείρεται ο ηλεκτρονόμος.

$I_{C_{\text{σκοτ}}}$	=		μΑ	$I_{C_{\text{διεγ.}}}$	=		μΑ
-----------------------	---	--	----	------------------------	---	--	----

6. Ανοίξτε το διακόπτη Δ. Στο κύκλωμα τροφοδοσίας του λαμπτήρα παρεμβάλετε σε σειρά τον ηλεκτρονόμο (επαφές A και C), έτσι ώστε ο λαμπτήρας να ανάβει, όταν ο ηλεκτρονόμος δεν διεγείρεται, και να σβήνει, όταν διεγείρεται. Φέρτε τον λαμπτήρα κοντά στο φωτοστοιχείο, ώστε να φωτίζει την επιφάνειά του και κλείστε το διακόπτη Δ. Ο λαμπτήρας θα αρχίσει να αναβοσβήνει περιοδικά. Εξηγήστε τη λειτουργία του κυκλώματος. Μεταβάλλοντας το ροοστάτη τί μεταβολή προκαλούμε στο κύκλωμα;

Ερωτήσεις

1. Ποιά είναι τα μειονεκτήματα και ποιά τα πλεονεκτήματα των φωτοδιόδων έναντι των φωτολυχνιών;
2. Γιατί με το ροοστάτη μεταβάλλεται η ευαισθησία του κυκλώματος, που μελετήσατε;
3. Ποιός είναι ο σκοπός των αντιστάσεων R_1 και R_2 του πειραματικού κυκλώματος;
4. Γιατί η φωτοδιπλοδίοδος είναι πιο ευαίσθητη από την απλή φωτοδίοδο;
5. Αναφέρετε πέντε τουλάχιστον εφαρμογές φωτοηλεκτρικών διατάξεων.



ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΤΗΣ ΤΑΣΗΣΕισαγωγή

Μια σημαντική κατηγορία ηλεκτρονικών συσκευών, που χρησιμοποιούνται ευρύτατα τόσο στην έρευνα όσο και στις εφαρμογές είναι τα τροφοδοτικά. Με τον όρο αυτό χαρακτηρίζονται διατάξεις, που έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν ηλεκτρική ισχύ για την τροφοδοσία άλλων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και διατάξεων. Η συντριπτική πλειοψηφία των τροφοδοτικών εργάζεται χρησιμοποιώντας την ηλεκτρική ισχύ του δικτύου πόλης. Υπάρχουν όμως και αυτόνομα τροφοδοτικά, που η ηλεκτρική ισχύς τους προέρχεται από ηλεκτρικά στοιχεία, συσσωρευτές ή φωτοβολταϊκά στοιχεία. Διακρίνονται γενικά σε τροφοδοτικά εναλλασσομένου και τροφοδοτικά συνεχούς, που κυρίως ενδιαφέρουν, ανάλογα με το είδος της τάσης -και ρεύματος- που παρέχουν. Εκτός από τα χαρακτηριστικά επιδόσεων ενός τροφοδοτικού (μέγιστη παρεχόμενη τάση, μέγιστο ρεύμα ή ισχύς κλπ) υπάρχουν και ωρισμένα χαρακτηριστικά ποιότητας (επιτυχανόμενη σταθεροποίηση, κυμάτωση (άσκηση 3), απόδοση, ολίσθηση, ύπαρξη ηλεκτρονικής προστασίας έναντι βραχυκυκλώματος εξόδου κλπ).

Ένα απλό τροφοδοτικό συνεχούς αποτελείται από έναν μετασχηματιστή, έναν ανορθωτή και ένα φίλτρο. Ο μετασχηματιστής υποβιβάζει ή αναβιβάζει την ενιαία τάση του δικτύου πόλης, ώστε να ελθει στην περιοχή τάσεων, που ενδιαφέρει, ο ανορθωτής μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή ημι- ή πλήρως ανορθωμένη και το φίλτρο την εξομαλύνει. Ένα τέτοιο τροφοδοτικό ονομάζεται τροφοδοτικό μη σταθεροποιημένης τάσης και δεν είναι ικανοποιητικό για σημαντικό αριθμό εφαρμογών. Οι κυριότεροι λόγοι γι' αυτό είναι: α) Η τάση εξόδου μεταβάλλεται αναλογικά με την τάση εισόδου, που σε πολλές περιπτώσεις υφίσταται διακυμάνσεις μεταξύ των 180 και 230V. β) Η τάση εξόδου μεταβάλλεται, όταν μεταβάλλεται ο φόρτος και συγκεκριμένα ελαττώνεται σε κάθε ελάττωσή του και αυξάνει σε κάθε αύξησή του. γ) Η τάση εξόδου μεταβάλλεται με κάθε μεταβολή της θερμοκρασίας· η ιδιομορφία αυτή αφορά τα τροφοδοτικά με κρυσταλλολυχνίες.



Οποτεδήποτε λοιπόν απαιτούνται τροφοδοτικά, που η τάση εξόδου τους να είναι ανεπηρέαστη από τις παραπάνω μεταβολές τα μη σταθεροποιημένα είναι ακατάλληλα. Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιούνται τροφοδοτικά ειδικού σχεδιασμού και προδιαγραφών, που ονομάζονται τροφοδοτικά σταθεροποιημένης τάσης. Τα τροφοδοτικά αυτά αποτελούν συνδυασμό δύο επί μέρους διατάξεων: ενός τροφοδοτικού μη σταθεροποιημένης τάσης και ενός σταθεροποιητή τάσης. Ο σταθεροποιητής τάσης είναι ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα τεσσάρων πόλων, που στην είσοδό του δέχεται τη μη σταθερή συνεχή τάση του ασταθεροποιήτου τροφοδοτικού και στην έξοδό του παρέχει μια τάση σταθερή και κατ'αρχήν ανεπηρέαστη από οποιαδήποτε από τις προαναφερθείσες μεταβολές (σχήμα 15-1). Στην πραγματικότητα και ο πιο καλός σταθεροποιητής δεν επιτυγχάνει την απόλυτη σταθερότητα της τάσης εξόδου. Ορίζονται έτσι για το χαρακτηρισμό των επιδόσεων του κάθε σταθεροποιητή κάποιες παράμετροι σταθεροποίησης, που είναι:

α) Συντελεστής σταθεροποίησης: Χαρακτηρίζει τη σταθερότητα της τάσης εξόδου έναντι μεταβολών της τάσης εισόδου και είναι καθαρός αριθμός. Ορίζεται από τη σχέση:

$$S_v = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}}$$

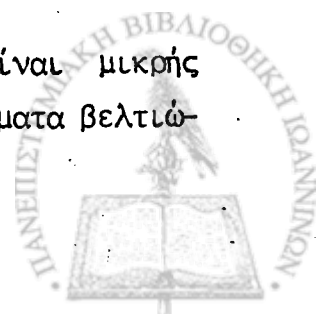
β) Αντίσταση εξόδου: Χαρακτηρίζει τη σταθερότητα της τάσης εξόδου έναντι μεταβολών του ρεύματος εξόδου (ρεύμα φόρτου). Έχει διαστάσεις αντιστάσεως και ορίζεται από τη σχέση:

