



## ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΥΨΗΛΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ (Θ)

### Ενότητα 11: Μικροκυματική Τεχνολογία

**ΔΙΔΑΣΚΩΝ:** Δρ. Στυλιανός Τσίτσος  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΤΕ



# Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



# Ενότητα 11

---

## Μικροκυματική Τεχνολογία

Δρ. Στυλιανός Τσίτσος

# Περιεχόμενα ενότητας

---

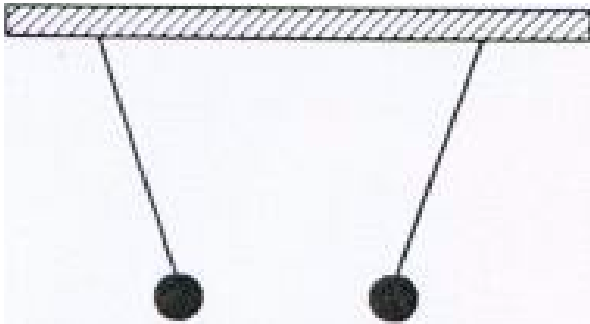
# Σκοποί ενότητας

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>: ΒΑΣΙΚΑ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

- Τα μικροκυματικά στοιχεία είναι **παθητικές** και **ενεργές** συσκευές που χρησιμοποιούνται συχνά στο εργαστήριο ή σε πάγκους δοκιμών.
- Τα **παθητικά στοιχεία** περιλαμβάνουν κεραίες, εξασθενητές, συζεύκτες, μετρητές συχνότητας και μη αντιστρεπτές συσκευές.
- Τα θερμίστορ και οι ανιχνευτές διόδου είναι παθητικά στοιχεία αλλά πρέπει να λειτουργούν με ενεργά στοιχεία όπως οι ενισχυτές.
- Άλλα ενεργητικά στοιχεία αποτελούν οι μετρητές ισχύος, οι μετρητές *SWR*, και οι μικροκυματικές γεννήτριες.

## Συζευκτική δράση



**Σχήμα 5.1:** Η μηχανική ενέργεια ενός ταλαντευόμενου εκκρεμούς προκαλεί την κίνηση του άλλου εκκρεμούς.

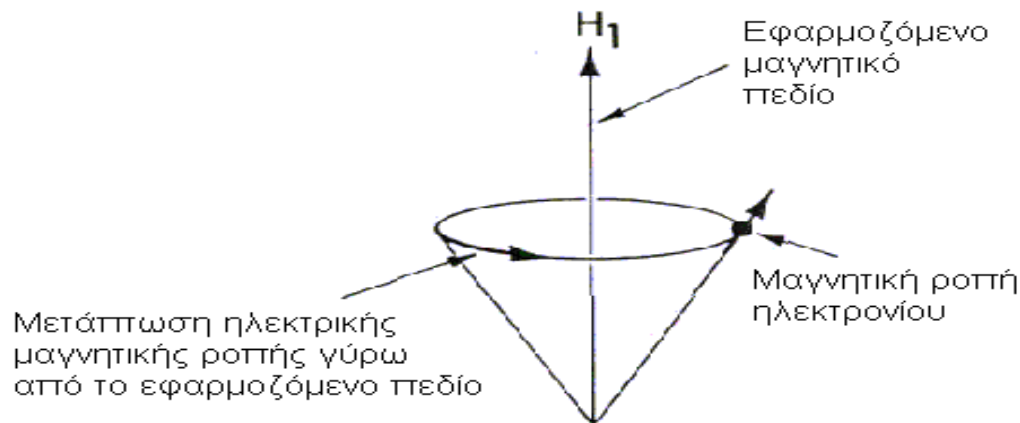
Οι μηχανικές και ηλεκτρικές ταλαντώσεις σε ένα σύστημα μπορούν να προκαλέσουν ταλαντώσεις σε ένα άλλο σύστημα της ίδιας φύσεως. Αυτή η ιδιότητα είναι πολύ χρήσιμη στους μικροκυματικούς συζεύκτες.



# Μικροκυματική Τεχνολογία

## Γυρομαγνητική δράση

- Η εφαρμογή ενός φερρίτη στα μικροκύματα είναι μοναδική λόγω της ιδιότητας της μη αντιστρεπτότητας.
- Όταν ένα κομμάτι φερρίτη τοποθετείται μεταξύ δύο μονίμων μαγνητικών πόλων, δηλαδή βόρειου και νότιου, τα μικροκυματικά σήματα που εισέρχονται στον φερρίτη από τη μία κατεύθυνση θα περάσουν με μικρή εξασθένηση, ενώ εκείνα που εισέρχονται από την αντίθετη κατεύθυνση θα απορροφηθούν.



