



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Μικροκυματικές διατάξεις

Ενότητα 3: Φερρίτες και διατάξεις φερριτών

Σταύρος Κουλουρίδης

Πολυτεχνική

Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας

Υπολογιστών

Σκοποί ενότητας

- Ιδιότητες των φερριτών και η εκμετάλλευση τους στην κατασκευή χρήσιμων μικροκυματικών δικτύων



Περιεχόμενα ενότητας

- Μαγνητικά υλικά
- Ιδιότητες των φερριτών
- Διατάξεις φερριτών



Μαγνητικά υλικά

- Παραμαγνητικά: έχουν μαγνητική διαπερατότητα ελάχιστα μεγαλύτερη της μονάδας
- Διαμαγνητικά: έχουν μαγνητική διαπερατότητα ελάχιστα μικρότερη της μονάδας
- Φερρομαγνητικά: υλικά τα οποία αποτελούνται από μικρές περιοχές, με προσανατολισμένες ατομικές μαγνητικές διπολικές ροπές, ακόμα και χωρίς την παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Η εφαρμογή εξωτερικού πεδίου προσανατολίζει όλες τις μαγνητικές ροπές με αποτέλεσμα μια μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα. Η απομάκρυνση του πεδίου δεν ισοδυναμεί με την επιστροφή του υλικού στην αρχική του κατάσταση (παραμένουσα μαγνήτιση)



Μαγνητικά υλικά (2)

- Αντιφερρομαγνητικά: Η εφαρμογή εξωτερικού πεδίου προσανατολίζει τις διπολικές μαγνητικές ροπές τόσο ομόρροπα όσο και αντίρροπα προς το πεδίο (αναίρεση της μαγνήτισης του υλικού)
- Φερριμαγνητικά: Διατηρούν τον αντιπαράλληλο προσανατολισμό των διπολικών ροπών, αλλά ο αριθμός των ροπών προς τη μια κατεύθυνση δε συμπίπτει με αυτόν προς την αντίθετη. Μη μηδενική μαγνήτιση αλλά σημαντικά μικρότερη από αυτή των φερρομαγνητικών.
- Οι φερρίτες είναι φερριμαγνητικά υλικά.
- Είναι μεταλλικά οξείδια της μορφής $M\text{OFe}_2\text{O}_3$, όπου M δισθενές μέταλλο (Κάδμιο, Μαγνήσιο, κτλ.)



Ιδιότητες των φερριτών

- Είναι υλικά σκληρά, χωρίς ελαστικότητα και εύθραυστα.
- Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα
- Χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα
- Το χαρακτηριστικό της μαγνητικής ανισοτροπίας κάνει τους φερρίτες χρήσιμους σε πολλές μικροκυματικές εφαρμογές
- Η μαγνητική ανισοτροπία δημιουργείται με την εφαρμογή ενός DC μαγνητικού πεδίου, μέσω του οποίου ελέγχεται η αλληλεπίδραση του φερρίτη με το μικροκυματικό σήμα



Διάδοση επίπεδου κύματος σε άπειρο φερρίτη

- DC μαγνητικό πεδίο πόλωσης $\mathbf{H}_0 = H_0 \hat{\mathbf{z}}$
- Ο τανυστής μαγνητικής διαπερατότητας εξαιτίας της μορφής του πεδίου πόλωσης είναι $\tilde{\mu} = \begin{bmatrix} \mu & j\kappa & 0 \\ -j\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{bmatrix}$
- Εξισώσεις Maxwell για αρμονική μεταβολή: $\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \tilde{\mu} \mathbf{H}$ (4.1α), $\nabla \times \mathbf{H} = +j\omega \epsilon \mathbf{E}$ (4.1β), $\nabla \cdot \mathbf{D} = 0$, $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$
- Το επίπεδο κύματα διαδίδεται κατά z, άρα: $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{-j\beta z}$ (4.2α), $\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 e^{-j\beta z}$ (4.2β), όπου β η σταθερά διάδοσης και \mathbf{E}_0 , \mathbf{H}_0 διανύσματα που περιγράφουν την πόλωση του κύματος.

• DC μαγνητικό πεδίο πόλωσης $\mathbf{H}_0 = H_0 \hat{\mathbf{z}}$
 • Ο τανυστής μαγνητικής διαπερατότητας εξαιτίας της μορφής του πεδίου πόλωσης είναι $\tilde{\mu} = \begin{bmatrix} \mu & j\kappa & 0 \\ -j\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{bmatrix}$
 • Εξισώσεις Maxwell για αρμονική μεταβολή: $\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \tilde{\mu} \mathbf{H}$ (4.1α), $\nabla \times \mathbf{H} = +j\omega \epsilon \mathbf{E}$ (4.1β), $\nabla \cdot \mathbf{D} = 0$, $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$
 • Το επίπεδο κύμα διαδίδεται κατά z, άρα: $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{-j\beta z}$ (4.2α), $\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 e^{-j\beta z}$ (4.2β), όπου β η σταθερά διάδοσης και \mathbf{E}_0 , \mathbf{H}_0 διανύσματα που περιγράφουν την πόλωση του κύματος.

