



**ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗ  
ΜΙΚΡΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Ανίχνευση ρωγμών σε μεταλλική πλάκα με μικροκυματική  
μέθοδο**

**Μαρία Δ. Αντωνίνη**

**Επιβλέποντες:** Ευαγγελία Καραγιάννη, Αν. Καθηγήτρια  
Χρήστος Βαζούρας, Επ. Καθηγητής

**ΑΘΗΝΑ**

**Φεβρουάριος 2020**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Ανίχνευση ρωγμών σε μεταλλική πλάκα με μικροκυματική μέθοδο

**ΑΝΤΩΝΙΝΗ ΜΑΡΙΑ**  
**A.M.:MM287**

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ:** Ευαγγελία Καραγιάννη, Αν. Καθηγήτρια  
Χρήστος Βαζούρας, Επ. Καθηγητής

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:** Ευαγγελία Καραγιάννη , Αν. Καθηγήτρια ΣΝΔ  
Χρήστος Βαζούρας, Επ. Καθηγητής ΣΝΔ  
Αγγελική Αραπογιάννη, Ομ. Καθηγήτρια ΕΚΠΑ

Φεβρουάριος 2020

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη παρούσα Διπλωματική Εργασία κύριος σκοπός είναι να γίνει η ανίχνευση ρωγμών σε μεταλλική επιφάνεια με τη μέθοδο των μικροκυμάτων μέσω διερεύνησης για την επιλογή της κατάλληλης συχνότητας. Η τεχνική των μικροκυμάτων με τη βοήθεια του κυματοδηγού αποτελεί μία από τις τεχνικές μη καταστροφικού ελέγχου υλικών για την αξιολόγηση και την επιβεβαίωση της αντοχής και της αποτελεσματικότητάς τους.

Αρχικά γίνεται μία εισαγωγή σε όλες τις κατηγορίες των Μη Καταστροφικών Μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ρωγμών και γενικά ατελειών. Έπειτα αναφέρονται σημαντικά σημεία της θεωρίας του Ηλεκτρομαγνητισμού δίνοντας μεγαλύτερη έμφαση στα μικροκύματα αφού είναι απαραίτητα για τη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας των κυματοδηγών, ένα από τα βασικά όργανα που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της πειραματικής διεξαγωγής.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία στην οποία χρησιμοποιήθηκε μεταλλικό δείγμα το οποίο έχει ευθεία ρωγμή βάθους 1.3mm έως 3 mm. Κατά μήκος των ρωγμών τοποθετήθηκε κυματοδηγός διαστάσεων 3x4 cm σε ρόλο κεραίας εκπομπής και με πηγή 8-10GHz κυματοδηγήθηκε κύμα προκειμένου να μετρηθούν τα ανακλώμενα. Μετά από πολλές δοκιμές, σε διαφορετικές συχνότητες, τοποθετώντας κάθετα ή παράλληλα στη ρωγμή τον κυματοδηγό, διαπιστώθηκε ότι για ρωγμές μικρού βάθους, η συχνότητα 8.5GHz έδωσε τις μεγαλύτερες ανακλάσεις, με κύμα της τάξης των 10mV— το οποίο είναι εμφανώς ανιχνεύσιμο. Ομοίως, για τη ρωγμή βάθους 3mm η καταλληλότερη συχνότητα είναι 8.2 GHz. Η πλέον κατάλληλη τοποθέτηση του κυματοδηγού ήταν κατά την κάθετη διάσταση σε σχέση με τη ρωγμή.

Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων, τα συμπεράσματα που προέκυψαν αλλά και η επιβεβαίωση ότι η μέθοδος των μικροκυμάτων είναι αποτελεσματική για την ανίχνευση ρωγμών σε μεταλλική επιφάνεια.

**ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ:** Ανίχνευση ρωγμών.

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** Μη Καταστροφικός Έλεγχος, Αστοχία, Ρωγμή, Μικροκύματα, Κυματοδηγός, Ανακλώμενη ακτινοβολία, Μέταλλο, Σχισμογραμμή.



## **ABSTRACT**

The main purpose of this thesis is to detect cracks on a metal surface using the microwave method through a probe to select the appropriate frequency. The microwave-assisted waveguide technique is one of the non-destructive materials testing techniques to evaluate and confirm their durability and effectiveness. Initially there is an introduction to all the categories of Non-Destructive Methods used to detect cracks and defects in general.

Next, important points in the theory of electromagnetism are mentioned, with a greater emphasis on microwaves since they are essential for understanding the mode of operation of waveguides, one of the key tools used in experimental conduct.

Following is the experimental procedure in which a metal sample having a straight crack of 1.3mm to 3mm depth was used. Along the cracks, a 3x4cm waveguide was placed in a transmit antenna and an 8-10GHz source was wave formed to measure reflectors. After many tests, at different frequencies, by placing the waveguide vertically or parallel to it, it was found that for shallow cracks, the 8.5 GHz frequency gave the highest reflections, with a wave of 10mV - which is clearly detectable. Similarly, for the 3mm depth crack the most appropriate frequency is 8.2 GHz. The most appropriate positioning of the waveguide was in the vertical dimension with respect to the crack. Finally, the results of the measurements, the conclusions and the confirmation that the microwave method is effective for detecting cracks on a metal surface are presented.

**SUBJECTAREA:** Crack detection.

**KEYWORDS:** Non Destructive Control, Failure, Crack, Microwave, Waveguide, Reflected Radiation, Metal, Slit.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η διατριβή και η ενασχόλησή μου με τη παρούσα διπλωματική εργασία δηλώνει το τέλος του Μεταπτυχιακού μου διπλώματος. Για την εκπόνηση της εργασίας θα ήθελα να αναφέρω τις ευχαριστίες μου σε κάποιους ανθρώπους που στάθηκαν καθοδηγητές.

Αρχικά θα ήθελα να εκφράσω την ευχαριστία και την ευγνωμοσύνη μου στη επιβλέπουσα καθηγήτρια μου κυρία Ευαγγελία Καραγιάννη, Αναπληρώτρια καθηγήτρια ΣΝΔ, για την ανάθεση αυτού του τόσο μεγάλου ενδιαφέροντος θέματος, τη πολύτιμη βοήθεια της και τον χρόνο που μου αφιέρωσε κατά τη διεκπεραίωση της.

Κατά δεύτερον ευχαριστώ θερμά τον κύριο Χρήστο Βαζούρα, Επίκουρο καθηγητής ΣΝΔ, που υπήρξε σύμβουλος και καθοδηγητής στην υλοποίηση και τη διεξαγωγή του πειράματος μέσα στον εργαστηριακό χώρο στη σχολή ΣΝΔ . Ακόμη τον ευχαριστώ για τη βοήθεια του που με καθοδήγησε στο θεωρητικό υπόβαθρο που ήταν απαραίτητο για την εργασία.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους δικούς μου ανθρώπους που είναι δίπλα μου και με στηρίζουν.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	<b>12</b>
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>13</b>
1.1 Μέθοδοι μη καταστροφικού ελέγχου αναγνώρισης υλικών.....	13
1.2 Ο ρόλος και η σημασία των μεθόδων (ΜΚΕ).....	13
1.3 Μη καταστροφική αξιολόγηση .....	14
1.4 Κατηγοριοποίηση των ΜΚΕ κατά την επιτροπή ΝΜΑΒ .....	16
1.5 Μέθοδοι βασισμένη στην οπτική εκτίμηση.....	18
1.6 Μέθοδοι βασισμένοι στον Ηλεκτρομαγνητισμό .....	20
1.7 Μέθοδοι βασισμένοι στην ακτινοβολία.....	21
1.8 Μέθοδοι βασισμένοι στην ακουστική ( υπέρηχοι).....	22
<b>2. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ</b> .....	<b>23</b>
2.1 Το Ηλεκτροστατικό πεδίο .....	23
2.2 Ένταση Ηλεκτροστατικού πεδίου .....	23
2.3 Δυναμικές γραμμές πεδίου .....	23
2.4 Νόμος Gauss.....	24
2.5 Ηλεκτρικό δυναμικό.....	25
2.6 Μαγνητικό πεδίο - εισαγωγή .....	26
2.7 Μαγνητικές δυνάμεις.....	26
2.8 Νόμος Biot- Savart .....	26
2.9 Νόμος Ampere .....	27
2.10 Χρονικά μεταβαλλόμενο Μαγνητικό πεδίο – Μαγνητική επαγωγή.....	27
2.11 Σύγχρονες εφαρμογές : Μαγνητικά υλικά .....	28
2.12 Εξισώσεις Maxwell .....	29
<b>3. ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΑ</b> .....	<b>31</b>
3.1 Εισαγωγή στα Μικροκύματα.....	31
3.2 Κυματοδηγοί.....	33
3.3 Τρόπος διάδοσης στον κυματοδηγό.....	34

<b>4. ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ.....</b>	<b>38</b>
4.1 Βασικές έννοιες.....	38
4.2 Το μοντέλο της γραμμής μεταφοράς.....	39
4.3 Οι θεμελιώδεις εξισώσεις της γραμμής μεταφοράς.....	41
4.4 Η μορφή των κυμάτων.....	41
4.5 Προέλευση και μορφή στάσιμων κυμάτων σε γραμμές μεταφοράς.....	42
4.6 Ο λόγος του στάσιμου κύματος.....	45
4.7 Η συμπεριφορά των στάσιμων κυμάτων ανά περίπτωση φορτίου.....	46
<b>5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....</b>	<b>48</b>
5.1 Θεωρητικό υπόβαθρο.....	48
5.2 Γενικά για τους ταλαντωτές YIG (yttriumiron garnet $Y_3Fe_5O_{12}$ ).....	49
5.3 Η πηγή που χρησιμοποιήθηκε.....	50
5.4 Αναλυτής φάσματος.....	53
5.5 Πειραματική διάταξη - οργανολογία.....	54
5.6 Μετρήσεις - Αποτελέσματα.....	57
<b>6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>62</b>
<b>ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....</b>	<b>63</b>