**Σχήμα 5.2:** Γυρομαγνητική αλληλεπίδραση σε φερρίτη.

# Μικροκυματική Τεχνολογία

## Δράση κοιλότητας

- Μία **κοιλότητα** είναι μία μεταλλική κλειστή επιφάνεια που μπορεί να αποθηκεύσει ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που εγχύεται στην κοιλότητα μέσα από μία μικρή οπή.
- Οι διαστάσεις της μικροκυματικής κοιλότητας πρέπει να είναι ίσες με το μισό μήκος κύματος του σήματος που μας αφορά.
- Η ικανότητα αποθήκευσης μικροκυματικής ενέργειας καθορίζεται από τον **παράγοντα ποιότητας  $Q$** , ο οποίος είναι ο λόγος της αποθηκευμένης ενέργειας προς την ενέργεια που δαπανάται εξαιτίας αντιστάσεων ή διαρροών.
- Ο παράγοντας ποιότητας σχετίζεται επίσης με τη μηχανική ευστάθεια, δηλαδή τη διαστολή και τη συστολή ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Οποιαδήποτε μεταβολή στις διαστάσεις λόγω θερμοκρασίας προκαλεί μετατόπιση στην συχνότητα συντονισμού. Συνεπώς, όσο μεγαλύτερος είναι ο παράγοντας ποιότητας, τόσο περισσότερο μηχανικώς σταθερή είναι η κοιλότητα. Ο παράγοντας ποιότητας είναι επίσης διαφορετικός όταν υπάρχει φορτίο στην κοιλότητα.
- Μία κοιλότητα χωρίς φορτίο μπορεί να επιτύχει ένα  $Q$  μέχρι  $105$ .
- Οι κοιλότητες χρησιμοποιούνται ως τμήματα αποθήκευσης ενέργειας σε μικροκυματικές λυχνίες και ως φίλτρα. Επίσης χρησιμοποιούνται σε μετρητές συχνότητας και ως σημαντικά τμήματα σε μικροκυματικές γεννήτριες.

# Μικροκυματική Τεχνολογία

## Εξασθενητές

- Οι **εξασθενητές** είναι στοιχεία που μπορούν να ελαττώσουν τη μικροκυματική ισχύ. Υπάρχουν δύο τύποι εξασθενητών: οι **σταθεροί** και οι **μεταβλητοί**. Οι **τερματισμοί** ανήκουν σε μία ειδική κατηγορία εξασθενητών.

- Η εξασθένιση μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους:

- α) **με χρήση άμμου από γραφίτη**. Όταν ένα μικροκυματικό σήμα συναντά την άμμο, το ρεύμα που παράγεται μετατρέπει την ενέργεια του σήματος σε θερμότητα.

- β) **με χρήση μεταλλικής ράβδου ή ελάσματος** τοποθετημένα στο κέντρο του ηλεκτρικού πεδίου. Το ηλεκτρικό πεδίο επάγει μία ροή ρεύματος με αποτέλεσμα μία ωμική απώλεια ισχύος. Η μέθοδος του ελάσματος χρησιμοποιείται σε μεταβλητούς εξασθενητές.

- Ένας σταθερός εξασθενητής ελαττώνει την ισχύ του σήματος εισόδου κατά ένα σταθερό ποσοστό, δηλαδή *3 dB*, *10 dB* κλπ.

## Μικροκυματική Τεχνολογία

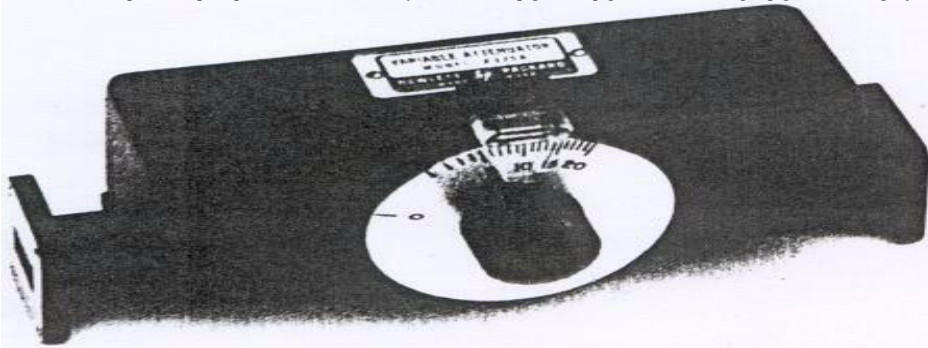
- Ο τερματισμός απορροφά ολικώς την ισχύ του σήματος εισόδου (με αποτέλεσμα τη θερμότητα). Επομένως το ένα άκρο του τερματισμού είναι κλειστό επειδή δεν έχουμε ισχύ εξόδου.
- Για έναν τερματισμό που χρησιμοποιεί μεταλλική ράβδο ή έλασμα η εσωτερική του γεωμετρία ελαττώνεται σταδιακά για να ελαχιστοποιεί την ανάκλαση.
- Οι τερματισμοί είναι πολύ χρήσιμοι σε δοκιμές ως το τελευταίο στάδιο για να τερματίσουν μία γραμμή μεταφοράς, παράγοντας έτσι μικρή ή καθόλου ανάκλαση.