Διάδοση επίπεδου κύματος σε άπειρο φερρίτη (2)

- Αντικαθιστώντας τις (4.2) στην (4.1α) προκύπτει

$$j\beta E_{0,y} = -j\omega(\mu H_{0,x} + j\kappa H_{0,y}) \quad (4.3\alpha)$$

$$j\beta E_{0,x} = -j\omega(-jH_{0,x} + \mu H_{0,y}) \quad (4.3\beta)$$

$$-j\omega\mu_0 H_{0,z} = 0 \quad (4.3\gamma)$$

- Αντικαθιστώντας τις (4.2) στην (4.1β) προκύπτει

$$j\beta H_{0,y} = j\omega\varepsilon E_{0,x} \quad (4.4\alpha)$$

$$-j\beta H_{0,x} = j\omega\varepsilon E_{0,y} \quad (4.4\beta)$$

$$0 = j\omega\varepsilon E_{0,z} \quad (4.4\gamma)$$

- Από τις (4.3γ) και (4.4γ) $H_{0,z} = 0, E_{0,z} = 0$
- Από (4.4α) και (4.4β) ορίζουμε την κυματική αγωγιμότητα Y ως

$$Y = \frac{H_{0,y}}{E_{0,x}} = \frac{-H_{0,x}}{E_{0,y}} = \frac{\omega\varepsilon}{\beta}$$



Διάδοση επίπεδου κύματος σε άπειρο φερρίτη (3)

- Από τις (4.3α), (4.3β) και χρησιμοποιώντας την έννοια της κυματικής αγωγιμότητας

$$\begin{bmatrix} j\omega^2 \epsilon \kappa & \beta^2 - \omega^2 \mu \epsilon \\ \beta^2 - \omega^2 \mu \epsilon & -j\omega^2 \epsilon \kappa \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{0,x} \\ E_{0,y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

- Θέτοντας την ορίζουσα του παραπάνω συστήματος ίση με 0 προκύπτει η εξίσωση για τον προσδιορισμό των σταθερών διάδοσης β του επίπεδου κύματος $(\beta^2 - \omega^2 \mu \epsilon)^2 = \omega^4 \epsilon^2 \kappa^2$.
- Κατά τα θετικά z προκύπτουν οι δύο λύσεις $\beta^\pm = \omega \sqrt{\epsilon(\mu \pm \kappa)}$
- Από τη λύση β^+ προκύπτει $E_{0,y} = -jE_{0,x}$ και $E^+ = E_0(\hat{x} - j\hat{y})e^{-j\beta^+z}$ ενώ $H^+ = E_0 Y^+(j\hat{x} + \hat{y})e^{-j\beta^+z}$, όπου $Y^+ = \frac{\omega \epsilon}{\beta^+} = \frac{\omega \epsilon}{\omega \sqrt{\epsilon(\mu + \kappa)}} = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu + \kappa}}$
- Το επίπεδο αυτό κύμα συνεπώς χαρακτηρίζεται από δεξιόστροφη κυκλική πόλωση



Διάδοση επίπεδου κύματος σε άπειρο φερρίτη (4)

- Για τη σταθερά διάδοσης β^- , $E_{0,y} = jE_{0,x}$

$$E^- = E_0(\hat{x} + j\hat{y})e^{-j\beta^-z}$$

$$H^- = E_0Y^-(-j\hat{x} + \hat{y})e^{-j\beta^-z}$$

$$Y^- = \frac{\omega\varepsilon}{\beta^-} = \frac{\omega\varepsilon}{\omega\sqrt{\varepsilon(\mu - \kappa)}} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu - \kappa}}$$

- Αυτό το επίπεδο κύμα έχει αριστερόστροφη κυκλική πόλωση
- **Συνεπώς: τα δεξιόστροφα και αριστερόστροφα κυκλικά πολωμένα επίπεδα κύματα, τα οποία και διαδίδονται με διαφορετικές φασικές ταχύτητες, είναι οι δύο δυνατοί ρυθμοί διάδοσης σε έναν άπειρο πολωμένο κατά z φερρίτη.**