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Μέθοδοι εντοπισμού ατελειών κάθε κατηγορίας. ....	15
Εικόνα 2: Διανύσματα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται γύρω από το θετικό και αρνητικό σημειακό φορτίο. ....	24
Εικόνα 3: Επαγωγή ρεύματος με αριστερόστροφη φορά. Η μαγνητική δύναμη $F$ που ασκείται στη ράβδο αντιτίθεται στη κίνηση. ....	28
Εικόνα 4: Μη μαγνητισμένο υλικό όπου τα ατομικά μαγνητικά δίπολα είναι τυχαία προσανατολισμένα. ....	29
Εικόνα 5: Με επίδραση εξωτερικού πεδίου $B$ . ....	29
Εικόνα 6: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα από συχνότητες $MHz$ έως $10^{15} Hz$ και εφαρμογές. ....	32
Εικόνα 7: Το μικροκυματικό φάσμα από υπο-GHz συχνότητες μέχρι εκατοντάδες GHz και εφαρμογές. ....	32
Εικόνα 8: Κίνηση δύο επίπεδων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. ....	35
Εικόνα 9: Μικρό τμήμα της κατανομής ανάμεσα σε δύο πλάκες. ....	35
Εικόνα 10: Μήκος και πλάτος κυματοδηγού συναρτήσει του $E$ . ....	36
Εικόνα 11: Μεγαλύτερη διατομή κυματοδηγού. ....	37
Εικόνα 12: Ρυθμοί διάδοσης σε κυματοδηγό. ....	37
Εικόνα 13: Τάση και ρεύμα σε γραμμή μεταφοράς. ....	39
Εικόνα 14: Μοντέλο γραμμής μεταφοράς με κατανεμημένες παραμέτρους. ....	40
Εικόνα 15: Μέτρο της τάσης σε γραμμή μεταφοράς με στάσιμα κύματα. ....	44
Εικόνα 16: Στάσιμα κύματα σε βραχυκυκλωμένη και ανοιχτοκυκλωμένη γραμμή. ....	46
Εικόνα 17: Χαρακτηριστικά και προδιαγραφές του YIG. ....	51
Εικόνα 18: Κάτοψη του εσωτερικού του ταλαντωτή YIG. ....	53
Εικόνα 19: Παλμογράφος. ....	54
Εικόνα 20: Η πλάκα που χρησιμοποιήθηκε στη διάρκεια του πειράματος. ....	55
Εικόνα 21: Σχισμογραμμή στον κυματοδηγό. ....	56
Εικόνα 22: Συνδεσμολογία. ....	56
Εικόνα 23: Διάγραμμα Τάσης – Συχνότητας στη περιοχή A ακριβώς δίπλα από τη ρωγμή βάθους 1,3 mm. ....	57
Εικόνα 24: Διάγραμμα Τάσης – Συχνότητας στη περιοχή B ακριβώς δίπλα από τη ρωγμή βάθους 3 mm. ....	58
Εικόνα 25: Διάγραμμα Τάσης-Συχνότητας για τη ρωγμή βάθους 1,3mm. ....	58
Εικόνα 26: Διάγραμμα Τάσης-Συχνότητας για τη ρωγμή βάθους 3mm. ....	59
Εικόνα 27: Διάγραμμα διαφοράς τάσεων-Συχνότητας για τη ρωγμή βάθους 1,3mm. ....	59
Εικόνα 28: Διάγραμμα διαφοράς τάσεων-Συχνότητας για τη ρωγμή βάθους 3mm. ....	60
Εικόνα 29: Διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς τάσεων-Συχνότητας για τη ρωγμή βάθους 1,3mm. ....	60

Εικόνα 30: Διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς τάσεων-Συχνότητας για τη ρωγμή βάθους 3mm. ....61

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Μέθοδοι εντοπισμού ατελειών κάθε κατηγορίας **Error!** **Bookmark** **not** **defined.**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Υπάρχουν σήμερα πολλές μέθοδοι ελέγχου της κατάστασης υλικών. Δυστυχώς όμως οι περισσότερες από αυτές απαιτούν την καταστροφή πρώτα ενός μέρους του υλικού προκειμένου να το μελετήσουμε. Για αυτό το λόγο τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη μεθόδων μη καταστροφικού ελέγχου είχε ραγδαία εξέλιξη. Αυτό συμβαίνει διότι επιτρέπουν την μελέτη των υλικών χωρίς όμως να τα παραμορφώνουν ή να τα καταστρέφουν. Ακόμα με τη χρήση αυτών των μεθόδων είναι δυνατόν να διαπιστωθούν τυχόν εξωτερικές και εσωτερικές αστοχίες των υλικών με αποτέλεσμα υλικά τα οποία χρειάζονται αποκατάσταση να απομακρύνονται γρήγορα.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στον ορισμό και τις μεθόδους Μη καταστροφικού ελέγχου. Πιο συγκεκριμένα επισημαίνεται η σημαντικότητα του ελέγχου των υλικών και αναφέρονται οι επικρατέστερες μέθοδοι Μη καταστροφικού ελέγχου .

Το δεύτερο κεφάλαιο πραγματεύεται βασικές έννοιες του ηλεκτρομαγνητισμού. Παρουσιάζονται οι θεωρίες του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου και πως αυτά συνδυάζονται ώστε να δημιουργηθεί του ηλεκτρομαγνητικό κύμα που είναι απαραίτητο της μεθόδου των μικροκυμάτων.

Το τρίτο κεφάλαιο εισάγει τον αναγνώστη βαθύτερα στη θεωρία των μικροκυμάτων και αναφέρεται ο τρόπος με τον οποίο τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα παράγονται σε συχνότητες μικροκυμάτων και πως αυτά διαδίδονται μέσω κατάλληλων οργάνων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μία απομάκρυνση από το θεωρητικό κομμάτι καθώς γίνεται αναφορά για τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία, τη μετάδοση και τη λήψη μικροκυμάτων. Συγκεκριμένα η δημιουργία των μικροκυμάτων πραγματοποιείται από ειδικές πηγές μικροκυματικών συχνοτήτων και διαδίδονται μέσω κυματοδηγών.

Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύεται και περιγράφεται η πειραματική διαδικασία η οποία διεξάχθηκε στη σχολή Ναυτικών Δοκίμων Πειραιά καθώς και τα αποτελέσματα των μετρήσεων, την εύρεση της συχνότητας αλλά και η επίτευξη του στόχου της διπλωματικής εργασίας.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Μέθοδοι μη καταστροφικού ελέγχου αναγνώρισης υλικών

Ο χαρακτηρισμός των ιδιοτήτων των υλικών είναι σημαντικός για την κατανόηση της συμπεριφοράς τους σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και αποτελεί τη βάση για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση προϊόντων για τις διάφορες χρήσεις. Η ανάγκη αυτή για τον χαρακτηρισμό υλικών έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων τεχνικών και μεθόδων.

Μία ιδανική μέθοδος χαρακτηρισμού θα πρέπει να παρέχει στοιχεία σχετικά με τις ιδιότητες του υλικού που σχετίζονται με τη μακροδομή και τη μικροδομή. Τέτοιου είδους δεδομένα μπορούν να ληφθούν χρησιμοποιώντας τις μεθόδους Μη Καταστροφικού Ελέγχου (ΜΚΕ). Η κάθε μέθοδος μπορεί να βασίζεται σε διαφορετικές τεχνικές, οι οποίες έχουν κοινή φυσική βάση (π.χ. ακουστική, οπτική, μαγνητισμός, κλπ.), όμως διαφοροποιούνται ως προς την εφαρμογή τους σε εργαστηριακό επίπεδο ή στο πεδίο σε πραγματικό χρόνο, δηλαδή κατά τη λειτουργία του εξαρτήματος ή της κατασκευής.

Ακόμη σημαντικό ρόλο για την αποτελεσματικότητα των μεθόδων έχει η οργανολογία του μη καταστροφικού ελέγχου. Η οργανολογία θα πρέπει να διαθέτει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά προκειμένου να απολαμβάνει ευρείας αποδοχής στην επιστημονική και τεχνική κοινότητα:

- **Ακρίβεια:** Το όργανο θα πρέπει να πραγματοποιεί μετρήσεις με ακρίβεια για τον προσδιορισμό είτε των ιδιοτήτων του υλικού ή της παρουσίας ατελειών/βλάβης σ' αυτό.
- **Αξιοπιστία:** Το όργανο θα πρέπει να ανιχνεύει συνεχώς και να ποσοτικοποιεί ατέλειες/βλάβη ή ιδιότητες του υλικού με υψηλό βαθμό αξιοπιστίας.
- **Απλότητα:** Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα όργανα στο πεδίο είναι εκείνα που χρησιμοποιούνται από τεχνικούς στο εργοστάσιο ή για επισκευές, και όχι από εξειδικευμένους χειριστές.
- **Χαμηλό Κόστος:** Ένα όργανο δεν χρειάζεται να είναι χαμηλού κόστους με την απόλυτη έννοια του όρου. Όμως, θα πρέπει να είναι φθινό σε σχέση είτε με την αξία του υπό έλεγχο εξαρτήματος ή σε σχέση με το κόστος της αποτυχίας ή της κρισιμότητας της εφαρμογής

### 1.2 Ο ρόλος και η σημασία των μεθόδων (ΜΚΕ)

Όπως φαίνεται και από τη σημασία του όρου «Μη Καταστροφικός Έλεγχος» είναι κάθε τεχνική που ελέγχει την κατάσταση των υλικών χωρίς να τους αλλάζει τις ιδιότητες αλλά ούτε να τους προξενεί βλάβες οι οποίες μπορεί να είναι υπεύθυνες για την μη αποτελεσματικότητα τους.

Η χρήση αυτών των μεθόδων είναι αρκετά σημαντική διότι μειώνει κατά πολύ την πιθανότητα ύπαρξης ελαττωμάτων τα οποία μπορεί να δημιουργήσουν αρνητικά αποτελέσματα. Η σημασία των μεθόδων αυτών βασίζεται στην αποτροπή καταστροφικής αστοχίας υλικών. Αρκετά ατυχήματα που έχουν συμβεί οφείλονται σε μη επαρκή έλεγχο με αποτέλεσμα αυτή η αστοχία υλικού να οδηγεί ακόμα και σε ανθρώπινα θύματα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το αεροσκάφος Cornetαλλά και διάφορα άλλα θανατηφόρα ατυχήματα στο πεδίο των σιδηροδρόμων [3]. Ο μεγάλος αριθμός των αστοχιών ανάγκασε την επιστημονική κοινότητα να μεριμνήσουν την αποφυγή αυτών στα διάφορα πεδία.

Δεύτερος σημαντικός ρόλος των ΜΚΕ είναι η ασφαλής και οικονομική διαχείριση των κατασκευών. Σε μία χώρα χιλιάδες κατασκευές χρειάζονται συντήρηση (εθνικές οδοί, γέφυρες, σιδηρόδρομοι). Γίνεται κατανοητή λοιπόν η αναγκαιότητα εφαρμογής μεθόδων

ΜΚΕ οι οποίες με γρήγορο, αξιόπιστο και οικονομικό τρόπο θα επιτρέψουν την κατάστρωση σχεδίου συντήρησης των κατασκευών βάσει της φθοράς που έχει υποστεί η ακεραιότητά τους και της επικινδυνότητας της λειτουργίας τους.