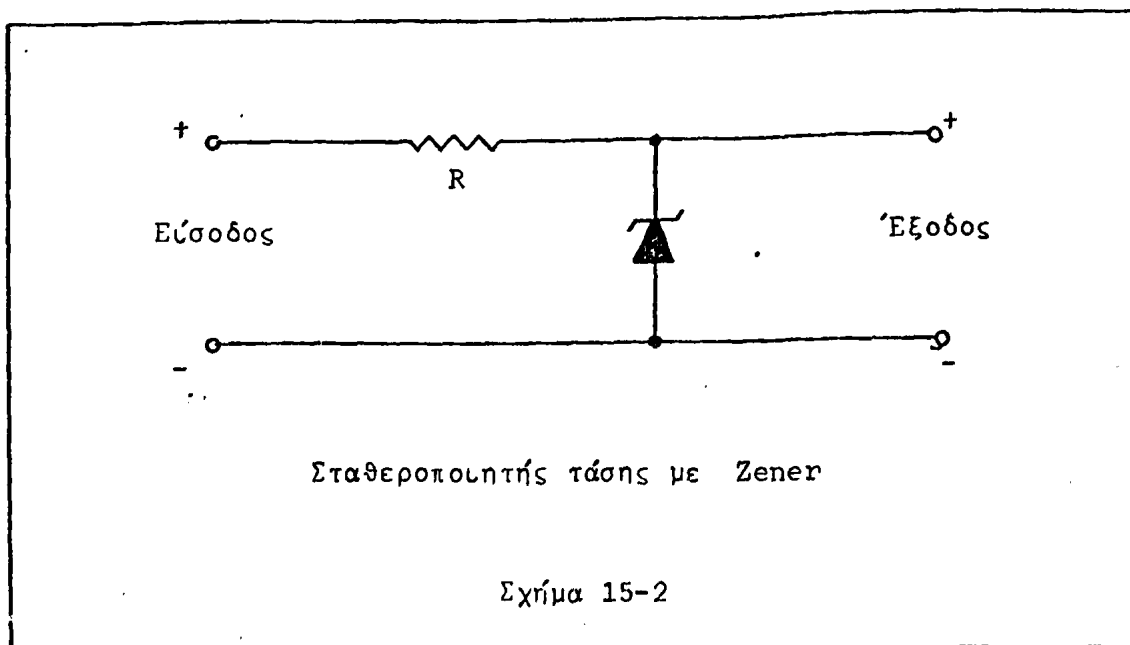
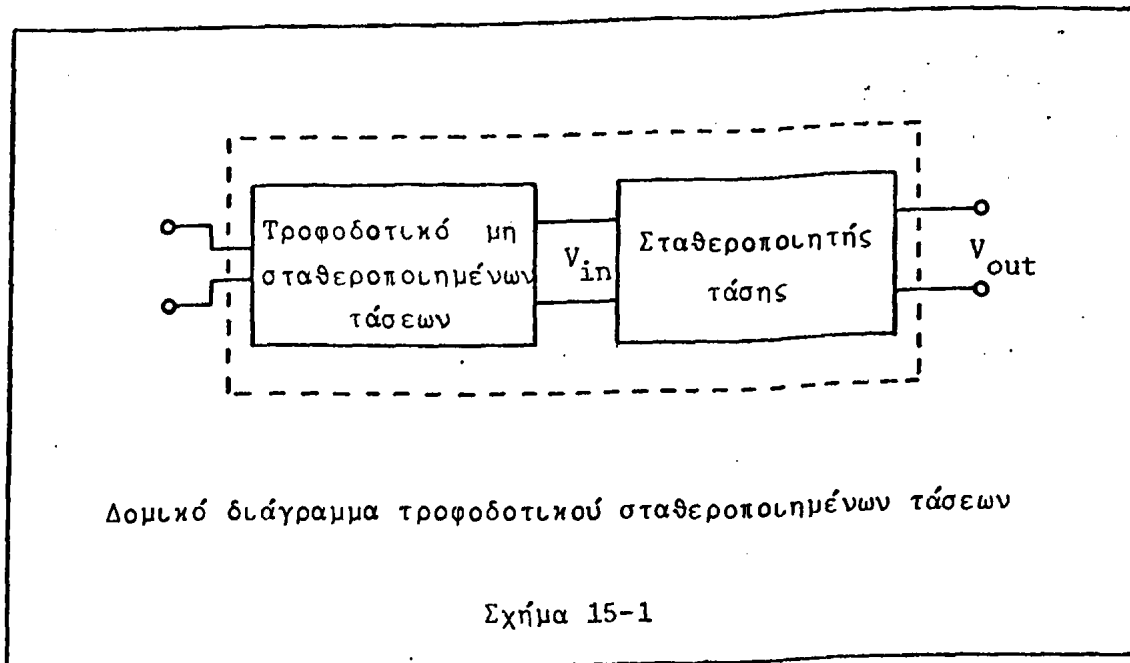
$$R_o = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta I_{out}}$$

γ) Συντελεστής θερμοκρασίας: Χαρακτηρίζει τη σταθερότητα της τάσης εξόδου έναντι θερμοκρασιακών μεταβολών του χώρου λειτουργίας του σταθεροποιητή. Έχει διαστάσεις τάσης (V/grad) και ορίζεται από τη σχέση:

$$S_T = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta T}$$

Ο συντελεστής αυτός στις περισσότερες περιπτώσεις εφαρμογών είναι μικρής σημασίας και γι'αυτό αγνοείται στα επόμενα. Άλλωστε τα κυκλώματα βελτιώ-