Διάδοση επίπεδου κύματος με γραμμική πόλωση σε άπειρο φερρίτη

- Η γραμμική πόλωση μπορεί να περιγραφεί ως επαλληλία μιας δεξιόστροφης και μιας αριστερόστροφης κυκλικής πόλωσης $E|_{z=0} = E_0 \hat{x} = \frac{1}{2} E_0 (\hat{x} - j\hat{y}) + \frac{1}{2} E_0 (\hat{x} + j\hat{y})$

- Μετά από διάδοση κατά απόσταση z

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{2} E_0 (\hat{x} - j\hat{y}) e^{-j\beta^+ z} + \frac{1}{2} E_0 (\hat{x} + j\hat{y}) e^{-j\beta^- z} \\ &= E_0 \left[\hat{x} \cos \frac{(\beta^+ - \beta^-)z}{2} - \hat{y} \sin \frac{(\beta^+ - \beta^-)z}{2} \right] e^{-j(\beta^+ + \beta^-) \frac{z}{2}} \end{aligned}$$

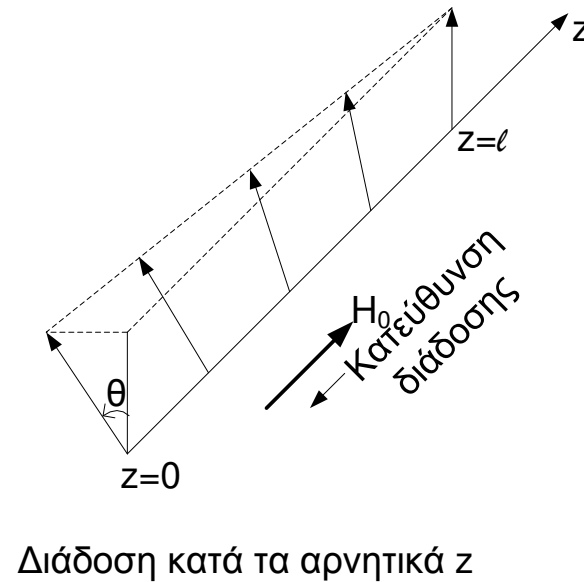
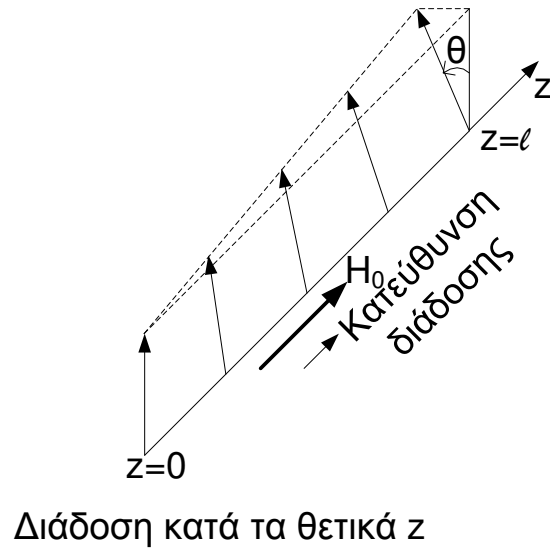
- Η εξίσωση αυτή παριστάνει ένα γραμμικά πολωμένο κύμα, του οποίου η πόλωση στρέφεται καθώς το κύμα προχωρά κατά z . Το φαινόμενο αυτό λέγεται **στροφή Faraday**.

- Το διάνυσμα της πόλωσης σχηματίζει γωνία με τον άξονα x ίση με

$$\varphi(z) = \tan^{-1} \frac{E_y}{E_x} = \tan^{-1} \left[-\tan \frac{(\beta^+ - \beta^-)z}{2} \right] = -\frac{(\beta^+ - \beta^-)z}{2}$$



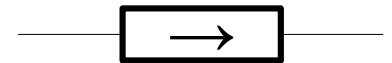
Στροφή της πόλωσης κατά τη διάδοση επίπεδου κύματος



Διατάξεις φερριτών

Απομονωτές

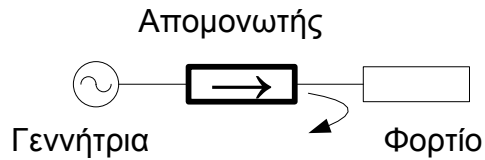
- Δίθυρες διατάξεις που επιτρέπουν τη διάδοση μικροκυματικού σήματος προς τη μια κατεύθυνση ενώ εισάγει σημαντική απόσβεση κατά την αντίθετη κατεύθυνση
- Πίνακας σκέδασης ιδανικού απομονωτή:
$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$
- Πρακτικά υπάρχουν μικρές απώλειες εισαγωγής για τη διάδοση από τη θύρα 1 στη θύρα 2 (περίπου 0.1-1 dB), ενώ οι απώλειες κατά την αντίθετη κατεύθυνση είναι περίπου 20-30 dB.