**Σχήμα 5.3:** Ένας τερματισμός κυματοδηγού.

# Μικροκυματική Τεχνολογία

- Το έλασμα μετακινείται από το κουμπί χειρισμού, έτσι ώστε τμήμα του ελάσματος χαμηλώνει μέσα στον κυματοδηγό και έτσι το ποσόν της εξασθένησης μεταβάλλεται.
- Οι μεταβλητοί εξασθενητές χρησιμοποιούνται ως ρυθμιστές στάθμης ισχύος.
- Κατά την εξασθένηση, συνήθως έχουμε και κάποια ανάκλαση και έτσι οι εξασθενητές σχεδιάζονται για να ελαχιστοποιούν την ανάκλαση. Το  $VSWR$ , αυξάνει ελαφρώς καθώς το έλασμα εισέρχεται όλο και περισσότερο στον κυματοδηγό, δηλαδή καθώς αυξάνει η τιμή της εξασθένησης.
- Κατά την εκλογή ενός εξασθενητή πρέπει να επιλέγεται το κατάλληλο πεδίο συχνότητας. Ακόμη, πρέπει να ληφθούν υπόψη το πεδίο εξασθένησης (π.χ. 0 ως 60 dB) και η ακρίβεια ανάγνωσης της ένδειξης ενός μεταβλητού εξασθενητή.



**Σχήμα 5.4:** Μεταβλητός εξασθενητής κυματοδηγού.

## Κατευθυντικοί συζεύκτες

- Ένας κατευθυντικός συζεύκτης επιτρέπει ένα καθορισμένο μέρος της μικροκυματικής ισχύος που ταξιδεύει στην κύρια γραμμή να συζευχθεί με τη δευτερεύουσα γραμμή σε μία επιθυμητή κατεύθυνση ροής.
- Οι κατευθυντικοί συζεύκτες μπορεί να έχουν τη μορφή κυματοδηγών, ομοαξονικών γραμμών και ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.



**Σχήμα 5.5:** Κατευθυντικοί συζεύκτες κυματοδηγού.

## Μικροκυματική Τεχνολογία

- Η **σύζευξη** γίνεται μόνο όταν η ισχύς εισέρχεται στον κυματοδηγό από δεξιά προς τα αριστερά. Ιδανικά, καμία σύζευξη δεν συμβαίνει αν η ισχύς εισέλθει από τα αριστερά προς τα δεξιά. Στην πράξη όμως, υπάρχει ένα μικρό ποσό ισχύος.
- Το πόσο καλά ένας κατευθυντικός συζεύκτης διατηρεί την κατευθυντική ιδιότητα, δίνεται από την **κατευθυντικότητα** του. Αν η κατευθυντικότητα ενός συζεύκτη είναι 40 dB, τότε 0,01% της ισχύος που εισέρχεται στην κύρια γραμμή κατά τη λάθος κατεύθυνση θα βρει το δρόμο προς τη δευτερεύουσα έξοδο.
- Για να επιτευχθεί η σύζευξη χρησιμοποιούνται δύο τρύπες στην κύρια γραμμή του κυματοδηγού που απέχουν μεταξύ τους απόσταση μισό μήκος οδηγούμενου κύματος.

# Μικροκυματική Τεχνολογία

## Ανιχνευτές ισχύος

- Οι **ανιχνευτές διόδου** και τα **θερμίστορ** μπορούν να ανιχνεύσουν τη μικροκυματική ισχύ, αλλά η αρχή λειτουργίας τους είναι διαφορετική.
- **Θερμίστορ** σημαίνει θερμική αντίσταση (thermal resistor). Η τιμή της αντίστασης ενός θερμίστορ είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας.
- Μερικά θερμίστορ έχουν θετικούς συντελεστές, δηλαδή οι τιμές της αντίστασης αυξάνουν με τη θερμοκρασία και μερικά αρνητικούς συντελεστές, δηλαδή έχουμε μείωση της τιμής της αντίστασης με τη θερμοκρασία.
- Όταν τοποθετηθούν στην πορεία της διάδοσης, η μικροκυματική ισχύς θερμαίνει το θερμίστορ το οποίο ακολουθείται από έναν ενισχυτή. Η αλλαγή της αντίστασης του θερμίστορ λόγω θερμότητας, δίνει στον ενισχυτή μία έξοδο που είναι ανάλογη της μικροκυματικής ισχύος. Η μέτρηση είναι συνήθως ανεξάρτητη της συχνότητας του σήματος.
- Οι **ανιχνευτές διόδου** (ή κρυσταλλικοί ανιχνευτές), είναι ημιαγωγικά στοιχεία. Η ανορθωτική ιδιότητα της διόδου δίνει είτε μία  $dc$  είτε μία αργά μεταβαλλόμενη έξοδο τάσεως που εξαρτάται από το αν το σήμα είναι σταθερό ή μεταβλητό.