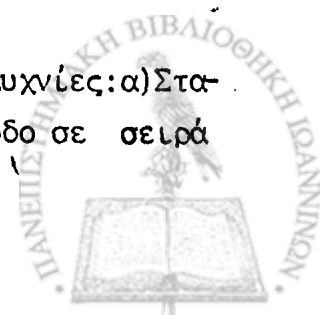


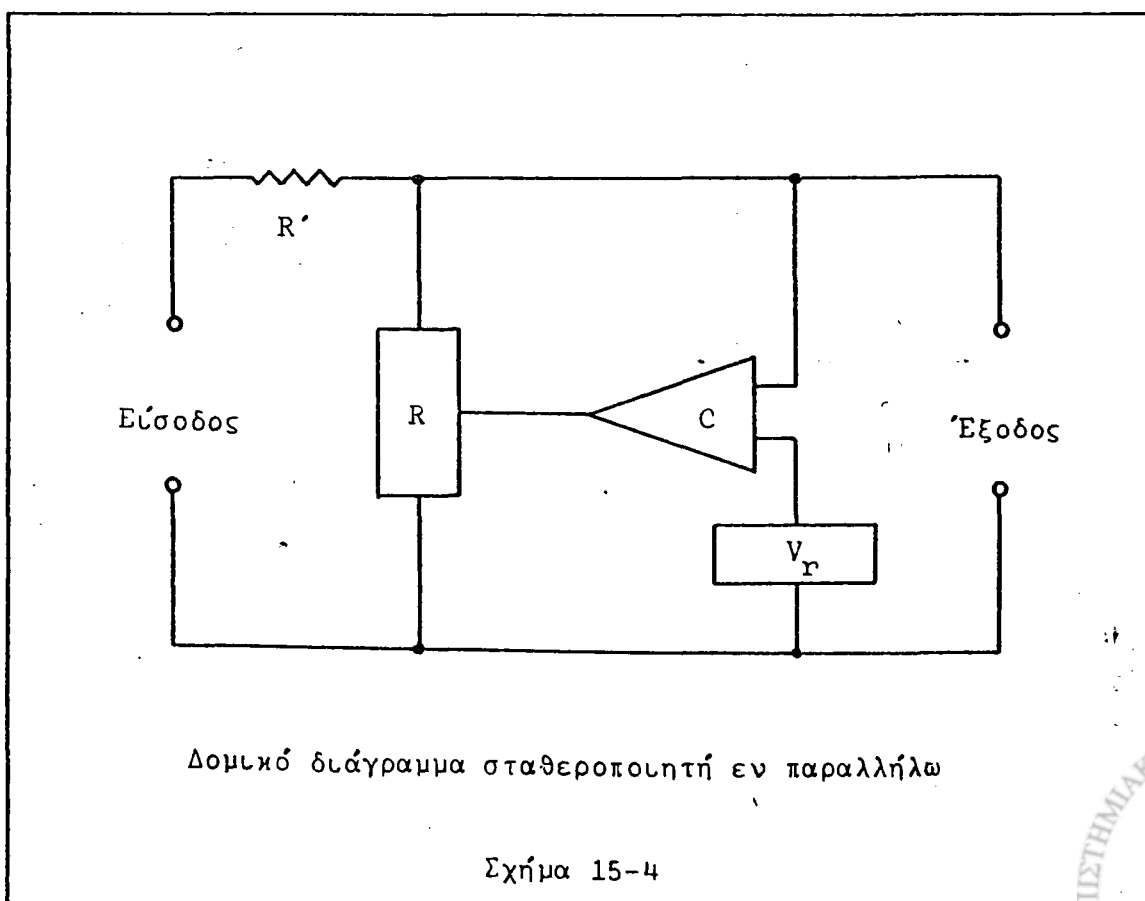
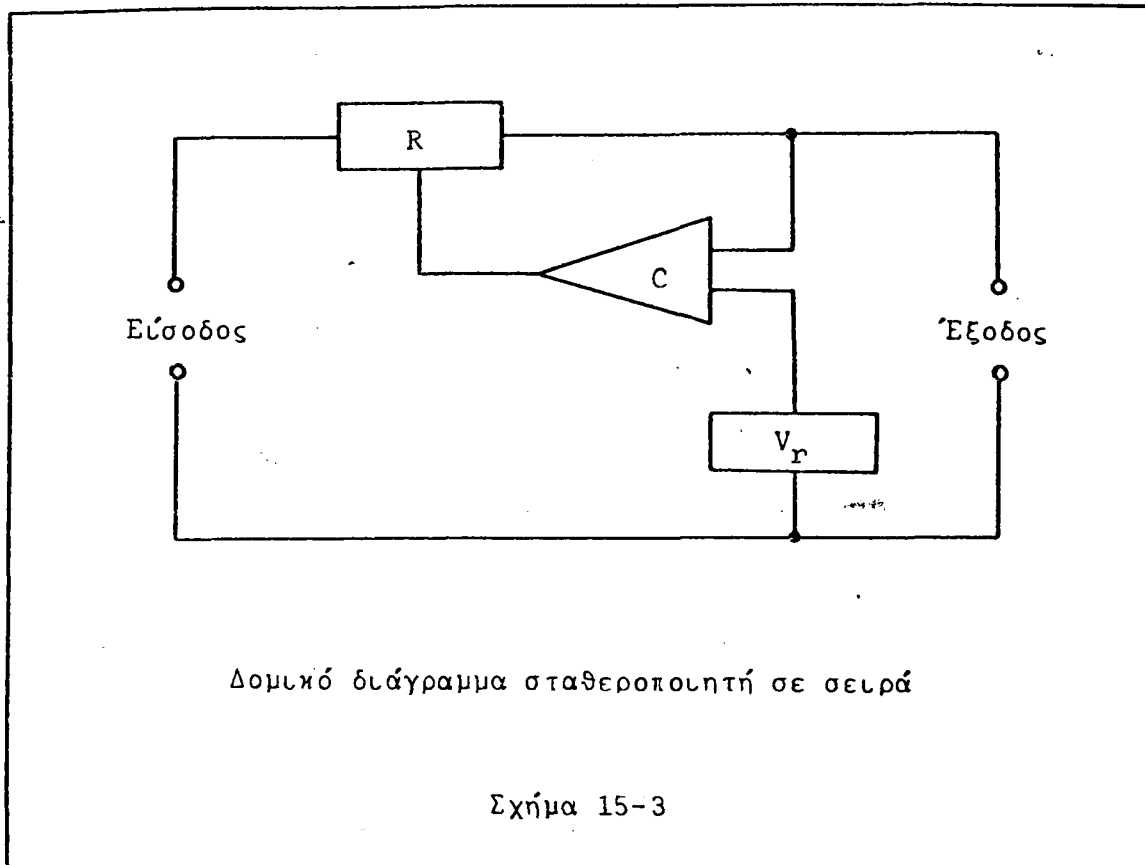


σεώς του διέπονται από διαφορετική αρχή λειτουργίας και εξετάζονται σε άλλη άσκηση.

Υπάρχουν διάφορα είδη σταθεροποιητών τάσης με διάφορο βαθμό πολυπλοκότητας, επιδόσεις, κόστος, σκοπό χρήσης και αρχή λειτουργίας. Ιστορικά παλιότεροι είναι οι σταθεροποιητές με δίοδες ή τρίοδες ηλεκτρονικές λυχνίες αερίου, που σήμερα έχουν εκλείψει εντελώς και αντικατασταθεί από σταθεροποιητές με κρυσταλλολυχνίες.

Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι σταθεροποιητών με κρυσταλλολυχνίες: α) Σταθεροποιητής με δίοδο Zener. β) Σταθεροποιητής με κρυσταλλοτρίοδο σε σειρά





(προς το φόρτο) και γ) Σταθεροποιητής με κρυσταλλοτρίοδο παράλληλα (προς το φόρτο). Ο σταθεροποιητής με δίοδο Zener είναι ο απλούστερος όλων (σχήμα 15-2) και μελετήθηκε αναλυτικά στην άσκηση 4. Τα κυριότερα πλεονεκτήματά του είναι το μικρό κόστος, η απλότητα δομής και η ικανοποιητική θερμική σταθερότητα.

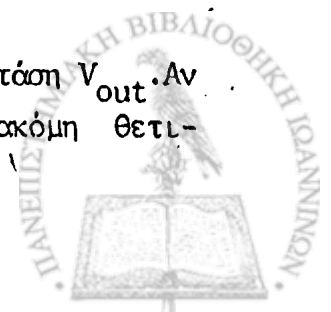
Ο σταθεροποιητής σε σειρά είναι ο ευρύτερα χρησιμοποιούμενος. Το δομικό του διάγραμμα δίνεται στο σχήμα 15-3. Όπως φαίνεται υπάρχει α) ένα ρυθμιστικό στοιχείο R τοποθετημένο σε σειρά με το κύκλωμα εξόδου, β) μια σταθερή τάση αναφοράς V_T και γ) ένας συγκριτής C, που διαρκώς συγκρίνει την τάση εξόδου V_{out} προς τη σταθερή τάση αναφοράς και, όποτε διαπιστώνει απόκλιση από την προκαθορισμένη διαφορά τους, στέλνει διορθωτικό σήμα στο ρυθμιστικό στοιχείο και επαναφέρει την αρχική κατάσταση.