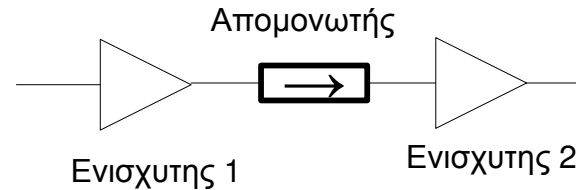
Συνηθισμένη αναπαράσταση απομονωτή



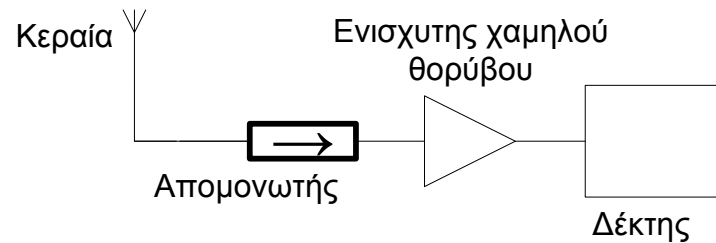
Εφαρμογές απομονωτή



Προστατεύει τη γεννήτρια από τυχόν ανακλώμενα από το φορτίο, σήματα



Αποσυνζευγνύει τις διάφορες ενισχυτικές βαθμίδες, ώστε η μια να μην εξαρτάται από την άλλη



Αποτρέπει την αλληλεπίδραση κάποιου επιστρεφόμενου σήματος με τα σθενή σήματα που λαμβάνει η κεραία

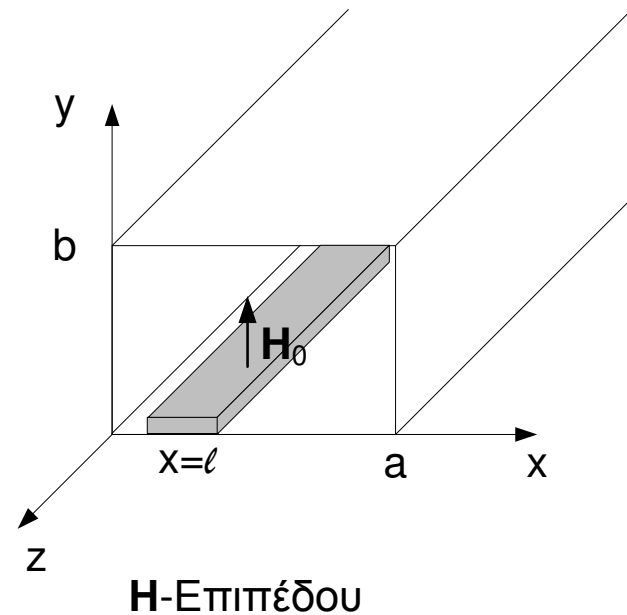
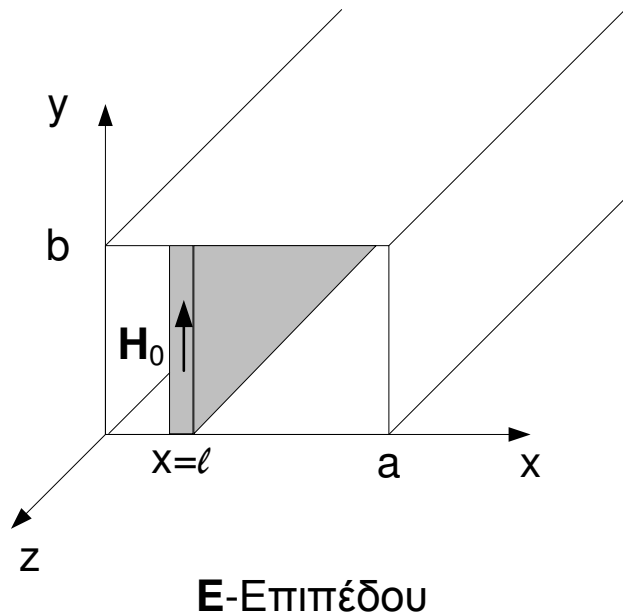


Απομονωτές συντονισμού

- Βασίζονται στην ιδιότητα, κυκλικά πολωμένα κύματα της μίας φοράς περιστροφής να αλληλεπιδρούν ισχυρά με το μαγνητικό υλικό στην περιοχή του γυρομαγνητικού συντονισμού, εμφανίζοντας υψηλές απώλειες, ενώ η πόλωση αντίθετης φοράς υφίσταται αμελητέες απώλειες.
- Συνεπώς κυκλικά πολωμένα κύματα που οδεύουν προς τη μια κατεύθυνση εμφανίζουν ισχυρή απόσβεση, ενώ κύματα προς την αντίθετη υφίστανται πολύ μικρή απόσβεση.