### 1.3 Μη καταστροφική αξιολόγηση

Ο όρος «μη καταστροφική αξιολόγηση» (NDE, Non- Destructive Evaluation) περιλαμβάνει πολλές επιμέρους έννοιες που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν διάφορες δραστηριότητες του εν λόγω πεδίου. Κάποιες απ' αυτές τις έννοιες είναι:

- Μη καταστροφικές δοκιμές (non destructive testing, NDT)
- Μη καταστροφική επιθεώρηση (non destructive inspection, NDI)
- Μη καταστροφική εξέταση (non destructive examination, NDEx)

Όλοι αυτοί οι όροι είναι παρόμοιοι, εφόσον περικλείουν μετρήσεις που διεξάγονται σ' ένα πειραματικό στοιχείο ώστε να προσδιοριστεί κάποιο χαρακτηριστικό του ή να επαληθευτεί αν αυτό περιέχει ανωμαλίες, ασυνέχειες ή γενικότερα ελαττώματα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον μη καταστροφικό έλεγχο επιτρέπουν στον επιθεωρητή να αποφασίσει αν το υπό εξέταση αντικείμενο πληροί τις προδιαγραφές, είναι δηλαδή αποδεκτό ή απορριπτέο. Η επιλογή μιας μεθόδου μη καταστροφικού ελέγχου ή συνδυασμού μεθόδων απαιτεί πρωτίστως την πλήρη κατανόηση του προβλήματος προς λύση. Στη συνέχεια εντοπίζονται εκείνες οι μέθοδοι που είναι κατάλληλες για περαιτέρω θεώρηση με βάση την τεχνική βιβλιογραφία. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι να συγκριθούν οι επιλεχθείσες μέθοδοι, όχι όμως και ένας γενικός κανόνας, αφού τα αποτελέσματα των μεθόδων εξαρτώνται κάθε φορά από τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Το πεδίο του «μη καταστροφικού ελέγχου» μπορεί κατά σύμβαση να διαιρεθεί σε 9 περιοχές:

- Ανίχνευση ατέλειας και αξιολόγηση
- Ανίχνευση διαρροής και αξιολόγηση
- Μέτρηση διαστάσεων και αξιολόγηση
- Προσδιορισμός θέσης και αξιολόγηση
- Χαρακτηρισμός δομής ή μικροδομής
- Εκτίμηση μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων
- Προσδιορισμός τάσεων και δυναμικής απόκρισης
- Ανάλυση «υπογραφής»
- Προσδιορισμός χημικής σύνθεσης

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι 9 αυτές περιοχές οι οποίες φαίνεται να είναι πολύ σημαντικές στο πεδίο της αξιολόγησης του μη καταστροφικού ελέγχου.

#### Ανίχνευση ατέλειας και αξιολόγηση

Η ανίχνευση των ατελειών θεωρείται συνήθως από τις πιο σημαντικές πλευρές του μη καταστροφικού ελέγχου. Οι ατέλειες μπορεί να είναι δύο ειδών, δισδιάστατες και τρισδιάστατες. Ανάλογα με τη θέση τους στο υλικό διαχωρίζονται σε επιφανειακές και εσωτερικές. Για τον εντοπισμό ατελειών κάθε κατηγορίας υπάρχουν κατάλληλοι μέθοδοι οι οποίοι φαίνονται στον πίνακα 1. Υπάρχουν αρκετοί τρόποι προσέγγισης του

προβλήματος της ανίχνευσης των ατελειών σε ότι αφορά την επιλογή της μεθόδου. Κάποιοι από τους παράγοντες που υπεισέρχονται σ' αυτή τη διαδικασία είναι οι εξής:

- Ο λόγος που πραγματοποιείται ο έλεγχος
- Ο τύπος των ατελειών, που διαφέρουν από υλικό σε υλικό
- Το μέγεθος και ο προσανατολισμός της ατέλειας που είναι απορριπτέα
- Η προβλεπόμενη θέση της ατέλειας που ενδιαφέρει
- Τα χαρακτηριστικά του υλικού που πρόκειται να ελεγχθεί

Οι λόγοι για τους οποίους είναι χρήσιμη η διαδικασία μη καταστροφικού ελέγχου είναι η ανάγκη να αποφασιστεί αν ένα αντικείμενο είναι αποδεκτό μετά από κάθε στάδιο παραγωγής του ή ακόμη και για την τελική του χρήση. Ακόμη ένας άλλος λόγος είναι η ανάγκη να αποφασιστεί αν ένα αντικείμενο που ήδη χρησιμοποιείται μπορεί να συνεχίσει στο μέλλον και για πόσο χρονικό διάστημα.

ΜΕΘΟΔΟΙ	Επίπεδες ατέλειες	Τρισδιάστατες ατέλειες	Επιφανειακές ατέλειες	Εσωτερικές ατέλειες
Οπτική ολογραφία		X	X	X (πιθανό)
Θερμική επιθεώρηση	X	X	X	X (πιθανό)
Μικροκύματα	X	X		X
Δινορεύματα	X	X	X	X
Εκτροπή ηλεκτρικού ρεύματος	X		X	X
Μαγνητικά σωματίδια	X	X	X	X (περιορισμένη χρ.)
Μαγνητικά πεδία	X		X	X
Ραδιογραφία νετρονίων		X		X
Ραδιογραφία ακτινών X		X		X
Υπέρηχοι	X	X	X	X
Διεισδυτικά υγρά		X (επιφανειακές)	X	
Ρεπλίκα	X	X (επιφανειακές)	X	
Οπτικές μέθοδοι	X	X (επιφανειακές)	X	

Εικόνα 1: Μέθοδοι εντοπισμού ατελειών κάθε κατηγορίας.

### Εντοπισμός διαρροής και αξιολόγηση

Λόγω του ότι πολλά αντικείμενα πρέπει να αντέχουν σε υψηλές πιέσεις, ο μη καταστροφικός προσδιορισμός των διαρροών είναι ιδιαίτερα σημαντικός. Κάθε τεχνική έχει ένα συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογών και χρειάζεται προσοχή στο να καθοριστούν για κάθε συγκεκριμένο πρόβλημα τα επίπεδα αποδεκτών ορίων διαρροής.

### Μετρολογία και αξιολόγηση

Η σύγχρονη μετρολογία χρησιμοποιεί την τεχνολογία των λέιζερ, σύγχρονα οπτικά μέσα και ρομποτικά συστήματα.

### Προσδιορισμός θέσης ατελειών και αξιολόγηση

Πολλές φορές τίθεται το πρόβλημα αν μια κατασκευή που αποτελείται από περισσότερα από 2 μέρη περιέχει ατέλειες στις περιοχές σύνδεσης και στις διεπιφάνειες δύο ή παραπάνω υλικών. Αυτού του είδους ο μη καταστροφικός έλεγχος καλείται προσδιορισμός θέσης. Κοινές τεχνικές που καλύπτουν το πεδίο αυτό είναι η τομογραφία και οι ραδιογραφία νετρονίων.

### Χαρακτηρισμός μικροδομής

Ο χαρακτηρισμός της μικροδομής μπορεί να λάβει χώρα επί τόπου χωρίς να προκληθεί ζημιά στο υπό εξέταση αντικείμενο με χρήση της μεθόδου της ρεπλίκας ή τεχνικών συμβατικής οπτικής μικροσκοπίας με κινητό εξοπλισμό που περιλαμβάνει υλικά και μέσα για στίλβωση, προσβολή και μικροσκόπιο. Ακόμα είναι δυνατό να εκτιμήσουμε τη μικροδομή συσχετίζοντας κάποιες πληροφορίες που λαμβάνονται από τις μη καταστροφικές δοκιμές [π.χ. η εκπομπή μιας τιμής ενέργειας(στην περιοχή των υπερήχων) έχει συσχετιστεί με τη μικροδομή του γκρίζου χυτοσιδήρου]. Τέλος, η μικροδομή εκτιμάται μέσα από τον προσδιορισμό των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων γιατί συνήθως υπάρχει σχέση μεταξύ δομής, ιδιοτήτων και απόκρισης μη καταστροφικής τεχνικής.

### Εκτίμηση φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων

Ο συγκεκριμένος είναι ένας από τους ταχέως αναπτυσσόμενους τομείς του πεδίου. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως οι ιδιότητες αυτές εκτιμώνται έμμεσα από τη μελέτη της μικροδομής. Εκτός από τις υπόλοιπες τεχνικές που εφαρμόζονται στα μέταλλα, τα μικροκύματα μπορούν να δώσουν πολύτιμες πληροφορίες για τις φυσικές ιδιότητες των μη μεταλλικών (διηλεκτρικών και μη αγώγιμων) υλικών.

### Προσδιορισμός δυνάμεων- τάσεων και δυναμικής απόκρισης

Η τάση σε μια περιοχή ενός αντικείμενου το οποίο βρίσκεται σε συγκεκριμένη κατάσταση φόρτισης μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια μεθόδων εύρεσης φοράς δύναμης όπως της φωτοελαστικής επικάλυψης, της ψαθυρής επικάλυψης, των δυναμοκυψέλων. Ένας μεγάλος αριθμός μεθόδων έχει αναπτυχθεί για τη μέτρηση των τάσεων στα υλικά όπως περίθλαση ακτίνων Χ, υπέρηχοι, και ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι. Η δυναμική συμπεριφορά ενός αντικείμενου είναι δυνατό να εκτιμηθεί κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του, εφαρμόζοντας τεχνολογία εύρεσης φοράς τάσης όσο το αντικείμενο φορτίζεται δυναμικά. Επιπλέον επιταχυνσιόμετρα και ακουστικοί μετατροπείς χρησιμοποιούνται ώστε να ληφθεί μια δυναμική απόκριση από την κατασκευή που υποβάλλεται στη φόρτιση. Η δυναμική απόκριση ονομάζεται «υπογραφή» και η εκτίμηση αυτής «ανάλυση υπογραφής». Η φύση αυτής της υπογραφής συσχετίζεται με διάφορα προβλήματα όπως ο μηχανικός θόρυβος, οι δονήσεις και η κατασκευαστική αστάθεια.