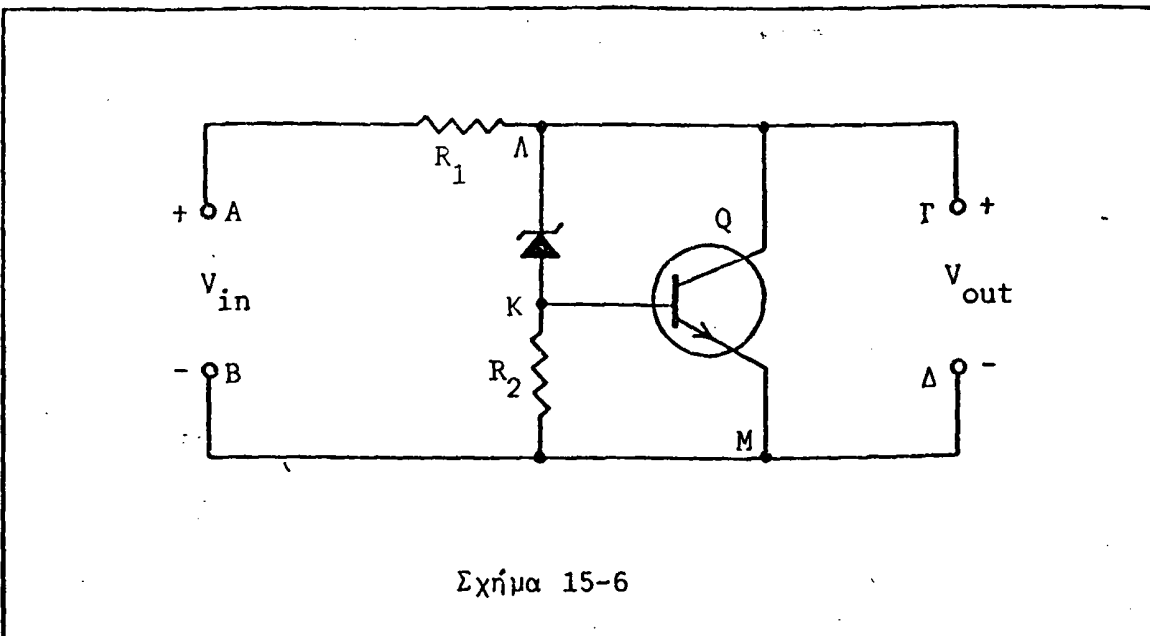
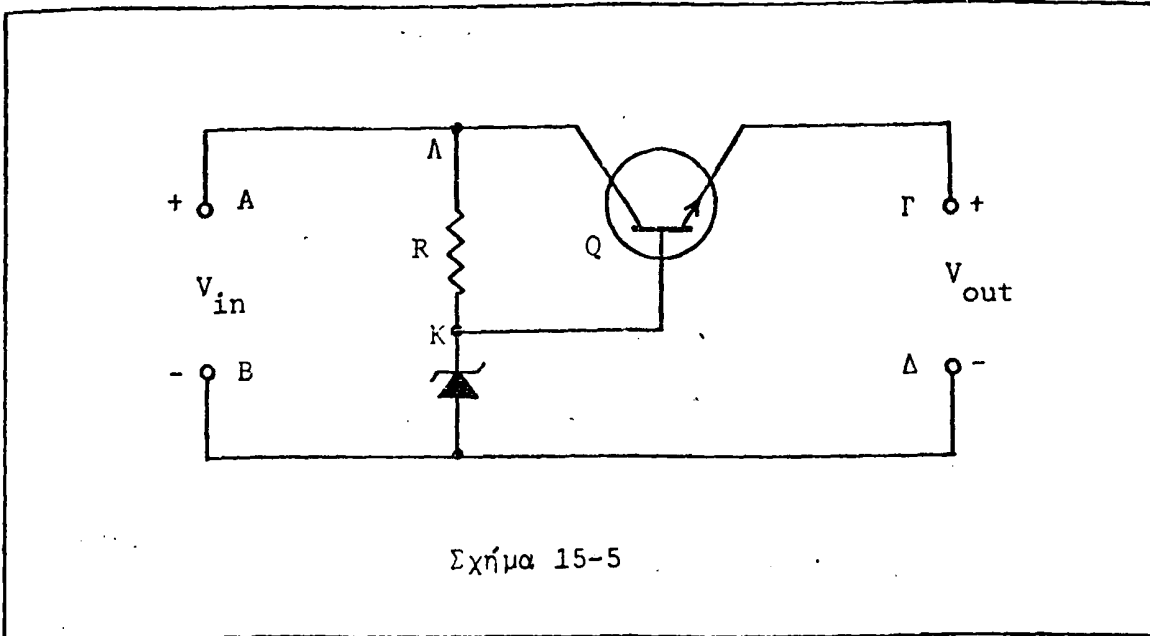
Ο σταθεροποιητής εν παράλληλω χρησιμοποιείται λιγότερο και το δομικό του διάγραμμα δίνεται στο σχήμα 15-4. Περιλαμβάνει τα ίδια στοιχεία με τον σταθεροποιητή σε σειρά, μόνο που το ρυθμιστικό στοιχείο είναι τώρα παράλληλα τοποθετημένο προς το κύκλωμα εξόδου. Η λειτουργία του είναι πανομοιότυπη με τον προηγούμενο.

Απλά κυκλώματα σταθεροποιητών

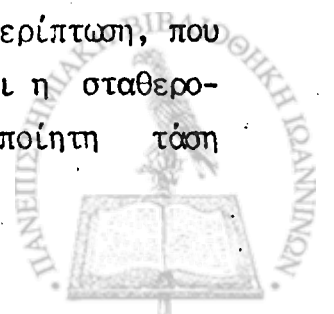
Εξετάζουμε αρχικά ένα απλό κύκλωμα σταθεροποιητή σε σειρά (σχήμα 15-5). Όπως φαίνεται στο σχήμα ο αρνητικός πόλος της σταθεροποιημένης εξόδου είναι κοινός με τον αρνητικό πόλο της ασταθεροποιητής εισόδου, ενώ μεταξύ των δύο θετικών πόλων μεσολαβεί η κρυσταλλοτρίδος Q, η αντίσταση της οποίας καθορίζει την πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής ΑΓ', άρα και την τελική τάση εξόδου. Η αντίσταση όμως της κρυσταλλοτρίδος είναι μεταβλητή και εξαρτάται από την πόλωση του τμήματος εκπομπός - βάση ελαττωμένη όσο η πόλωση αυτή αυξάνει. Η πόλωση βάσης καθορίζεται με τη βοήθεια του διαιρέτη τάσης, που σχηματίζουν η δίοδος Zener (ανάστραφα πολωμένη) και η αντίσταση R. Είναι σημαντικό όμως, ότι δεν πρόκειται για κοινό διαιρέτη, επειδή η τάση στα άκρα της Zener διατηρείται πάντοτε σταθερή (τάση αναφοράς). Κατά συνέπεια και το δυναμικό του σημείου Κ είναι πάντοτε σταθερό σε σχέση με τον αρνητικό πόλο του σταθεροποιητή.