Γεωμετρίες απομονωτών συντονισμού φερρίτη σε κυματοδηγό



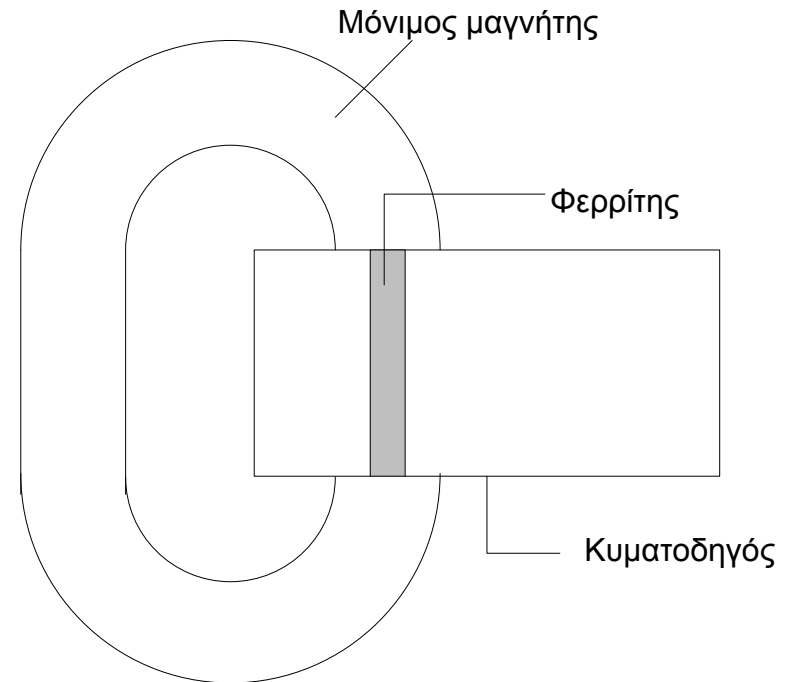
Γεωμετρίες απομονωτών συντονισμού φερρίτη σε κυματοδηγό(2)

- Το τμήμα του φερρίτη πρέπει να τοποθετηθεί μέσα στον κυματοδηγό σε θέση όπου το μαγνητικό πεδίο της μικροκυματικής συχνότητας είναι κυκλικά πολωμένο
- Η θέση αυτή για τον TE_{10} ρυθμό ορθογώνιου κυματοδηγού δίνεται από τη σχέση $\tan \frac{\pi l}{a} = \pm \frac{\pi/\alpha}{\beta_{10}} = \pm \frac{k_c}{\sqrt{k_0^2 - k_c^2}}$
- Η ιδανική σχεδιαστική απαίτηση είναι η σταθερά απόσβεσης κατά τη μια κατεύθυνση να είναι $\alpha^+ = 0$ και κατά την άλλη $\alpha^- \neq 0$.