## **1.4 Κατηγοριοποίηση των ΜΚΕ κατά την επιτροπή NMAB**

Η ανάπτυξη των μικρο-ηλεκτρο-μηχανικών συστημάτων ( Micro Electro Mechanical system–MEMS) με βάση νέες συσκευές ημιαγωγών καθώς και την ενσωμάτωση πλεγμάτων ινών Bragg επιτρέπει την εμφύτευση συσκευών ελέγχου και παρακολούθησης σε ένα υλικό κατά τη στιγμή της κατασκευής του ώστε να καταστεί δυνατή η παρακολούθηση της λειτουργίας της δομής σε πραγματικό χρόνο. Η επιτροπή για τη μη καταστροφική αξιολόγηση του National Materials Advisory Board (NMAB) υιοθέτησε ένα σύστημα για την κατηγοριοποίηση των ΜΚΕ σε έξι κύριες κατηγορίες (πίνακας 1 ). Οι κατηγορίες αυτές είναι :

- Οπτικός έλεγχος



- Μαγνητικός- Ηλεκτρικός έλεγχος
- Έλεγχος με μηχανικές δονήσεις
- Χημικοί και ηλεκτροχημικοί έλεγχοι
- Θερμικοί έλεγχοι
- Έλεγχος με διεισδυτικές ακτινοβολίες

**Πίνακας 1: Οι 6 κύριες κατηγορίες των ΜΚΕ και οι εφαρμογές τους.**

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ		ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Μηχανικές και Οπτικές	Χώμα Ρωγμές Διαστάσεις Πάχος	Επιφανειακή τραχύτητα Συντελεστής ανάκλασης
Διεισδύουσες ακτινοβολίες	Ρωγμές Εγκλείσματα Πάχος	Μικροπορώδες Διαχωρισμός
Ηλεκτρομαγνητισμός	Ανισοτροπία Κοιλότητες Παραμορφώσεις Σκληρότητα	Θερμική επεξεργασία Κρυσταλλική δομή Συγκέντρωση ιόντων
Υπέρηχοι	Έναρξη & διάδοση ρωγμής Αποκολλήσεις Πυκνότητα Μέτρο ελαστικότητας	Μηχανική υποβάθμιση Επιφανειακές τάσεις
Υπέρυθρη ακτινοβολία	Έναρξη & διάδοση ρωγμής Θερμική αγωγιμότητα Πάχος Ρωγμές Υγρασία	Διάβρωση Αποκολλήσεις Εγκλείσματα Πορώδες

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ		ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Χημική ανάλυση	Σύσταση	Αναγνώριση κραμάτων
	Στοιχειακή ανάλυση	Επιφανειακές ατέλειες
	Μέγεθος κόκκου	Πορώδες

Κάθε μέθοδος μπορεί να χαρακτηριστεί από πέντε βασικούς παράγοντες:

α) πηγή ενέργειας ή μέσο για τη διερεύνηση του υλικού (π.χ. ακτίνες Χ, κύματα υπερήχων και θερμική ακτινοβολία),

β) φύση των σημάτων και η

εικόνα που προκύπτει από την αλληλεπίδραση με το αντικείμενο (εξασθένιση των ακτίνων Χ, ανάκλαση των υπερήχων),

γ) μέσο ανίχνευσης ή απεικόνισης των παραγόμενων σημάτων (π.χ. πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι),

δ) μέθοδοι καταγραφής των σημάτων ( παλμογράφος, κάμερα υπερύθρου)

ε) ερμηνεία των αποτελεσμάτων (ποσοτική ή ποιοτική).

Αντικείμενο της κάθε μεθόδου είναι να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις παρακάτω παραμέτρους των υλικών:

- Ασυνέχειες και διαχωρισμοί (ρωγμές, αποκολλήσεις, εγκλείσματα κ.ά.)
- Δομή (κρυσταλλικό πλέγμα, μέγεθος κόκκου, κ.ά.)
- Διαστάσεις και μετρολογία (πάχος, διάμετρος, κ.ά.)
- Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες (αγωγιμότητα, μέτρο ελαστικότητας, κ.ά.)
- Σύνθεση και χημική ανάλυση (ταυτοποίηση κράματος, προσμείξεις κ.ά.)
- Στατική και δυναμική απόκριση (εναπομένουσες τάσεις, ρυθμός ανάπτυξης ρωγμής, φθορά από τριβή κ.ά.)
- Ανάλυση υπογραφής «signature analysis» (συχνότητα φάσματος, περιεχόμενο εικόνας κ.ά.)
- Μη φυσιολογικές κατανομές θερμοκρασίας

Τέλος, παρουσιάζεται μια σύντομη επισκόπηση των μεθόδων μη καταστροφικού ελέγχου που χρησιμοποιούνται συνήθως, μαζί με τους τύπους των ατελειών που η κάθε μέθοδος ανιχνεύει, καθώς και τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών. Οι διαδικασίες ελέγχου που ακολουθούνται σε κάθε μέθοδο περιγράφονται με τη μορφή αυστηρών οδηγιών οι οποίες ορίζονται στα πρότυπα που έχει υιοθετήσει ο κάθε κατασκευαστής. Υπάρχουν πάρα πολλά πρότυπα που μπορεί να ακολουθήσει κάποιος και αναγνωρίζονται από τα αρχικά τους όπως DIN (Γερμανικά), EN (Ευρωπαϊκά) και ISO (Παγκόσμια). Η επιλογή του καλύτερου προτύπου δεν είναι κάτι που μπορεί να γίνει εύκολα και ο κύριος παράγοντας που το καθορίζει αυτό είναι η αγορά και οι πελάτες που απευθύνεται ο κάθε κατασκευαστής.

### 1.5 Μέθοδοι βασισμένη στην οπτική εκτίμηση

Οι μέθοδοι αυτής της κατηγορίας είναι εκείνες που βασίζονται στην εκτίμηση μετά από την εξωτερική εξέταση του δοκιμίου και στην απόφαση της καταλληλότητας ή μη αυτού. Η βασικότερη προϋπόθεση για αυτήν την κατηγορία είναι η καλή λειτουργία της όρασης του ελεγκτή, επομένως κρίνεται απαραίτητη μια οφθαλμολογική εξέταση για όποιον

προορίζεται να εφαρμόσει αυτές τις μεθόδους ώστε να εξασφαλιστεί η σιγουριά των αποτελεσμάτων. Οι τρεις πιο διαδεδομένες μέθοδοι είναι οι παρακάτω.

- **Οπτικός έλεγχος**

Αυτή η μέθοδος είναι θεωρητικά η πιο απλή και είναι η πρώτη που πρέπει να εντάσσεται στην παραγωγική διαδικασία, διότι τόσο η διαδικασία όσο και ο εξοπλισμός για την εφαρμογή της δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες απαιτήσεις. Όσον αφορά τη διαδικασία ελέγχου, θα πρέπει να υπάρχει τυποποιημένος έλεγχος των τυπικών χαρακτηριστικών για το κάθε είδος. Τα πλεονεκτήματα του οπτικού ελέγχου σε σύγκριση με άλλες μεθόδους είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί σχεδόν σε όλες τις επιφάνειες και μάλιστα στις περισσότερες περιπτώσεις χωρίς τη χρήση ακριβού εξοπλισμού, ενώ τα μειονεκτήματά του είναι ότι δεν μπορούμε να βρούμε ελαττώματα κάτω από την επιφάνεια όπως επίσης και πολύ λεπτές επιφανειακές ρωγμές.

- **Εύρεση επιφανειακών ατελειών με διεισδυτικά υγρά**

Τα διεισδυτικά υγρά ευδιάκριτα ή με έντονη διαφορά μεταξύ τους ώστε να διευκολύνεται ο ελεγκτής. Επομένως τα διεισδυτικά υγρά είναι είτε φθορίζοντα και οι ατέλειες αναδεικνύονται με UV λάμπα, είτε κόκκινα και ο εμφανιστής λευκός για να υπάρχει έντονη αντίθεση και να τα βλέπουμε ακόμα και στο φως της μέρας. Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου σε σύγκριση με άλλες είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα στερεά αντικείμενα, ανεξαρτήτως σχήματος και υλικού ενώ παράλληλα και τα αναλώσιμα που χρησιμοποιούνται για την ανάδειξη των σφαλμάτων είναι χαμηλού κόστους. Αντιθέτως τα μειονεκτήματά της είναι ότι η μέθοδος βασίζεται πολύ στη σωστή εφαρμογή από τον ελεγκτή.

- **Εύρεση επιφανειακών ατελειών με μαγνητικά σωματίδια**

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται αποκλειστικά σε μαγνητιζόμενα υλικά για να αναδείξει επιφανειακές ρωγμές που δεν φαίνονται με γυμνό μάτι. Ο αρχή λειτουργίας της μεθόδου είναι αρκετά απλή και βασίζεται στη μαγνήτιση του υλικού και την ταυτόχρονη εφαρμογή κάποιου μέσου που περιέχει μαγνητικά σωματίδια. Η μαγνήτιση αυτή πρέπει να γίνεται σε όσο το δυνατό περισσότερες από τις διαστάσεις του ώστε σε κάθε εφαρμογή η φορά του μαγνητικού πεδίου να είναι όσο το δυνατόν πιο κάθετη στις ρωγμές. Στα σημεία που υπάρχει ρωγμή δημιουργείται τοπικά ένα έντονο μαγνητικό πεδίο το οποίο έλκει τα σωματίδια αυτά και τα συγκεντρώνει κατά μήκος της ρωγμής. Αυτά τα σωματίδια είναι είτε φθορίζοντα και αναδεικνύονται με χρήση λάμπας UV, είτε περιέχονται σε υγρά με έντονη χρωματική αντίθεση ώστε να είναι δυνατό να τα δούμε στο φως της ημέρας (γνωστή ως μέθοδος άσπρο – μαύρο). Για τη μαγνήτιση των εξεταζόμενων επιφανειών χρησιμοποιούνται φορητοί μαγνήτες όταν εξετάζονται μεγάλα κομμάτια με απλά γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως άξονες, σωλήνες, κλπ ενώ αν τα κομμάτια είναι μικρά συστήνεται η χρήση σταθερών σταθμών με ειδικά στηρίγματα που βοηθάνε στη γρήγορη εξέτασή τους. Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου σε σύγκριση με άλλες είναι ότι δεν χρειάζεται κάποια ιδιαίτερη προετοιμασία – καθαρισμό το αντικείμενο, οι ρωγμές αναδεικνύονται ευκρινώς και τα αποτελέσματα του ελέγχου είναι ξεκάθαρα και αναπαραγόμενα. Το κύριο μειονέκτημά της είναι ότι η εφαρμογή της είναι δυνατή μόνο στα μαγνητιζόμενα υλικά. [3]

## 1.6 Μέθοδοι βασισμένοι στον Ηλεκτρομαγνητισμό

Οι μέθοδοι αυτής της κατηγορίας είναι εκείνες που βασίζονται στην παρατήρηση και μέτρηση όπου αυτό είναι εφικτό των διαφόρων ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων τα οποία αναπτύσσονται στα δοκίμια με τη χρήση κατάλληλων συσκευών και αισθητήρων. Οι πιο σημαντικές και διαδεδομένες μέθοδοι – εφαρμογές σε αυτήν την κατηγορία είναι οι παρακάτω:

- **Μέτρηση πάχους επικαλύψεων**

Αυτή η μέθοδος δεν υπάγεται στις κλασικές ομάδες των ΜΚΕ μιας και δεν οδηγεί στην εύρεση σφαλμάτων όπως ρωγμές και πόροι. Εν' τούτοις χρησιμεύει στη μέτρηση ενός κρίσιμου παράγοντα για την αντοχή του δοκιμίου, όπως είναι ο πάχος της επικάλυψης πάνω σε μαγνητιζόμενα και μη μέταλλα μέσω σημαντικών φυσικών φαινομένων. Ο βασικός διαχωρισμός μεταξύ των μεθόδων μέτρησης γίνεται μεταξύ των αποκαλούμενων μαγνητικών μεθόδων και των μεθόδων δινορευμάτων. Η επιλογή για το ποια θα εφαρμοστεί σε κάθε περίπτωση γίνεται βάσει του υποστρώματος πάνω στο οποίο έχει γίνει η επικάλυψη.