Υπό κανονικές συνθήκες στην έξοδο επικρατεί μια ωρισμένη τάση V_{out} . Αν για οποιονδήποτε λόγο η τάση αυτή αυξηθεί, το άκρο Γ θα γίνει ακόμη θετι-





κώτερο ως προς το σημείο Δ, άρα και ως προς το σημείο Κ. Αυτό σημαίνει, ότι η πόλωση εκπομπού-βάσης (ή η κρυσταλλοτρίοδος) ελαττώνεται. Η ελάττωση αυτή της V_{EB} προκαλεί αύξηση της εσωτερικής αντιστάσεως της κρυσταλλοτρίοδος άρα μεγαλύτερη πτώση τάσης κατά μήκος του αγώγου ΑΓ, που ισοδυναμεί με ελάττωση του δυναμικού του Γ και επαναφορά της αυξημένης τάσης εξόδου στην αρχική της τιμή. Ακριβώς αντίστροφα λειτουργεί η διάταξη στην περίπτωση, που η τάση εξόδου για κάποιο λόγο ελαττώνεται. Είναι προφανές, ότι η σταθεροποιημένη τάση εξόδου είναι πάντοτε μικρότερη από την άσταθεροποιητή τάση εισόδου.



Ο σταθεροποιητής σε σειρά χρειάζεται ηλεκτρονική προστασία από βραχυκύκλωμα της εξόδου, επειδή, αν συμβεί κάτι τέτοιο, το ρεύμα, που θα διέλθει από την κρυσταλλοτρίοδο θα την καταστρέψει. Ο απλούστερος τρόπος προστασίας είναι η παρεμβολή μιας κατάλληλης αντιστάσεως μεταξύ των σημείων Α και Λ του κυκλώματος.

Εξετάζουμε τώρα ένα απλό κύκλωμα σταθεροποιητή εν παραλλήλω (σχήμα 15-6). Όπως φαίνεται και στο σχήμα ο αρνητικός πόλος της σταθεροποιημένης εξόδου είναι πάλι κοινός με τον αρνητικό πόλο της ασταθεροποιητής εισόδου, ενώ μεταξύ των δύο θετικών πόλων παρεμβάλλεται μια αντίσταση R_1 . Η έξοδος λοιπόν έχει πάλι μικρότερη τάση από την είσοδο. Παράλληλα προς την είσοδο συνδεσμοποιείται μια κρυσταλλοτρίοδος, που η βάση της (σημείο Κ) πολώνεται μέσω της Zener σε μια σταθερή τάση ως προς το σημείο Λ (ισοδυναμικό του θετικού πόλου εξόδου Γ). Σε κανονικές συνθήκες η κρυσταλλοτρίοδος παρουσιάζει μια ωρισμένη αντίσταση και ακόμη και αν η έξοδος είναι χωρίς φόρτο προκαλεί τη ροή ρεύματος μέσω του κυκλώματος και μια πτώση τάσης κατά μήκος της R_1 . Η τάση εξόδου λοιπόν είναι:

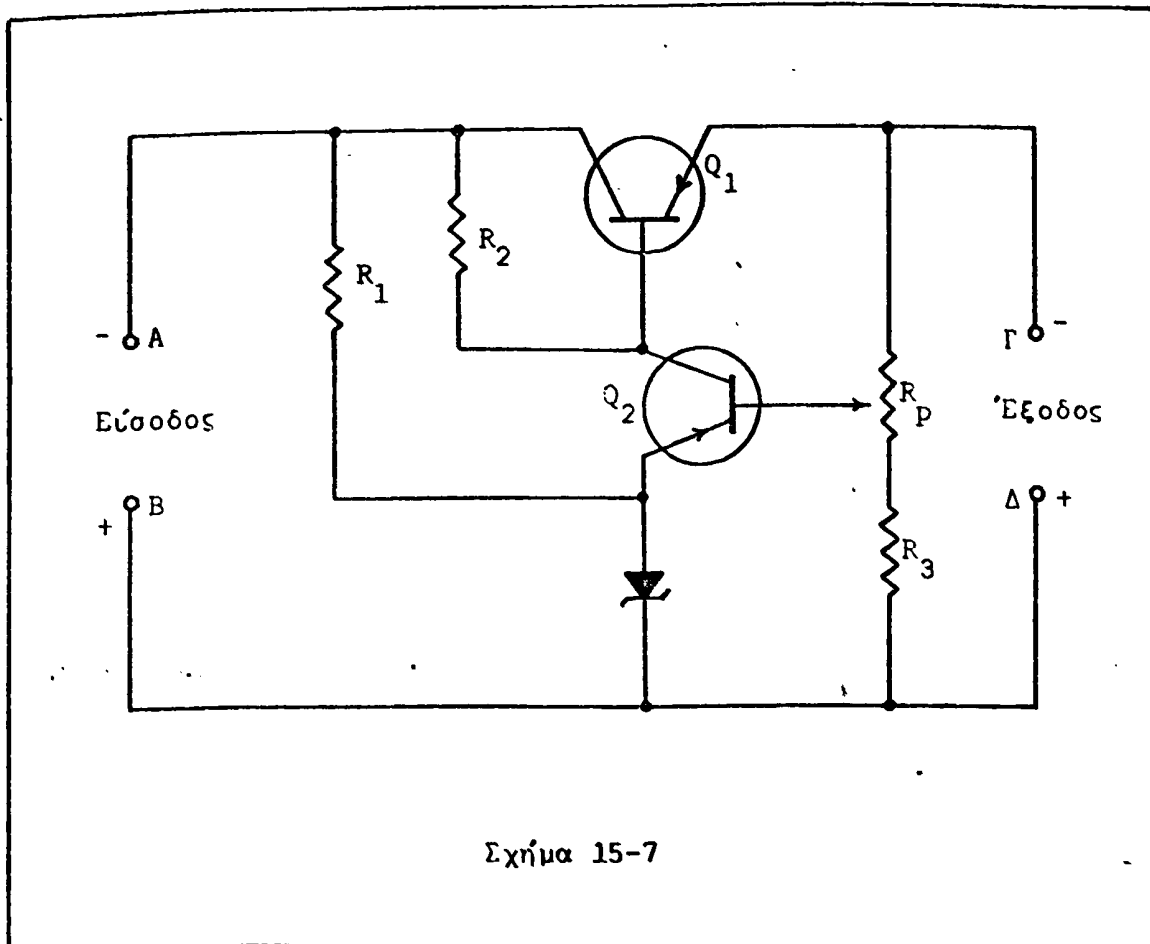
$$V_{out} = V_{in} - i \cdot R_1$$

Αν για οποιονδήποτε λόγο η τάση αυτή V_{out} αυξηθεί, το σημείο Γ θα γίνει ακόμη θετικότερο ως προς το σημείο Δ, άρα και το σημείο Κ θα γίνει ακόμη θετικότερο ως προς το σημείο Μ (εκπομπός). Αυτό συνεπάγεται αύξηση της τάσης πολώσεως εκπομπού-βάσης, δηλαδή ελάττωση της αντιστάσεως της κρυσταλλοτρίοδος. Διέρχεται λοιπόν από την κρυσταλλοτρίοδο -άρα και από την αντίσταση R_1 -περισσότερο ρεύμα, γεγονός που σημαίνει αύξηση της πτώσης τάσης κατά μήκος της R_1 και ελάττωση της τάσης εξόδου V_{out} στην αρχική της τιμή. Ακριβώς αντίστροφα λειτουργεί το κύκλωμα, όταν η τάση εξόδου ελαττωθεί.