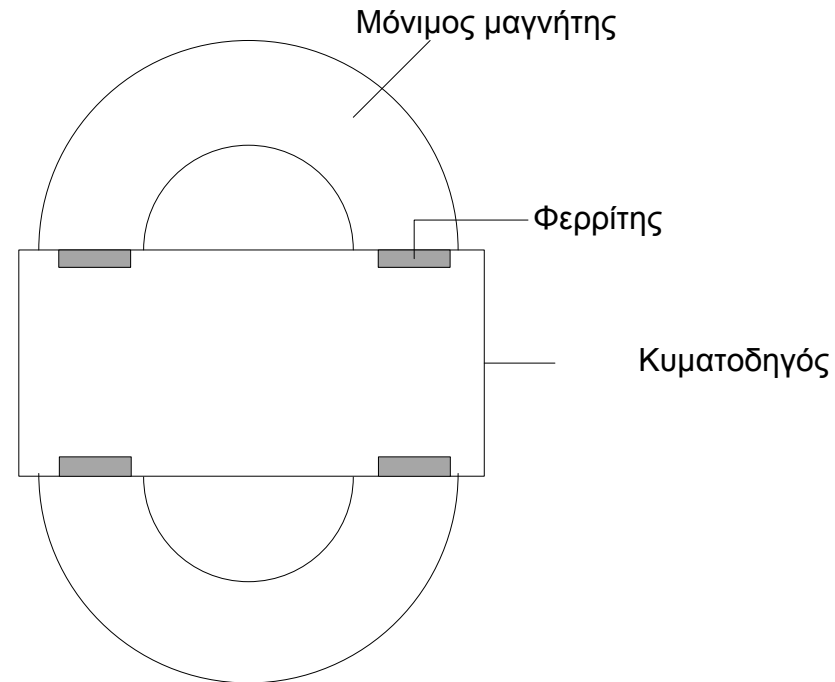
Απομονωτής συντονισμού Ε-επιπέδου

- Προσφέρει ευκολία στην εφαρμογή του DC μαγνητικού πεδίου πόλωσης
- Αλλά:
 - ❑ Η συνθήκη $\alpha^+ = 0$ δε μπορεί να επιτευχθεί (α^+ η σταθερά απόσβεσης κατά τη θετική κατεύθυνση) .
 - ❑ Το εύρος ζώνης είναι περιορισμένο
 - ❑ Η απαγωγή θερμότητας είναι κακή και άρα η χρήση σε εφαρμογές ισχύος περιορισμένη



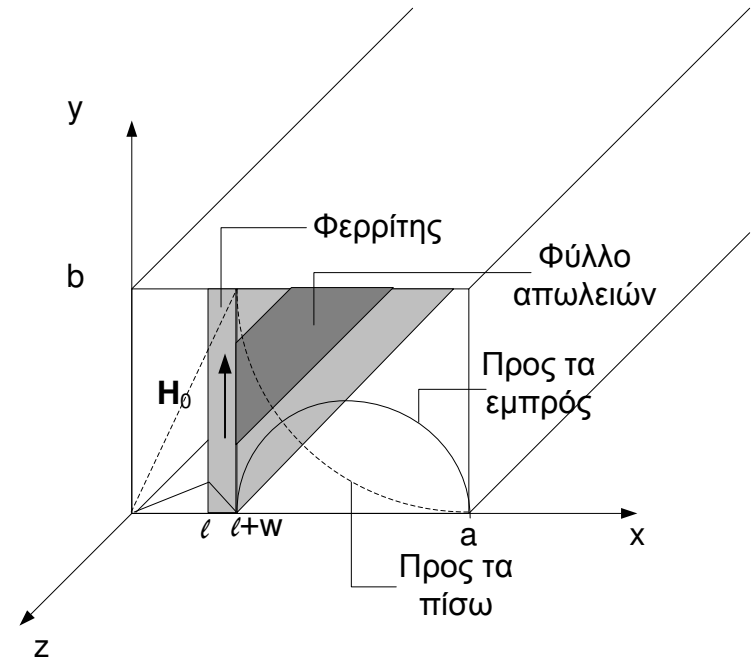
Απομονωτής συντονισμού Η-επιπέδου

- Αυτή η γεωμετρία απαιτεί ισχυρότερο DC μαγνητικό πεδίο πόλωσης
- Αλλά:
 - ❑ Οι συνιστώσες H_x και H_y δεν επηρεάζονται από το φερρίτη καθώς είναι εφαπτομενικές στο υλικό.
 - ❑ Παρουσιάζει καλύτερη απαγωγή θερμότητας καθώς ο φερρίτης είναι σε επαφή με τα τοιχώματα του κυματοδηγού
 - ❑ Το εύρος ζώνης είναι πολύ βελτιωμένο σε σχέση με τους απομονωτές Ε-επιπέδου