- **Εύρεση επιφανειακών ατελειών με δινορεύματα**

Μια ακόμα εφαρμογή των δινορευμάτων είναι η εύρεση επιφανειακών και υποεπιφανειακών ατελειών (κυρίως ρωγμών) που υπάρχουν σε ηλεκτροαγωγιμα υλικά. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην εφαρμογή εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου που εφαρμόζεται κάθετα σε μια επιφάνεια το οποίο δημιουργεί δινορεύματα παράλληλα προς την επιφάνεια που εξετάζουμε. Τα δινορεύματα αυτά με τη σειρά τους δημιουργούν δεύτερο μαγνητικό πεδίο το οποίο αντιτίθεται στο πρώτο και το αδυνατίζει. Στα σημεία που υπάρχουν ρωγμές γίνεται παράκαμψη των δινορευμάτων με αποτέλεσμα σε εκείνο το σημείο το δεύτερο μαγνητικό πεδίο να μην είναι αρκετά ισχυρό και να γίνεται εντοπισμός της ατέλειας. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει βρει κυρίως εφαρμογή στην αεροπορική βιομηχανία και χρησιμοποιείται σε απλά γεωμετρικά σχήματα.

- **Ραδιογραφικός έλεγχος**

Ο ραδιογραφικός έλεγχος είναι μία μέθοδος μη καταστρεπτικού ελέγχου που βασίζεται στην απορρόφηση διεισδύουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από το υπό επιθεώρηση αντικείμενο. Η διαφορική απορρόφηση μπορεί να οφείλεται σε διαφορές της πυκνότητας της σύστασης του υλικού και του πάχους. Έτσι, με τον ραδιογραφικό έλεγχο ανιχνεύονται περιοχές με διαφορετική πυκνότητα ή πάχος σε σχέση με το περιβάλλον μέταλλο όπως οι ασυνέχειες των συγκολλήσεων. Γενικά, με τον ραδιογραφικό έλεγχο μπορεί να ανιχνευτούν ασυνέχειες με αξιόλογο πάχος σε μία διεύθυνση παράλληλη με την δέσμη ακτινοβολίας. Αυτό σημαίνει ότι η δυνατότητα της μεθόδου για ανίχνευση επίπεδων ασυνεχειών όπως οι ρωγμές εξαρτάται από τον προσανατολισμό της δέσμης σε σχέση με την συγκόλληση. Τρισδιάστατες ασυνέχειες όπως πόροι και εγκλείσματα που έχουν υπολογίσιμο πάχος σε όλες τις διευθύνσεις μπορεί να ανιχνευτούν αρκεί να έχουν πάνω από 1% διαφορά στην απορρόφηση της ακτινοβολίας σε σχέση με το περιβάλλον μέταλλο. Για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται μία πηγή ακτινοβολίας και ένα φιλμ. [3]

## 1.7 Μέθοδοι βασισμένοι στην ακτινοβολία

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται εκείνες οι μέθοδοι ΜΚΕ οι οποίες βασίζονται στην λήψη ακτινογραφιών όπως ακριβώς και στην Ιατρική και διαχωρίζονται σε αυτές που αποτυπώνουν το αποτέλεσμα είτε σε φιλμ γνωστές ως Ραδιογραφία, είτε σε άλλο μέσο αποτύπωσης (πχ αποτύπωση σε οθόνη) γνωστή ως Ραδιοσκοπία. Ένας ακόμα διαχωρισμός έχει να κάνει με τη πηγή που γεννά την ακτινοβολία που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση και είναι αυτή που ορίζει και τη μέθοδο. Για το ΜΚΕ ενδιαφέρον παρουσιάζει η μέθοδος που βασίζεται σε ακτίνες Χ και η μέθοδος που βασίζεται σε ακτίνες γ.

### • Έλεγχος με ακτινοβολία Χ ( X – ray )

Με τη μέθοδο αυτή μπορούν να βρεθούν ατέλειες και ελαττώματα τόσο στο εσωτερικό όσο και στην επιφάνεια του αντικειμένου που εξετάζεται. Σημαντικό ρόλο στην επιλογή του εξοπλισμού έχει να κάνει το πάχος των αντικειμένων που πρόκειται να εξεταστούν μιας και με όσο μεγαλύτερο πάχος εξετάζουμε, τόσο αδυνατίζει η ακτινοβολία μέσα σε αυτό και επομένως απαιτείται ισχυρότερη πηγή. Για τη δημιουργία αυτής της ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται ειδικές Χray Λυχνίες. Οι λυχνίες αυτές είναι κενές και περιέχουν μία θερμαινόμενη κάθοδο από την οποία ξεκινάνε επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια και προσκρούουν στην άνοδο η οποία είναι φτιαγμένη από βολφράμιο. Από τη πρόσκρουση αυτή έχουμε τη δημιουργία ακτινοβολίας Χray την οποία και χρησιμοποιούμε στους ελέγχους μας. Η όλη συσκευή απαιτεί την ύπαρξη καλής ψύξης (λόγω της μεγάλης θερμοκρασίας που αναπτύσσεται κατά τη πρόσκρουση των ηλεκτρονίων) και ειδικών διαφραγμάτων τα οποία καθοδηγούν τις ακτίνες στο σημείο που θέλουμε να εξετάσουμε. Λόγω της επικινδυνότητας που παρουσιάζουν οι ακτίνες Χ για τον ανθρώπινο οργανισμό (επειδή αλλοιώνουν τα κύτταρα), απαιτείται πολύ καλή εκπαίδευση και ειδική προστασία για τους ελεγκτές που εφαρμόζουν αυτές τις μεθόδους ώστε να μην παρεμβάλλονται ανάμεσα στην πηγή και στο εξεταζόμενο αντικείμενο.

### • Έλεγχος με ακτινοβολία γ

Η βασική διαφορά αυτής της μεθόδου από την άλλη είναι η πηγή της ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται. Στην ακτινοβολία γ χρησιμοποιούνται ραδιοϊσότοπα τα οποία διαφέρουν στην έντασή τους και στο χρόνο ημισείας ζωής (το χρονικό διάστημα που χρειάζεται για να πέσει η έντασή τους στο μισό). Τρία από τα πιο κοινά στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι:

- Το Σελήνιο (Se) 75, που έχει χρόνο ημισείας ζωής 120 μέρες
- Το Ιρίδιο (Ir) 192, που έχει χρόνο ημισείας ζωής 75 μέρες
- Το Κοβάλτιο (Co) 60, που έχει χρόνο ημισείας ζωής 5,2 χρόνια

Από αυτά το Σελήνιο έχει την ασθενέστερη ακτινοβολία και η ποιότητα των ακτινογραφιών που λαμβάνονται με αυτό δεν διαφέρουν ιδιαίτερα σε σχέση με τις Χ-ray, ενώ το Κοβάλτιο έχει την ισχυρότερη και χρησιμοποιείται για τα μεγαλύτερα πάχη. Αυτό που διακρίνει τη μια πηγή από την άλλη είναι ότι τα ισότοπα δεν μπορούν να σβήσουν όπως μια Λυχνία και επομένως εκπέμπουν συνεχώς ακτινοβολία. Για αυτό το λόγο απαιτούνται ειδικές διατάξεις φύλαξης και αξιοποίησης αυτών ώστε να αποφεύγεται διαρροή ακτινοβολίας. Επίσης η αγορά του εξοπλισμού και η συντήρηση – διατήρησή του είναι αρκετά πιο πολύπλοκες από ότι στα Χ-ray.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των παραπάνω μεθόδων είναι ότι μας δίνουν μια ξεκάθαρη εικόνα της κατάστασης του εξεταζόμενου αντικειμένου, ενώ παράλληλα η αποτύπωση σε φιλμ (ή σε κάποιο ψηφιακό μέσο) γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποδεικνύεται η

ποιότητα της λήψης και οι συνθήκες που έγινε αυτή και να μην επιδέχεται καμία αμφισβήτηση. Από την άλλη, το κυριότερο μειονέκτημά τους αποτελεί η επικινδυνότητα που παρουσιάζει η ακτινοβολία για τον ελεγκτή και τους εργαζόμενους, γεγονός που γεννά επιπλέον κόστη όπως εξοπλισμός ασφαλείας και εκπαίδευση εργαζομένων. Επιπλέον μειονεκτήματα είναι ότι υπάρχει όριο στο πάχος του δοκιμίου που μπορούμε να ελέγξουμε και ότι σφάλματα ειδικής μορφής όπως ρωγμές που είναι παράλληλες με την ακτινοβολία είναι πολύ δύσκολο να ανιχνευθούν. [3]

