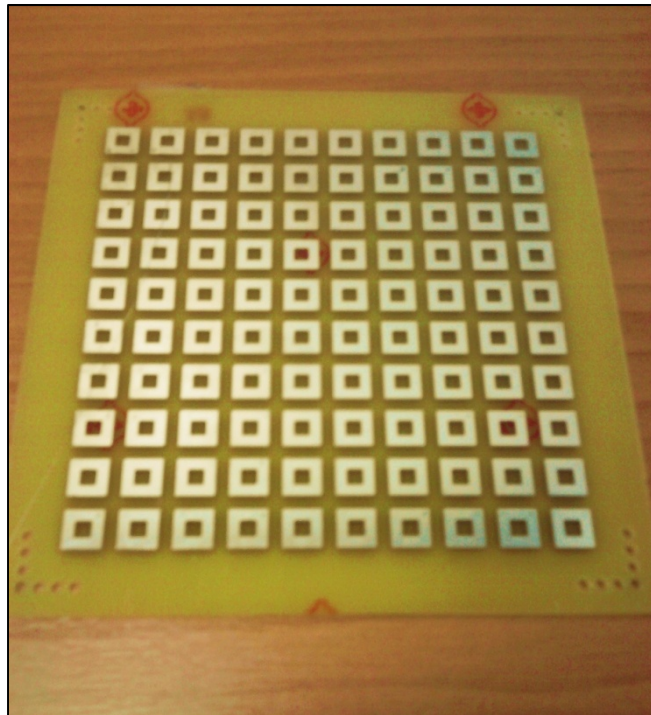




**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΕΞΕΛΖΕ Α.Μ. 89**



**ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΙΚΩΝ**  
**ΑΡΙΣΤΕΡΟΣΤΡΟΦΩΝ ΜΕΤΑΪΛΙΚΩΝ**

**Επιβλέποντες: Καφεσάκη Μαρία**  
**Κατσαράκης Νίκος**

## *Πρόλογος – Ευχαριστίες*

---

Αυτή η διπλωματική εργασία αποτελεί το τελευταίο βήμα πριν από την ολοκλήρωση της περιόδου που έζησα ως φοιτητής γι αυτό και αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα κομμάτια της έως τώρα σταδιοδρομίας μου. Όταν ξεκίνησα και ήρθα σε μία πρώτη επαφή με το αντικείμενο της έρευνας διαπίστωσα πόσο ενδιαφέρον τομέας είναι αυτός των αριστερόστροφων υλικών και κατάλαβα ότι εκτός από μία τυπική διπλωματική εργασία θα ανακάλυπτα και ένα καινούριο και ευχάριστο περιβάλλον. Είναι ευτυχία μου που έφτασα μέχρι εδώ και ελπίζω το αποτέλεσμα το οποίο θα παρουσιάσω παρακάτω να είναι ικανοποιητικό.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά την επιβλέποντα καθηγήτρια κα. Μαρία Καφεσάκη για την καθοδήγηση, την υποστήριξη και την βοήθεια που μου παρείχε κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Νικο Κατσαράκη υπεύθυνο του εργαστηρίου στο Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας (Ι.Τ.Ε.) που μαζί με την κα. Καφεσάκη μου έδωσαν την ευκαιρία να χρησιμοποιήσω το εργαστήριο. Επίσης ευχαριστώ θερμά για την πολύτιμη βοήθεια τους στο εργαστήριο το κ. Γιώργο Κενανάκη και την κα. Ειρήνη Τσιάπα.

Θα θελα επίσης να ευχαριστήσω τον φίλο και συμφοιτητή μου Κώστα Ευσταθίου που μαζί ξεκινήσαμε παράλληλα τις διπλωματικές εργασίες μας και βοηθήσαμε ο ένας τον άλλο σε κάθε δυσκολία. Ακόμα ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους μου που με στήριξαν με κάθε τρόπο όλο το διάστημα αυτής της εργασίας.

Για το τέλος άφησα το μεγαλύτερο ευχαριστώ στους γονείς μου και στον αδερφό μου που έκαναν υπομονή, μου παρείχαν κάθε δυνατή βοήθεια με οποιοδήποτε κόστος και με στήριξαν και σε αυτή την εργασία όπως και σε όλη την φοιτητική μου ζωή. Αυτή η εργασία είναι αφιερωμένη σε αυτούς.

## **Περιεχόμενα**

Σκοπός της εργασίας.....	4
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στα Αριστερόστροφα μεταϋλικά – η πορεία και η εξέλιξη τους .....	4
1.1 Αριστερόστροφα υλικά: Εισαγωγή.....	4
1.2 Ιστορική αναδρομή – Θεωρητικό υπόβαθρο: .....	5
1.2.1 Οι εξισώσεις του Maxwell και το διάνυσμα Poynting .....	5
1.2.2 Η προέλευση του αρνητικού δείκτη διάθλασης στα υλικά με $\epsilon$ και $\mu$ αρνητικό.....	6
1.2.3 Οι τέλει φακοί ως δυνατότητα εφαρμογής των αριστερόστροφων υλικών .....	8
1.3 Από τη θεωρία στην πράξη: Τα πρώτα Αριστερόστροφα Μεταϋλικά .....	8
1.3.1 Εισαγωγή .....	9
1.3.2 Το κύκλωμα LC στα SRR.....	9
1.3.3 Η διηλεκτρική συνάρτηση $\epsilon(\omega)$ στα Wires.....	11
1.3.4 Η σύνθετη δομή των Wires με τα SRRs .....	11
Κεφ. 2: Η δομή των επαναλαμβανόμενων διακεκομμένων συρμάτων και παραλλαγές της .....	12
2.1 Εισαγωγή - Η δομή των ζευγαριών συρμάτων πεπερασμένου μήκους (Slab Pairs) .....	12
2.2 Το κύκλωμα RLC στη δομή των slab pairs. ....	13
2.3 Η συχνότητα μαγνητικού συντονισμού $\omega_{LC}$ .....	15
2.4 Ηλεκτρικός συντονισμός στα slab pairs .....	16
2.5 Η δομή των fishnet.....	16
2.6 Το μήκος κύματος και η σύγκριση του με τις διαστάσεις των δομών.....	17
2.7 Από τα slab-pairs στα slabs with opening.....	17
Κεφάλαιο 3 Προσομοιώσεις – Σχεδίαση Αριστερόστροφων Μεταυλικών.....	19
3.1 Στόχος των προσομοιώσεων.....	19
3.2 Λογισμικό προσομοίωσης – CST Microwave Studio.....	20
3.3: Προσομοιώσεις - Αποτελέσματα:.....	21
3.3.1: Η αρχική δομή των Cut Slab και ο χαρακτηρισμός της .....	21
3.3.2 Η επίδραση του opening στον μαγνητικό συντονισμό .....	23
3.3.3 Η επίδραση των ελεγχόμενων γεωμετρικών αλλαγών στη συμπεριφορά των δομών .....	24
3.3.5 Τοποθέτηση λαιμού .....	27
3.3.5 α) Στενοί λαιμοί .....	28
3.3.5 β) Φαρδιοί λαιμοί.....	29

3.3.6 Επίτευξη αριστερόστροφης συμπεριφοράς .....	30
Κεφάλαιο 4: Πειραματική διαδικασία – Προετοιμασία – Εκτέλεση πειραμάτων. ....	32
4.1 Σχεδιασμός – Κατασκευή Μεταλλικών - Η διαδικασία κατασκευής των δειγμάτων.....	32
4.2 Χαρακτηρισμός Μεταλλικών - Αναλυτής Δικτύων .....	34
4.2.1 Η γενική διάταξη του Αναλυτή Δικτύων και τα τμήματα που αποτελείται: .....	36
4.3 Διεξαγωγή Πειράματος: .....	37
4.3.1 Προετοιμασία Πειραμάτων.....	37
4.4.2 Πειραματική Διαδικασία – Αποτελέσματα.....	38
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα – Περαιτέρω έρευνα .....	40
5.1 Συμπεράσματα .....	40
5.2 Περαιτέρω έρευνα – προβλήματα προς επίλυση: .....	41
Βιβλιογραφία: .....	42

## Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη ανάλυση και βελτιστοποίηση μιας κατηγορίας αριστερόστροφων μεταϋλικών που μπορούν να δώσουν αρνητική μαγνητική διαπερατότητα και αρνητικό δείκτη διάθλασης. Οι δομές αυτές βασίζονται σε ζεύγη μεταλλικών πλακών (υπεύθυνα για την αρνητική μαγνητική διαπερατότητα). Στόχος της μελέτης είναι: (α) να μπορεί να γίνει ελεγχόμενη μεταβολή των συχνοτήτων απόκρισης των δομών, (β) η αρνητική μαγνητική διαπερατότητα των δομών να εμφανίζεται σε όσο το δυνατόν χαμηλότερες συχνότητες (ώστε η κλίμακα μήκους της δομής να είναι μικρότερη από το μήκος κύματος απόκρισης – και άρα η δομή να συμπεριφέρεται ως ομογενές υλικό), και τέλος, (γ) συνδυάζοντας κατάλληλα τη δομή με συνεχή σύρματα (υπεύθυνα για αρνητική επιδεκτικότητα) να επιτευχθεί αριστερόστροφη συμπεριφορά (δηλαδή ταυτόχρονα αρνητική επιδεκτικότητα και διαπερατότητα, το οποίο οδηγεί σε αρνητικό δείκτη διάθλασης). Ο στόχος αυτός, και ιδιαίτερα ο έλεγχος και η ελάττωση των συχνοτήτων απόκρισης των δομών, επιτεύχθηκε με την κατάλληλη αφαίρεση μετάλλου από τα ζεύγη των μεταλλικών πλακών, ενώ συνενώνοντας κατάλληλα τα ζεύγη πλακών ώστε να επιτευχθεί ένας συνεχής μεταλλικός δρόμος στην κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου επιτεύχθηκε αριστερόστροφη διάδοση με εξαιρετικά ικανοποιητικά επίπεδα διέλευσης (σχετικά μικρή απορρόφηση).

Η εργασία στο μεγαλύτερο της μέρος εστιάζει στο σχεδιασμό και την παραμετρική μελέτη των δομών μέσω προσομοιώσεων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, και σε μικρότερη έκταση στην επιβεβαίωση των θεωρητικών υπολογισμών μέσω μικροκυματικών μετρήσεων διέλευσης.

## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στα Αριστερόστροφα μεταϋλικά – η πορεία και η εξέλιξη τους

### **1.1 Αριστερόστροφα υλικά: Εισαγωγή**

Τα αριστερόστροφα μετά-υλικά είναι υλικά τα οποία έχουν αρνητικό δείκτη διάθλασης ( $n < 0$ ) σε συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων. Όσο εξωπραγματικό κι αν ακούγεται αυτό η δημιουργία και η μελέτη των αριστερόστροφων υλικών έχει ήδη επιτευχθεί κάνοντας πράξη τις πολύ πρωτοπόρες ιδέες του V. G. Veselago, ο οποίος πρώτος έθεσε το 1968 το θέμα του τι ιδιότητες θα είχε ένα αριστερόστροφο υλικό και κατά πόσο θα ήταν επιτρεπτή η ύπαρξη του από τους νόμους της φυσικής και πιο συγκεκριμένα της οπτικής και του ηλεκτρομαγνητισμού.

Τα υλικά αυτά δεν υπάρχουν στη φύση παρά μόνο κατασκευάζονται τεχνητά. Ο όρος αριστερόστροφα αναφέρεται στο γεγονός ότι στα υλικά αυτά η τριάδα  $\{\mathbf{k}, \mathbf{E}, \mathbf{H}\}$ , (δηλαδή κυματόνισμα, ηλεκτρικό πεδίο, μαγνητικό πεδίο) αποτελεί αριστερόστροφο σύστημα, σε αντίθεση με τα συνήθη υλικά όπου αποτελεί δεξιόστροφο. Ο διεθνής όρος που χρησιμοποιείται για τα υλικά αυτά είναι **Αριστερόστροφα Μεταϋλικά (Left-Handed Meta-materials)**. Επίσης χρησιμοποιείται ο όρος «υλικά με αρνητικό δείκτη διάθλασης» (**Negative Index Materials**).

Τα φαινόμενα που επηρεάζονται από τη συμπεριφορά αυτή των υλικών αυτών είναι φαινόμενα οπτικής όπως η διάθλαση και η ανάκλαση, το φαινόμενο Doppler, κ.α., ως αποτέλεσμα του αρνητικού δείκτη διάθλασης που παρουσιάζει ένα τέτοιο υλικό.

Ο αρνητικός δείκτης διάθλασης ( $n < 0$ ) στα αριστερόστροφα υλικά επιτυγχάνεται σε συγκεκριμένες περιοχές συχνοτήτων όπου η ηλεκτρική επιδεκτικότητα  $\epsilon$  και η μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$  είναι αρνητικές ( $\epsilon(\omega) < 0$ ,  $\mu(\omega) < 0$ ) -όπου το  $\omega$  είναι η κυκλική συχνότητα του προσπίπτοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Στις περιοχές συχνοτήτων που μελετάμε στα περισσότερα υπάρχοντα υλικά η μαγνητική διαπερατότητα,  $\mu$ , είναι περίπου ίση με 1 όμως η διηλεκτρική συνάρτηση, λόγω συντονισμών, μπορεί να πάρει μια ποικιλία τιμών, από θετικές έως αρνητικές.

Με την δημιουργία κατάλληλων δομών μπορούν να επιτευχθούν αρνητικές τιμές και για τη μαγνητική διαπερατότητα αλλά και να ελεγχθούν οι τιμές της διηλεκτρικής συνάρτησης ώστε να έχουμε αρνητικές τιμές στην ίδια περιοχή συχνοτήτων με την αρνητική μαγνητική διαπερατότητα, με αποτέλεσμα το υλικό να παρουσιάζει αρνητικό δείκτη διάθλασης σε αυτή την περιοχή συχνοτήτων. Αυτό είναι και το βασικό τέχνασμα που χρησιμοποιείται για την δημιουργία υλικών με αριστερόστροφη απόκριση.

## 1.2 Ιστορική αναδρομή – Θεωρητικό υπόβαθρο:

Ήταν το 1968 όταν ο Ρώσος Φυσικός G. V. Vesselago δημοσίευσε τις μελέτες του σχετικά με κάποια υποθετικά υλικά που θα είχαν αρνητικό  $\epsilon$  και αρνητικό  $\mu$  και τα ονόμασε αριστερόστροφα υλικά [1]. Οι μελέτες του βασίστηκαν στις εξισώσεις του Maxwell και τον οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι τα υλικά αυτά θα έπρεπε να έχουν αρνητικό δείκτη διάθλασης. Οι μελέτες του όμως έμειναν σε θεωρητικό επίπεδο καθώς δεν μπορούσαν να αναπτυχθούν δομές που να παρουσιάζουν τις συγκεκριμένες ιδιότητες. Οι επιστήμονες γνώριζαν ότι μερικά υλικά παρουσιάζουν αρνητικό  $\epsilon$  ή αρνητικό  $\mu$  αλλά δεν μπορούσαν τότε να τα συνδυάσουν ώστε να ισχύουν στην ίδια περιοχή συχνοτήτων.

Ο Vesselago ξεκίνησε τις μελέτες του από το γεγονός ότι το γινόμενο του αρνητικού  $\epsilon$  και αρνητικού  $\mu$  δίνει θετικό αριθμό και έτσι η εξίσωση:

$$n = \sqrt{\frac{\mu(\omega)\epsilon(\omega)}{\mu_0\epsilon_0}} \quad (1.1)$$

δίνει δείκτη διάθλασης,  $n$ , ο οποίος είναι πραγματικός αριθμός και συνεπώς η διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε ένα τέτοιο υλικό είναι απρόσκοπτη.

### 1.2.1 Οι εξισώσεις του Maxwell και το διάνυσμα Poynting

Οι δυο πρώτες εξισώσεις του Maxwell στη διαφορική τους μορφή για γραμμικά μέσα με  $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$  και  $\mathbf{H} = \mathbf{B}/\mu$  είναι

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1.3)$$

με τις (1.2), (1.3) να έχουν λύσεις μονοχρωματικά κύματα της μορφής  $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t)}$  και  $\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 e^{i(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t)}$ . Αντικαθιστώντας τις λύσεις αυτές στις (1.2),(1.3) προκύπτουν οι

$$\begin{aligned} \mathbf{k} \times \mathbf{E} &= \omega \mu \mathbf{H} \\ \mathbf{k} \times \mathbf{H} &= -\omega \epsilon \mathbf{E} \end{aligned}$$

Αυτές οι εξισώσεις δείχνουν ότι για  $\epsilon > 0$  και  $\mu > 0$  για τη τριάδα  $\{\mathbf{k}, \mathbf{E}, \mathbf{H}\}$  ισχύει ο κανόνας του δεξιού χεριού. Σε ένα υλικό όμως με  $\mu < 0$  και  $\epsilon < 0$  οι εξισώσεις γίνονται

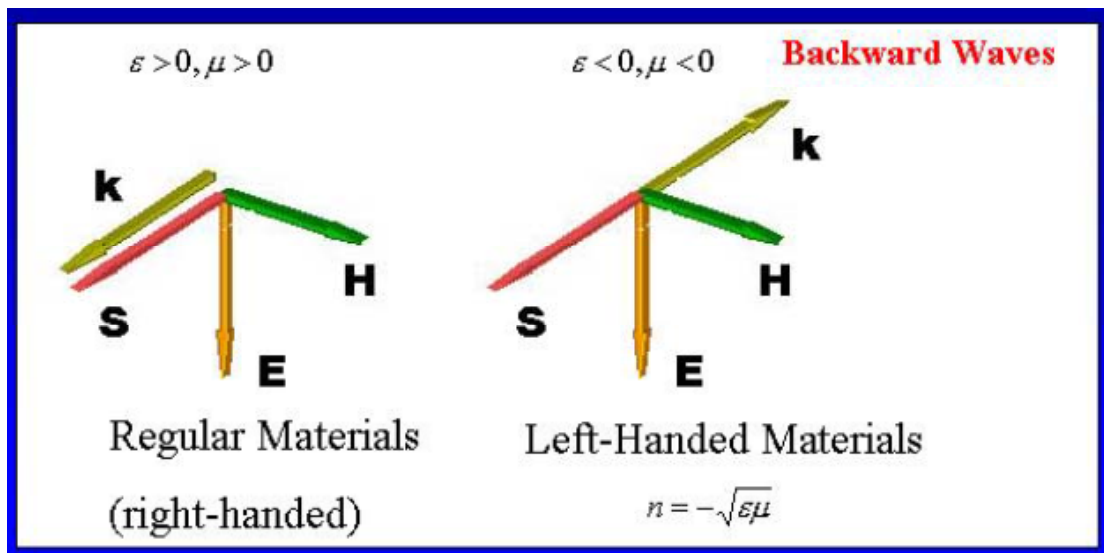
$$\mathbf{k} \times \mathbf{E} = -\omega|\mu|\mathbf{H} \quad (1.4)$$

$$\mathbf{k} \times \mathbf{H} = \omega|\epsilon|\mathbf{E} \quad (1.5)$$

μετατρέποντας την τριάδα  $\{\mathbf{k}, \mathbf{E}, \mathbf{H}\}$  σε αριστερόστροφο σύστημα. Έτσι προκύπτει και ο χαρακτηρισμός των υλικών με αρνητικό  $\mu(\omega)$  και  $\epsilon(\omega)$  ως αριστερόστροφα.