# Μικροκυματική Τεχνολογία

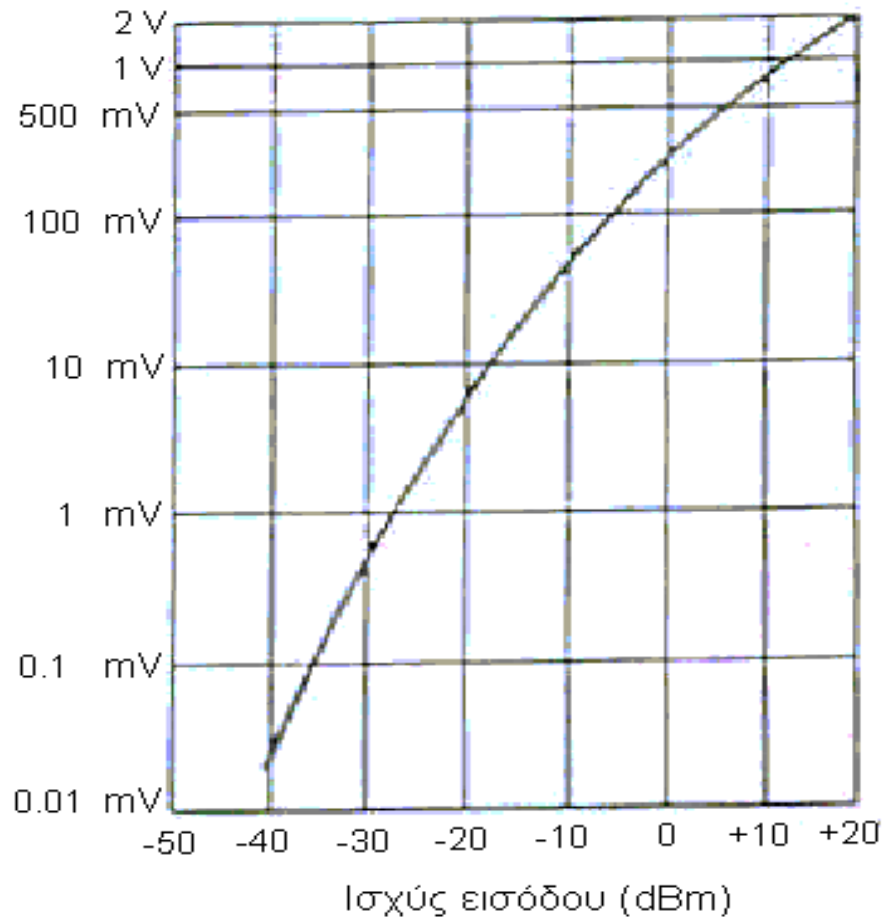
- Γενικά τα θερμίστορ δίνουν περισσότερο ακριβείς μετρήσεις της στάθμης ισχύος από τους κρυσταλλικούς ανιχνευτές. Δυστυχώς όμως, τα θερμίστορ έχουν την τάση να καθυστερούν όσον αφορά την αντίδρασή τους, στη μεταβολή των σημάτων ισχύος.
- Το γεγονός ότι ένας κρυσταλλικός ανιχνευτής δεν δίνει ακριβείς μετρήσεις ισχύος οφείλεται στη μη γραμμικότητά του.
- Η μη γραμμικότητα μπορεί να προσεγγιστεί μαθηματικά ως μία σειρά από πολυώνυμα:

$$R = aP + bP^2 + cP^3 + \dots \quad (5.1)$$

όπου  $R$  είναι η απόκριση της διόδου,  $P$  είναι η ισχύς του σήματος που μετρείται και  $a$ ,  $b$  και  $c$  είναι οι συντελεστές του πολυωνύμου. Για τις περισσότερες περιπτώσεις αρκεί να προσεγγίσουμε ως το  $P^2$  μόνο (νόμος του τετραγώνου). Η απόκριση της διόδου είναι επίσης ανεξάρτητη της συχνότητας του σήματος.