### **1.8 Μέθοδοι βασισμένοι στην ακουστική ( υπέρηχοι)**

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν τον ήχο, και πιο συγκεκριμένα τους υπέρηχους, ως το μέσο μέτρησης, διάγνωσης και εύρεσης ατελειών έχουν εφαρμογή σε όλα τα αποκαλούμενα ηχοαγωγιμα υλικά. Η αρχή λειτουργίας είναι αρκετά απλή και συνοπτικά μπορούμε να πούμε ότι χρησιμοποιούνται αισθητήρες με δυνατότητα εκπομπής και λήψης υπερήχων οι οποίοι εισάγουν παλμούς μέσα στο εξεταζόμενο υλικό. Ακριβώς όπως συμβαίνει και με τους ήχους που μπορούμε να ακούσουμε, μόλις κάποιος από τους παλμούς αυτούς βρει κάποιο εμπόδιο το οποίο ιδανικά είναι κάθετο σε αυτόν (πχ την επιφάνεια άλλου μη ηχοαγωγιμου υλικού) ανακλάται προς τα πίσω και ο μετατροπέας που εμπεριέχεται στον αισθητήρα που τον εξέπεμψε τον μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια και ούτω καθεξής. Με αυτή τη διαδικασία οι συσκευές υπερήχων μετράνε πρακτικά το χρόνο που χρειάζεται ένας παλμός για να διανύσει την απόσταση από το σημείο που μπαίνει μέχρι το εμπόδιο και έχοντας δεδομένη την ταχύτητα που ταξιδεύει ο ήχος μέσα στο υλικό υπολογίζουν και μας δίνουν την απόσταση μεταξύ των δύο σημείων. Λόγω του γεγονότος ότι ενδέχεται να υπάρχουν πολλών ειδών ατέλειες, με διάφορα σχήματα, γεωμετρίες και θέση μέσα στα υλικά που εξετάζονται, βρίσκονται στη διάθεση του ελεγκτή πολλών ειδών αισθητήρες οι οποίοι επιλέγονται κατά περίπτωση. Επομένως υπάρχουν οι αισθητήρες ευθείας δέσμης και οι γωνιακοί αισθητήρες οι οποίοι χαρακτηρίζονται από τη γωνία με την οποία ξεκινάει ο παλμός από αυτούς. Σε κάθε περίπτωση και ανεξαρτήτως του τι είδους αισθητήρα χρησιμοποιεί ο ελεγκτής, είναι απαραίτητη η χρήση ενός ενδιάμεσου υλικού γνωστού ως couplant (gel, νερό, γράσο, κλπ) το οποίο αντικαθιστά τον αέρα που παρεμβάλλεται μεταξύ του αισθητήρα και του δοκιμίου, διότι αυτός παρουσιάζει μεγάλη ακουστική αντίσταση μην επιτρέποντας την εισαγωγή του παλμού στο υλικό. [3]

## 2. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

### 2.1 Το Ηλεκτροστατικό πεδίο

Έστω ότι έχουμε 2 σημειακά φορτία  $Q$ ,  $q$ α οποία είναι τοποθετημένα σε ένα σημείο  $A$  και σε ένα σημείο  $B$  αντίστοιχα και απέχουν μεταξύ τους απόσταση  $r$ . Σύμφωνα με το νόμο του Coulomb η δύναμη που ασκείται στο σημειακό φορτίο  $q$  εξαιτίας του σημειακού φορτίου  $Q$  που ηρεμεί δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q \cdot q}{r^2} \hat{r} \quad (2.1)$$

Όπου  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2}$  η διηλεκτρική σταθερά ή δεκτικότητα του κενού.

### 2.2 Ένταση Ηλεκτροστατικού πεδίου

Η ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου που δημιουργεί το φορτίο  $Q$  σε κάθε σημείο του χώρου, είναι ανεξάρτητη του φορτίου  $q$  που έχει τον ρόλο του υποθέματος (δοκιμαστικό μοναδιαίο φορτίο). Επομένως διαιρώντας τη δύναμη  $F$  με το φορτίο  $q$  θα προκύψει η Ισχύς του Ηλεκτρικού Πεδίου.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \hat{r} \quad (2.2)$$

Στη περίπτωση όπου αντί για δύο σημειακά φορτία υπάρχει συνεχής κατανομή φορτίων στο χώρο τότε η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα ως προς τους στοιχειώδεις όγκους που αποτελούν τον όγκο της κατανομής του φορτίου στο χώρο. Παρακάτω δίνεται το ολοκλήρωμα :

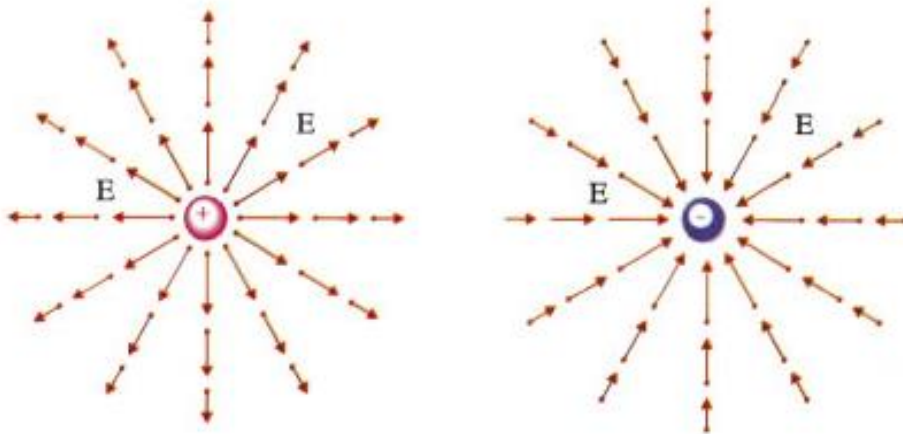
$$\vec{E} = \vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \int \frac{1}{r^2} \hat{r} dq \quad (2.3)$$

- Γραμμική κατανομή φορτίου :  $dq = \lambda \cdot dl$   
 $\lambda$  = φορτίο ανά μονάδα μήκους  
 $dl$  = στοιχειώδεις μήκος πάνω στη γραμμή
- Για επιφανειακό φορτίο :  $dq = \sigma \cdot da$   
 $\sigma$  = φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας  
 $da$  = στοιχειώδεις εμβαδόν πάνω στην επιφάνεια
- Για φορτίο χώρου :  $dq = \rho \cdot dV$   
 $\rho$  = φορτίο ανά μονάδα όγκου  
 $dV$  = στοιχειώδης όγκος

### 2.3 Δυναμικές γραμμές πεδίου

Το μέγεθος του πεδίου υποδεικνύεται από την πυκνότητα των δυναμικών γραμμών. Το ηλεκτρικό πεδίο είναι ισχυρό γύρω από το κέντρο όπου οι γραμμές βρίσκονται κοντά μεταξύ τους και ασθενές όπου είναι αραιές. Οι δυναμικές γραμμές πηγάζουν από

Θετικά φορτία και καταλήγουν σε αρνητικά . Δεν σταματούν ενδιάμεσα αλλά μπορούν να εκτείνονται ως το άπειρο και δεν διασταυρώνονται ποτέ. ( εικόνα 2 )



Εικόνα 2: Διανύσματα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται γύρω από το θετικό και αρνητικό σημειακό φορτίο.

Στο δισδιάστατο μοντέλο των σχημάτων παραπλανεί, γιατί η πυκνότητα των γραμμών που περνούν από κύκλο ακτίνας  $r$  δίνεται από το συνολικό τους αριθμό προς την περίμετρο ( $n / 2\pi r$ ) που φθίνει ως  $\frac{1}{r}$  και όχι ως  $\frac{1}{r^2}$ . Αυτό διορθώνεται στο τρισδιάστατο μοντέλο, όπου η πυκνότητα δίνεται από το συνολικό αριθμό των δυναμικών γραμμών προς την επιφάνεια ( $n / 4\pi r^2$ ) της σφαίρας που φθίνει ως  $\frac{1}{r^2}$ .

Η ροή διαμέσου μιας κλειστής επιφάνειας είναι μέτρο συνολικού φορτίου που βρίσκεται μέσα της, αφού η ροή είναι ένα μέτρο του <<αριθμού των δυναμικών γραμμών>> που διαπερνούν μία επιφάνεια, ο οποίος με τη σειρά του είναι ανάλογος του φορτίου που δημιουργεί το πεδίο. Η ένταση του Ηλεκτρικού πεδίου είναι ανάλογης της πυκνότητας των δυναμικών γραμμών.

## 2.4 Νόμος Gauss

Σύμφωνα με τον νόμο του Gauss συνολικός αριθμός των ηλεκτρικών γραμμών που περνούν από μία επιφάνεια ( ηλεκτρική ροή ) είναι ανάλογη με το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο που είναι εγκλωβισμένο από την επιφάνεια.

- **Ολοκληρωτική μορφή του Νόμου του Gauss**

Αν θεωρήσουμε ένα σημειακό φορτίο  $q$  στο κέντρο σφαίρας ακτίνας  $r$  η ροή θα είναι:

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \oint E \, dA = E \oint dA \quad (2.4)$$

Από νόμο Coulomb ισχύει επίσης :

$$\Phi_E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \cdot 4\pi r^2 = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (2.5)$$

Από τις εξισώσεις 2.4 και 2.5 εξάγεται ο Νόμος του Gauss για μία κλειστή επιφάνεια η οποία περικλείει συνολικό φορτίο  $q_{in}$  :



$$\Phi_E = \oint \vec{E} d\vec{A} = \frac{q_{in}}{\epsilon_0} \quad (2.6)$$

Ο Νόμος του Gauss ισχύει για οποιαδήποτε κατανομή . [9]

- **Διαφορική μορφή Νόμου του Gauss**

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.7)$$

## 2.5 Ηλεκτρικό δυναμικό

Έστω ένα φορτίο  $q$  μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο  $\vec{E}$  . Το έργο που παράγει η δύναμη  $F$  στο φορτίο  $q$  όταν αυτό μετατοπίζεται κατά απειροστό διάστημα  $d\vec{s}$  είναι :

$$dW = \vec{F} d\vec{s} = q\vec{E} d\vec{s} \quad (2.8)$$

Επειδή η δύναμη Coulomb είναι συντηρητική μπορούμε να ορίσουμε την συνάρτηση της δυναμικής ενέργειας  $U$ . Για μετατόπιση του φορτίου από σημείο  $A$  σε σημείο  $B$  η διαφορά δυναμικής ενέργειας είναι :

$$U(B) - U(A) = \Delta U = -q \int_A^B \vec{E} d\vec{s} \quad (2.9)$$

Για να ορίσουμε την συνάρτηση να ορίσουμε την συνάρτηση της δυναμικής ενέργειας θα εκμεταλλευτούμε το γεγονός ότι μπορούμε να επιλέξουμε το σημείο στο οποίο αυτή μηδενίζεται και θεωρούμε σημείο αναφοράς  $A$  άπειρο και ορίζουμε την δυναμική ενέργεια ως εξής :

$$U(B) = -q \int_{\infty}^B \vec{E} d\vec{s} \quad (2.10)$$

Αν γράψουμε τη συνάρτηση δυναμικής ενέργειας στη γενική της μορφή για οποιαδήποτε σημείο του χώρου  $r$  έχουμε :

$$U(r) = q \int_r^{\infty} \vec{E} d\vec{s} \quad (2.11)$$

Ορίζουμε ως διαφορά δυναμικού μεταξύ 2 σημείων  $A, B$

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q} = - \int_A^B \vec{E} d\vec{s} \quad (2.12)$$

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου  $E$  μπορεί να εκφραστεί αλλιώς :

$$E = -\nabla V = -\left(i \frac{\partial V}{\partial x} + j \frac{\partial V}{\partial y} + k \frac{\partial V}{\partial z}\right) \quad (2.13)$$

Όπου  $i, j$ , κμοναδιαία διανύσματα των αξόνων  $Ox, Oy, Oz$ . Ηδιαφορά δυναμικού  $V$  μετριέται σε Volts (  $V$  ) , επομένως η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μετριέται σε  $V / m$ .