Άμεση συνέπεια της αριστερόστροφης τριάδας  $\mathbf{k}, \mathbf{E}, \mathbf{H}$  είναι ότι η ροή ενέργειας που δίνεται από το διάνυσμα Poynting (εξ. 1.6) έχει αντίθετη κατεύθυνση από την κατεύθυνση του κυματανύσματος  $\mathbf{k}$  (σχ. 1.1) όπως προκύπτει από την εξίσωση του διανύσματος:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu}(\mathbf{E} \times \mathbf{B}) \quad (1.6)$$



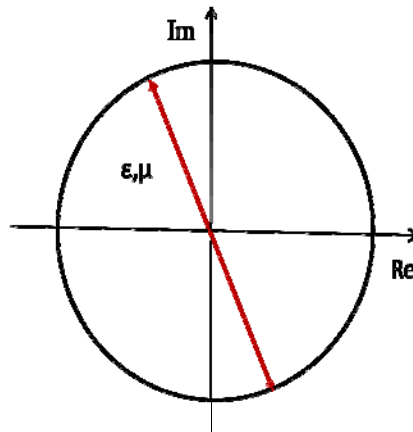
Σχ 1.1: Το διάνυσμα Poynting είναι ομόρροπο με το κυματανύσμα  $\mathbf{k}$  στα δεξιόστροφα υλικά και αντίρροπο με αυτό στα αριστερόστροφα

### 1.2.2 Η προέλευση του αρνητικού δείκτη διάθλασης στα υλικά με $\epsilon$ και $\mu$ αρνητικό

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα υλικό με αρνητικό  $\mu$  και  $\epsilon$ . Μπορούμε να εκφράσουμε τα  $\epsilon$  και  $\mu$  στην εκθετική μιγαδική μορφή ως (βλ. σχ. 1.2):

$$\begin{aligned} \epsilon &= |\epsilon|e^{i\theta+2m\pi i} \\ \mu &= |\mu|e^{i\varphi+2k\pi i} \end{aligned} \quad \text{με } \pi/2 < \theta < \pi \text{ και } \pi/2 < \varphi < \pi \quad m, k, \text{ ακέραιοι}$$

και με αντικατάσταση τους στην εξίσωση (1.1) - οι  $\epsilon_0, \mu_0$  ενσωματώνονται στις  $\epsilon, \mu$  καθώς και η  $k$  στην  $m$  - έχουμε



Σχ. 1.2: Το μιγαδικό επίπεδο

Καταλήξαμε στις δυο λύσεις της εξίσωσης για τον δείκτη διάθλασης. Όπως φαίνεται στο μιγαδικό επίπεδο (βλ. σχήμα 1.2) από τις τιμές που μπορούν να πάρουν οι  $\theta, \varphi$  η  $n_1$  περιέχει τις θετικές τιμές του φανταστικού μέρους και η  $n_2$  τις αρνητικές. Η διάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε ένα μέσο με δείκτη διάθλασης  $n$  θα είναι ανάλογη της  $\frac{1}{n}$ . Για τις  $n_1$  και  $n_2$  η εκθετική αυτή έκφραση οδηγεί σε αποσβεννήμενη και αύξουσα συνάρτηση αντίστοιχα. Για λόγους διατήρησης της ενέργειας μέσα στο υλικό επιλέγουμε την λύση  $n_1$  για το δείκτη διάθλασης ως φυσικά αποδεκτή λύση. Η λύση αυτή, στο όριο μικρών απωλειών στο μέσο,

$$\text{Im}(\epsilon), \text{Im}(\mu) \rightarrow 0 \quad \theta, \varphi \rightarrow \pi \quad (1.8)$$

παίρνει τη μορφή,

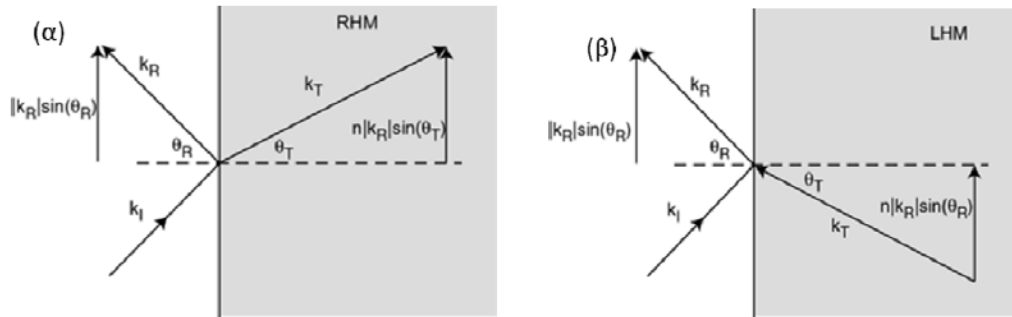
$$n = n_1 = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\mu_0 \mu_r}} \quad n = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \quad (1.9)$$

Ας υποθέσουμε ότι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει στη διαχωριστική επιφάνεια ενός δεξιόστροφου και ενός αριστερόστροφου υλικού. Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν πριν στο αριστερόστροφο υλικό το διάνυσμα Poynting θα έχει αντίθετη φορά από εκείνη του κυματανύσματος  $\mathbf{k}$ . Εφαρμόζοντας τον νόμο του Snell στα δύο μέσα τότε

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1.10)$$

όπου ο δείκτης 2 αναφέρεται στο αριστερόστροφο υλικό και ο δείκτης 1 στο δεξιόστροφο και η φορά πρόσπτωσης είναι από το 1 στο 2. Για να ισχύει ο νόμος του Snell πρέπει οι γωνίες πρόσπτωσης και διάθλασης να έχουν αντίθετο πρόσημο όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.3. Τα υλικά λοιπόν με αρνητικό δείκτη διάθλασης παρουσιάζουν αρνητική γωνία διάθλασης.



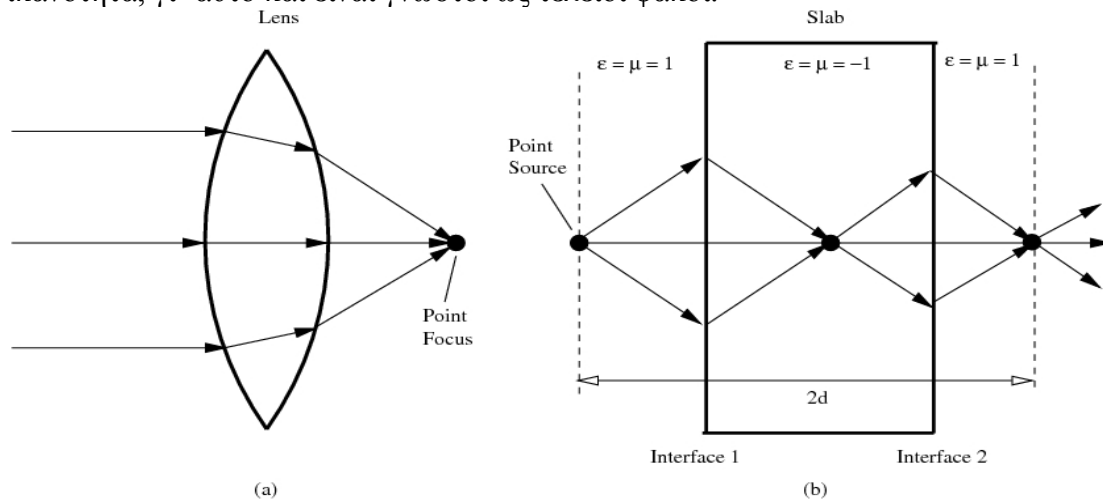


Σχ.1.3: Η γωνία διάθλασης  $\theta_T$  στην περίπτωση δεξιόστροφων(α) και αριστερόστροφων (β) υλικών

### 1.2.3 Οι τέλει φακοί ως δυνατότητα εφαρμογής των αριστερόστροφων υλικών

Η ανάπτυξη των Αριστερόστροφων Μεταυλικών (LHMs) ανοίγει μια νέα περιοχή παραμέτρων για τα σύνθετα υλικά με νέες ιδιότητες εντελώς διαφορετικές από αυτές των υλικών που υπάρχουν στη φύση [4].

Ένα παράδειγμα της καινοτομίας που προσφέρει ένα υποθετικό υλικό το οποίο παρουσιάζει αριστερόστροφη συμπεριφορά είναι η δυνατότητα δημιουργίας επίπεδων φακών [1,5] όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4. Επιπλέον, όπως δείχθηκε το 2000 από τον J. Pendry [5], οι φακοί αυτοί μπορούν να προσφέρουν θεωρητικά άπειρη διακριτική ικανότητα, γι' αυτό και είναι γνωστοί ως τέλει φακοί.



Σχ. 1.4: Επίπεδος φακός με τη χρήση αριστερόστροφων μεταυλικών (β) σε σύγκριση με την τεχνολογία των υπάρχοντων καμπυλωτών φακών (α)

### 1.3 Από τη θεωρία στην πράξη: Τα πρώτα Αριστερόστροφα Μεταυλικά

### 1.3.1 Εισαγωγή

Έπρεπε να περάσουν σχεδόν 30 χρόνια από την εργασία του Veselago για να επανέλθει το ζήτημα των αριστερόστροφων υλικών στο προσκήνιο της έρευνας. Το πρώτο βήμα έγινε το 1996 όταν ο John Pendry et. al. [2] με αφορμή την μελέτη και δημιουργία φωτονικών υλικών διαπίστωσε ότι τα παράλληλα σύρματα μπορούσαν να αντιστρέψουν το ηλεκτρικό πεδίο που προσέπιπε σε αυτά ακόμα και σε μικροκυματικές συχνότητες, να δώσουν δηλαδή αρνητικό  $\epsilon$ , εξαρτώμενο από τη διάμετρο και τη συγκέντρωσή τους.

Το κύριο πρόβλημα που αφορούσε την επιβεβαίωση της θεωρίας του Veselago ήταν η δημιουργία υλικών με αρνητικό  $\mu(\omega)$ . Το πρόβλημα λύθηκε το 1999 πάλι από τον Pendry et al [3], όταν διαπιστώθηκε ότι μεταλλικοί δακτύλιοι με μικρές εγκοπές (**Split-Ring Resonator – SRR**), όπως αυτός που φαίνεται στο σχ. 1.5, παρουσιάζουν το πολυπόθητο αρνητικό  $\mu$ , καθώς λειτουργούν ως ταλαντωτές κυκλικών ρευμάτων όταν βρίσκονται υπό την επίδραση εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου. Αυτή η ταλάντωση δημιουργεί συντονισμό και κοντά και πάνω από τη συχνότητα συντονισμού η μαγνητική διαπερατότητα σε ένα σύστημα πολλών δακτυλίων παίρνει αρνητικές τιμές.

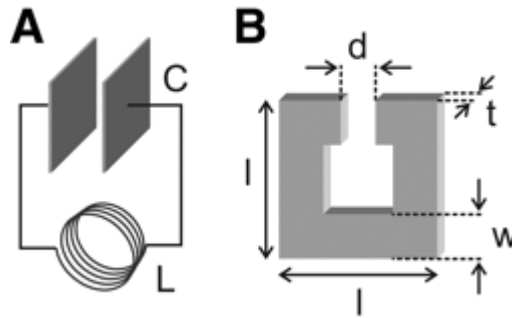


Σχ. 1.5: Split Ring Resonator (SRR)

Ένα ακόμα σημαντικό βήμα προς την υλοποίηση των ιδεών του Pendry ήταν η ανακάλυψη ότι η τοποθέτηση των μεταλλικών συρμάτων (**Wires**) σε μια δομή που αποτελείται από περιοδικά επαναλαμβανόμενους SRR μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση αρνητικού  $\epsilon(\omega)$  και αρνητικού  $\mu(\omega)$  στην ίδια περιοχή συχνοτήτων, όταν ένα ΗΜ κύμα προσπίπτει σε αυτή. Τέτοια ήταν και η πρώτη δομή που παρουσίασε πειραματικά αριστερόστροφη συμπεριφορά και αποτέλεσε την αρχή για ένα ευρύ τομέα έρευνας πάνω στα αριστερόστροφα μεταϋλικά. [6]

### 1.3.2 Το κύκλωμα LC στα SRR

Τα περισσότερα από τα υπάρχοντα αριστερόστροφα μεταϋλικά αποτελούνται από ομόκεντρους διακοπτόμενους μεταλλικούς δακτυλίους (SRRs) και μεταλλικά σύρματα. Τα μεταλλικά σύρματα παράγουν την αρνητική διηλεκτρική συνάρτηση,  $\epsilon < 0$ , και οι ομόκεντροι διακοπτόμενοι μεταλλικοί δακτύλιοι παράγουν την αρνητική μαγνητική διαπερατότητα,  $\mu < 0$ .

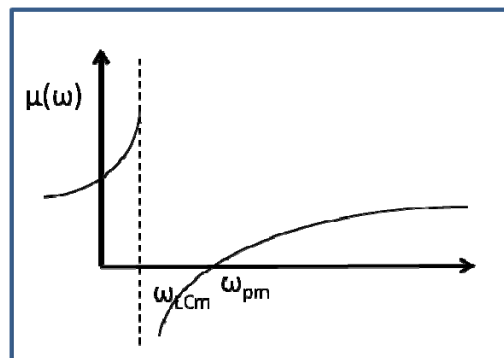


Σχ. 1.6 Το κύκλωμα LC στα SRR

Καθώς προσπίπτει το ηλεκτρομαγνητικό κύμα στο SRR, το SRR διαρρέεται με ρεύμα  $I$  με αποτέλεσμα στα άκρα της εγκοπής να υπάρχει συγκέντρωση φορτίου. Η συγκέντρωση φορτίου δημιουργεί το φαινόμενο του πυκνωτή στο χώρο μεταξύ των 2 επιφανειών της εγκοπής. Το SRR, λόγω του κυκλικού ρεύματος, έχει επίσης αυτεπαγωγή  $L$  και το αποτέλεσμα είναι να δημιουργείται ένα κύκλωμα LC με συχνότητα συντονισμού  $\omega_{LC} = 1/\sqrt{LC}$  (βλέπε σχ. 1.6). Η χωρητικότητα του πυκνωτή μπορεί να προσεγγιστεί από την χωρητικότητα για δύο παράλληλες πλάκες, δηλαδή  $C = \epsilon_0 \epsilon_c w t / d$  με το  $w$  να είναι το πλάτος του μετάλλου το  $t$  το πάχος και το  $d$  το πλάτος της εγκοπής. Η αυτεπαγωγή  $L$  μπορεί να προσεγγιστεί με αυτή ενός σωληνοειδούς, δηλαδή  $L = \mu_0 l^2 / t$ , με το  $l$  να είναι η πλευρά του SRR.

Χρησιμοποιώντας την προσέγγιση κυκλώματος πυκνωτή-πηνίου για τη συμπεριφορά του SRR και κάποιες βασικές σχέσεις του ηλεκτρομαγνητισμού που συνδέουν τη μαγνήτιση με το  $\mu$ , προκύπτει η σχέση της μαγνητικής διαπερατότητας  $\mu$  [7,8], με την συχνότητα του προσπίπτοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος  $\omega$ . Αυτή είναι

$$\mu(\omega) = \frac{\mu_0 (1 - \frac{F}{1 - \gamma^2})}{1 - \frac{F}{1 - \gamma^2} - \frac{\omega^2}{\omega_{LCm}^2}}$$

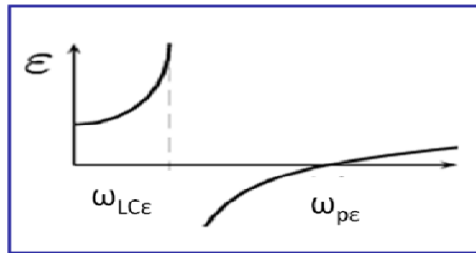


Σχ. 1.7: Η συνάρτηση  $\mu(\omega)$  για την δομή των SRRs

με το  $\omega_{LCm}$  να είναι η συχνότητα μαγνητικού συντονισμού, το  $F$  να είναι ένας αριθμητικός παράγοντας θετικός και μικρότερος της μονάδας που προκύπτει από τις διαστάσεις της δομής, ενώ το  $\gamma$  είναι ο συντελεστής απόσβεσης ο οποίος είναι ίσος με το λόγο της αντίστασης  $R$  προς την αυτεπαγωγή  $L$ , δηλαδή  $\gamma = R/L$ .

Αντίστοιχη συμπεριφορά παρουσιάζει στη δομή των SRR και η ηλεκτρική επιδεκτικότητα  $\epsilon$  [8], ως συνάρτηση της συχνότητας  $\omega$  του προσπίπτοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Αυτή η συμπεριφορά είναι αντίστοιχη με εκείνη των πεπερασμένου μήκους συρμάτων που έχει ως αποτέλεσμα η  $\epsilon$  να παίρνει αρνητικές

τιμές λίγο μετά την συχνότητα ηλεκτρικού συντονισμού  $\omega_0$  και μέχρι την συχνότητα πλάσματος  $\omega_p$ . Η συνάρτηση του  $\epsilon(\omega)$  είναι



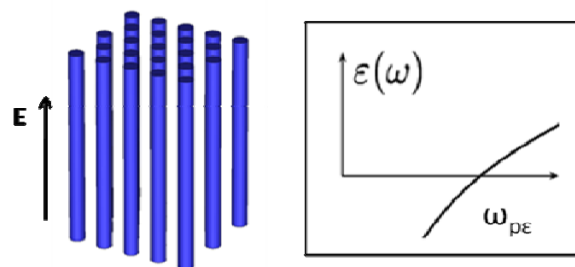
Σχ. 1.8: Η διηλεκτρική συνάρτηση για τη δομή των SRR

με το  $\omega_{pe}$  να είναι η συχνότητα πλάσματος της δομής και το  $\omega_{LCE}$  η συχνότητα ηλεκτρικού συντονισμού.

### 1.3.3 Η διηλεκτρική συνάρτηση $\epsilon(\omega)$ στα Wires

Για τα επαναλαμβανόμενα συνεχή σύρματα (Wires) [8] η ηλεκτρική επιδεκτικότητα  $\epsilon(\omega)$ , ως συνάρτηση της συχνότητας δίνεται από τον τύπο

—) και έχει τη μορφή που δείχνεται στο σχήμα 1.9.



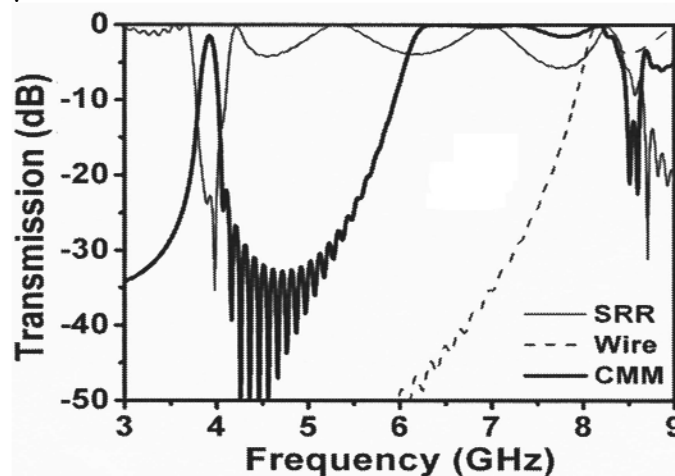
Σχ 1.9 Συνάρτηση  $\epsilon(\omega)$  για την δομή των επαναλαμβανόμενων συρμάτων

Στην έκφραση του  $\epsilon(\omega)$ ,  $\omega$  είναι η συχνότητα του προσπίπτοντος ΗΜ κύματος ενώ  $\omega_{pe}$  είναι η συχνότητα πλάσματος της δομής πάνω από την οποία το υλικό γίνεται διαπερατό από το ΗΜ κύμα, δηλ. η  $\epsilon(\omega)$  γίνεται θετική. Η διαφορά από τα παραπάνω είναι ότι στα συνεχόμενα σύρματα δεν υπάρχει συντονισμός σε μη μηδενική συχνότητα. Η μαγνητική διαπερατότητα των συρμάτων είναι σταθερή και ίση με μονάδα.

### 1.3.4 Η σύνθετη δομή των Wires με τα SRRs

Έχοντας μελετήσει τις δύο δομές των SRRs και των Wires και την συμπεριφορά της μαγνητικής διαπερατότητας και της ηλεκτρικής επιδεκτικότητας σε αυτά, απομένει να δειχθεί πώς ο συνδυασμός τους οδηγεί σε αριστερόστροφο μεταυλικό και πώς επιδεικνύεται η αριστερόστροφη αυτή συμπεριφορά. Όταν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει στη δομή των SRRs τότε στο φάσμα διαπερατότητας στις τιμές όπου το  $\mu$  είναι αρνητικό φαίνεται ένα ελάχιστο. Επειδή οι αρνητικές τιμές του  $\mu(\omega)$  οδηγούν σε μη πραγματικές τιμές του  $n$  ( $n =$

) δεν υπάρχει διάδοση του κύματος σε αυτή τη περιοχή τιμών (βλ. σχήμα 1.10). Στα Wires, επίσης, στην περιοχή συχνοτήτων όπου η ηλεκτρική επιδεκτικότητα έχει αρνητικές τιμές, όπως συνέβη με το  $\mu$  στα SRR's έτσι και εδώ ο δείκτης διάθλασης  $n$  παίρνει φανταστικές τιμές ( $n = \dots$ ). Σύμφωνα με τα όσα περιέγραψε ο Veselago στην αρχική του δημοσίευση αυτό που αναμένεται να συμβεί όταν οι δυο αυτές δομές συνδυαστούν είναι στις περιοχές συχνοτήτων όπου και το  $\mu(\omega)$  και το  $\varepsilon(\omega)$  είναι αρνητικά να υπάρχει διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Αυτή η διάδοση του κύματος στο φάσμα διαπερατότητας εμφανίζεται ως «κορυφή» στην περιοχή συχνοτήτων όπου ούτε για τα SRRs, ούτε για τα Wires μόνα τους υπήρχε διάδοση. Μια τέτοια κορυφή φαίνεται π.χ. στο σχήμα 1.10, σε συχνότητες  $\sim 4$  GHz, στην καμπύλη για τη συνδυασμένη δομή των SRRs με τα Wires (CMM). Αυτή η κορυφή λόγω του ότι προκύπτει από τον συνδυασμό αρνητικού  $\varepsilon(\omega)$  και  $\mu(\omega)$  αποδεικνύει την αριστερόστροφη συμπεριφορά και χαρακτηρίζει το CMM ως αριστερόστροφο μεταυλικό.