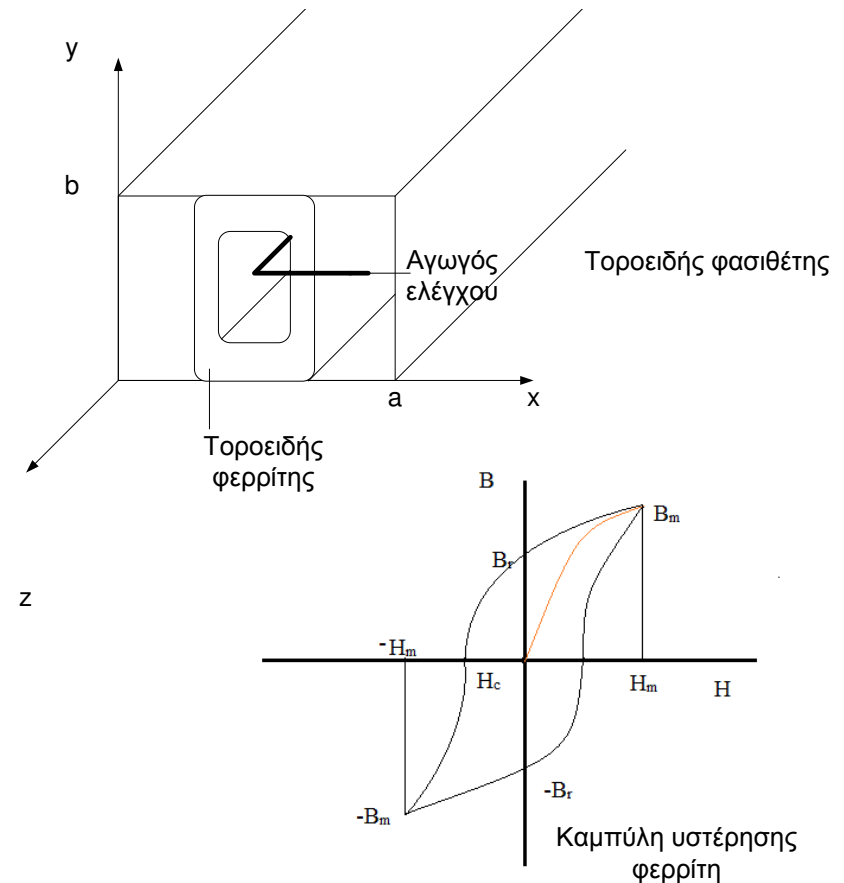
Απομονωτές μετατόπισης πεδίου

- Όπως δείχνει το σχήμα ο ρυθμός προς τα εμπρός μηδενίζεται στο άκρο της πλάκας του φερρίτη, ενώ ο ρυθμός προς τα πίσω παίρνει τη μέγιστη τιμή του.
- Η τοποθέτηση στη θέση αυτή μιας πλάκας απωλειών προκαλεί ισχυρή απόσβεση του κύματος προς τα πίσω, ενώ δεν επηρεάζει τη διάδοση προς τα εμπρός.



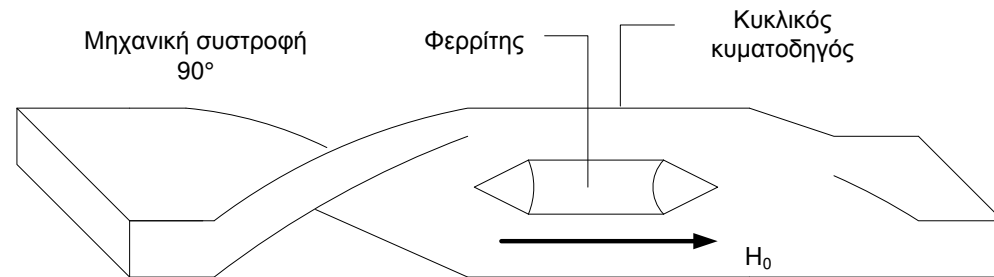
Φασιθέτες

- Η μεταβλητή ολόσθηση φάσης υλοποιείται με την αλλαγή του DC μαγνητικού πεδίου πόλωσης του φερρίτη.
- Το ρεύμα του αγωγού ελέγχου, ελέγχει το μαγνητικό πεδίο πόλωσης, συνήθως με ψηφιακό τρόπο.
- Στον αγωγό ελέγχου εφαρμόζεται ένας παλμός τάσης που φτάνει το φερρίτη στον κόρο. Σύμφωνα με την καμπύλη υστέρησης (σχήμα), η απομάκρυνση του παλμού αφήνει το υλικό με μια παραμένουσα μαγνήτιση.

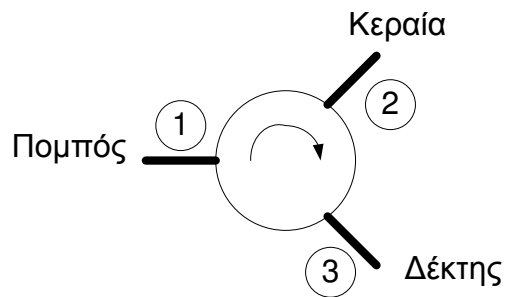


Γύρατρον (gyrator)

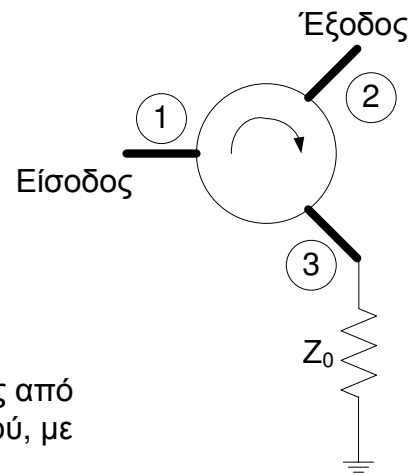
- $[S] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$
- Η ράβδος φερρίτη είναι σχεδιασμένη για συστροφή 90° .
- Κατά τη διάδοση από τη θύρα 1 προς τη 2 η μηχανική στροφή αθροίζεται με τη στροφή Faraday ($90^\circ + 90^\circ$), με αποτέλεσμα η έξοδος να είναι σε αντίθετη φάση από την είσοδο
- Κατά την αντίθετη διάδοση η στροφή Faraday και η μηχανική στροφή αλληλοαναιρούνται ($90^\circ - 90^\circ$), συνεπώς $S_{12} = 1$.