## 2.6 Μαγνητικό πεδίο - εισαγωγή

Μέχρι τώρα μελετούσαμε ακίνητα φορτία , τώρα θα μελετήσουμε τις δυνάμεις μεταξύ κινούμενων φορτίων . Κάνοντας ένα απλό πείραμα και διεγείροντας ρεύμα ( κινούμενα φορτία ) μέσα σε δύο σύρματα παράλληλα μεταξύ τους θα παρατηρηθεί ότι όταν τα ρεύματα έχουν αντίθετη κατεύθυνση, τα σύρματα απωθούνται μεταξύ τους ενώ όταν έχουν ίδια κατεύθυνση τα σύρματα έλκονται. Είναι σίγουρο πως η δύναμη μεταξύ τους δεν είναι ηλεκτροστατικής φύσεως, αφού αν πλησιάσει ένα φορτίο στα σύρματα αυτό δεν θα νιώσει καμία δύναμη. Αυτό συμβαίνει γιατί μπορεί τα φορτία να είναι κινούμενα όμως σε κάθε τμήμα του σύρματος υπάρχει ίσος αριθμός θετικών και αρνητικών φορτίων. Αυτή είναι η πρώτη επαφή με μία μαγνητική δύναμη. Συνεπώς ένα ακίνητο φορτίο παράγει μόνο ηλεκτρικό πεδίο  $\vec{E}$  ενώ ένα κινούμενο φορτίο δημιουργεί και μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}$ . Σε κάθε υλικό υπάρχει κίνηση φορτίου ( ηλεκτρονίων ) στα άτομα όμως η κίνηση αυτή δεν είναι συγχρονισμένη για όλα τα άτομα και έτσι τα ατομικά μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται αλληλοαναιρούνται . Σε ορισμένα υλικά τα μαγνητικά πεδία των κινούμενων ηλεκτρονίων σε κάθε άτομο προστίθενται και έτσι δημιουργείται ένα μετρήσιμο μαγνητικό πεδίο από το υλικό. Τέτοια υλικά είναι οι σιδηρομαγνήτες.

## 2.7 Μαγνητικές δυνάμεις

Ας θεωρήσουμε ότι μπορεί να ορισθεί ένα μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}$  σε μία περιοχή. Το μαγνητικό πεδίο δρα σε ηλεκτρικά φορτία και η χρήση του για την εύρεση της κίνησης των φορτίων διαφέρει δραστικά από αυτή του ηλεκτρικού πεδίου.

Η μαγνητική δύναμη που ασκείται πάνω σε φορτίο  $Q$  που κινείται με ταχύτητα  $\vec{u}$  μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο είναι :

$$\vec{F}_{μαγν} = Q(\vec{u} \times \vec{B}) \quad (2.14) \text{ Νόμος δύναμης Lorentz}$$

Αν η ταχύτητα είναι παράλληλη στο  $\vec{B}$  τότε η δύναμη είναι μηδέν και αν η ταχύτητα είναι κάθετη στο  $\vec{B}$  η δύναμη είναι μέγιστη.

Στη περίπτωση όπου έχουμε παρουσία ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου τότε η δύναμη θα δίνεται από τον τύπο :

$$\vec{F} = Q [\vec{E} + (\vec{u} \times \vec{B})] \quad (2.15)$$

Οι μαγνητικές δυνάμεις δεν παράγουν έργο, μπορούν να αλλάξουν την κατεύθυνση της κίνησης ενός σωματιδίου αλλά δεν μπορούν να μεταβάλλουν το μέτρο της ταχύτητάς του. [9]

## 2.8 Νόμος Biot- Savart

Τα κινούμενα ηλεκτρικά φορτία δημιουργούν μαγνητικό πεδίο άρα ένα ρεύμα  $I$  δημιουργεί μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}$  . Θεωρούμε έναν αγωγό ο οποίος περιγράφεται από μία καμπύλη  $\vec{s}$  και ένα σημείο  $P$  στον χώρο. Το πείραμα δείχνει ότι από ένα τμήμα  $d\vec{s}$  ρευματοφόρου αγωγού δημιουργείται μαγνητικό πεδίο

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{s} \times \hat{r}}{r^2} \quad (2.16)$$

Όπου το διάνυσμα από το  $d\vec{s}$  στο P. Η σταθερά  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m} / \text{A}\cdot\text{m}$  ονομάζεται μαγνητική διαπερατότητα.

Οι πειραματικές μετρήσεις που περιγράφει ο νόμος Biot – Savart είναι :

- Το μέτρο του  $d\vec{B}$  είναι αντιστρόφως ανάλογο του  $r^2$
- Το μέτρο του  $d\vec{B}$  είναι ανάλογο του ρεύματος I και του μήκους ds του στοιχειώδους τμήματος του αγωγού
- Το διάνυσμα  $d\vec{B}$  είναι κάθετο τόσο στο  $d\vec{s}$  όσο και στο  $\hat{r}$ .
- Το μέτρο του  $d\vec{B}$  είναι ανάλογο του  $\sin\theta$ , όπου  $\theta$  η γωνία που σχηματίζουν τα  $d\vec{s}$  και  $\hat{r}$ .

Το ολικό μαγνητικό πεδίο B είναι το διανυσματικό άθροισμα των πεδίων  $d\vec{B}$  από τα τμήματα  $d\vec{s}$  του αγωγού.

$$\vec{B} = \int d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\vec{s} \times \vec{r}}{r^2} \quad (2.17)$$

## 2.9 Νόμος Ampere

Αν έχουμε μια κατανομή ρεύματος τότε δημιουργείται μαγνητικό πεδίο το οποίο πάνω σε μία κλειστή διαδρομή C ικανοποιείται από τον νόμο του Ampere:

$$\oint \vec{B} d\vec{s} = \mu_0 I_{enc} \quad (2.18)$$

Όπου  $I_{enc}$  το ρεύμα που περικλείεται στη καμπύλη. Ο νόμος αυτός είναι για τα ρεύματα και τα μαγνητικά πεδία ανάλογος του νόμου Gauss για τα ηλεκτρικά φορτία. Επομένως ο νόμος του Gauss για τον μαγνητισμό γίνεται ως εξής :

Αν η ροή του μαγνητικού πεδίου είναι  $\Phi_B = \vec{B} d\vec{A}$  τότε η μαγνητική ροή που διέρχεται από μια κλειστή επιφάνεια είναι μηδέν

$$\oint \vec{B} d\vec{A} = 0 \quad (2.19)$$

## 2.10 Χρονικά μεταβαλλόμενο Μαγνητικό πεδίο – Μαγνητική επαγωγή

Αν θεωρήσουμε ότι από έναν αγωγίμο βρόγχο διέρχεται μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}$ , η ηλεκτρεγερτική δύναμη που προκύπτει από το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο δίνεται από τον νόμο του Faraday για την επαγωγή :

$$E = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2.20)$$

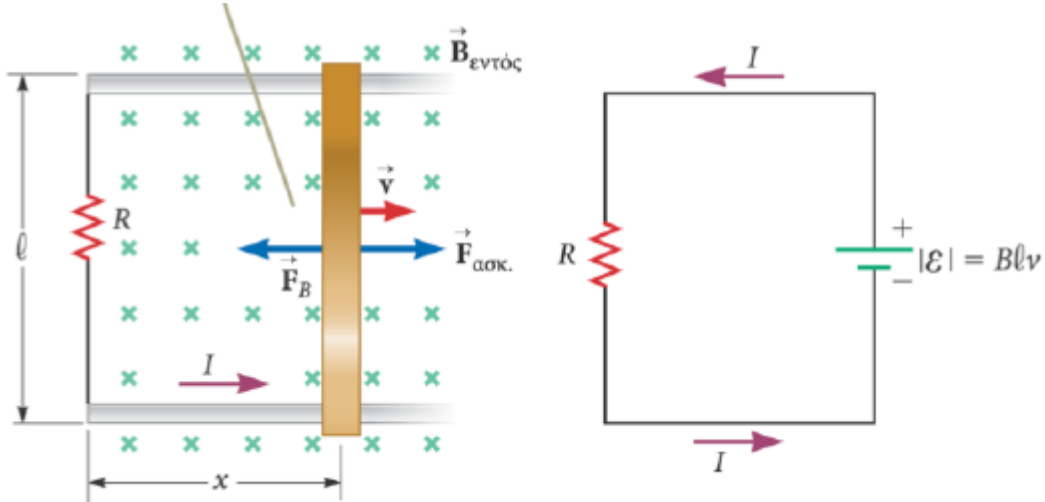
### • ΗΕΔ λόγω κίνησης

Όταν ένας αγωγός μήκους l κινείται μέσα σε σταθερό μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}$  με ταχύτητα u, τα ηλεκτρόνια στον αγωγό δέχονται δύναμη  $\vec{F} = q\vec{u} \times \vec{B}$ . Καθώς κινούνται προς την μία άκρη του αγωγού τελικά έχουμε ηλεκτρικό πεδίο E τέτοιο ώστε :

$$qE = quB \Rightarrow E = uB \quad (2.21)$$

Και διαφορά δυναμικού  $\Delta V = EI = Blu$  ( 2.22 )

Αν θεωρήσουμε ότι ο αγωγός είναι τμήμα κλειστής διαδρομής τότε δημιουργείται επαγόμενο ρεύμα στο κύκλωμα .



Εικόνα 3:Επαγωγή ρεύματος με αριστερόστροφη φορά. Η μαγνητική δύναμη F που ασκείται στη ράβδο αντιτίθεται στη κίνηση.