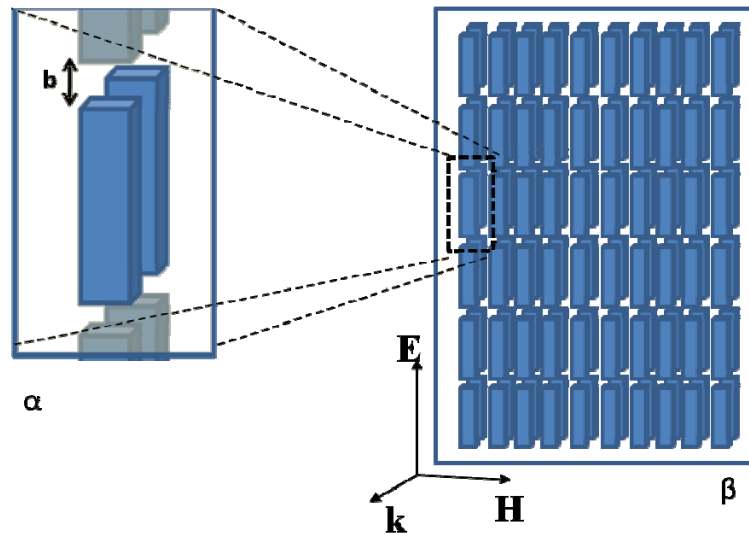
Σχ. 1.10 [9]: Φάσμα διαπερατότητας για τα SRRs, τα Wires και το μεταυλικό που προκύπτει από τη συνδυασμένη δομή τους (Composed MetaMaterial - CMM)

## **Κεφ. 2: Η δομή των επαναλαμβανόμενων διακεκομμένων συρμάτων και παραλλαγές της**

### **2.1 Εισαγωγή - Η δομή των ζευγαριών συρμάτων πεπερασμένου μήκους (Slab Pairs)**

Η δομή των SRR με Wires είναι η πιο κοινή προσέγγιση που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία αριστερόστροφων μεταυλικών. Ωστόσο η δομή των SRR είναι αρκετά πολύπλοκη ως προς την κατασκευή της και τον χαρακτηρισμό της, κυρίως σε νανομετρική κλίμακα, οπότε μελετήθηκαν εναλλακτικές δομές που μπορούν να δώσουν αρνητική μαγνητική διαπερατότητα και να είναι απλούστερες ως προς τη κατασκευή τους. Μια τέτοια δομή είναι τα ζεύγη μεταλλικών διακεκομμένων συρμάτων πεπερασμένου μήκους (σχ. 2.1), τα λεγόμενα slab pairs [10]. Τα slab pairs όπως θα δειχθεί παρακάτω, λειτουργούν σαν μαγνητικοί συντονιστές, ανάλογα με τα SRRs. Ο συνδυασμός τους με τα wires μπορεί να δώσει αριστερόστροφη συμπεριφορά [10]. Παρακάτω παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο ένα περιοδικό

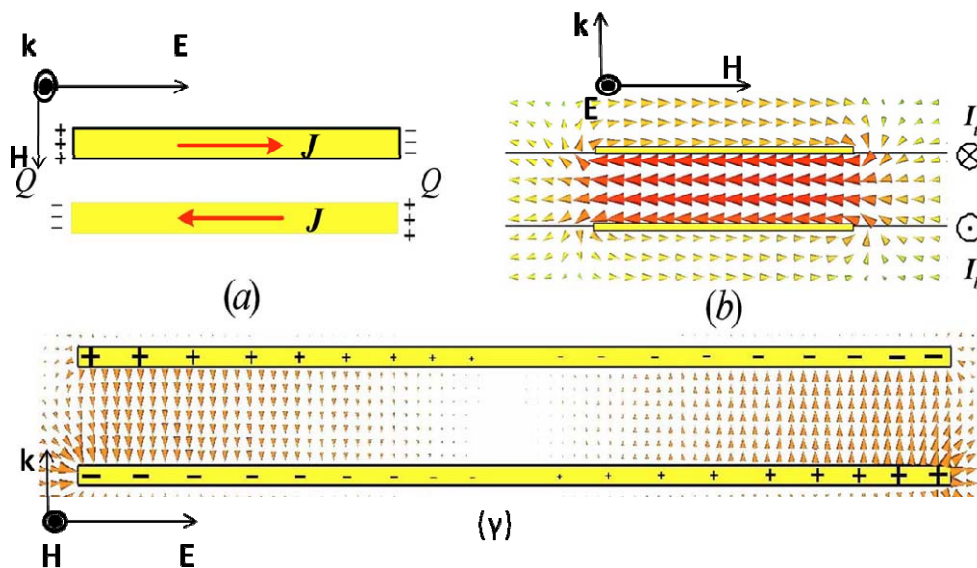
σύστημα από slab pairs μπορεί να δώσει  $\mu(\omega) < 0$  λίγο μετά τον μαγνητικό συντονισμό.



Σχ 2.1: Ένα ζευγάρι μεταλλικών συρμάτων που απέχει απόσταση  $b$  από τα γειτονικά του ζευγάρια (α) και το πλέγμα(β) συνολικά στη δομή των ζευγαριών μεταλλικών συρμάτων πεπερασμένου μήκους (Slab – pairs)

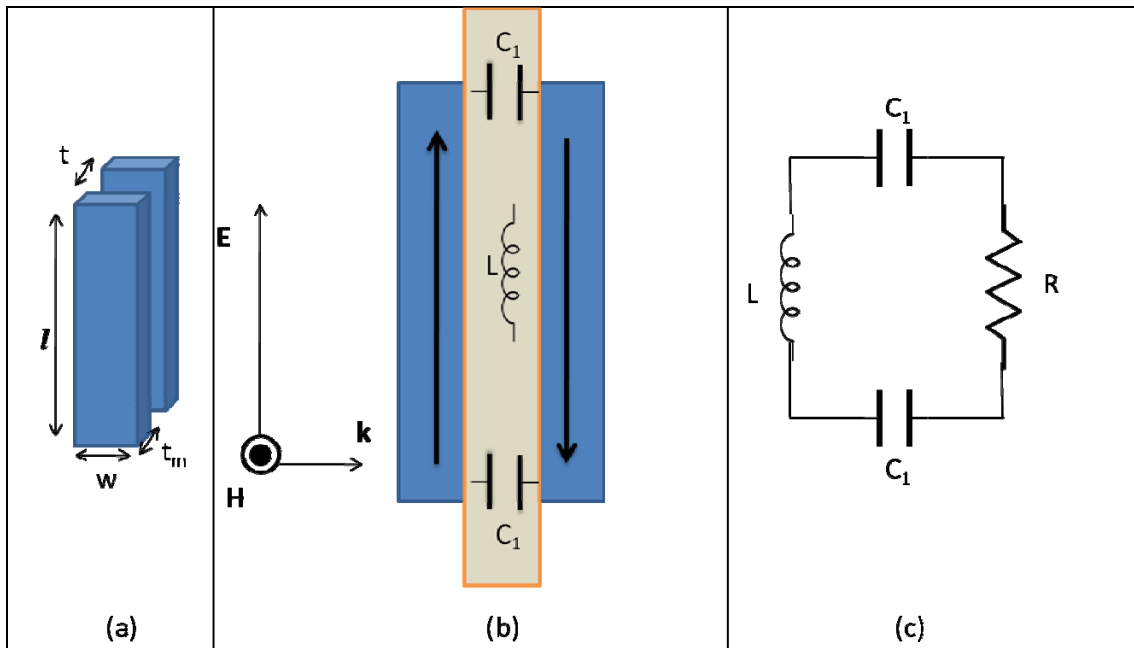
## 2.2 Το κύκλωμα RLC στη δομή των slab pairs.

Όταν σε ένα περιοδικό σύστημα από slab-pairs προσπίπτει ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα με την κατεύθυνση και την πόλωση που δείχνεται στο σχ. 2.1(β) έχουμε το φαινόμενο του πυκνωτή στα άκρα των πλακών και του πηνίου ανάμεσα στις πλάκες, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2, όπου εικονίζονται τα επαγόμενα ρεύματα και τα πεδία που δημιουργούνται όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει κάθετα στη δομή των slab-pairs.



Σχ. 2.2[10]: Απεικόνιση των ρευμάτων που διαρρέουν τα slab-pairs κατά τον μαγνητικό συντονισμό στο (α) επίπεδο  $(\mathbf{E}, \mathbf{k})$  στην κατεύθυνση του  $\mathbf{H}$ , (β) στο επίπεδο του μαγνητικού πεδίου  $(\mathbf{H}, \mathbf{k})$  και γ) στο επίπεδο του ηλεκτρικού πεδίου  $(\mathbf{E}, \mathbf{k})$ . Οι κώνοι αντιπροσωπεύουν την ένταση του μαγνητικού πεδίου στο (β) και του ηλεκτρικού πεδίου στο (γ) στο σύστημα.

Έτσι κάθε ζευγάρι συμπεριφέρεται ως κύκλωμα RLC, που αποτελείται από 2 πυκνωτές σε σειρά, αυτεπαγωγή L και αντίσταση R. Παρακάτω θα δειχθεί πώς το κύκλωμα αυτό οδηγεί σε  $\mu(\omega)$  αρνητικό.



Σχ. 2.3: (α) Ένα ζευγάρι συρμάτων (slab – pair) και (β),(c) το κύκλωμα RLC που δημιουργείται σε αυτό όταν ένα HM κύμα προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια του.

Υποθέτουμε ότι έχουμε ένα σύστημα slab-pair όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3(α) με μήκος  $l$ , πλάτος  $w$  και πάχος μετάλλου  $t_m$ , με απόσταση μεταξύ των 2 μεταλλικών φύλλων  $t$ . Το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο είναι της μορφής

$$\mathbf{H} = H_0 \mathbf{k} \quad (2.1)$$

στην κατεύθυνση που φαίνεται στο σχήμα 2.3(β). Η μαγνητική ροή από το εξωτερικό πεδίο είναι

$$\phi = \mu_0 l t H \quad (2.2)$$

Εφαρμόζοντας των 2<sup>ο</sup> κανόνα του Kirchhoff και αντικαθιστώντας τις (2.1),(2.2) προκύπτει

$$- \quad (2.3)$$

με το R να είναι η αντίσταση του υλικού και το C η χωρητικότητα του συστήματος. Η προφανής λύση της εξίσωσης (2.3) θα είναι η  $I = I_0$  με

$$\quad (2.4)$$

Η διπολική μαγνητική ροπή,  $m$ , και η μαγνήτιση,  $M$  στο σύστημα είναι (σε μέτρο)

$$m = \text{εμβαδόν} \times \text{ρεύμα} = lI \quad (2.5)$$

$$M = (N_{LC}/V)lI = lI/V_{uc} \quad (2.6)$$

με το  $N_{LC}$  να είναι ο αριθμός των κυκλωμάτων στον όγκο  $V$ , και ο όγκος  $V_{uc}$  να είναι ο όγκος της μοναδιαίας κυψελίδας του πλέγματος που προκύπτει από τις σταθερές πλέγματος  $\alpha_E$ ,  $\alpha_H$ ,  $\alpha_k$  στην κατεύθυνση των πεδίων  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$  και του κυματανύσματος  $\mathbf{k}$ .

Χρησιμοποιώντας την μαγνητική επιδεκτικότητα  $\chi_m$  στις  $M = \chi_m H$  και  $\mu(\omega)/\mu_0 = 1 + \chi_m$  εξάγουμε την συνάρτηση

$$\mu(\omega) = \mu_0 \left\{ 1 - \frac{\left(\frac{1}{V_{uc}}\right) \left[\frac{\mu_0(lI)^2}{L}\right] \omega^2}{\omega^2 - \omega_{LC}^2 + i\omega\gamma} \right\} \quad (2.7)$$

με  $\omega_{LC} = 1/\sqrt{LC}$  και  $\gamma = R/L$

Για να υπολογιστεί ο συντελεστής αυτεπαγωγής  $L$  θεωρούμε το σύστημα ως ένα σωληνοειδές με εμβαδόν  $l^2$  και πλάτος  $w$  (σχήμα 2.3(α, β)). Το  $L$  σε αυτή την περίπτωση είναι ίσο με

$$L = \mu_0 t l / w \quad (2.8)$$

Αντίστοιχα για την χωρητικότητα του πυκνωτή που δημιουργείται στα άκρα 2 παράλληλων συρμάτων στο μαγνητικό συντονισμό ισχύει η εξίσωση της μορφής

$$C_1 = \epsilon_0 \epsilon_b w l' / t$$

όπου εδώ το  $l'$  αναφέρεται σε ένα μέρος του μήκους των συρμάτων που συνεισφέρει στη δημιουργία του πυκνωτή όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2(γ) και είναι ίσο με  $l' = c_1 l$  - με  $0.2 < c_1 < 0.3$  -, ενώ το  $\epsilon_b$  είναι η διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού υλικού που βρίσκεται ανάμεσα στα slabs. Η συνολική χωρητικότητα  $C$  στο slab pair είναι υποδιπλάσια της  $C_1$  καθώς υπάρχουν δυο πυκνωτές σε σειρά στο κύκλωμα. Οπότε η συνολική χωρητικότητα είναι

$$C = \epsilon_0 \epsilon_b w c_1 l / 2t \quad (2.9)$$

Αντικαθιστώντας την (2.8) στην (2.7) προκύπτει

$$\mu(\omega) = \mu_0 \left\{ 1 - \frac{\left(\frac{wlt}{V_{uc}}\right) \omega^2}{\omega^2 - \omega_{LC}^2 + i\omega\gamma} \right\} \quad (2.10)$$

με την  $\mu(\omega)$  να συμπεριφέρεται ακολουθώντας το μοντέλο Drude – Lorentz. Αποτέλεσμα είναι το  $\mu(\omega)$  να παίρνει αρνητικές τιμές λίγο πάνω από τη συχνότητα συντονισμού  $\omega_{LC}$ . Έτσι ελέγχοντας τη συχνότητα συντονισμού μπορούμε να ελέγξουμε τις περιοχές όπου το  $\mu(\omega)$  είναι αρνητικό.

### 2.3 Η συχνότητα μαγνητικού συντονισμού $\omega_{LC}$



Η συχνότητα μαγνητικού συντονισμού για το κύκλωμα RLC των slab pairs είδαμε ότι προκύπτει από τα L, C του κυκλώματος από τη σχέση  $\omega_{LC} = 1/\sqrt{LC}$ . Αντικαθιστώντας τις (2.8), (2.9) προκύπτει

$$\omega_{LC} = \frac{1}{\sqrt{(\epsilon_0 \epsilon_b w c_1 l / 2t)(\mu_0 t l / w)}} = \frac{1}{\sqrt{(\epsilon_0 \epsilon_b c_1 \mu_0 l^2 / 2)}} \quad (2.11)$$

όπου φαίνεται ότι η συχνότητα συντονισμού εξαρτάται μόνο από το μήκος  $l$  των slabs στο σύστημα. Αυτή η διαπίστωση είναι σχετική γιατί έχουμε θεωρήσει τον πυκνωτή του κυκλώματος ως σωληνοειδές και έχουμε εξάγει την έκφραση της αυτεπαγωγής. Οι υπόλοιποι γεωμετρικοί συντελεστές της δομής συνεισφέρουν στην συχνότητα συντονισμού αλλά η συνεισφορά αυτή είναι αμελητέα. Όπως θα δειχθεί παρακάτω και από τις προσομοιώσεις αλλά και όπως φαίνεται και στην (2.11) το μήκος των slabs είναι αυτό που κυρίως καθορίζει (αντιστρόφως ανάλογα) την συχνότητα μαγνητικού συντονισμού.

## 2.4 Ηλεκτρικός συντονισμός στα slab pairs

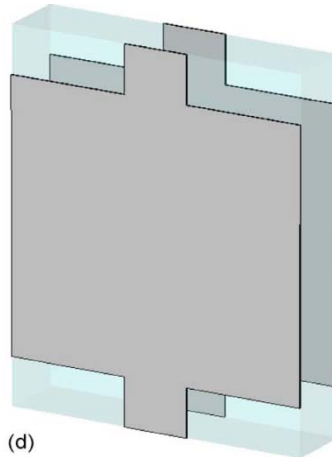
Όταν έχουμε ηλεκτρικό συντονισμό τα δυο σύρματα στα slab-pairs διαρρέονται από ρεύμα ομόρροπο που δημιουργεί συμμετρία καθρέπτη στο κύκλωμα [10]. Αποτέλεσμα είναι να μην δημιουργούνται πυκνωτές μεταξύ των συρμάτων του ζεύγους. Οι πυκνωτές που συνεισφέρουν στο κύκλωμα και επηρεάζουν τον ηλεκτρικό συντονισμό προκύπτουν από την αλληλεπίδραση των συνεπίπεδων slab, στο χώρο δηλαδή ανάμεσα στο πάνω άκρο του ενός slab και στο κάτω άκρο του επόμενου του στην κατεύθυνση του  $\mathbf{E}$  (η απόσταση  $b$  στο σχήμα 2.1(α)). Η συχνότητα ηλεκτρικού συντονισμού  $\omega_{LCe}$  προκύπτει από την εξίσωση  $\omega_{LCe} = \frac{1}{\sqrt{L_e C_e}}$  με  $C_e$  τη χωρητικότητα των πυκνωτών αυτών και  $L_e$  την αυτεπαγωγή του συστήματος, που στην περίπτωση αυτή είναι προσεγγιστικά η αυτεπαγωγή ευθύγραμμου μεταλλικού σύρματος. Το  $C_e$  προκύπτει από την σχέση για δυο παράλληλα σύρματα, μήκους  $w$  και ακτίνας  $t_m$  σε απόσταση  $b$  μεταξύ τους δηλαδή  $C_e = \frac{\pi \epsilon w}{\ln(\frac{b}{t_m})}$ . Το  $L_e$  είναι της μορφής  $(\mu/\pi)g(w/l)$  με το  $g(x)$  να συμπεριφέρεται ως  $-\ln(x)$  όταν το  $x$  τείνει στο 0. Σαν συμπέρασμα λοιπόν προκύπτει ότι ο ηλεκτρικός συντονισμός στα slab pairs επηρεάζεται από το  $b$  αλλά και από το  $w$  δηλαδή η αλλαγή του λόγου  $w/l$  έχει μεγάλη επίδραση στον ηλεκτρικό συντονισμό εν αντιθέσει με τον μαγνητικό συντονισμό όπου το  $w$  παίζει πολύ μικρό ρόλο.

## 2.5 Η δομή των fishnet

Γνωρίζοντας ότι τα slab pairs μπορούν να δώσουν αρνητική διαπερατότητα έγινε η προσπάθεια συνδυασμού της δομής αυτής με wires, ώστε να επιτευχθεί ταυτόχρονα αρνητική επιδεκτικότητα και διαπερατότητα. Αρχικά σαν λογικό επακόλουθο θα ήταν να τοποθετηθούν τα wires ανάμεσα στα slabs [9], ωστόσο η σύνθετη δομή που τελικά επικράτησε είναι αυτή των φαριδιών slabs – συνήθως με πλάτος όσο το πλάτος της μοναδιαίας κυψελίδας - στα οποία είναι κολλημένα τα wires με αποτέλεσμα να φαίνονται σαν λαίμοι στο σύστημα. Αυτή η δομή ονομάστηκε fishnet [12] (βλ. σχήμα 2.4) και είναι από τις πιο κοινές πλέον δομές που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη αριστερόστροφων υλικών γιατί δίνει την εντονότερη αριστερόστροφη συμπεριφορά από άλλες σύνθετες δομές slab-pairs με

wires. Η προσθήκη των λαιμών στα slabs έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της συχνότητας μαγνητικού συντονισμού καθώς για τη συνδυασμένη δομή λαιμών – slabs η αυτεπαγωγή είναι μικρότερη από εκείνη των slabs μόνο, καθώς ισχύει για την αυτεπαγωγή [11]:

$$\frac{1}{L_{fishnet}} = \frac{1}{L_{slabs}} + \frac{1}{L_{necks}} \quad (2.12)$$



Σχ. 2.4: Η μοναδιαία κυψελίδα στη δομή fishnet.