Ο σταθεροποιητής εν παραλλήλω δε χρειάζεται προστασία έναντι βραχυκυκλώματος, αλλά παρουσιάζει το σημαντικό μειονέκτημα να διαρρέεται η κρυσταλλοτρίοδος από το μέγιστο ρεύμα, όταν το κύκλωμα εξόδου είναι χωρίς φόρτο (ανοιχτό, οπότε η τάση εξόδου είναι μέγιστη) προκαλώντας έτσι ανάμελη κατανάλωση ισχύος. Η σταθεροποίηση είναι τόσο καλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η δυναμική παράμετρος β της κρυσταλλοτρίοδος και μικρότερη η δυναμική αντίσταση της Zener.

Αναφερόμαστε τώρα σε ένα βελτιωμένο τύπο σταθεροποιητή σε σειρά, που έχει επί πλέον τη δυνατότητα να μεταβάλλει την τάση εξόδου του διατηρώντας



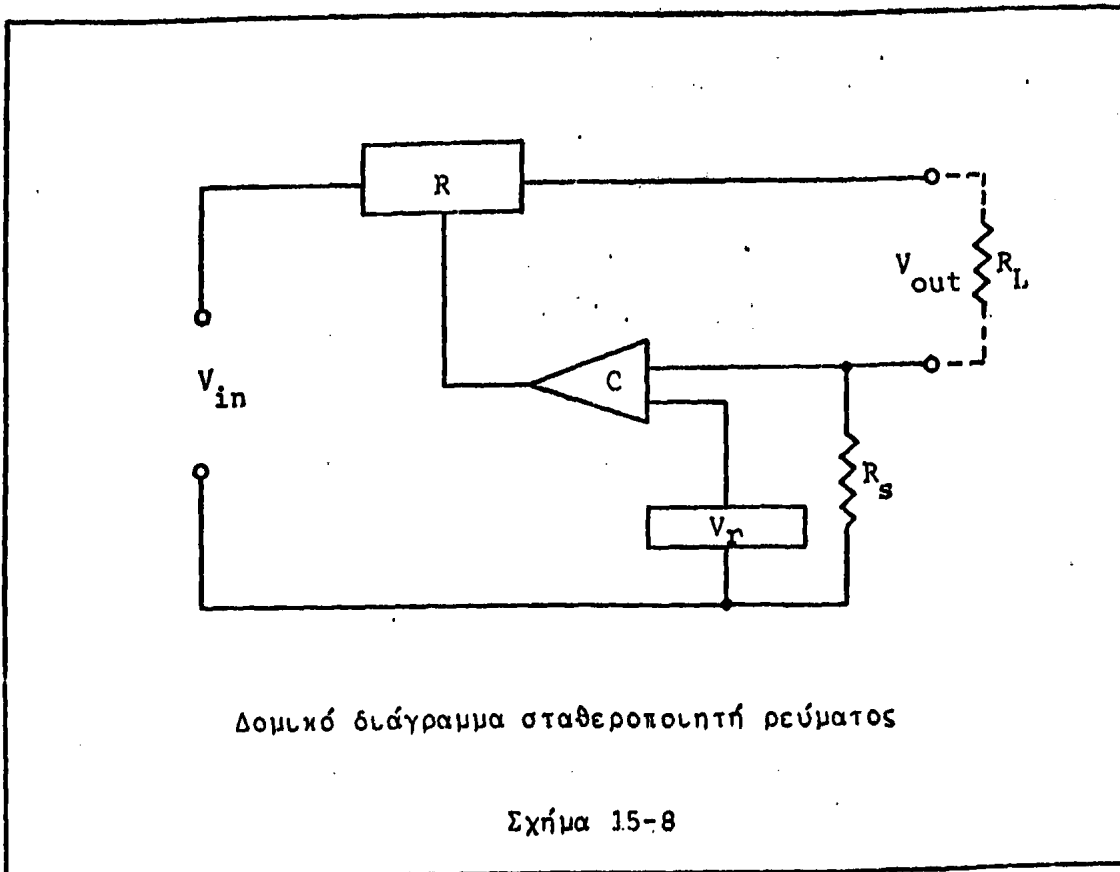


Σχήμα 15-7

την βέβαια σταθερή σε κάθε τιμή, που ρυθμίζεται. Το κύκλωμα του σταθεροποιητή αυτού, που είναι και το κύκλωμα πειραματικής μελέτης, δίνεται στο σχήμα 15-7. Η κρυσταλλοτρίοδος Q_1 αποτελεί το ρυθμιστικό στοιχείο. Επειδή χρησιμοποιούνται κρυσταλλοτρίοδοι pnp κοινός πόλος στο κύκλωμα εισόδου και εξόδου είναι ο θετικός. Η κρυσταλλοτρίοδος Q_2 αποτελεί το στοιχείο ελέγχου, ενώ η διάοδος Zener εξασφαλίζει τη σταθερή τάση αναφοράς και πολώνει τον εκπομπό της Q_2 σε σταθερή τάση ως προς τον κοινό θετικό πόλο. Η αντίσταση R_2 πολώνει τη βάση του Q_1 , ενώ το ποτενσιόμετρο R_p με την αντίσταση R_3 , που συνδέονται παράλληλα προς την έξοδο, αποτελούν το στοιχείο ανιχνεύσεως της τάσης εξόδου.

Ρυθμίζοντας το ποτενσιόμετρο R_p καθορίζουμε τη στάθμη πολώσεως της βάσης του Q_2 άρα και του Q_1 και την τελική τάση εξόδου της διατάξεως. Αν τώρα μετά τον καθορισμό της επιθυμητής τάσης 'εξόδου η τάση αυτή αυξηθεί, ο αρνητικός πόλος Γ γίνεται ακόμη αρνητικότερος ως προς το θετικό πόλο Δ .





Ακόμη αρνητικότερη λοιπόν γίνεται και η βάση του Q_2 , οπότε εφ' όσον η τάση πλώσεως εκποπού διατηρείται σταθερή ως προς Δ , αυξάνει η V_{BE} , άρα και το ρεύμα συλλέκτη του Q_2 , δηλαδή το ρεύμα που διαρρέει την R_2 . Η βάση του Q_1 λοιπόν γίνεται θετικότερη σε σχέση με το κανονικό δυναμικό της και κατά συνέπεια η V_{BE} του Q_1 ελαττώνεται (κρυσταλλοτρίδος pnp). Σαν αποτέλεσμα η αντίσταση του Q_1 αυξάνει και αυξάνει έτσι η πτώση τάσης κατά μήκος του ΑΓ, οπότε το Γ γίνεται θετικότερο και η τάση εξόδου επανέρχεται στην αρχική της τιμή. Ακριβώς αντίστροφα λειτουργεί το κύκλωμα, όταν η σταθεροποιημένη τάση εξόδου ελαττώνεται.

Εκτός από τους σταθεροποιητές τάσης υπάρχουν και οι σταθεροποιητές ρεύματος. Η αρχή λειτουργίας τους δεν διαφέρει ουσιαστικά από την αρχή λειτουργίας του σταθεροποιητή τάσης. Τίθεται απλά σε σειρά με την έξοδο (φόρτος) μια αντίσταση R_s και στη συνέχεια σταθεροποιείται η τάση στα άκρα της αντιστάσεως αυτής (σχήμα 15-8).