# Μικροκυματική Τεχνολογία

Τάση εξόδου



**Σχήμα 5.6:** Η τάση εξόδου της διόδου σε σχέση με την εφαρμοζόμενη μικροκυματική ισχύ.

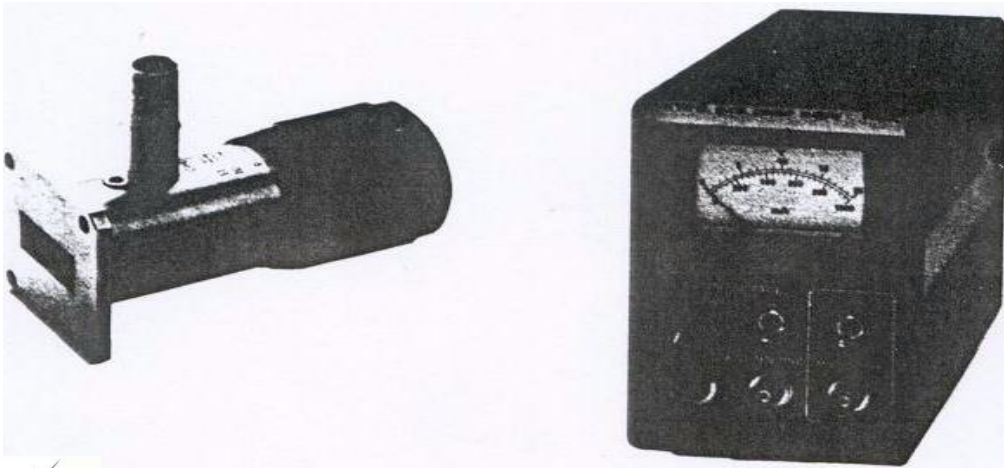
# Μικροκυματική Τεχνολογία

## Μικροκυματικές γεννήτριες

- Οι μικροκυματικές γεννήτριες ή ταλαντωτές, είναι γενικά δύο κατηγοριών: λυχνίες κενού και στερεάς καταστάσεως.
- Το κλύστρον, η λυχνία οδεύοντος κύματος (*TWT*), το μάγνητρον, το γύροτρον και οι ενισχυτές διασταυρούμενου πεδίου είναι λυχνίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ταλαντωτές. Συνήθως παράγουν μεγάλη μικροκυματική ισχύ (*Watts* μέχρι *MWatts*) και δεν τις συναντούμε σε πάγκους εργαστηρίων, εκτός από το κλύστρον χαμηλής ισχύος του οποίου η έξοδος κυμαίνεται από *mW* μέχρι *W*.
- Οι συσκευές στερεάς καταστάσεως που χρησιμοποιούνται ως ταλαντωτές είναι *δίοδοι Gunn* και *IMPATT*. Αυτοί οι ταλαντωτές στερεάς καταστάσεως μπορούν να παράγουν μικροκυματική ισχύ από μερικά *mW* μέχρι μερικά *W*.

## Μικροκυματική Τεχνολογία

- Ο ταλαντωτής *Gunn* είναι ένας κρύσταλλος *n*-τύπου γαλλίου-αρσενικού στον οποίο μία εφαρμοζόμενη *dc* τάση προκαλεί ομαδοποίηση των ηλεκτρονίων εξαιτίας της ανομοιόμορφης κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου και παράγει μικροκυματικά σήματα στα *10 GHz* περίπου.
- Το φυσικό μέγεθος του κρυστάλλου καθορίζει τη συχνότητα εξόδου.
- Η ισχύς εξόδου περιορίζεται από τη δυσκολία απομάκρυνσης θερμότητας από τον κρύσταλλο.



Σχήμα 5.7:

Ένας ταλαντωτής *Gunn* κυματοδηγού με το τροφοδοτικό του.

# Μικροκυματική Τεχνολογία

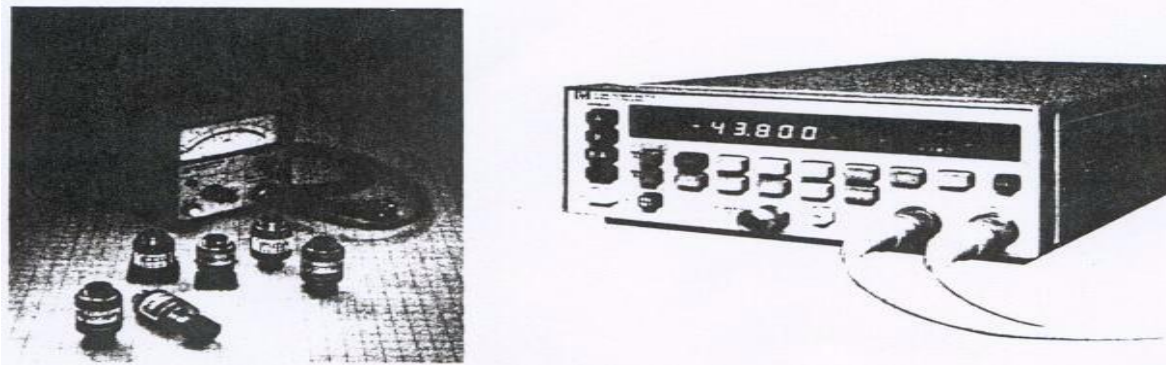
## Μετρητές

- Συνήθεις εργαστηριακοί μετρητές περιλαμβάνουν **μετρητές ισχύος, μετρητές λόγου στασίμων κυμάτων (*SWR*), και μετρητές συχνότητας.**
- Ο μετρητής ισχύος και ο μετρητής *SWR* είναι ενεργές συσκευές, δηλαδή απαιτούν ισχύ για να λειτουργήσουν.
- Ένας μετρητής συχνότητας είναι μία κοιλότητα που συνδέεται με έναν κυματοδηγό (ή ομοαξονικό καλώδιο) μέσω ενός μικρού ανοίγματος. Επομένως, ο μετρητής συχνότητας δεν απαιτεί ισχύ για να λειτουργήσει.