## 2.6 Το μήκος κύματος και η σύγκριση του με τις διαστάσεις των δομών

Η συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που προσπίπτει στις δομές που έχουν αναφερθεί μπορεί να είναι της τάξεως των GHz και σε κάποιες περιπτώσεις των THz, ανάλογα με το μέγεθος των δομών του συστήματος. Το εύρος των συχνοτήτων που θα μελετηθούν σε αυτή την εργασία είναι από 1 – 30 GHz. Αυτό σημαίνει για το μήκος κύματος  $\lambda$  ότι η τιμή του κυμαίνεται μεταξύ των 300 – 10 mm αντίστοιχα. Ένας από τους στόχους στην δημιουργία αριστερόστροφων μεταλλικών είναι οι διαστάσεις της δομής στην οποία προσπίπτει το κύμα να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες από το μήκος κύματος απόκρισης της δομής, ώστε η δομή να συμπεριφέρεται σαν ένα ομογενές υλικό. Έτσι, οι δομές που θα σχεδιαστούν πρέπει να είναι κλίμακας μήκους μικρότερης από 10mm. Το φαινόμενο που καθορίζει τη συμπεριφορά της μαγνητικής διαπερατότητας και κατ' επέκταση και την συνολική αριστερόστροφη συμπεριφορά των υλικών είναι ο μαγνητικός συντονισμός. Γι αυτό το λόγο γίνεται μία προσπάθεια ο μαγνητικός συντονισμός να επιτυγχάνεται σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερα μήκη κύματος σε σχέση με το μέγεθος της δομής (π.χ. της μοναδιαίας κυψελίδας της), άρα σε όσο το δυνατόν μικρότερες συχνότητες.

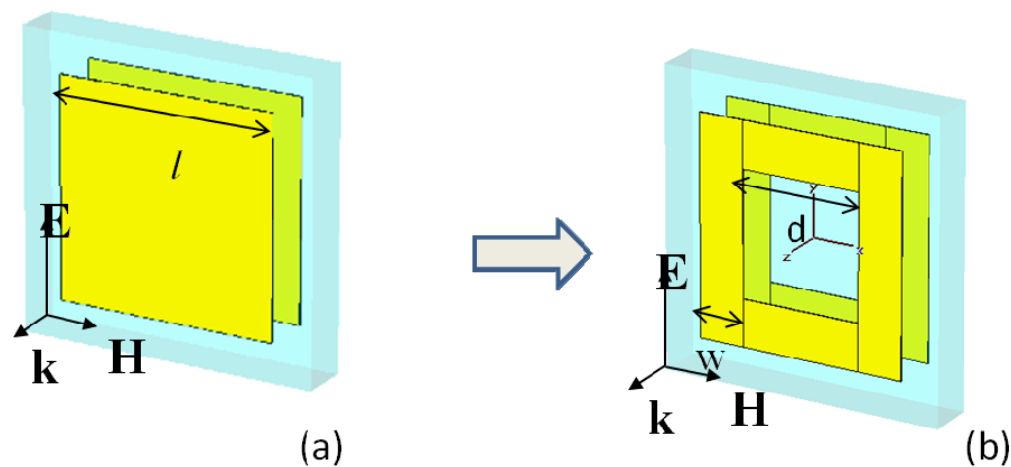
## 2.7 Από τα slab-pairs στα slabs with opening

Έχοντας υπόψη τις παραπάνω εξαρτήσεις, δηλαδή το πώς εξαρτάται η συχνότητα μαγνητικού κυρίως, αλλά και ηλεκτρικού συντονισμού από τις διαστάσεις

της δομής θα γίνει μια προσπάθεια ελέγχου των συντονισμών με αλλαγές των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της δομής.

Συμφώνα με τα προηγούμενα στη δομή των slab-pair η μεταβολή του μήκους του slab,  $l$ , είναι ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει τις συχνότητες τόσο του μαγνητικού όσο και του ηλεκτρικού συντονισμού. Αυτό οδηγεί σε αδυναμία να ρυθμιστούν ανεξάρτητα και κατά το επιθυμητό οι συχνότητες μαγνητικού και ηλεκτρικού συντονισμού, κάτι το οποίο είναι αναγκαίο για τη βελτιστοποίηση των αριστερόστροφων υλικών.

Ένα μέρος αυτής της εργασίας εστιάζεται στην εξέταση του αν και κατά πόσο αφαιρώντας κατάλληλα κομμάτια μετάλλου από τα slabs δίνει την δυνατότητα ανεξάρτητης ρύθμισης ηλεκτρικού και μαγνητικού συντονισμού.



Σχ. 2.3 Από τη δομή των cut slabs(α) αφαιρείται ένα κομμάτι μετάλλου δημιουργώντας την δομή των cut slabs with opening (β).

Στα παρακάτω θα ασχοληθούμε με τετράγωνα slab-pairs (δηλαδή ίσο μήκος  $l$  με πλάτος  $w$ ) ώστε η συμπεριφορά του συστήματος να μην εξαρτάται από την πόλωση του προσπίπτοντος ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στην περίπτωση κάθετης πρόσπτωσης (βλ. σχήμα 2.3). Για διάκριση τα ονομάζουμε παρακάτω cut – slabs και συμβολίζουμε την αυτεπαγωγή και τη χωρητικότητα που επιδεικνύουν στο μαγνητικό συντονισμό με  $L_{cs}$ ,  $C_{cs}$  αντίστοιχα. Για την  $L_{cs}$  ισχύει σύμφωνα με την (2.8) ότι  $L_{cs} = \mu_0 l t / l$ . Όταν όμως αφαιρέσουμε ένα κομμάτι μετάλλου με πλάτος  $d = (l - 2w)$  από το εσωτερικό της δομής όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3(β) τότε ο συντελεστής αυτεπαγωγής του συστήματος γίνεται

$$L_{csg} = \mu_0 l t / 2w > \mu_0 l t / (2w + d) \quad L_{csg} > L_{cs} \quad (2.13)$$

όπου ο  $L_{csg}$  είναι ο συντελεστής αυτεπαγωγής της δομής με το opening (gap). Η χωρητικότητα στον μαγνητικό συντονισμό δεν παρουσιάζει μεγάλη διαφορά μεταξύ της δομής των cut – slabs και αυτής των cut slabs with opening, αφού στα άκρα των slab δεν έχουν αλλάξει πολύ οι διαστάσεις των «πυκνωτών». Εκείνο που μπορεί να αλλάξει( αναλόγως με τα πόσο μεγάλο είναι το κομμάτι που αφαιρούμε) είναι το ποσοστό του μετάλλου που συνεισφέρει στον πυκνωτή δηλαδή ο συντελεστής  $c_1$  της  $l'$  στην (2.9). Αν η αλλαγή αυτή δεν είναι μεγάλη μπορούμε κατά προσέγγιση να θεωρήσουμε ότι  $C_{csg} = C_{cs}$ , παίρνοντας για τη συχνότητα συντονισμού:

$$L_{csg} > L_{cs} \Rightarrow 1/\omega_{csg}^2 C > 1/\omega_{cs}^2 C \Rightarrow \omega_{cs} > \omega_{csg} \quad (2.14)$$

Συμπέρασμα των παραπάνω είναι ότι αφαιρώντας ένα κομμάτι μετάλλου από την δομή των cut-slabs περιμένουμε να μειωθεί η συχνότητα στην οποία το σύστημα παρουσιάζει μαγνητικό συντονισμό. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, για να επηρεαστεί η συχνότητα συντονισμού των δομών αυτών η μόνη γεωμετρική παράμετρος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι το μήκος των slabs. Αύξηση όμως του μήκους συνεπάγεται ταυτόχρονη μείωση τόσο του μαγνητικού όσο και του ηλεκτρικού συντονισμού (συντονισμού στο  $\varepsilon(\omega)$ ). Η συχνότητα ηλεκτρικού συντονισμού μειώνεται πιο γρήγορα από εκείνη του μαγνητικού, πλησιάζει τη συχνότητα μαγνητικού συντονισμού [8] και επηρεάζει καταστροφικά το αρνητικό  $\varepsilon(\omega)$  των συνεχών wires (λαιμών) στην περιοχή συχνοτήτων του μαγνητικού συντονισμού όταν τα cut-slabs συνδυαστούν με wires για την επίτευξη αριστερόστροφης απόκρισης (σημειώστε ότι ο συντονισμός στο  $\varepsilon(\omega)$  δεν έχει μόνο περιοχή αρνητικών τιμών αλλά και πολύ μεγάλων θετικών τιμών).

Επαναλαμβάνουμε εδώ ότι ένα ζητούμενο στα αριστερόστροφα υλικά είναι να έχουν διαστάσεις μοναδιαίας κυψελίδας όσο το δυνατόν μικρότερες του μήκους κύματος μαγνητικού συντονισμού ώστε να συμπεριφέρονται στην περιοχή συχνοτήτων του συντονισμού αυτού αυτή ως ομογενή υλικά και να μην εμφανίζουν σύνθετα φαινόμενα συμβολής και περίθλασης.

Με τους υπολογισμούς και τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω εξετάζεται θεωρητικά και πειραματικά και ποσοτικοποιείται η επίδραση της αφαίρεσης μετάλλου από τα cut-slabs, επιβεβαιώνοντας τις προαναφερόμενες αρχικές εκτιμήσεις.

## **Κεφάλαιο 3 Προσομοιώσεις - Σχεδίαση Αριστερόστροφων Μεταυλικών.**

### **3.1 Στόχος των προσομοιώσεων**

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις μικροκυματικής διαπερατότητας με τη βοήθεια του προγράμματος CST Microwave Studio με σκοπό την χρησιμοποίηση των αποτελεσμάτων στο σχεδιασμό και βελτιστοποίηση σύνθετων υλικών που παρουσιάζουν αριστερόστροφη συμπεριφορά και επιπρόσθετα είναι ιστροπικά στο επίπεδο κάθετα στην κατεύθυνση διάδοσης, ώστε η διάδοση να είναι ανεξάρτητη της πόλωσης του προσπίπτοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Οι δομές που μελετώνται βασίζονται στα cut-slabs για την επίτευξη του αρνητικού  $\mu(\omega)$  και σε συνεχή σύρματα, ενωμένα με τα slabs για την επίτευξη του αρνητικού  $\varepsilon(\omega)$ .

Η βελτιστοποίηση τέτοιων δομών έγκειται σε:

- Μετακίνηση του μαγνητικού συντονισμού σε όσο το δυνατό μικρότερες συχνότητες, ώστε η δομή να συμπεριφέρεται σαν ομογενές υλικό.
- Απομάκρυνση των συχνοτήτων μαγνητικού και ηλεκτρικού συντονισμού των slabs με στόχο ο ηλεκτρικός συντονισμός να μην

επιηρεάζει την ομαλότητα της καμπύλης της διηλεκτρικής συνάρτησης στην περιοχή του μαγνητικού συντονισμού

- Στα παρακάτω μελετάται κυρίως η επίδραση της αφαίρεσης μετάλλου στις συχνότητες συντονισμού των δομών cut – slabs καθώς και στην αριστερόστροφη συμπεριφορά cut-slabs και wires.

### 3.2 Λογισμικό προσομοίωσης – CST Microwave Studio

Βασικό εργαλείο για την ανάλυση και το σχεδιασμό των σύνθετων υλικών στον υπολογιστή είναι το λογισμικό CST Microwave Studio. Το λογισμικό αυτό είναι ένα εύχρηστο πρόγραμμα προσομοίωσης της ηλεκτρομαγνητικής διάδοσης σε περιοχές υψηλών συχνοτήτων. Είναι ειδικά σχεδιασμένο για γρήγορη και αποδοτική ανάλυση και σχεδίαση διατάξεων όπως κεραίες, φίλτρα, γραμμές μεταφοράς, διασυνδεδετές, τυπωμένα κυκλώματα και πολλές άλλες.

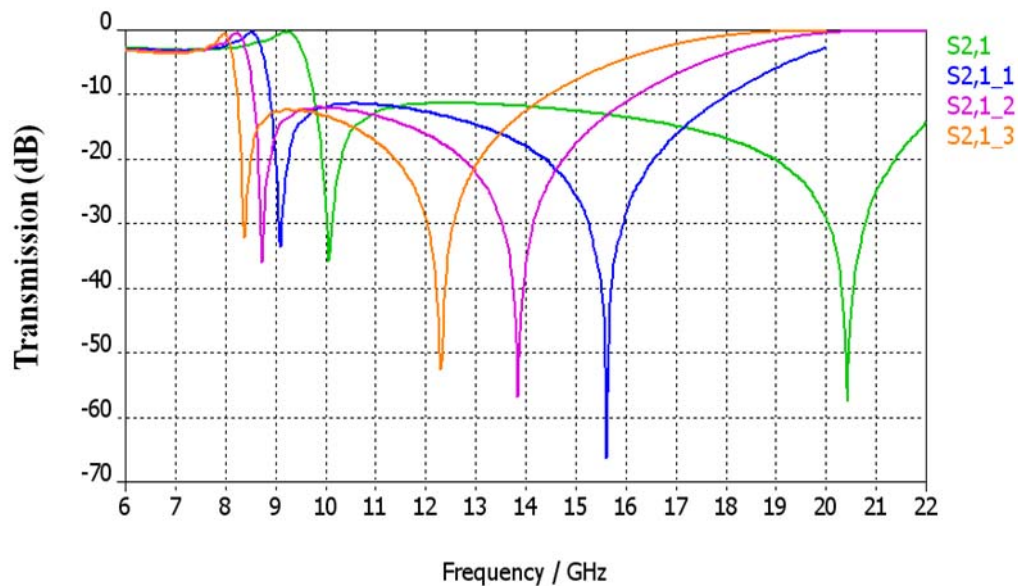
Η μαθηματική μέθοδος που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα είναι η μέθοδος πεπερασμένης ολοκλήρωσης (FIT), η οποία δεν είναι τίποτε άλλο παρά μία μέθοδος ακριβούς επίλυσης των ολοκληρωτικών εξισώσεων του Maxwell κατάλληλη για εφαρμογή σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η αριθμητική αυτή μέθοδος παρέχει ένα γενικό σχήμα διακριτοποίησης του χώρου, το οποίο εφαρμόζεται σε διάφορα ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα από υπολογισμούς στατικών πεδίων ως εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων στο πεδίο του χρόνου ή της συχνότητας.

Η μέθοδος εργασίας με το πρόγραμμα είναι σε γενικές γραμμές η εξής: εισάγεται το γεωμετρικό μοντέλο της προς προσομοίωση διάταξης και ορίζονται οι παράμετροι της μελέτης, δηλαδή περιοχή συχνοτήτων, ιδιότητες υλικών, πηγή ηλεκτρομαγνητικού σήματος, συνοριακές συνθήκες, ανιχνευτές και το πρόγραμμα πραγματοποιεί την προσομοίωση της διάταξης στην επιλεγμένη μπάνα συχνοτήτων και τέλος αναλύονται τα αποτελέσματα αυτής.

Το πρόγραμμα είναι αρκετά εύκολο στη χρήση από αρχάριους αλλά ταυτόχρονα παρέχει δυνατότητες και μεθόδους που απαιτούν μεγάλη εξοικείωση και ως εκ τούτου αφορούν κυρίως προχωρημένους χρήστες. Προβλέπονται τέσσερις διαφορετικές τεχνικές προσομοίωσης, κάθε μία κατάλληλη για συγκεκριμένα προβλήματα. Πρέπει, επίσης, να τονιστεί ότι όπως και οποιαδήποτε μέθοδος επίλυσης με H/Y, η προσομοίωση περιέχει σφάλματα τα οποία με κατάλληλο χειρισμό πρέπει να ελαχιστοποιούνται.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων εμφανίζονται με τη μορφή του σχήματος 3.1. Αυτή είναι η μορφή 1D, η μία από τις 3 που παρέχει το πρόγραμμα (2D, αποτελέσματα μακρινού πεδίου οι άλλες δυο), η οποία παρουσιάζει τις παραμέτρους σκέδασης (S – parameters) στην περιοχή συχνοτήτων που μελετάται, δηλαδή τον συντελεστή ανάκλασης (S1,1 - πλάτος και φάση) και τον συντελεστή διέλευσης (S1,1 – πλάτος και φάση). Οι παράμετροι σκέδασης είναι το εργαλείο που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της διάδοσης ενός κύματος στην υπό μελέτη δομή. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1, εξετάζοντας το πλάτος διέλευσης (S2,1) μπορεί να διαπιστωθεί το κατά πόσο περνάει διαμέσου του αντικειμένου που μελετάται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα που εκπέμπεται από την πηγή. Το S2,1 αναφέρεται στο κύμα που λαμβάνει ο ανιχνευτής (σημείο 2) από την πηγή (σημείο 1), κανονικοποιημένο ως προς το προσπίπτον κύμα, ώστε σε περίπτωση πλήρους διέλευσης  $S_{2,1}=1$ . Στην περίπτωση του σχήματος 3.1, όπου η κλίμακα στον κατακόρυφο άξονα είναι dB, απεικονίζεται στην πραγματικότητα το  $10\log_{10}(S_{2,1})$ . Έτσι αν η τιμή είναι στο 0 σημαίνει ότι η διάδοση του κύματος είναι απρόσκοπτη, ενώ οι αρνητικές τιμές δείχνουν ανάκλαση ή απορρόφηση του κύματος. (Στο σχήμα

3.1 τα  $S_{2,1\_1}$ ,  $S_{2,1\_2}$  κτλ είναι υπολογισμοί για διαφορετικές δομές που έχουν τοποθετηθεί στο ίδιο διάγραμμα ώστε να γίνει σύγκριση μεταξύ τους.)

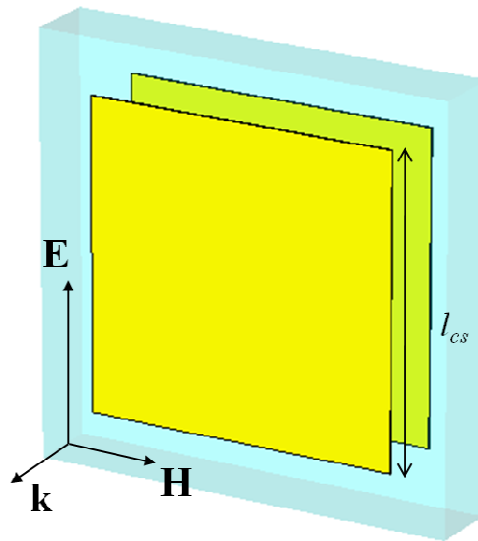


Σχ. 3.1: Αποτελέσματα προσομοίωσης με τη χρήση του προγράμματος CST Microwave Studio

### 3.3: Προσομοιώσεις - Αποτελέσματα:

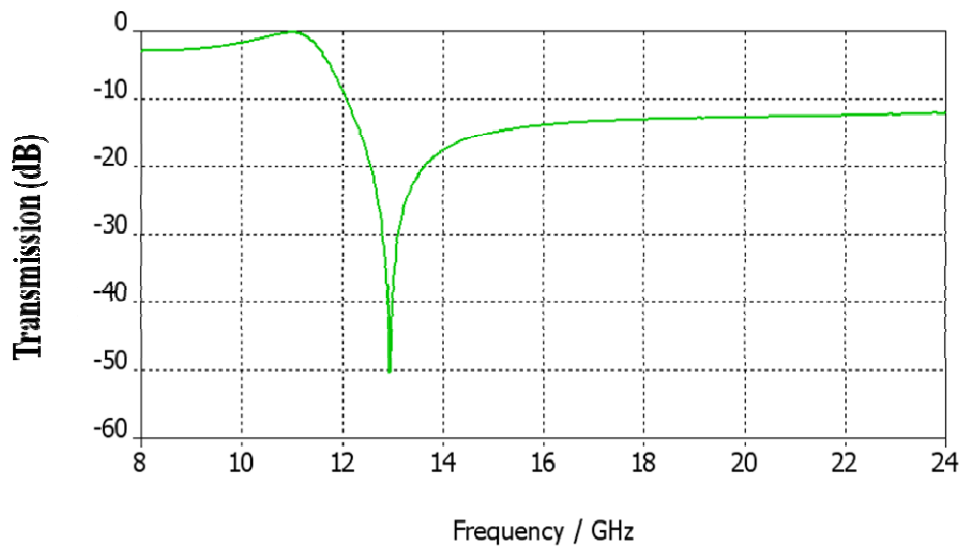
#### 3.3.1: Η αρχική δομή των Cut Slab και ο χαρακτηρισμός της

Σύμφωνα με τη θεωρία των slab-pairs όπως αναπτύχθηκε παραπάνω μπορεί να υπάρξει αρνητική μαγνητική διαπερατότητα ( $\mu(\omega) < 0$ ) από μια δομή η οποία αποτελείται από δυο παράλληλα μεταλλικά φύλλα που επαναλαμβάνονται περιοδικά στον χώρο (βλ. παρ. 2.7). Οι δομές που θα μελετήσουμε βασίζονται σε τέτοια μεταλλικά φύλλα, τα οποία επιπλέον είναι τετράγωνα ώστε το σύστημα να είναι ισοτροπικό στο επίπεδο **E-H** (σχ. 3.2). Τα μεταλλικά αυτά φύλλα (slabs) είναι τοποθετημένα το ένα απέναντι στο άλλο στις επιφάνειες διηλεκτρικού υλικού (σχ. 3.2), δίνοντας τη δομή που ονομάσαμε cut – slabs. Στις δομές που μελετάμε οι διαστάσεις του διηλεκτρικού στη μοναδιαία κυψελίδα του πλέγματος είναι  $9.5 \text{ mm} \times 9.5 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm}$  ενώ η ηλεκτρική αγωγιμότητα του διηλεκτρικού είναι  $0.0038 \text{ S/m}$  και η διηλεκτρική σταθερά είναι 2.8. Το μέταλλο των slabs είναι χαλκός με αγωγιμότητα  $5.88 \times 10^8 \text{ S/m}$ , ενώ το πάχος των μεταλλικών φύλλων είναι  $0.030 \text{ mm}$ . Οι προσομοιώσεις γίνονται στο διάστημα συχνοτήτων  $1.0 \text{ GHz} - 30.0 \text{ GHz}$ , ενώ το κύμα προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια των φύλλων (σχ. 3.2). Το πάχος του μετάλλου καθώς και οι διαστάσεις του υποστρώματος παραμένουν σταθερά σε όλες τις προσομοιώσεις.