Χρησιμοποιούμενα όργανα

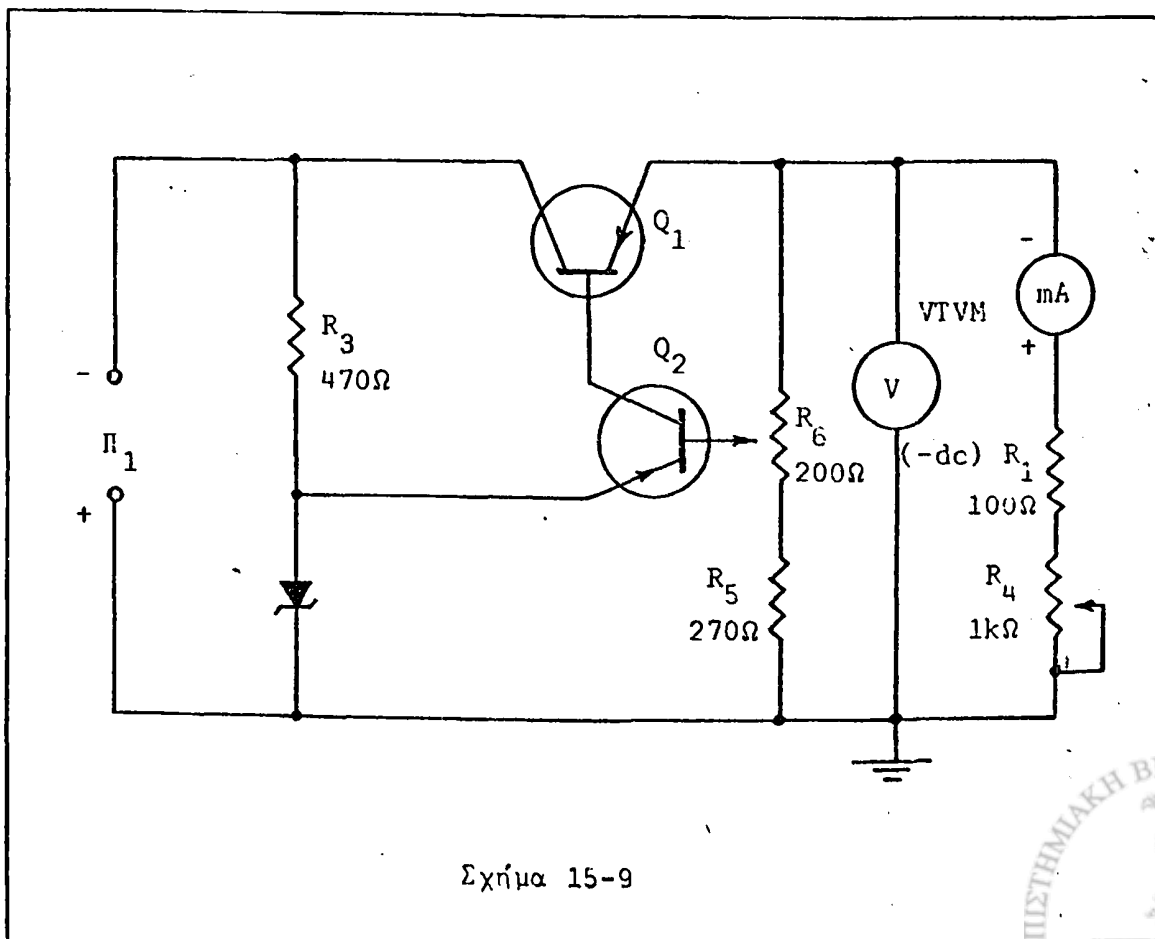


1. Τροφοδοτικό χαμηλής τάσης
2. Ηλεκτρονικό βολτόμετρο
3. Πολύμετρο
4. Δύο κρυσταλλοτρίοδοι pnp
5. Δίοδος Zener
6. Ποτενσιόμετρα: 200Ω-0.5W, 1kΩ-2W
7. Αντιστάσεις: 100Ω-1W, 270Ω-2W (2), 470Ω-0.5W

Πειραματικό μέρος

1. Πραγματοποιείτε το κύκλωμα του σχήματος 15-9. Η αντίσταση R_1 και ο ροοστάτης R_4 αποτελούν το φόρτο καταναλώσεως.

2. Ρυθμίστε τα ποτενσιόμετρα R_4 και R_6 στη μέγιστη τιμή τους. Κατόπιν ρυθμίζοντας την τάση εισόδου (τροφοδοτικό Π_1) στις τιμές του παρακάτω πίνακα μετρείστε τις τιμές της τάσης E_L στα άκρα του φόρτου ($R_1 + R_4$) και του ρεύματος φόρτου. Μηδενίστε κατόπιν την τάση τροφοδοσίας. Προσοχή: Το ρεύμα φόρτου δεν πρέπει να υπερβεί τα 50mA, διότι θα καταστραφεί η κρυσταλλο-



Σχήμα 15-9

E	V	E_L	V	I_L	mA
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
12					

τρόδος Q_1 .

3. Χαράξετε τις καμπύλες $E_L=f(E)$ και $I_L=f(E)$. Από ποιά τιμή τάσης εισόδου και πάνω αρχίζει να λειτουργεί ικανοποιητικά ο σταθεροποιητής; Συγκρίνετε την τιμή αυτή με την τάση Zener της διόδου.

$E_{\min} =$	V	$V_Z =$	V
--------------	---	---------	---

4. Αποσυνδέστε προσωρινά το φόρτο από το κύκλωμα (κλάδος φόρτου αν-οιχτός). Ρυθμίστε το τροφοδοτικό στα 12V και το ποτενσιόμετρο R_6 , έτσι ώστε η τάση εξόδου να είναι $E_L = 8V$ ($I_L=0$). Επανασυνδέστε το φόρτο και συνεχίστε για τις υπόλοιπες τιμές ρεύματος φόρτου του πίνακα, που ακολουθεί. Ρυθμίστε πάλι την πηγή τροφοδοσίας στο μηδέν.

5. Υπολογίστε το συντελεστή σταθεροποίησης φόρτου

$$k = \frac{E_{L1} - E_{L2}}{E_{L1}}$$



	$E_{L_0} = 8V$	$E_{L_0} = 10V$
I_L mA	E_L V	E_L V
0		
10		
20		
30		
40		
50		

όπου E_{L_1} η τάση χωρίς φόρτο και E_{L_2} η τάση με πλήρη φόρτο ($I_L=50mA$) στην έξοδο.

6. Χαράξτε την καμπύλη $E_L = f(I_L)$.

7. Επαναλάβετε τις εργασίες 4, 5 και 6 για τάση εξόδου $E_{L_0}=10V$.

8. Ρυθμίστε την τάση τροφοδοσίας E στα 12V και το ρεύμα εξόδου στα 50mA. Μετρήστε την τάση εξόδου E_L . Ρυθμίστε κατόπιν την τάση τροφοδοσίας E στα 14V και το ρεύμα εξόδου στα 0mA (ανοιχτό κύκλωμα). Μετρήστε πάλι την τάση εξόδου E_L . Υπολογίστε τη μεταβολή ΔE_L και σχετική μεταβολή $\Delta E_L/E_L$ της τάσης εξόδου για τις παραπάνω (δυσμενέστερες) συνθήκες λειτουργίας του σταθεροποιητή.