# Μικροκυματική Τεχνολογία

## - Μετρητές ισχύος

- Ο μετρητής ισχύος αποτελείται από όλα τα ηλεκτρονικά εκτός από τον ανιχνευτή θερμίστορ, με τον οποίο η μικροκυματική ισχύς μπορεί να ανιχνευθεί από το αποτέλεσμα θέρμανσης στον θερμίστορ.
- Το θερμίστορ πρέπει να είναι συμβατό με τον μετρητή ισχύος. Η μικρότερη κλίμακα για τον αναλογικό μετρητή είναι  $-50 \text{ dBm}$  και η μεγαλύτερη κλίμακα είναι  $10 \text{ dBm}$ .

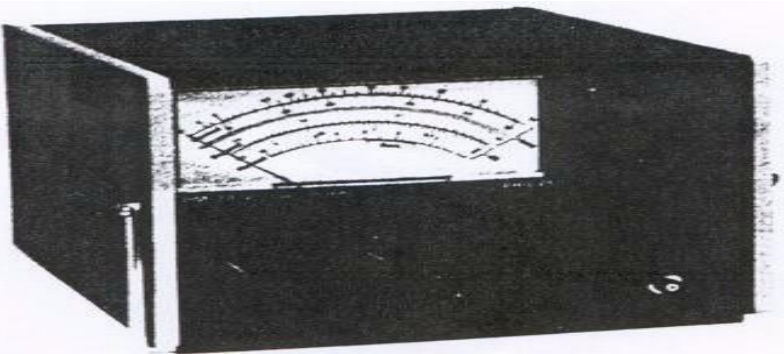


**Σχήμα 5.8:** (Α) Αναλογικός μετρητής ισχύος (Β) Ψηφιακός μετρητής ισχύος.

# Μικροκυματική Τεχνολογία

## -Μετρητής SWR

- Ο μετρητής *SWR* είναι ένας ενισχυτής τάσεως χαμηλού θορύβου που εξάγει πληροφορία τάσεως σχετικά με την ανιχνευόμενη ισχύ, από τη δίοδο κρυστάλλου.
- Ο μετρητής *SWR* μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετρήσει τη σχετική στάθμη ισχύος δύο ισχύων καθώς και το *VSWR* ενός στασίμου κύματος. Η σχετική μέτρηση ισχύος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πειράματα σε απώλειες επιστροφής και απώλειες παρεμβολής.



**Σχήμα 5.9:** Ένας μετρητής λόγου στασίμου κύματος (*SWR*).

# Μικροκυματική Τεχνολογία

## - Μετρητής συχνότητας

- Το κύριο στοιχείο ενός μετρητή συχνότητας είναι η συντονισμένη κοιλότητα.
- Συνήθως το μήκος της κοιλότητας (αν η κοιλότητα είναι κυλινδρική) είναι ο καθοριστικός παράγοντας για τη συχνότητα συντονισμού. Τυπικά το μήκος είναι ίσο με το μισό του μήκους κύματος.
- Το μήκος της κοιλότητας μπορεί να ρυθμιστεί μηχανικά από ένα ηλεκτρικό βραχυκύκλωμα, έτσι ώστε το νέο μήκος, δηλαδή η νέα συχνότητα συντονισμού να είναι η ίδια με το μετρούμενο σήμα.
- Υπάρχουν δύο τύποι μετρητών συχνότητας (οι οποίοι μερικές φορές ονομάζονται και μετρητές κύματος): ο **τύπος απορρόφησης** και ο **τύπος μετάδοσης**. Οι εργαστηριακοί μετρητές συχνότητας είναι συνήθως τύπου απορροφήσεως.



## Μικροκυματική Τεχνολογία

- Αν η συχνότητα του σήματος είναι ίδια με τη συχνότητα συντονισμού της κοιλότητας, σχεδόν όλο το σήμα της κύριας γραμμής θα απορροφηθεί από την κοιλότητα η οποία αποθηκεύει την ενέργεια. Ένας μετρητής ισχύος τοποθετημένος στο άκρο της γραμμής μεταφοράς θα καταγράψει πολύ μικρή ισχύ.
- Αν η συχνότητα του σήματος δεν συμπίπτει με τη συχνότητα συντονισμού της κοιλότητας, η ισχύς του σήματος θα υποστεί μικρή ή καθόλου απώλεια.



**Σχήμα 5.10:** Ένας μετρητής συχνότητας κυματοδηγού.

## Μικροκυματική Τεχνολογία

- Μετρητές συχνότητας τύπου απορρόφησης είναι διαθέσιμοι για συνδέσεις κυματοδηγού και ομοαξονικού καλωδίου.
- Η τυπική ακρίβεια είναι  $\pm 0,1\%$ .
- Η υγρασία και η θερμοκρασία επηρεάζουν το διηλεκτρικό μέσα στην κοιλότητα καθώς και τις φυσικές διαστάσεις της κοιλότητας και συνεπώς την ακρίβεια του μετρητή.