Σχήμα 3.2 : Η αρχική δομή των cut-slabs

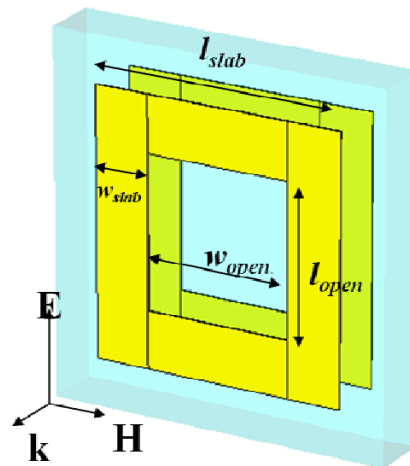
Η αρχική δομή την οποία μελετήσαμε και επιχειρήσαμε να βελτιστοποιήσουμε έχει πλευρά τετραγώνου του φύλλου  $l_{cs} = 7.0 \text{ mm}$ . Το πλάτος διέλευσης στην περίπτωση αυτή (για μία μοναδιαία κυψελίδα στην κατεύθυνση διάδοσης) φαίνεται στο Σχ. 3.3:



Σχήμα 3.3: Το φάσμα διαπερατότητας των cut-slabs

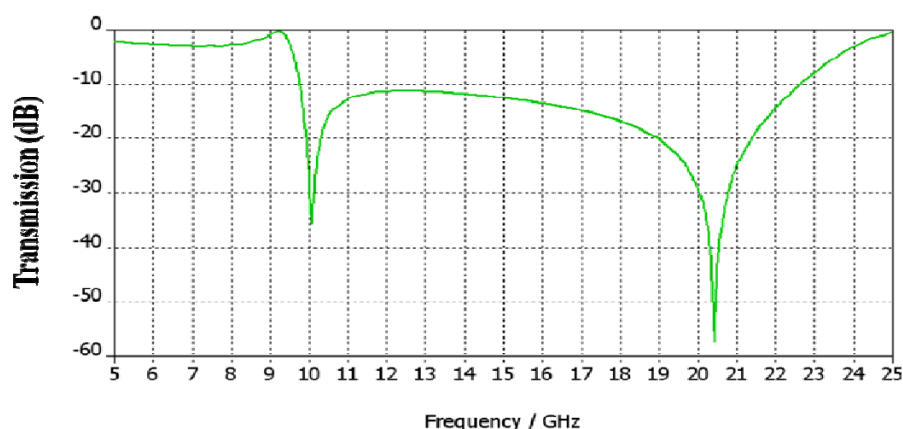
Το ελάχιστο που παρατηρείται στα 13 GHz προκύπτει από τον μαγνητικό συντονισμό καθώς αμέσως μετά το μαγνητικό συντονισμό οι τιμές του  $\mu$  είναι αρνητικές άρα δεν υπάρχει διάδοση του κύματος. Ο ηλεκτρικός συντονισμός συναντάται σε μεγαλύτερες συχνότητες από τα 24 GHz και δεν εμφανίζεται σε αυτό το διάγραμμα. Σειρά έχει η αφαίρεση μετάλλου από αυτή τη δομή και η επίδραση της στη συμπεριφορά της.

### 3.3.2 Η επίδραση του opening στον μαγνητικό συντονισμό



Σχημα 3.4: Η δομή των cut-slab with opening

Εδώ εξετάζουμε την επίδραση της αφαίρεσης κομματιών μετάλλου από τα slabs, στην ηλεκτρομαγνητική απόκρισή τους. Σκοπός είναι ο ηλεκτρικός και ο μαγνητικός συντονισμός να εξακολουθούν να είναι απομακρυσμένοι με όσο το δυνατό πιο έντονη την ένταση του  $\mu(\omega)$  αλλά η δομή να έχει μικρότερη ποσότητα μετάλλου και ο μαγνητικός συντονισμός να εμφανίζεται σε όσο το δυνατόν χαμηλότερες συχνότητες. Για το λόγο αυτό αφαιρείται ένα κομμάτι μετάλλου από τα slabs διατηρώντας σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους του συστήματος. Το εσωτερικό κομμάτι που αφαιρείται είναι αρχικά τετράγωνο με πλευρά  $w_{open} = 4.00$  mm (βλ. Σχ. 3.4). Η επίδραση της αφαίρεσης αυτής στο συντελεστή διέλευσης, φαίνεται στο Σχ. 3.5.



Σχήμα 3.5: Φάσμα διαπερατότητας των cut-slabs with opening

Όπως παρατηρούμε η συχνότητα μαγνητικού συντονισμού μετακινήθηκε από τα 13 GHz (σχ. 3.3) στα 10 GHz, Η συχνότητα ηλεκτρικού συντονισμού (~20.5



GHz) επίσης μειώθηκε σε σχέση με τα cut-slabs χωρίς αφαίρεση μετάλλου, ο ηλεκτρικός συντονισμός όμως εξακολουθεί να παραμένει ικανοποιητικά απομακρυσμένος από τον μαγνητικό.

Η μείωση της συχνότητας μαγνητικού συντονισμού με την αφαίρεση μετάλλου είναι σε συμφωνία με τις εκτιμήσεις της παραγράφου 2.7. Πιο συγκεκριμένα αφαιρώντας το τετράγωνο μεταλλικό κομμάτι με πλευρά 4.00 mm αλλάζει άμεσα η αυτεπαγωγή  $L$  και σύμφωνα με την εξίσωση 2.8 για την αυτεπαγωγή του συστήματος έχουμε

$$L_{cs} = \mu_0 l t / [(2W_{slab}) + w_{open}] = \mu_0 l t / (7\text{mm}) \text{ και } L_{csg} = \mu_0 l t / (2W_{slab}) = \mu_0 l t / (3\text{mm})$$

συνεπώς  $L_{csg} = 2.33 \times L_{cs}$ . Αντικαθιστώντας στη συχνότητα συντονισμού για τις δυο αυτεπαγωγές και θεωρώντας ότι  $C_{cs} = C_{csg}$  τότε προκύπτει:

$$L_{csg} = 2.33 \times L_{cs} \Rightarrow 1/\omega_{csg}^2 C = 2.33 \times 1/\omega_{cs}^2 C \Rightarrow \omega_{cs} = \sqrt{2.33} \times \omega_{csg}$$

οπότε για  $\omega_{cs} = 13$  GHz και με αφαίρεση 4.00 mm μετάλλου από το εσωτερικό του slab αναμένεται για το  $\omega_{csg}$ :

$$\omega_{csg} = 1/\sqrt{2.33} \times \omega_{cs} = 13 \text{ GHz}/1.53 = 8.51 \text{ GHz}$$

Διαπιστώνουμε ότι σύμφωνα με τη θεωρία αυτή η αφαίρεση του τετραγώνου μετάλλου από τη δομή οδηγεί σε μείωση κατά 4.5 GHz της συχνότητας μαγνητικού συντονισμού. Η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη από αυτή που τελικά εμφανίστηκε κατά τη διεξαγωγή της προσομοίωσης, η οποία ήταν στα 3.0 GHz.. Αυτό οφείλεται από τη μία στο ότι το μοντέλο σωληνοειδούς που χρησιμοποιήσαμε για την αυτεπαγωγή της δομής μας είναι περισσότερο κατάλληλο για ποιοτικές εκτιμήσεις παρά για ποσοτικούς υπολογισμούς και από την άλλη στο ότι έχουμε αγνοήσει τη μεταβολή της χωρητικότητας των πυκνωτών του κυκλώματος RLC του σχήματος 2.3, με την αφαίρεση του μετάλλου. (Εμείς θεωρήσαμε στους υπολογισμούς μας ότι το  $C_{cs} = C_{csg}$  δηλαδή ότι ουσιαστικά το  $l'$  της εξίσωσης (2.9) παραμένει σταθερό. Ωστόσο αυτό δεν είναι απόλυτα ακριβές καθώς με την αφαίρεση του μετάλλου αλλάζει και επιφάνεια του slab που συνεισφέρει στη δημιουργία του πυκνωτή. Η αφαίρεση του μετάλλου οδηγεί σε μικρότερο  $l'$  άρα και σε μικρότερη χωρητικότητα ( $C_{csg} < C_{cs}$  βλ. εξ. 2.9) με συνέπεια η μείωση της συχνότητας συντονισμού να είναι μικρότερη απ'ότι θα ήταν αν χωρητικότητα παρέμενε σταθερή, δεδομένου ότι  $\omega \sim 1/\sqrt{C}$ ).

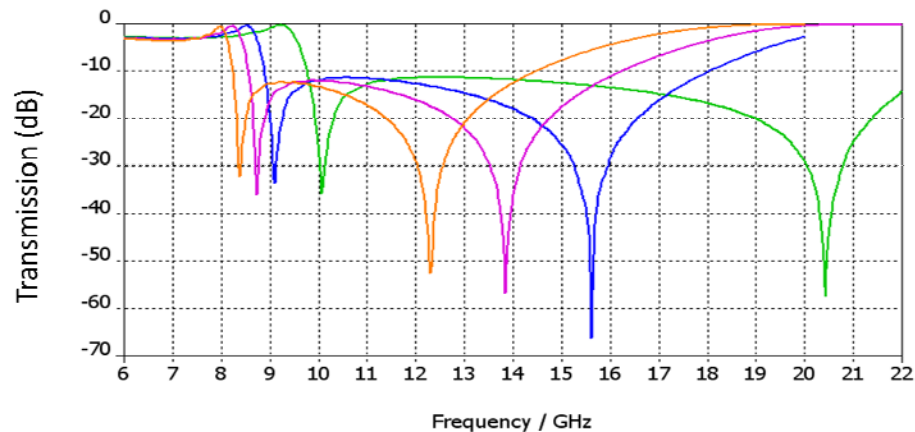
Αυτό που κατά βάση μας ενδιαφέρει όμως είναι ότι η συχνότητα συντονισμού μειώνεται και μάλιστα σε ικανοποιητικό, ως προς την τιμή της, βαθμό

### 3.3.3 Η επίδραση των ελεγχόμενων γεωμετρικών αλλαγών στη συμπεριφορά των δομών

Προσπαθώντας να κατανοήσουμε καλύτερα την επίδραση της αφαίρεσης μετάλλου στη δομή των cut-slabs διενεργούμε τρεις ακόμα προσομοιώσεις με βάση τη δομή που εξετάστηκε παραπάνω (Σχ. 3.4) Εξετάζουμε χωριστά (α) την επίδραση της πλευράς του τετραγώνου που αφαιρούμε,  $l_{open} = w_{open}$ , στις συχνότητες συντονισμού κρατώντας σταθερές τις διαστάσεις του slab, (β) την επίδραση της πλευράς του τετραγώνου που αφαιρούμε σε slabs μικρότερου μήκους,  $l_{slab}$ . Ο στόχος

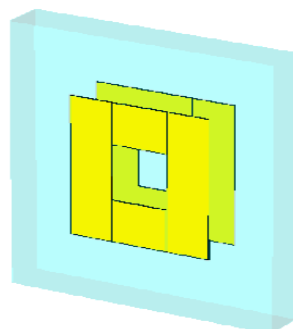
είναι να ελέγξουμε αν στη μεταβολή των συχνοτήτων με την αφαίρεση μετάλλου παίζει ρόλο η αλληλεπίδραση γειτονικών slabs στην κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου και (γ) την επίδραση της αφαίρεσης ορθογώνιων κομματιών μετάλλου με μήκος ( $l_{open}$ ) από πλάτος ( $w_{open}$ ), στις συχνότητες συντονισμού, για να προσδιορίσουμε τον κύριο παράγοντα που προκαλεί μεταβολή συχνοτήτων κατά την αφαίρεση μετάλλου.

(α) Συμφώνα με το Σχ. 3.4 κρατώντας το  $l_{slab}$  σταθερό (7.0 mm) μεταβάλλουμε το  $w_{open} = l_{open}(4.0\text{mm} - 6.0\text{ mm})$  και προσομοιώνουμε, με τα αποτελέσματα να φαίνονται στο Σχ. 3.6



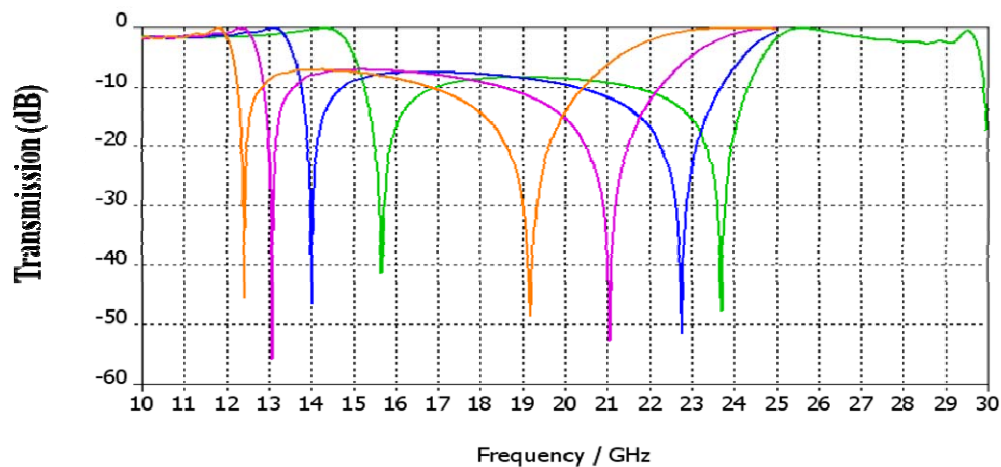
Σχ. 3.6 :α) Φάσμα διαπερατότητας για cut – slabs με gap διατηρώντας σταθερό το  $l_{slab}$  (7mm) και μεταβάλλοντας το  $w_{open}$ : **πράσινο** = 4.0mm , **μπλε** = 5.0mm , **ροζ** = 5.5 mm , **πορτοκαλί** = 6.0mm. με το πρώτο ελάχιστο κάθε καμπύλης να αντιστοιχεί στη συχνότητα μαγνητικού συντονισμού και το δεύτερο στη συχνότητα ηλεκτρικού συντονισμού

Όπως φαίνεται και από τις προσομοιώσεις ο ηλεκτρικός με τον μαγνητικό συντονισμό πλησιάζουν καθώς αυξάνεται η πλευρά του τετραγώνου του μετάλλου που αφαιρείται. Πιο συγκεκριμένα το ελάχιστο του μαγνητικού συντονισμού μειώνεται κατά 2 GHz περίπου όταν αυξάνεται το  $w_{open}$  κατά 2.0 mm, τη στιγμή που το ελάχιστο του ηλεκτρικού συντονισμού φαίνεται να μειώνεται κατά περίπου 9 GHz στην αντίστοιχη αύξηση κατά 2.0 mm του  $w_{open}$ . Η μείωση της συχνότητας μαγνητικού συντονισμού ακολουθεί την συμπεριφορά που περιγράφηκε παραπάνω για την αφαίρεση μετάλλου από το slab: όσο μεγαλώνει το κομμάτι που αφαιρείται τόσο μικραίνει και η συχνότητα που παρατηρείται ο μαγνητικός συντονισμός. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρουσιάζει και η συχνότητα ηλεκτρικού συντονισμού η οποία φαίνεται να επηρεάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό από την αφαίρεση του μετάλλου με αποτέλεσμα να πλησιάζει την συχνότητα μαγνητικού συντονισμού.



Σχήμα 3.7: Η δομή των cut slab with opening με μικρότερες διαστάσεις ( $l_{\text{slab}} = 5.0 \text{ mm}$ )

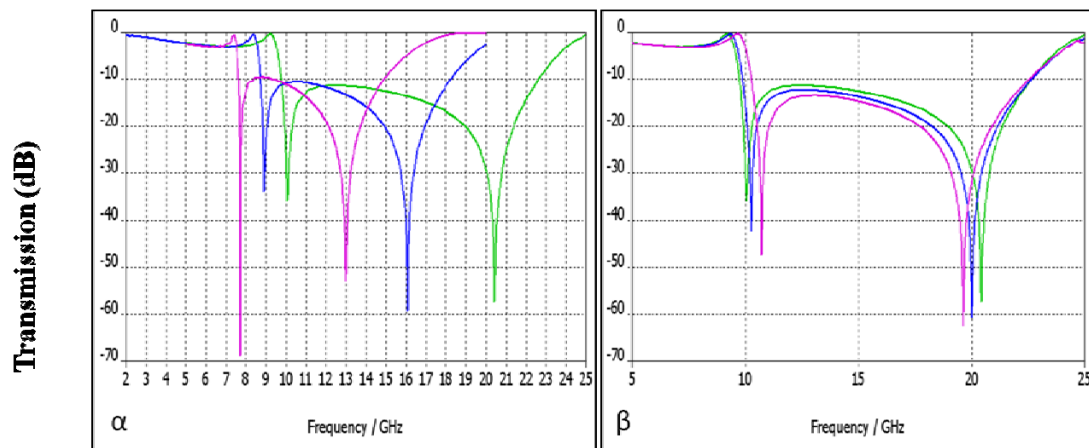
(β) Στη συνέχεια εξετάζεται ο ρόλος του  $w_{\text{open}}$  σε slabs αρκετά μικρότερα από την αντίστοιχη πλευρά της μοναδιαίας κυψελίδας (βλ. σχ. 3.7). Στο σχ. 3.8 παρουσιάζεται προσομοίωση, στην οποία μεταβάλλεται το  $w_{\text{open}}$  από 2.0 mm σε 4.0 mm σε slabs μήκους  $l_{\text{slab}} = 5.0 \text{ mm}$ , δηλαδή αρκετά μικρότερο σε σχέση με αυτό του Σχ. 3.6. Ο στόχος είναι να ελέγξουμε αν στη μετακίνηση των συντονισμών με το μέγεθος του opening, η οποία παρατηρήθηκε στο σχ. 3.6 υπάρχει επίδραση της χωρητικότητας μεταξύ slabs γειτονικών μοναδιαίων κυψελίδων στην κατεύθυνση του E. Η χωρητικότητα αυτή είναι αμελητέα για slabs μήκους πολύ μικρότερου από την αντίστοιχη πλευρά της μοναδιαίας κυψελίδας



Σχ. 3.8 : α)Φάσμα διαπερατότητας για cut – slabs με gap διατηρώντας σταθερό το  $l_{\text{slab}}$  (5.0 mm) και μεταβάλλοντας το  $l_{\text{open}} = w_{\text{open}}$ : πράσινο = 2.0mm , μπλε = 3.0mm , ροζ = 3.5mm , πορτοκαλί = 4.0mm.

Όπως φαίνεται στο σχ. 3.8, οι συχνότητες ηλεκτρικού και μαγνητικού συντονισμού στο παραπάνω σύστημα παρουσιάζουν την αναμενόμενη μετακίνηση προς τα αριστερά καθώς αυξάνεται το μήκος του opening,  $l_{\text{open}}$ . Ωστόσο η μείωση της συχνότητας συντονισμού είναι σχεδόν ίδια και για τον ηλεκτρικό (5.0 GHz) και για τον μαγνητικό (4.0 GHz) συντονισμό σε αντίθεση με το σχ. 3.6 όπου η μετακίνηση του ηλεκτρικού συντονισμού είναι σαφώς εντονότερη. Αυτή η διαφορά οφείλεται στο γεγονός ότι το slab είναι «απομονωμένο» από τα συνεπιπεδα γειτονικά slabs με αποτέλεσμα να μην υπάρχει έντονη αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Η μετακίνηση όμως του μαγνητικού συντονισμού στο σχ. 3.8 είναι συγκρίσιμη με αυτή του σχ. 3.6, δείχνοντας ότι η μόνη χωρητικότητα και αυτεπαγωγή που παίζει ρόλο στον μαγνητικό συντονισμό είναι η χωρητικότητα και αυτεπαγωγή μέσα στη μοναδιαία κυψελίδα όπως έχουμε λάβει υπόψη στους υπολογισμούς μας μέσω κυκλώματος RLC.