E V	I_L mA	E_L V
12	50	
14	0	

$\Delta E_L =$	$\Delta E_L/E_L =$
----------------	--------------------



Ερωτήσεις

1. Γιατί οι σταθεροποιητές σε σειρά χρησιμοποιούνται περισσότερο από τους σταθεροποιητές εν παραλλήλω;
2. Ποιοί είναι προτιμώτεροι στις εφαρμογές οι σταθεροποιητές τάσης ή οι σταθεροποιητές ρεύματος;
3. Γιατί όταν ελαττώνεται η τάση πώλωσης του τμήματος εκπομπού- βάσης μιας κρυσταλλοτριόδου αυξάνει η αντίστασή της;
4. Εξηγείστε πώς σταθεροποιεί το κύκλωμα του σχήματος 15-7, όταν η τάση εξόδου του σταθεροποιητή ελαττωθεί;
5. Στο κύκλωμα, που μελετήσατε πειραματικά, εξηγείστε το ρόλο κάθε αντιστάσεως.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Μ. Αναστασιάδου: Μαθήματα ηλεκτρονικής και ραδιοηλεκτρολογίας - Αθήνα 1978.
2. T.Beeforth-H.Goldsmid: Physics of solid state devices - Pion Ltd, London, 1970.
3. J.Brophy: Basic Electronics for scientists - Mc Graw Hill, New York 1972.
4. W.Chow: Principle of tunnel diode circuits - J.Wiley, New York, 1964.
5. R.Cobbold: Theory and applications of the Field effect transistors - Wiley, New York, 1970.
6. K.Everett-E.Jenkins: A safety handbook for science teachers - John Murray, Great Britain, 1980.
7. S.Gentile: Basic theory and application of tunnel diode - Van Nost rand, New York, 1962.
8. H.Gerrish: Learning experiences in transistors and semiconductors Buck, Farmingdale, 1972.
9. W.Gosling: Field Effect Transistors applications - Heywood, London, 1964.
10. B.Gregory: An introduction to Electrical Instrumentation
11. C.Herrick - M.Estrada: Experiments in semiconductor applications and design - J.Wiley, New York, 1967.
12. Κ. Καρούμπαλου - Γ.Φιλοκύπρου: Μαθήματα Ηλεκτρονικής - Αθήνα 1978.
13. M.Kiver - B.van Emden: Transistor laboratory manual - Mc Graw-Hill, New York, 1962.
14. D.Leach: Transistor circuit measurements - Mc Graw-Hill, New York, 1968.
15. R.Millman-Ch.Halkias: Electronic devices and circuits-Mc Graw,Hill, New York, 1967.
16. RCA: Thyristor and rectifier manual - USA, 1975.
17. RCA: Transistor, Thyristor and Diode manual - USA, 1969.
18. Ch.Roth: A programmed text on use of the oscilloscope - Prentice Hall, London, 1970.
19. J.Seymour: Physical Electronics - Pitman, London, 1972.



20. L. Sevin: Field-effect transistors-Mc Graw-Hill, New York, 1965.
21. G. Thalmann: Symboles électroniques - Spes Dunod, Lausanne, 1973.
22. Α. Ζερβάκου: Τεχνολογία ηλεκτρονικών εξαρτημάτων - Αθήνα 1975.



Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

<u>Εισαγωγή</u>	σελ.
Πρόλογος	
Ασφάλεια Εργαστηρίου	5
Σύμβολα ηλεκτρονικών στοιχείων και διατάξεων	10
Στοιχεία τεχνολογίας ηλεκτρονικών εξαρτημάτων	13
<u>Ασκήσεις</u>	
1. Κυκλώματα διακορύσεως - Κυκλώματα ολοκληρώσεως	20
2. Ηλεκτρονικές λυχνίες κενού - Μελέτη πεντιόδου	31
3. Μελέτη κρυσταλλοδιόδου - Κυκλώματα ανορθώσεως	51
4. Μελέτη κρυσταλλοδιόδου Zener - Σταθεροποίηση τάσης	64
5. Μελέτη κρυσταλλοδιόδου tunnel - Κυκλώματα ταλαντώσεων	76
6. Μελέτη κρυσταλλοτριόδου με κοινή βάση	
Ενισχυτής τάσης με κοινή βάση	88
7. Κρυσταλλοτριόδος με κοινό εκπομπό	
Ενισχυτής τάσης κοινού εκπομπού	105
8. Γραμμές φόρτου - Καμπύλες μέγιστης καταναλώσεως ισχύος	120
9. Ενισχυτής ισχύος μιας βαθμίδας	132
10. Ενισχυτής δύο βαθμίδων με σύζευξη RC	143
11. Μελέτη κρυσταλλοτριόδου F.E.T.	157
12. Μελέτη ελεγχόμενου ανορθωτή πυριτίου	175
13. Μελέτη thermistor	199
14. Φωτοηλεκτρικές διατάξεις	212
15. Μεταβλητός σταθεροποιητής τάσης	233
Βιβλιογραφία	246
Περιεχόμενα	248



Π Ρ Ο Λ Ο Γ Ο Σ

Το βιβλίο αυτό απευθύνεται κύρια στους προπτυχιακούς φοιτητές του Φυσικού Τμήματος του Πανεπιστημίου μας και περιλαμβάνει την πρώτη σειρά Εργαστηριακών Ασκήσεων Ηλεκτρονικής Φυσικής, που αναφέρονται στις βασικές λειτουργίες των κρυσταλλολυχνιών και τα στοιχειώδη κυκλώματα ενισχύσεως και σταθεροποιήσεως. Υπάρχει ακόμη μία άσκηση επί των ηλεκτρονικών λυχνιών, επειδή θεωρούμε εκπαιδευτικά σκόπιμο να ασχοληθούν οι φοιτητές και με τις ηλεκτρονικές λυχνίες, παρόλο που θεωρούνται ξεπερασμένη τεχνολογία, διότι η κατανόηση της λειτουργίας ενός ηλεκτρονικού μηχανισμού γίνεται ευχερέστερα με τη θεώρηση ενός είδους φορέων (ηλεκτρόνια) αντί δύο (οπές- ηλεκτρόνια), όπως συμβαίνει στις κρυσταλλολυχνίες.

Η δεύτερη σειρά Εργαστηριακών Ασκήσεων, που θα εκδοθεί για το επόμενο ακαδημαϊκό έτος, περιλαμβάνει ασκήσεις συνθετώτερων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, ολοκληρωμένων, λογικών πυλών κλπ.

Το πειραματικό μέρος των ασκήσεων βασίζεται κατά ένα ποσοστό στο εκπαιδευτικό τεύχος "Learning experiences in transistors,, που επιμελήθηκε ο καθηγητής H.H. Gerrish.

Ιδιαίτερα ευχαριστούμε τον Φυσικό κ. Δημήτρη Παπαδημητρίου για τη συμβολή του στη συγγραφή της παλαιάς εκδόσεως του βιβλίου "Εργαστηριακές Ασκήσεις Ηλεκτρονικών και Κρυσταλλικών λυχνιών,, το οποίο αποτέλεσε και βάση του παρόντος.

Δ. Μ. Μ.

Γ. Ε. Γ.

Ιωάννινα 1983