Κυκλοφορητές



Ταυτόχρονη χρήση της ίδιας κεραίας από τον πομπό και το δέκτη ενός σταθμού, με τη βοήθεια κυκλοφορητή

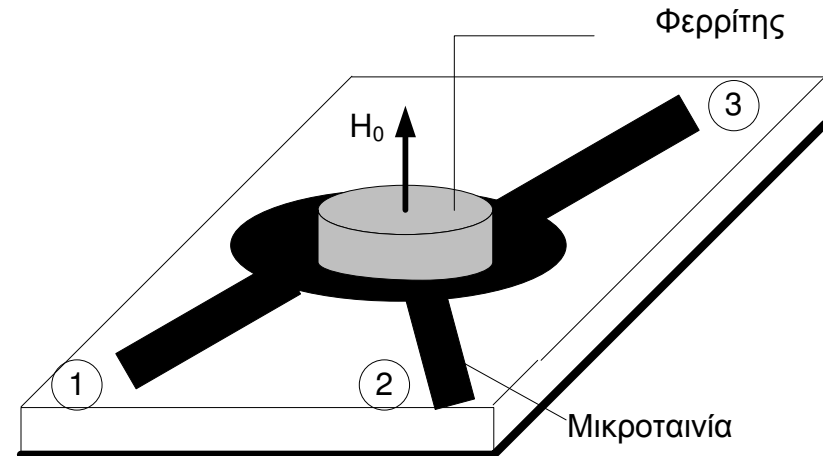


Χρήση κυκλοφορητή ως απομονωτή με προσαρμογή μιας θύρας του



Κυκλοφορητές επαφής

- Η ύπαρξη του κυκλινδρικού φερρίτη οδηγεί σε μια αλλαγή της αναλογίας του ηλεκτρικού μήκους που βλέπει το ωρολογιακό και το ανθωρολογιακό κύμα.
- Με κατάλληλη σχεδίαση του φερρίτη τα παραπάνω κύματα υπερτίθενται με αντίθετη φάση στη θύρα 3, ώστε τελικά όλη η ισχύς καταλήγει στη θύρα 2.

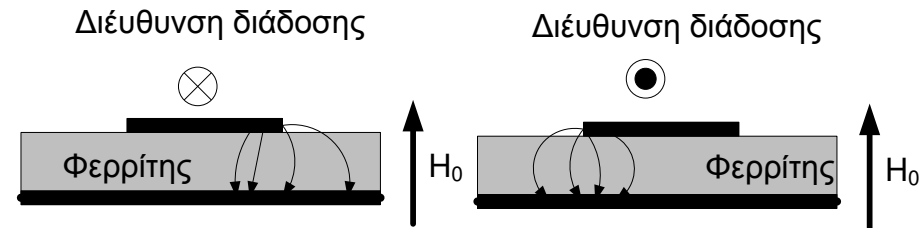


Κυκλοφορητής επαφής τριών θυρών υλοποιημένος σε μικροταινία



Διατάξεις ρυθμών ακμής

- Όταν μια γραμμή μικροταινίας κατασκευάζεται σε υπόστρωμα φερρίτη, ο βασικός ρυθμός εμφανίζεται στην ακμή του αγωγού της μικροταινίας
- Αν αυξηθεί το πλάτος της μικροταινίας, ο ρυθμός ακμής τείνει να ακολουθεί την ακμή, με αποτέλεσμα να μπορεί να προσαχθεί σε μια περιοχή με απώλειες και τελικά το κύμα να απορροφηθεί επιλεκτικά.
- Η ιδιότητα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση διατάξεων όπως απομονωτές και κυκλοφορητές



Τέλος Ενότητας

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την 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.



Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση **1.00**.



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, Σταύρος Κουλουρίδης. «Μικροκυματικές διατάξεις. Φερρίτες και διατάξεις φερριτών». Έκδοση: 1.0. Πάτρα 2015.

Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:

<https://eclass.upatras.gr/courses/EE775>.



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