(γ) Επόμενο βήμα είναι να εξεταστεί αν οι μεταβολές που αναφέρθηκαν στα (α) και (β), πιο πάνω, οφείλονται περισσότερο στη μεταβολή του  $w_{\text{open}}$ , σε αυτή του  $l_{\text{open}}$  ή και στα δύο. Αρχικά μεταβάλλουμε το πλάτος  $w_{\text{open}}$ , κρατώντας σταθερό το μήκος  $l_{\text{open}}$ , και εν συνεχεία το μήκος  $l_{\text{open}}$ , κρατώντας σταθερό το πλάτος  $w_{\text{open}}$ . Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχ. 3.9



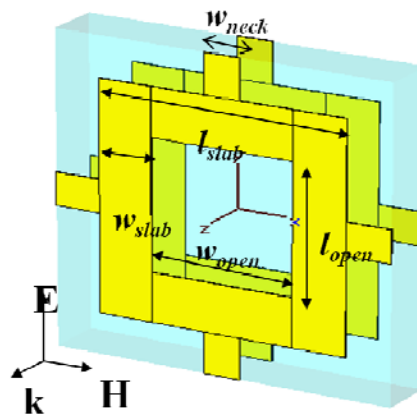
Σχ. 3.9 : Φάσμα διαπερατότητας για cut – slabs με opening διατηρώντας σταθερό το  $l_{\text{slab}}$  (7.0mm) και μεταβάλλοντας α) το  $w_{\text{open}}$  ( $l_{\text{open}} = 4.0\text{mm}$ ), β) το  $l_{\text{open}}$  ( $w_{\text{open}} = 4.0\text{mm}$ ) με  
:πράσινο = 4.0mm , μπλε = 5.0mm , ροζ = 6.0mm

Όπως φαίνεται στο Σχ. 3.9 η συχνότητα συντονισμού (ηλεκτρικού και μαγνητικού) στις δομές αυτές επηρεάζεται σχεδόν ολοκληρωτικά από το πλάτος,  $w_{\text{open}}$ , του ανοίγματος. Κατά τη μεταβολή του  $l_{\text{open}}$  παρατηρούνται ελάχιστες μεταβολές στις συχνότητες συντονισμού (βλ. σχήμα 3.9(β)). Ειδικά για τη συχνότητα μαγνητικού συντονισμού, το γεγονός ότι ο παράγοντας που την επηρεάζει είναι το πλάτος του slab, δείχνει ότι ο κύριος συντελεστής της μείωσης της συχνότητας μαγνητικού συντονισμού με την αφαίρεση μετάλλου είναι η αύξηση της αυτεπαγωγής της δομής στο μαγνητικό συντονισμό (η αύξηση του  $w_{\text{open}}$  επιφέρει πολύ μικρή αλλαγή στη χωρητικότητα του συστήματος).

### 3.3.5 Τοποθέτηση λαιμού

Σύμφωνα με τα παραπάνω η δομή που είναι βέλτιστη για την επίτευξη αριστερόστροφης συμπεριφοράς είναι αυτή του τετράγωνου φύλλου μετάλλου με πλευρές  $l_{\text{slab}} = 7.0 \text{ mm} \times 7.0 \text{ mm}$  από το οποίο έχει αφαιρεθεί ένα τετράγωνο κομμάτι πλευράς,  $l_{\text{open}} = w_{\text{open}} = 4.0 \text{ mm}$ . Αυτή η δομή παρουσιάζει αρκετά απομακρυσμένο ηλεκτρικό συντονισμό από τον μαγνητικό ενώ η συχνότητα μαγνητικού συντονισμού είναι σε σχετικά χαμηλές τιμές (τιμές που αντιστοιχούν σε μήκη κύματος αρκετά μεγαλύτερα από το μέγεθος της μοναδιαίας κυψελίδας).

Για να μετατρέψουμε την παραπάνω δομή σε αριστερόστροφη θα πρέπει να προσθέσουμε συνεχόμενα σύρματα (wires) στην κατεύθυνση του προσπίπτοντος ηλεκτρικού πεδίου,  $\mathbf{E}$ . Έτσι προσθέτουμε στενά κομμάτια μετάλλου τα οποία ενώνουν την πάνω πλευρά του ενός φύλλου με την κάτω πλευρά του συνεπίπεδού του όπως φαίνεται στο σχήμα 3.10(για λόγους συμμετρίας προσθέτουμε τα ίδια κομμάτια και στην κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου,  $\mathbf{H}$ ). Επειδή τα κομμάτια αυτά είναι πιο στενά από την πλευρά του τετραγώνου σχηματίζουν μορφή λαιμού και γι αυτό αποκαλούνται έτσι. Στόχος, όπως είπαμε, είναι να επιτευχθεί αριστερόστροφη συμπεριφορά καθώς οι «λαιμοί» θα έχουν τον ρόλο των wires στο σύστημα.

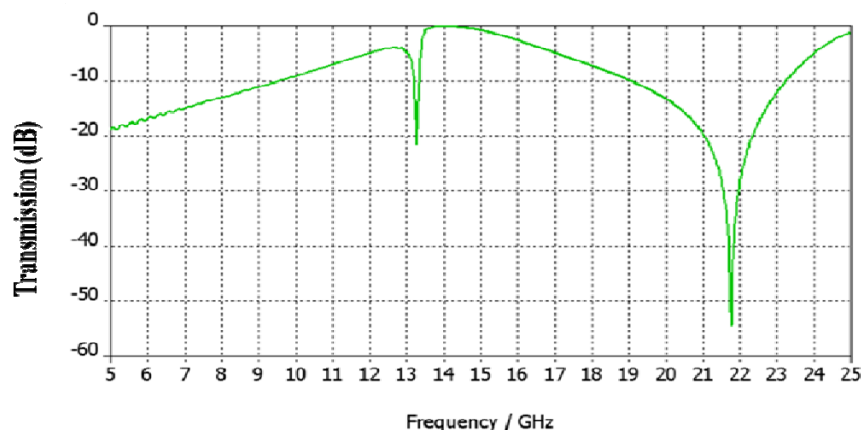


Σχ. 3.10 : Η δομή των cut-slab with opening με την προσθήκη «λαιμών»

Παρακάτω παρατίθενται οι σχετικοί υπολογισμοί οι οποίοι εξετάζουν την επίτευξη αριστερόστροφης συμπεριφοράς σε συστήματα cut-slabs με openings και προσθήκη λαιμών. Στόχος είναι η επίτευξη αριστερόστροφης συμπεριφοράς με μικρές απώλειες και όσο το δυνατό μεγαλύτερο φασματικό εύρος.

### 3.3.5 α) Στενοί λαιμοί

Αρχικά εξετάζουμε το σύστημα του σχ. 3.4 στο οποίο έχουν προστεθεί «λαιμοί» εύρους  $w_{neck} = 1.0 \text{ mm}$  (βλ. σχ. 3.10). Υπενθυμίζεται εδώ ότι οι διαστάσεις του τετραγώνου και του ανοίγματος (cut-slab with opening) είναι  $l_{slab} = w_{slab} = 7.0 \text{ mm}$ ,  $l_{open} = w_{open} = 4.0 \text{ mm}$  αντίστοιχα και θα κρατηθούν σταθερές στις περιπτώσεις που θα συζητηθούν παρακάτω. Τα αποτελέσματα για το πλάτος διέλευσης από μία μοναδιαία κυψελίδα στην κατεύθυνση διάδοσης φαίνονται στο σχήμα 3.11.

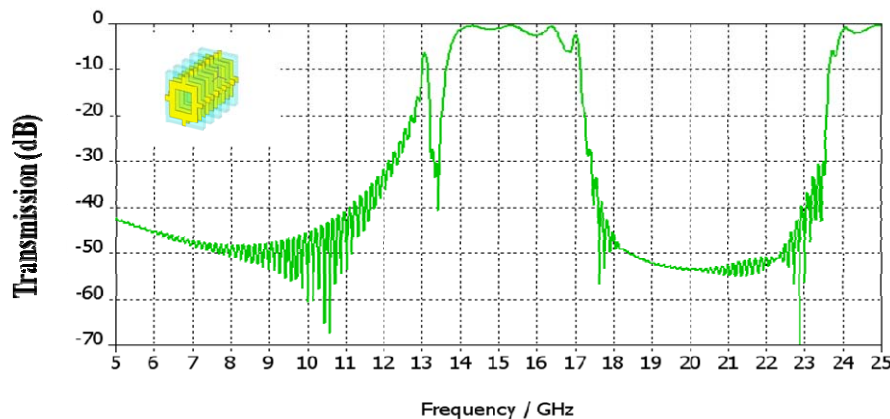


Σχ. 3.11: Φάσμα διαπερατότητας για τη δομή των cut - slabs with opening με την προσθήκη «λαιμών»

Η συχνότητα μαγνητικού συντονισμού παρατηρείται στα 13.2 GHz και η συχνότητα ηλεκτρικού συντονισμού στα 21.8. Συγκρίνοντας τα σχήματα 3.5 και 3.11

παρατηρούμε ότι η συχνότητα μαγνητικού συντονισμού αυξήθηκε με την τοποθέτηση λαιμών στη δομή, σε συμφωνία με την θεωρία της παραγράφου 2.5 (η τοποθέτηση λαιμών οδηγεί σε μείωση της συνολικής αυτεπαγωγής του συστήματος και συνεπώς σε αύξηση της συχνότητας μαγνητικού συντονισμού).

Για να διαπιστωθεί αν όντως προκύπτει αριστερόστροφη συμπεριφορά στην παραπάνω δομή χρειάζεται να γίνει η προσομοίωση τοποθετώντας περισσότερα από ένα επίπεδα (μοναδιαίες κυψελίδες) κάθετα στην κατεύθυνση διάδοσης. Έτσι επαναλαμβάνουμε τον υπολογισμό με πέντε επίπεδα της δομής κάθετα στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος, ώστε να έχουμε πέντε μοναδιαίες κυψελίδες στην κατεύθυνση διάδοσης. Η απόσταση μεταξύ γειτονικών επιπέδων στην κατεύθυνση του κυματανύσματος  $\mathbf{k}$  είναι  $a_k = 3.6 \text{ mm}$ , (από ένα οποιοδήποτε σημείο ενός επιπέδου έως το αντίστοιχο σημείο του πρώτου παράλληλου επιπέδου). Έτσι προκύπτει η δομή επαναλαμβανόμενων παράλληλων πλακών που διακρίνεται στην ένθετη εικόνα στο σχ. 3.12. Τα αποτελέσματα όσον αφορά τη διέλευση φαίνονται στο σχήμα 3.12.



Σχ. 3.12 Φάσμα διαπερατότητας για τη δομή των cut slabs with opening με την προσθήκη λαιμών, για πέντε επίπεδα στη κατεύθυνση διάδοσης του κύματος

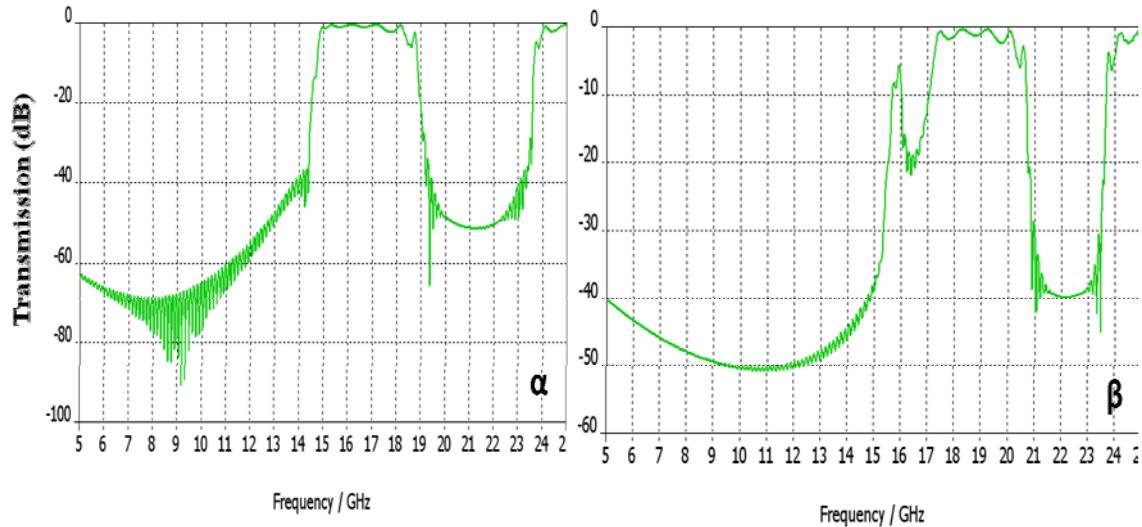
Όπως διαπιστώνεται από αντιστροφή του συντελεστή διέλευσης και ανάκλασης (δεν αναφέρεται εδώ) για υπολογισμό των παραμέτρων  $\epsilon(\omega)$  και  $\mu(\omega)$ , στην περιοχή από τα 5 ως τα 13 GHz (καθώς και αυτή από τα 17 στα 24 GHz) αντιστοιχεί σε αρνητικό  $\epsilon(\omega)$  και θετικό  $\mu(\omega)$  – γι' αυτό παρατηρείται και το ελάχιστο στον συντελεστή διέλευσης. Η περιοχή γύρω στα 13,5 GHz η οποία όπως αναφέρθηκε και στο σχ. 3.11 αντιστοιχεί σε αρνητικό  $\mu(\omega)$  εξακολουθεί να αντιστοιχεί σε ελάχιστο της διέλευσης άρα σε θετικό  $\epsilon(\omega)$ . Συνεπώς, δεν έχουμε αριστερόστροφη συμπεριφορά στη δομή μας. Ωστόσο μια μικρή επέκταση της περιοχής όπου το  $\epsilon(\omega)$  είναι αρνητικό σε μεγαλύτερες συχνότητες, διατηρώντας τη συχνότητα μαγνητικού συντονισμού σταθερή, θα μπορούσε να οδηγήσει σε αριστερόστροφη συμπεριφορά. Μια τέτοια μετατόπιση μπορεί να πραγματοποιηθεί αυξάνοντας το πλάτος του λαιμού (έτσι όμως προκαλείται μια μικρή αύξηση στη συχνότητα μαγνητικού συντονισμού).

### 3.3.5 β) Φαρδιοί λαιμοί

Αρχικά τοποθετείται λαιμός πλάτους,  $w_{\text{neck}} = 2.0 \text{ mm}$ , με αποτέλεσμα η περιοχή του μαγνητικού συντονισμού να εφάπτεται με την περιοχή αρνητικού  $\epsilon$  (σχ. 3.13(α)). Αυξάνοντας κατά 1.0 mm ακόμα το πλάτος του λαιμού ( $w_{\text{neck}} = 3.0 \text{ mm}$ ) παρατηρείται (Σχ. 3.13 (β)) να ξεχωρίζει μια κορυφή από τα 15 GHz ως τα 16 GHz, η



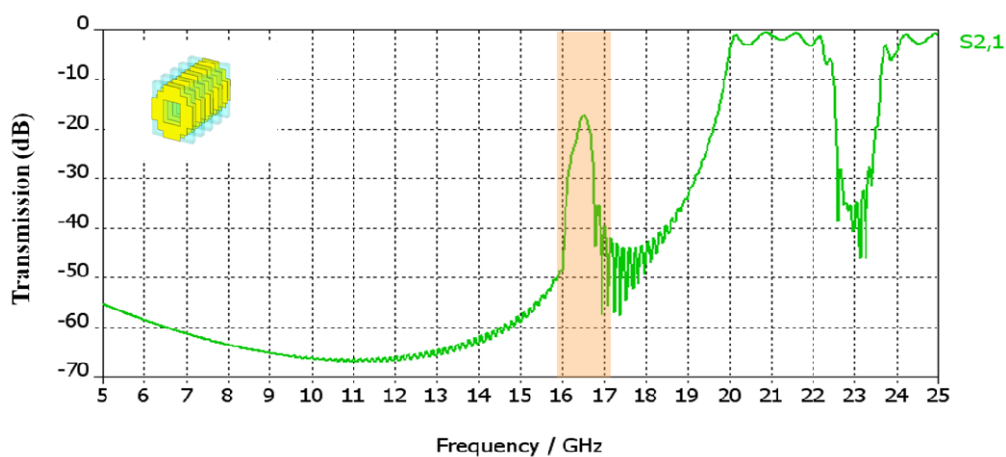
οποία είναι μικρής έντασης ωστόσο οφείλεται σε αριστερόστροφη συμπεριφορά του υλικού (αποδεικνύεται με αντιστροφή των παραμέτρων σκέδασης – δε δείχνεται εδώ).



Σχ. 3.13: Φάσμα διαπερατότητας για τη δομή των cut-slab with opening με την προσθήκη λαιμών για 5 επίπεδα στην κατεύθυνση διάδοσης με πλάτος λαιμού  $w_{neck}$  : 2.0 mm (α) και 3.0 mm (β).

### 3.3.6 Επίτευξη αριστερόστροφης συμπεριφοράς

Επόμενο βήμα είναι περαιτέρω αύξηση του πλάτους του λαιμού ώστε η αριστερόστροφη κορυφή στο φάσμα διέλευσης να είναι καλά διαχωρισμένη από την περιοχή δεξιόστροφης συμπεριφοράς. Έτσι το πλάτος του λαιμού ( $w_{neck}$ ) αυξάνεται στα 4.0 mm και πλέον έχει την ίδια τιμή με το πλάτος του τετράγωνου του κενού (opening) που υπάρχει στο μέταλλο ( $w_{open} = w_{neck}$ ). για το σχετικό υπολογισμό χρησιμοποιούνται πέντε παράλληλα επίπεδα στην κατεύθυνση διάδοσης με σταθερά πλέγματος  $a_k = 3.6$  mm. Τα αποτελέσματα όσον αφορά το πλάτος διέλευσης φαίνονται στο σχήμα 3.14:



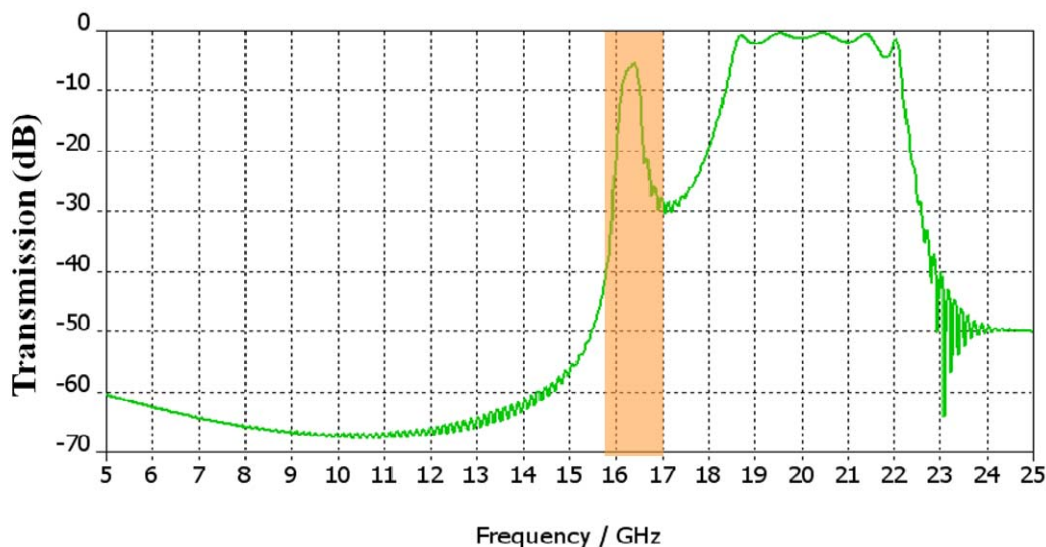
Σχ. 3.14 Φάσμα διαπερατότητας για τη δομή των cut-slab with opening με την προσθήκη λαιμών με πλάτος λαιμού  $w_{neck} = 4.0$  mm. Η σκιασμένη περιοχή δείχνει την κορυφή που

επιδεικνύει αριστερόστροφη συμπεριφορά.

Όπως παρατηρείται στην περιοχή συχνοτήτων από 16 GHz έως 17 GHz εμφανίζεται μια κορυφή στο φάσμα διέλευσης. Η κορυφή αυτή εμφανίζεται λόγω της ταυτόχρονης παρουσίας αρνητικού  $\mu$  και  $\epsilon$ , άρα σε αριστερόστροφη συμπεριφορά της δομής. Η κορυφή αυτή, παρότι ευδιάκριτη στο φάσμα δεν έχει αρκετά ικανοποιητική ένταση (-22 dB).