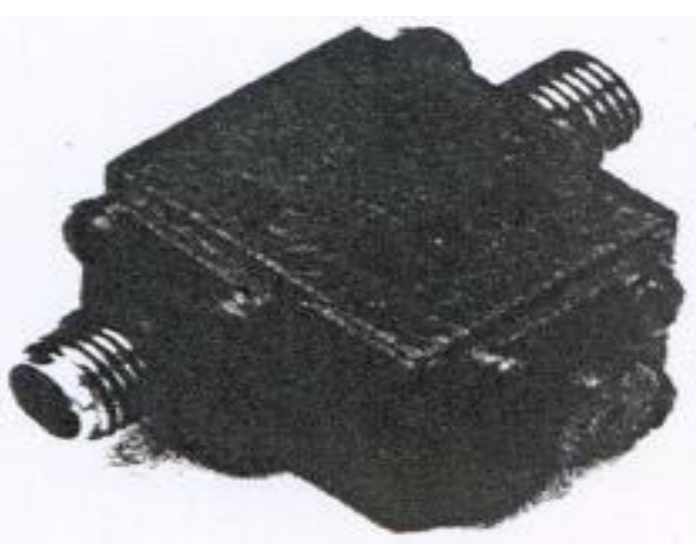
# Μικροκυματική Τεχνολογία

## Μη-αντιστρεπτές συσκευές

- Τόσο οι απομονωτές όσο και οι κυκλοφορητές είναι μη-αντιστρεπτές συσκευές που χρησιμοποιούν φερρίτες πολωμένους από στατικά μαγνητικά πεδία.
- Ένας ιδανικός απομονωτής είναι όπως μία ιδανική δίοδος χαμηλής συχνότητας. Υπάρχει 100% αγωγή κατά την προς τα εμπρός κατεύθυνση και 0% αγωγή στην αντίστροφη κατεύθυνση.
- Ένας απομονωτής τοποθετημένος μπροστά από μία γεννήτρια σήματος δεν θα επηρεάσει το προς τα εμπρός σήμα, αλλά θα αποτρέψει κάθε ανακλώμενο σήμα να φτάσει - και συνεπώς να καταστρέψει - τη γεννήτρια.
- Το πόσο καλά λειτουργεί ένας απομονωτής δίνεται από την προς τα εμπρός απώλεια παρεμβολής και την απομόνωσή του. Η προς τα εμπρός απώλεια παρεμβολής ιδανικά θα είναι 1 ή αλλιώς 0 dB και πρακτικά το κατά δυνατόν μικρότερη. Η απώλεια ισχύος στον απομονωτή κατά την εμπρός κατεύθυνση είναι αναπόφευκτη.

## Μικροκυματική Τεχνολογία

- Η απομόνωση είναι ένα μέτρο της εξασθένησης των σημάτων που ταξιδεύουν στην αντίστροφη κατεύθυνση. Τυπικές τιμές απομόνωσης είναι  $30\text{ dB}$  και  $40\text{ dB}$ .
- Οι απομονωτές είναι διαθέσιμοι στη μορφή κυματοδηγών, ομοαξονικών καλωδίων και ταινιογραμμών.



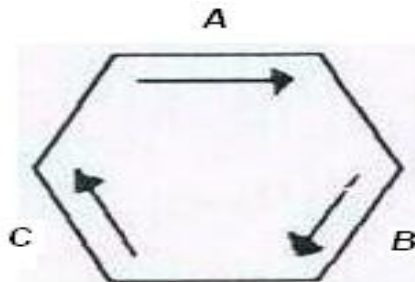
**Σχήμα 5.11:** Ένας ομοαξονικός απομονωτής.

# Μικροκυματική Τεχνολογία

## - Κυκλοφορητής

• Ένα μικροκυματικό σήμα που εισέρχεται στη θύρα *A* θα εξέλθει από τη θύρα *B*, ιδανικά με  $0\text{ dB}$  εξασθένιση. Κανένα σήμα οποιουδήποτε πλάτους δε θα εμφανιστεί από τη θύρα *A* στη θύρα *C*.

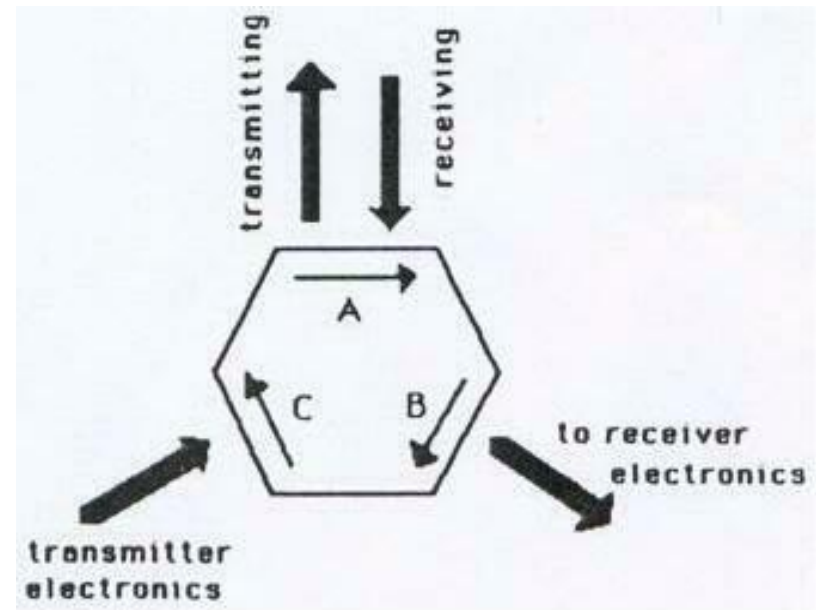
Σχήμα 5.12: α) Το σύμβολο ενός κυκλοφορητή



β) Ένας ομοαξονικός κυκλοφορητής.