Με σκοπό την αύξηση της έντασης της αριστερόστροφης κορυφής έγινε ακόμα μία προσομοίωση μειώνοντας το πλάτος του λαιμού ( $w_{\text{neck}}$ ) στα 3.5 mm αλλά και το μήκος της πλευράς του τετραγώνου κενού ( $w_{\text{open}}$ ) στα 3.0 mm, ώστε η αριστερόστροφη κορυφή να πλησιάσει περισσότερο τη συχνότητα «πλάσματος» της δομής (δηλαδή η συχνότητα στην οποία το  $\epsilon$  γίνεται από αρνητικό θετικό), μειώνοντας έτσι την εμπέδηση της δομής (η εμπέδηση,  $\sqrt{\mu/\epsilon}$ , είναι ένας βασικός παράγοντας που καθορίζει το ποσοστό του κύματος που διέρχεται σε σχέση με αυτό που ανακλάται από ένα υλικό – πλησιάζοντας την περιοχή αρνητικού  $\mu$  στη συχνότητα πλάσματος την φέρνουμε στην ουσία σε χαμηλές (συγκρίσιμες με το  $\mu$ ) τιμές του  $\epsilon$ , φέρνοντας την εμπέδηση κοντά σε αυτή του κενού και μειώνοντας έτσι την ανάκλαση).

Πράγματι, όπως φαίνεται στο σχ. 3.15, η ένταση της αριστερόστροφης κορυφής τώρα (κορυφή σε ~16.5 GHz) φτάνει τα -7 dB, επίπεδο εξαιρετικά ικανοποιητικό για τα δεδομένα του πεδίου των αριστερόστροφων υλικών.



Σχήμα 3.16 Φάσμα διαπερατότητας για τη δομή των cut-slab with opening με την προσθήκη λαιμών, για 5 επίπεδα στην κατεύθυνση της διάδοσης, με πλάτος λαιμού  $w_{\text{neck}} = w_{\text{open}} = 3.5$  mm

Έχοντας επιτύχει μία δομή η οποία στις προσομοιώσεις παρουσιάζει ικανοποιητική αριστερόστροφη συμπεριφορά, απομένει η πειραματική επαλήθευση των δεδομένων που προέκυψαν σε επίπεδο προσομοιώσεων. Αυτό που θέλουμε να



εξετάσουμε είναι αν όντως η αφαίρεση μετάλλου από τις δομές των cut slabs οδηγεί σε μείωση της συχνότητας μαγνητικού συντονισμού στο βαθμό που υπολογίστηκε θεωρητικά, καθώς και να επιβεβαιώσουμε και να επιδείξουμε ικανοποιητική αριστερόστροφη συμπεριφορά σε δομές cut-slabs με opening συνδυασμένα με λαιμούς. Κάποια από τα αποτελέσματα της πειραματικής αυτής μελέτης (η οποία βρίσκεται σε εξέλιξη) παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

#### **Κεφάλαιο 4: Πειραματική διαδικασία – Προετοιμασία – Εκτέλεση πειραμάτων.**

##### **4.1 Σχεδιασμός – Κατασκευή Μεταλλικών - Η διαδικασία κατασκευής των δειγμάτων**

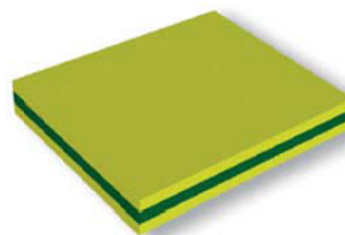
Η κατασκευή των δομών (ενεργών σε ~GHz) γίνεται με την εναπόθεση των μεταλλικών στοιχείων πάνω σε υποστρώματα FR4, χρησιμοποιώντας την τεχνική τυπωμένων κυκλωμάτων (ΤΤΚ) (από εταιρεία που ειδικεύεται σε τέτοιες κατασκευές). Τα δεδομένα για τη σχεδίαση των πλακετών προέκυψαν από τους υπολογισμούς και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων όπως αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Για τον σχεδιασμό των Μεταλλικών χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα σχεδίασης AutoCAD. Το AutoCAD είναι ένα σχεδιαστικό πρόγραμμα που επιτρέπει τον αυτοματοποιημένο σχεδιασμό δομών.



Σχ. 4.1: Υπόστρωμα εποξικής ριτίνης



**α**

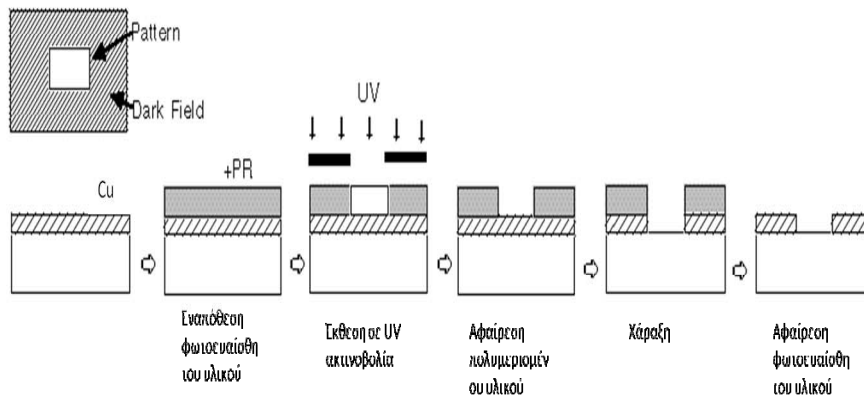


**β**

Σχήμα 4.2: (α) Μηχάνημα τοποθέτησης φωτοευαίσθητου υλικού και (β) το υπόστρωμα μετά

την τοποθέτηση του φωτοευαίσθητου υλικού

Η διαδικασία κατασκευής των τυπωμένων κυκλωμάτων περιγράφεται παρακάτω ενώ τα βήματα φαίνονται και στο σχήμα 4.3:



Σχ. 4.3: Η διαδικασία της φωτολιθογραφίας με την χρήση θετικού φωτοευαίσθητου υλικού για την κατασκευή των πλακετών.

- Αρχικά σε στις δύο επιφάνειες ενός λεπτού φύλλου διηλεκτρικού πλαστικού (FR4), πάχους 1.6 mm τοποθετούμε υπόστρωμα εποξικής ρητίνης (ουσία η οποία χρησιμοποιείται ως κόλλα μεταξύ του διηλεκτρικού και του μετάλλου) και στρώματα χαλκού πάχους 30μm στις δυο πλευρές του διηλεκτρικού.



Σχήμα 4.4: Μηχάνημα εκπομπής υπεριώδους ακτινοβολίας

- Ένα θετικό φωτοευαίσθητο υμένιο εφαρμόζεται με θερμότητα και πίεση στις επιφάνειες χαλκού της πλακέτας.



Σχήμα 4.5: Χημική επεξεργασία πλακέτας

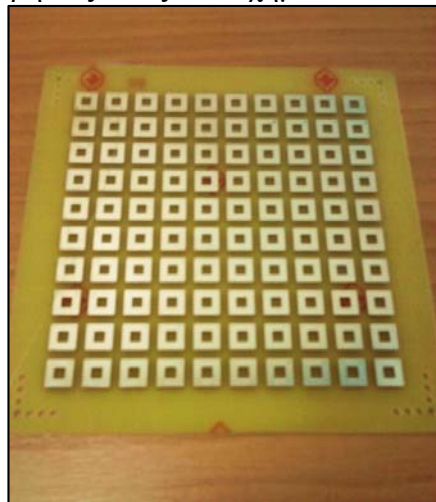
- Έπειτα στην επιφάνεια της πλακέτας τοποθετείται μία μάσκα. Αυτή η μάσκα αποτελείται από ένα υλικό που δεν επιτρέπει τη διέλευση του φωτός και από το

οποίο έχουν αφαιρεθεί τα κομμάτια ώστε η διέλευση του φωτός να μην επιτρέπεται μόνο στο σχέδιο της δομής που επιθυμούμε π.χ. τη δομή των cut-slabs.



Σχήμα 4.6: Γραμμή μεταφοράς για τη χάραξη των πλακετών χημικά

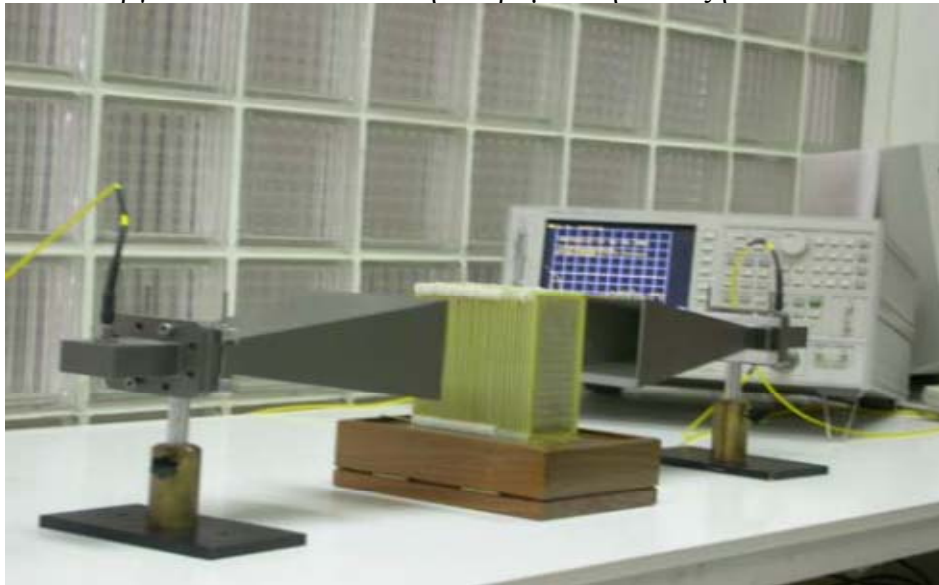
- Έπειτα οι πλακέτες εκτίθενται σε υπεριώδες φως. Οι περιοχές της μάσκας που επιτρέπουν τη διέλευση του φωτός πολυμερίζουν το υμένιο δημιουργώντας έτσι μια λανθάνουσα μορφή του σχεδίου κυκλωμάτων.
- Η πλακέτα έπειτα περνά μέσα από μια χημική ουσία, έτσι ώστε να αφαιρεθεί το υλικό που έχει πολυμεριστεί. Ο χαλκός αφαιρείται χημικά από την πλακέτα από τις περιοχές που το φωτοευαίσθητο υλικό έχει πολυμεριστεί αφήνοντας στην πλακέτα χαραγμένο τον χαλκό στο σχήμα που επιθυμούμε και επικαλυμμένο ακόμα με το μη πολυμερισμένο φωτοευαίσθητο υλικό το οποίο στο τέλος αφαιρείται από την επιφάνεια του χαλκού. Όλη η διαδικασία γίνεται με ένα σύστημα γραμμής μεταφοράς για τη χάραξη των πλακετών χημικά. Με την διαδικασία αυτή παίρνουμε τις τεχνητές δομές που θα χρησιμοποιήσουμε για τις πειραματικές μας μετρήσεις όπως στο σχήμα 4.7.



Σχ. 4.7: Ενδεικτική πλακέτα στην οποία έχουν τοποθετηθεί μεταλλικές τετράγωνες δομές (cut slab with opening) σε διηλεκτρικό υπόστρωμα

## 4.2 Χαρακτηρισμός Μεταλλικών - Αναλυτής Δικτύων

Ο χαρακτηρισμός των μεταλλικών έγινε με μικροκυματικές μετρήσεις διαπερατότητας, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας έναν αναλυτή δικτύων Hewlett-Packard 8722ES και μικροκυματικές χοάνες. Στο σχήμα φαίνονται αναλυτικά τα όργανα που αποτελούν την πειραματική διάταξη.

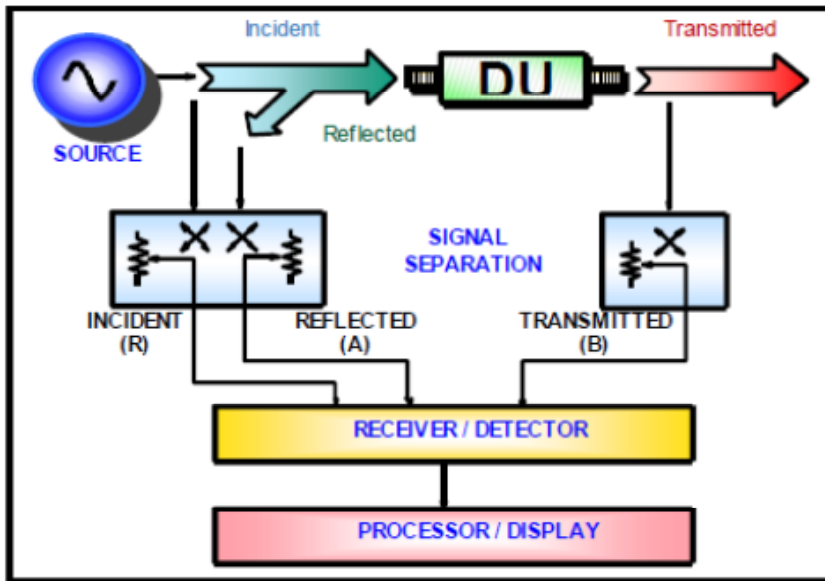


Σχ. 4.8: Τυπική διάταξη του αναλυτή δικτύων που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή του πειράματος

Η πειραματική διαδικασία είναι η εξής:

Τοποθετούμε την τεχνητή δομή σε κατάλληλη απόσταση ανάμεσα στις χοάνες. Έπειτα εκπέμπουμε ηλεκτρομαγνητικά κύματα με τη βοήθεια της πηγής σήματος του αναλυτή δικτύων. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ανακλούνται και διαπερνούν τη δομή εν μέρει και με τη βοήθεια του δέκτη σήματος του αναλυτή δικτύων μετράμε το ποσοστό του κύματος που διαδίδεται σε σχέση με το προσπίπτον κύμα. Για λόγους ασφαλείας αλλά και για να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες από το σύστημα, καλύπτεται περιμετρικά η διάταξη με μαύρο απορροφητικό πορώδες υλικό ώστε να απορροφώνται τα κύματα που δεν συναντούν τη δομή και να μην ανακλώνται στο περιβάλλον επιστρέφοντας στις χοάνες.

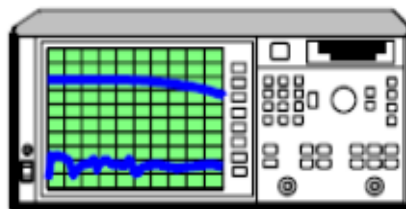
#### 4.2.1 Η γενική διάταξη του Αναλυτή Δικτύων και τα τμήματα που αποτελείται:



Σχ. 4.9: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης των σημαντικότερων τμημάτων του αναλυτή

Στο σχήμα 4.9 βλέπουμε τη γενική διάταξη του αναλυτή δικτύων, με τα σημαντικότερα τμήματα της επεξεργασίας του σήματος. Προκειμένου να μετρηθούν το σήμα εισόδου, ανάκλασης και διάδοσης, απαιτούνται τέσσερα τμήματα:

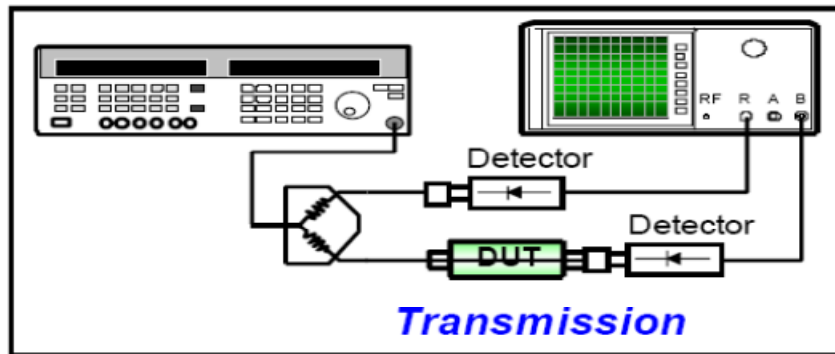
- Πηγή σήματος η οποία παρέχει το ερέθισμα στο σύστημα (π.χ. προσπίπτων κύμα στη δομή) στην οποία μπορούμε να καθορίσουμε τη συχνότητα και το επίπεδο ισχύος.



Σχ. 4.10 Πηγή σήματος του αναλυτή δικτύων.

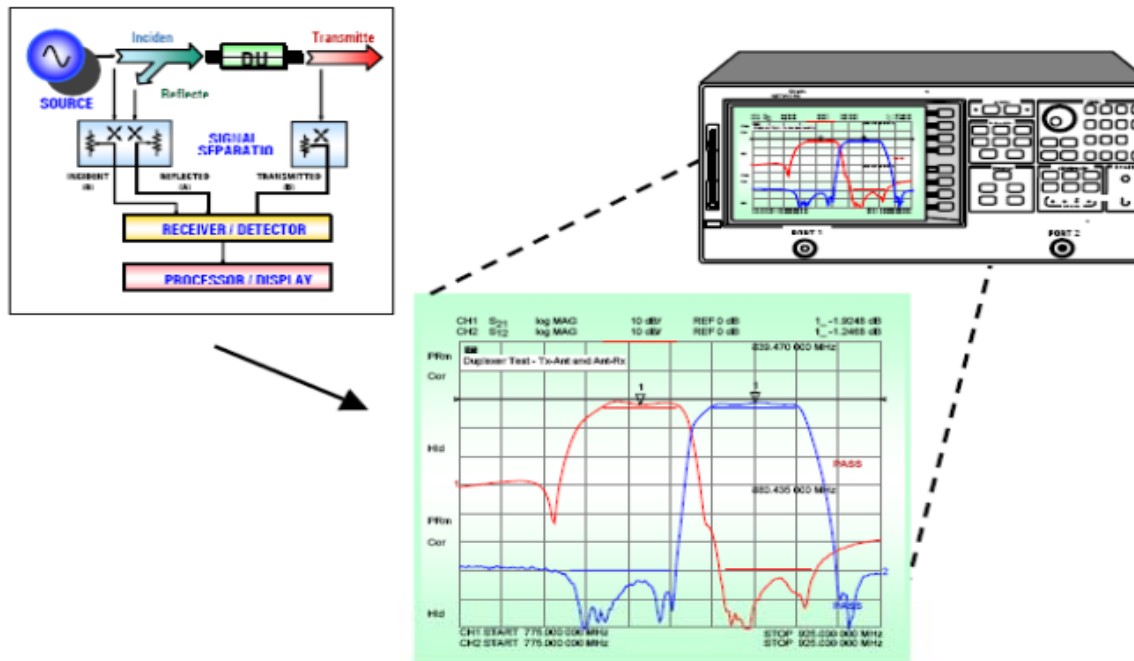
- Συσκευές διαχωρισμού σήματος οι οποίες χρησιμεύουν σε δυο βασικές λειτουργίες του αναλυτή δικτύων: μετρούν την τιμή του σήματος εισόδου για αναφορά και διαχωρίζουν το σήμα εισόδου και ανάκλασης. Οι συσκευές διαχωρισμού μπορεί να είναι splitters ή directional couplers. Οι διαφορά ανάμεσα στους splitters και στους directional couplers είναι ότι οι πρώτοι δεν κατευθύνουν το σήμα με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι απώλειες στο σήμα που φτάνει στη δομή που μελετάται (Device Under Test – DUT). Οι directional couplers έχουν μικρή απώλεια σήματος αλλά και κατευθυντικές ικανότητες γι αυτό και θεωρούνται ιδανικοί. Το μειονέκτημα τους είναι ότι δεν δημιουργούν μεγάλο εύρος γι αυτό και χρησιμοποιούνται «γέφυρες» για την επίτευξη μεγαλύτερου εύρους. Η χρήση ωστόσο γεφυρών αυξάνει τις απώλειες του σήματος.

- Δέκτη του διαδιδόμενου σήματος: Ο δέκτης της διάδοσης μπορεί να συνδεθεί με ένα DUT, επιτρέποντας και τις μετρήσεις ανάκλασης και διάδοσης με μια ενιαία οργάνωση.



Σχ. 4.11: Οι δέκτες διάδοσης και η θέση τους στη διάταξη του αναλυτή δικτύων.

- Επεξεργαστής/οθόνη για τον υπολογισμό και την καταγραφή των αποτελεσμάτων. Εδώ μορφοποιούνται τα στοιχεία της μετάδοσης έτσι ώστε να είναι εύκολο να ερμηνευτούν τα αποτελέσματα της μέτρησης. Οι περισσότερες συσκευές ανάλυσης δικτύων έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά γνωρίσματα όπως τα γραμμικά και λογαριθμικά sweeps, τη γραμμική και λογαριθμική ανάλυση, τις πολικές καμπύλες, τα διαγράμματα Smith, κ.λπ.



Σχ. 4.12: Η οθόνη του αναλυτή δικτύων και τα αποτελέσματα όπως παρουσιάζονται σε αυτή.