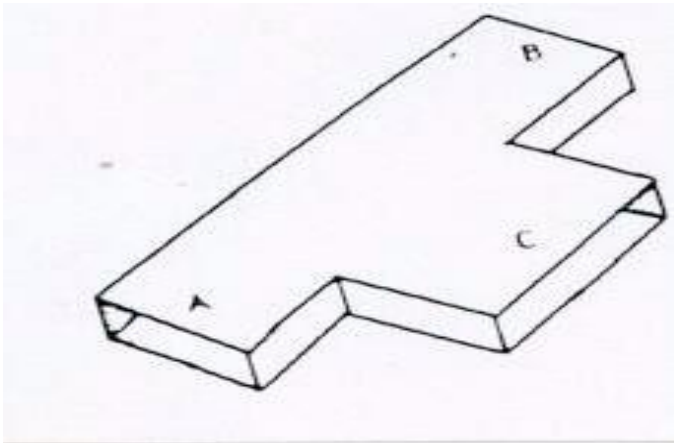


Σχήμα 5.14: Μία εφαρμογή του κυκλοφορητή.

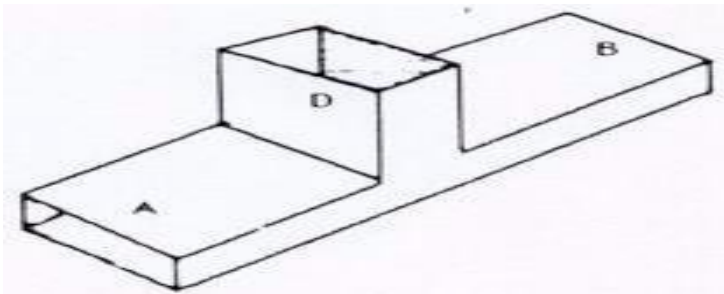


## Τμήματα T

Τα τμήματα  $T$  είναι κυματοδηγοί με μία ή περισσότερες πλάγιες θύρες.



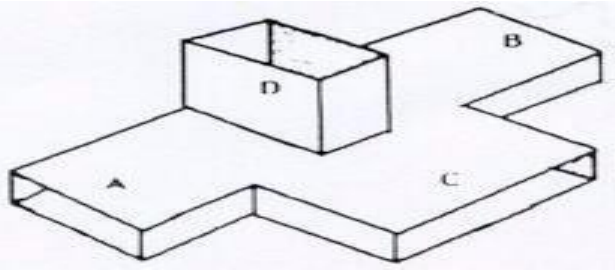
Σχήμα 5.16: Ένα διακλαδισμένο  $T$  κυματοδηγού.



Σχήμα 5.17: Ένα  $T$  σε σειρά κυματοδηγού.

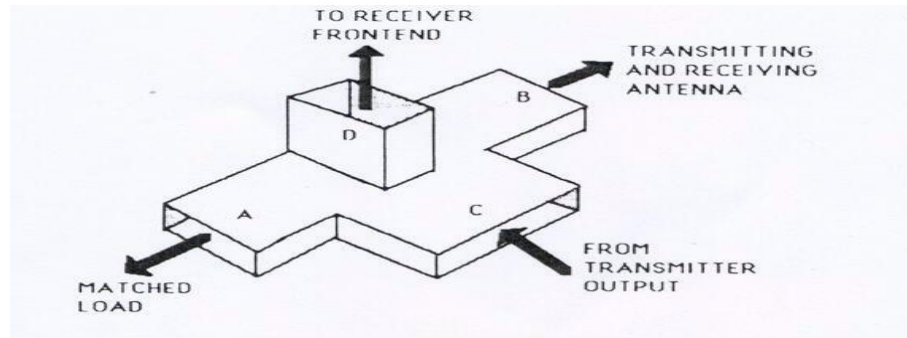
# Μικροκυματική Τεχνολογία

Σχήμα 5.18: Ένα μαγικό  $T$  κυματοδηγού.



Είσοδος	Έξοδος
$A(1/2), B(1/2)$	$C(1), D(0)$
$C(1)$	$A(1/2), B(1/2), D(0)$
$D(1)$	$A(1/2), B(1/2), 180^\circ$ με το $A), C(0)$

Πίνακας 5.1



Σχήμα 5.19: Μία εφαρμογή του μαγικού  $T$ .

# Τέλος Ενότητας

---