## 4.3 Διεξαγωγή Πειράματος:

### 4.3.1 Προετοιμασία Πειραμάτων



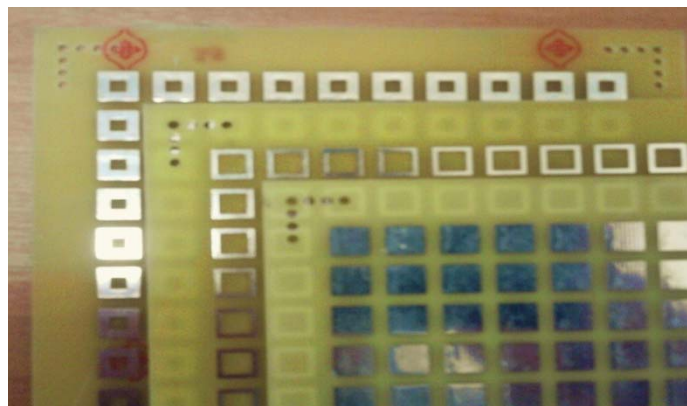
Αρχικά τοποθετούμε τις χοάνες που θα χρησιμοποιήσουμε στο πείραμα. Το κάθε ζευγάρι χοανών εκπέμπει (και κατ' επέκταση δέχεται) ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων. Για την κατάλληλη επιλογή χοανών ανατρέχουμε στις προσομοιώσεις που έχουν προηγηθεί των πειραμάτων ώστε οι περιοχές συχνοτήτων που είναι προς μελέτη να περιέχονται στο εύρος των συχνοτήτων των χοανών που θα επιλέξουμε.

Βάσει των αποτελεσμάτων που έχουν αναφερθεί παραπάνω (σχήμα 3.2, 3.4, κ.α.) για τη μελέτη του μαγνητικού συντονισμού των cut – slabs με ή χωρίς opening, επιλέγουμε χοάνες με όρια από 7 GHz έως 16 GHz. Έπειτα τοποθετούμε τις χοάνες τη μία ακριβώς απέναντι από την άλλη και ενδιάμεσα τοποθετούμε την δομή που θα μελετήσουμε. Προσέχουμε η δομή να ισαπέχει από την κάθε χοάνη καθώς και να ευθυγραμμίζεται κατάλληλα, ώστε να είναι κάθετη η πρόσπτωση του κύματος στην δομή. Η απόσταση χοάνης – δομής στη διάταξη των πειραμάτων μας είναι 10 cm.

Αφού πραγματοποιηθεί η μέτρηση παίρνουμε τα αποτελέσματα με την μορφή αρχείου κειμένου (.txt), το οποίο περιέχει τις τιμές της έντασης της διαπερατότητας (transmission) σε dB που αντιστοιχούν στις διάφορες τιμές της συχνότητας σε GHz.

#### 4.4.2 Πειραματική Διαδικασία – Αποτελέσματα

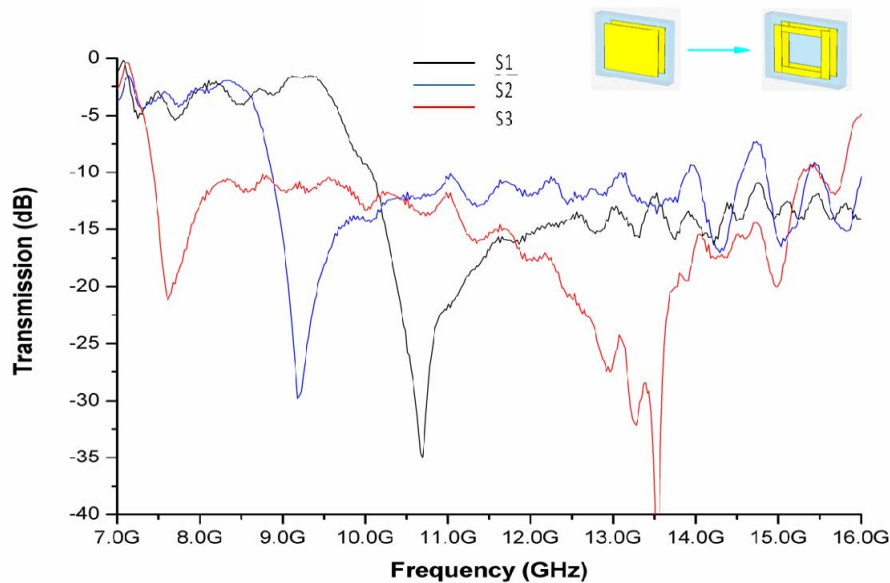
Αρχικά σχεδιάζουμε και στέλνουμε για κατασκευή τις δομές των cut slabs και των cut-slab με opening που αναφέρονται στο Κεφ. 3, ξεκινώντας από τη δομή του σχήματος 3.2. Στην κάθε πλακέτα διηλεκτρικού τοποθετούμε 10 x 10 μοναδιαίες κυψελίδες (unit cells, u. c.). Οι μετρήσεις σε πρώτο στάδιο θα γίνουν για μια πλακέτα. Θα γίνουν 3 διαφορετικές μετρήσεις με την πλευρά του κάθε slab να είναι  $l_{\text{slab}} = 7.0\text{mm}$  και το opening να έχει μορφή τετραγώνου με πλευρά που κυμαίνεται από  $w_{\text{open}} = 0.0\text{ mm}$  έως  $w_{\text{open}} = 5.0\text{ mm}$ . Οι πλακέτες που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στην εικόνα του σχήματος 4.13.



Σχ 4.13: Οι πλακέτες που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή του πειράματος.

Στο σχήμα 4.14 παρουσιάζονται οι καμπύλες διαπερατότητας για τα τρία δείγματα με διαφορετική πλευρά ανοίγματος (opening). Η *μαύρη* καμπύλη αντιπροσωπεύει το πρώτο δείγμα (S1) το οποίο είναι τετράγωνα cut-slabs χωρίς να έχουμε αφαιρέσει κάποιο κομμάτι από την επιφάνεια ( $w_{\text{open}} = 0.0$ ). Όπως παρατηρείται η συχνότητα μαγνητικού συντονισμού εντοπίζεται στα 10.7 GHz. Στο δεύτερο δείγμα (S2) έχουμε αφαιρέσει ένα μικρό κομμάτι ( $w_{\text{open}} = 3.0\text{ mm}$ ) μετάλλου από την πρώτη δομή και όπως φαίνεται στην *μπλε* καμπύλη του σχήματος η συχνότητα μαγνητικού συντονισμού εμφανίζεται στα ~ 9.2 GHz. Τέλος στο τρίτο

δείγμα (S3), στο οποίο έχει αφαιρεθεί ένα ακόμα μεγαλύτερο κομμάτι μετάλλου ( $w_{\text{open}} = 5.0\text{mm}$ ), η συχνότητα μαγνητικού συντονισμού εμφανίζεται στα  $\approx 7.6\text{ GHz}$  (κόκκινη καμπύλη του σχήματος 4.14).

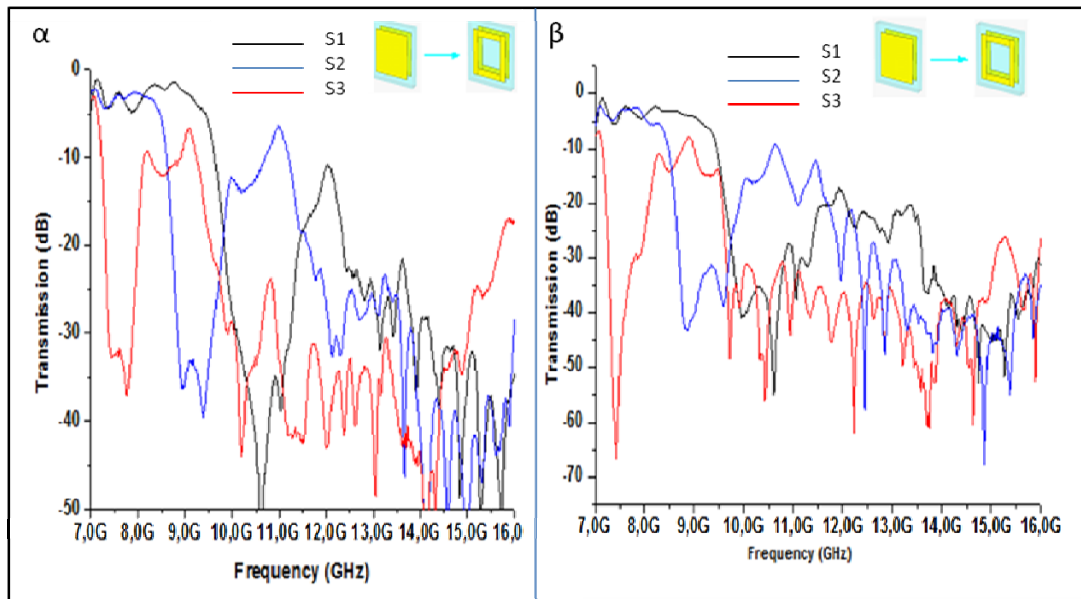


Σχ. 4.14: Φάσμα διαπερατότητας για τις δομές των cut slabs (S1), cut slabs με opening  $w_{\text{open}} = 3.0\text{ mm}$  (S2) και cut slabs με opening  $w_{\text{open}} = 5.0\text{ mm}$  (S3).

Όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε, η συχνότητα μαγνητικού συντονισμού μειώνεται από τα  $10.7\text{ GHz}$  στα  $7.6\text{ GHz}$  ( $-3.1\text{GHz}$ ) αφαιρώντας ένα κομμάτι τετράγωνο με διαστάσεις  $5.0\text{ mm} \times 5.0\text{ mm}$  από το μέταλλο. Αυτό επιβεβαιώνει τις προβλέψεις της θεωρίας και των υπολογισμών για το ότι η αφαίρεση μετάλλου από τα cut – slabs οδηγεί σε μείωση της συχνότητας μαγνητικού συντονισμού.

Επόμενο βήμα είναι οι μετρήσεις να γίνουν για περισσότερες παράλληλες πλακέτες. Οι διαστάσεις της κάθε πλακέτας είναι ίδιες με την προηγούμενη μέτρηση απλώς τοποθετούμε 3 και 5 πλακέτες κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Η σταθερά πλέγματος στην κατεύθυνση του  $\mathbf{k}$  είναι  $a_{\mathbf{k}} = 3.1\text{ mm}$ . Στο σχήμα 4.15 φαίνεται η σύγκριση των καμπυλών για 3 και 5 πλακέτες.





Σχ. 4.15: Φάσμα διαπερατότητας για τις δομές των cut slabs (S1), cut slabs με opening  $W_{\text{open}} = 3.0 \text{ mm}$  (S2) και cut slabs με opening  $W_{\text{open}} = 5.0 \text{ mm}$  (S3) για 3 επίπεδα (α), 5 επίπεδα (β)

Όπως διαπιστώνουμε και στις 2 περιπτώσεις το χάσμα (ελάχιστο της διέλευσης) που προκύπτει από τον μαγνητικό συντονισμό παραμένει στην περιοχή τιμών που εμφανίστηκε και για την μία πλακέτα όπως φαίνεται στο σχ. 4.14. Η προσθήκη των επιπλέον πλακετών έχει ως αποτέλεσμα μόνο την διεύρυνση του χάσματος χωρίς να οδηγεί σε μετακίνησή του.

Το βασικό συμπέρασμα των παραπάνω είναι ότι η αφαίρεση μετάλλου από μία δομή cut-slabs έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της συχνότητας μαγνητικού συντονισμού. Με την τοποθέτηση περισσότερων επιπέδων στο σύστημα έχουμε διεύρυνση της περιοχής αρνητικής διαπερατότητας χωρίς επηρεασμό της θέσης της.

## Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα – Περαιτέρω έρευνα

### 5.1 Συμπεράσματα

Σε αυτή την εργασία μελετήσαμε σε επίπεδο προσομοιώσεων α) την μαγνητική και ηλεκτρική απόκριση που παρουσιάζουν δομές βασισμένες στο ζεύγος μεταλλικών πλακών οι οποίες είναι ισοτροπικές στο επίπεδο **E-H** (cut-slabs) β) την επίδραση που έχει στο μαγνητικό συντονισμό η κατάλληλη αφαίρεση μετάλλου από τις δομές αυτές και γ) την συμπεριφορά των δομών αυτών με την προσθήκη λαιμών. Τέλος μεταφέραμε τα δεδομένα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις σε πειραματικό επίπεδο για επιβεβαίωση των υπολογισμών των σχετικών με την επίδραση της αφαίρεσης μετάλλου στα cut-slabs.

Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

(α) σε επίπεδο προσομοιώσεων:

- Οι ισοτροπικές στο επίπεδο **E-H**, δομές των cut – slab, cut – slab with opening, και cut slab with opening με την προσθήκη λαιμών

παρουσιάζουν μαγνητικό συντονισμό σε μήκη κύματος μεγαλύτερα από τις διαστάσεις της μοναδιαίας κυψελίδας της κάθε δομής.

- Με την αφαίρεση μετάλλου (opening) από την δομή των cut – slabs οδηγεί σε μείωση της συχνότητας μαγνητικού συντονισμού.
- Η αφαίρεση μετάλλου (opening) στα cut-slabs οδηγεί στην σύγκλιση της συχνότητας μαγνητικού και ηλεκτρικού συντονισμού.
- Η προσθήκη μεταλλικών «λαιμών» στη δομή των cut – slabs with opening μπορεί να οδηγήσει σε αριστερόστροφη απόκριση της δομής και πιο ειδικά για να έχουμε αριστερόστροφο υλικό θα πρέπει το πλάτος του λαιμού να είναι ίσο με το πλάτος του opening.

(β) σε πειραματικό επίπεδο

- Επιβεβαιώθηκαν πειραματικά οι υπολογισμοί που είχαν γίνει σε επίπεδο προσομοιώσεων για τις δομές την cut-slabs και των cut-slabs with opening καθώς διαπιστώθηκε ότι η αφαίρεση μετάλλου από τα cut-slabs οδηγεί σε μείωση της συχνότητας μαγνητικού συντονισμού της δομής.

## 5.2 Περεταίρω έρευνα – Προβλήματα προς επίλυση:

Σε αυτή την εργασία παρουσιάστηκαν μερικά υλικά που μπορούν υπό κατάλληλες συνθήκες να αποτελέσουν μέρος αυτών που κοινώς αποκαλούνται αριστερόστροφα μεταϋλικά. Το γεγονός ότι ο τομέας των αριστερόστροφων υλικών έχει αναπτυχθεί την τελευταία δεκαετία δείχνει ότι υπάρχουν μεγάλα περιθώρια ανάπτυξης καθώς κάθε χρόνο παρουσιάζονται και καινοτόμες δομές αριστερόστροφων υλικών.

Πέρα όμως από την μελέτη καινούριων δομών και την τελειοποίηση ήδη υπαρκτών, γίνεται έρευνα για κάποια πιο σύνθετα μεταϋλικά που θα παρέχουν περαιτέρω ιδιότητες στα υπάρχοντα αριστερόστροφα υλικά.

- Switchable Left-Handed Materials:

Σκοπός της έρευνας είναι να δημιουργηθούν switchable αριστερόστροφα υλικά. Αυτό σημαίνει ότι με κάποιο τρόπο θέλουμε να ελέγχουμε αν το υλικό θα συμπεριφέρεται ως αριστερόστροφο ή όχι. Για να επιτευχθεί αυτό υπάρχει η ιδέα της χρήσης οξειδίου του ψευδαργύρου (ZnO) στις εγκοπές των SRRs. Το ZnO λόγω του ότι είναι φεροηλεκτρικό υλικό μπορεί να μεταβάλλει την αγωγιμότητα του με την παρουσία υπεριώδους ακτινοβολίας UV. Χωρίς την παρουσία UV οι εγκοπές των SRR λειτουργούν σαν πυκνωτές όπως περιγράφηκε στο κεφ. 1. Κάνοντας χρήση UV η αγωγιμότητα του ZnO αυξάνεται με αποτέλεσμα να φτάνει στα επίπεδα της αγωγιμότητας του μετάλλου κλείνοντας έτσι την εγκοπή με αποτέλεσμα η δομή να μην συμπεριφέρεται πλέον σαν ταλαντωτής και έτσι να χάνεται η αριστερόστροφη συμπεριφορά του συστήματος.

- Tunable Left-Handed Materials

Μία ακόμα ιδέα που ερευνάται είναι η δημιουργία υλικών με διακυμαινόμενη (tunable) αριστερόστροφη συμπεριφορά. Το τέχνασμα για την επίτευξη αυτής της συμπεριφοράς είναι το ίδιο με αυτό για τα switchable αριστερόστροφα υλικά μόνο που αυτή τη φορά αλλάζει το υλικό που τοποθετείται στις εγκοπές. Αυτό το υλικό

μπορεί να είναι το τιτανιούχο βάριο ( $\text{BaTiO}_3$ ) το οποίο είναι κεραμικό με πυροηλεκτρικές και πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες με συνέπεια ελέγχοντας την χωρητικότητα των πυκνωτών του SRR μέσω της διακυμαινόμενης ηλεκτρικής συμπεριφοράς του  $\text{BaTiO}_3$  (κυρίως με την αλλαγή της θερμοκρασίας) να ελέγχεται και η ένταση της αριστερόστροφης συμπεριφοράς του υλικού. Η διαφορά του tunable με το switchable υλικό είναι ότι μπορούμε να ελέγξουμε την ένταση της αριστερόστροφης συμπεριφοράς ανάλογα με τις διαφορετικές καταστάσεις του υλικού που έχουμε τοποθετήσει στις εγκοπές.

### **Προβλήματα προς επίλυση :**

Ένα ακόμα πρόβλημα με τις υπάρχουσες δομές των αριστερόστροφων υλικών είναι ότι η αριστερόστροφη συμπεριφορά τους συναντάται στα μικροκύματα και όχι στο ορατό φάσμα. Η έρευνα λοιπόν εστιάζει στην αλλαγή των διαστάσεων των δομών ή στην χρήση διαφορετικών υλικών ούτως ώστε να επιτευχθεί αριστερόστροφη συμπεριφορά από υλικά με μικρότερο μέγεθος (μικρόμετρα, νανόμετρα) και σε συχνότητες όπου μπορούν να γίνουν αντιληπτές από το ανθρώπινο μάτι.

Τέλος ένα σημαντικό πρόβλημα στα αριστερόστροφα υλικά είναι οι απώλειες του μετάλλου της δομής, καθώς επηρεάζουν την αριστερόστροφη συμπεριφορά της. Αν δεν υπήρχαν απώλειες από το μέταλλο τότε θα είχαμε πλήρη μετάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος από τις δομές. Αυτή είναι και η αιτία που τα αριστερόστροφα υλικά περιορίζονται σε μικροκυματικό επίπεδο.

### **Βιβλιογραφία:**

- [1] V. Veselago, Sov. Phys. Usp. 10, 509 (1968).
- [2] J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart, and I. Youngs, Phys. Rev. Lett. 76, 4773 (1996);
- [3] J. B. Pendry, A. Holden, D. Robbins, and W. Stewart, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 47, 2075 (1999)
- [4] J. B. Pendry and David R. Smith Reversing, *Light With Negative Refraction* Phys. Today 57, June, 37 (2004)
- [5] J. B. Pendry, “*Negative refraction makes a perfect lens,*” Phys. Rev. Lett. 85, 3966 (2000).
- [6] D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat - Nasser, and S. Schultz, Phys. Rev. Lett. 84, 4184 (2000).
- [7] C. M. Soukoulis, M. Kafesaki, and E. N. Economou, Adv. Mater. 18, 1941 2006
- [8] T. Koschny and M. Kafesaki, E. N. Economou, and C. M. Soukoulis, *Effective medium theory of left-handed materials* Phys. Rev. Lett. 93, 107402 (2004)
- [9] Koray Aydin, Kaan Guven, Maria Kafesaki, Lei Zhang, Costas M. Soukoulis, and Ekmel Ozbay, *Experimental observation of true left-handed transmission peaks in metamaterials*, Optics Letters, Vol. 29, Issue 22, pp. 2623-2625 (2004)
- [10] J. Zhou, L. Zhang, G. Tuttle, T. Koschny, and C. M. Soukoulis, *Negative index materials using simple short wire pairs* Phys. Rev. B 73, 041101 (2006).

[11] Jiangfeng Zhou, Eleftherios N. Economou, Thomas Koschny, and Costas M. Soukoulis *Unifying approach to left-handed material design* Optics Letters, Vol. 31, Issue 24, pp. 3620-3622 (2006)

[12] R. S. Penciu, M. Kafesaki, Th. Koschny, E. N. Economou, C. M. Soukoulis, PHYSICAL REVIEW B 81, 235111 2010

[13] M. Kafesaki, I. Tsiapa, N. Katsarakis, Th. Koschny, C. M. Soukoulis, and E. N. Economou, *Left-handed metamaterials: The fishnet structure and its variations* Phys. Rev. B 75, 235114 (2007)

[14] R. B. Gregor, C. G. Parazzoli, K. Li, and M. H. Tanielian *Origin of dissipative losses in negative index of refraction materials* Applied Physics Letters, Volume 82, Issue 14, id. 2356 (2003)

[15] David J. Griffiths, *Εισαγωγή στην Ηλεκτροδυναμική Τόμος II* Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης (2005)