Η μαγνητική ροή μέσα από το πλαίσιο είναι  $\Phi_B = Blx$ , ο Νόμος του Faraday δίνει :

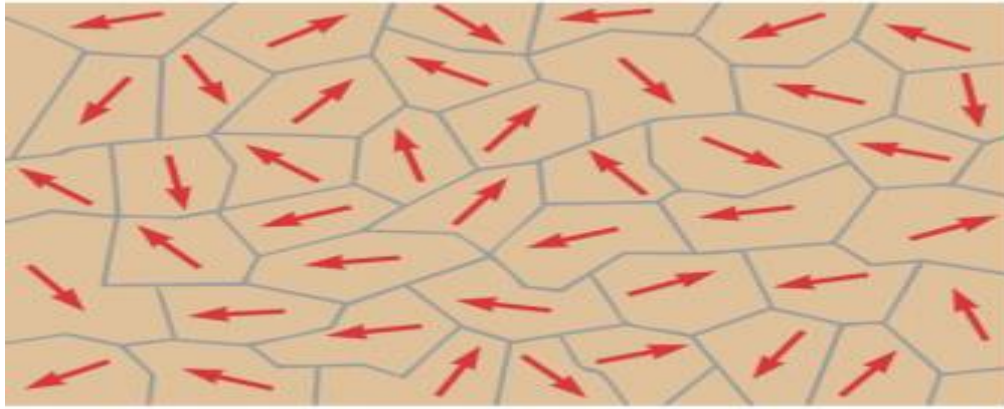
$$E = - \frac{d\Phi_B}{dt} = - \frac{d(Blu)}{dt} = -Blu \quad (2.23)$$

Το επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο είναι μη συντηρητικό οπότε :

$$\oint \vec{E} d\vec{S} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2.24)$$

## 2.11 Σύγχρονες εφαρμογές : Μαγνητικά υλικά

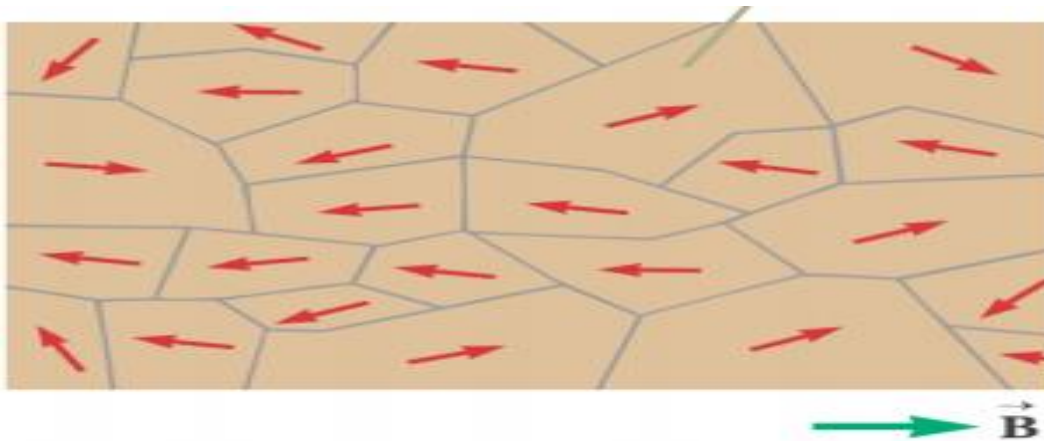
Μερικά υλικά έχουν ισχυρές μαγνητικές ιδιότητες οι οποίες είναι γνωστές ως σιδηρομαγνητικές. Τα άτομα των υλικών αυτών έχουν μαγνητικές ροπές οι οποίες τείνουν να ευθυγραμμίζονται ακόμα και με την επίδραση ασθενών μαγνητικών πεδίων. Κάθε περιοχή περιλαμβάνει πολλά άτομα. Άρα οι δυνάμεις που ασκούνται σε μικροσκοπικό επίπεδο δημιουργούν δομές σε μικροσκοπική κλίμακα. Παραδείγματα σιδηρομαγνητικών υλικών είναι ο Σίδηρος, το Κοβάλτιο, το Νικέλιο, το Γαδολίνιο και το Δυσπρόσιο. Παρακάτω φαίνονται οι μαγνητικές περιοχές ενός σιδηρομαγνήτη.



α

Εικόνα 4: Μη μαγνητισμένο υλικό όπου τα ατομικά μαγνητικά δίπολα είναι τυχαία προσανατολισμένα.

Όταν επιδρά ένα εξωτερικό  $\vec{B}$ , οι περιοχές με συνιστώσες μαγνητική ροπής ομόρροπες του  $\vec{B}$  μεγαλώνουν, οπότε το δοκίμιο μαγνητίζεται.



β

Εικόνα 5: Με επίδραση εξωτερικού πεδίου  $\vec{B}$ .

## 2.12 Εξισώσεις Maxwell

Σύμφωνα με τις παραπάνω θεωρίες της Ηλεκτροστατικής και της Μαγνητοστατικής προκύπτουν συνοπτικά οι εξισώσεις Maxwell .

**Νόμος Gauss** :  $\oint \vec{E} d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$

**Νόμος Gauss για μαγνητισμό**:  $\oint \vec{B} d\vec{A} = 0$

**Νόμος Ampere – Maxwell**:  $\oint \vec{B} d\vec{S} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt}$

**Νόμος Faraday** :  $\oint \vec{E} d\vec{S} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$

Οι νόμοι του ηλεκτρομαγνητισμού δίνουν το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο τα οποία είναι συναρτήσεις του χώρου και του χρόνου, δηλαδή μπορεί να είναι μη-ομογενή και μεταβαλλόμενα ως προς τον χρόνο. [9]

Παρακάτω φαίνεται και η διαφορική μορφή των παραπάνω εξισώσεων του Maxwell:

- $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho(\vec{r})}{\epsilon_0}$
- $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$
- $\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
- $\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

### 3. ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΑ

#### 3.1 Εισαγωγή στα Μικροκύματα

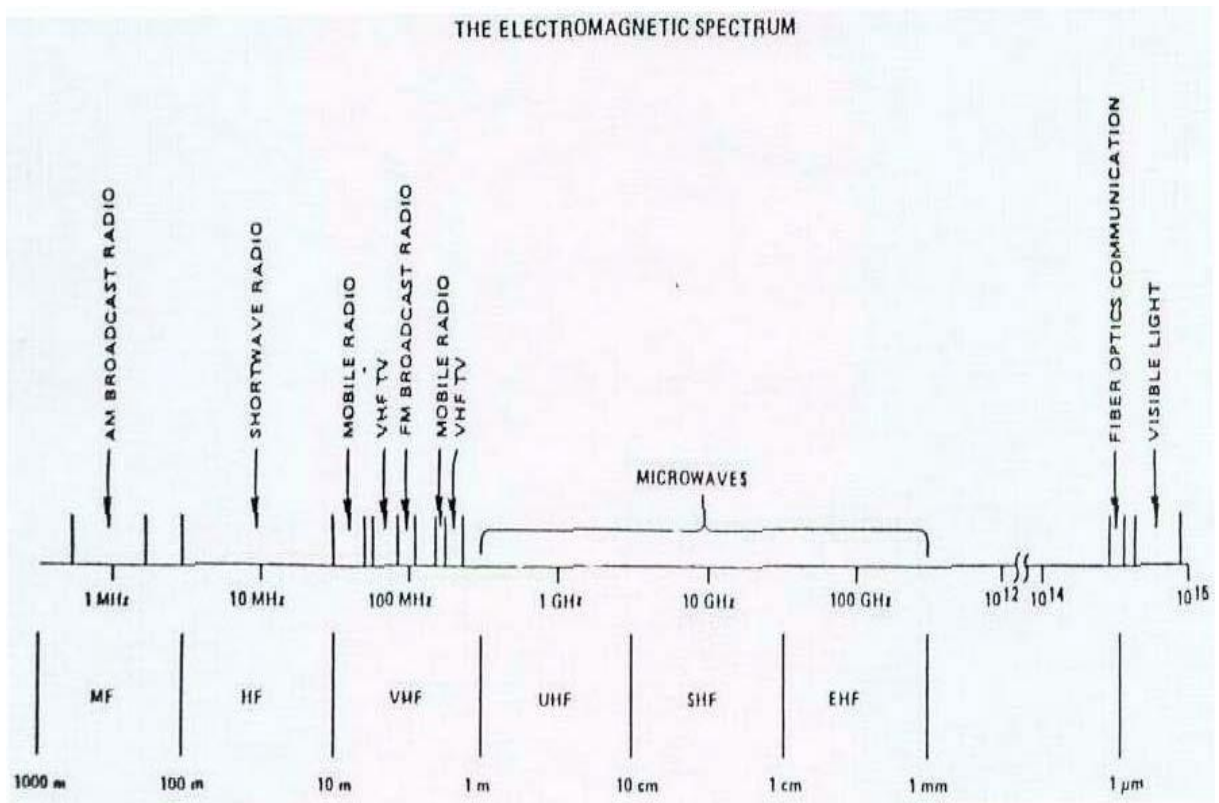
Η επιστήμη των μικροκυμάτων ξεκίνησε με την ανάπτυξη του ραντάρ και επεκτάθηκε κατά τη διάρκεια του δεύτερου Παγκόσμιου πολέμου. Η ανακάλυψη των μικροκυματικών πηγών όπως το κλύστρον και το μάγνητρον άνοιξε τη συχνότητα των Γιγάκυκλων ( $\text{GHz} = 10^9\text{Hz}$ ) στους μηχανικούς τηλεπικοινωνιών. Η εμπορική χρησιμοποίηση των δορυφόρων έφερε επανάσταση στις Τηλεπικοινωνίες και οι μικροκυματικές ζεύξεις αντικατέστησαν πολλά χιλιόμετρα τηλεφωνικών καλωδίων.

Τα μικροκύματα είναι ουσιαστικά από μερικές εκατοντάδες MHz μέχρι μερικές εκατοντάδες GHz. Το μεγάλο πρόβλημα στις συχνότητες των μικροκυμάτων είναι το μέγεθος του μήκους κύματος του σήματος. Το μήκος κύματος σε ένα σήμα χαμηλής συχνότητας είναι πολύ μεγάλο συγκρινόμενο με τις φυσικές διαστάσεις μιας συσκευής. Για παράδειγμα, το μήκος κύματος μιας γραμμής ηλεκτρικής ενέργειας στα 50 Hz είναι 6.000 km ενώ για ένα σήμα συχνότητας 1 MHz το μήκος κύματος είναι 300 m.

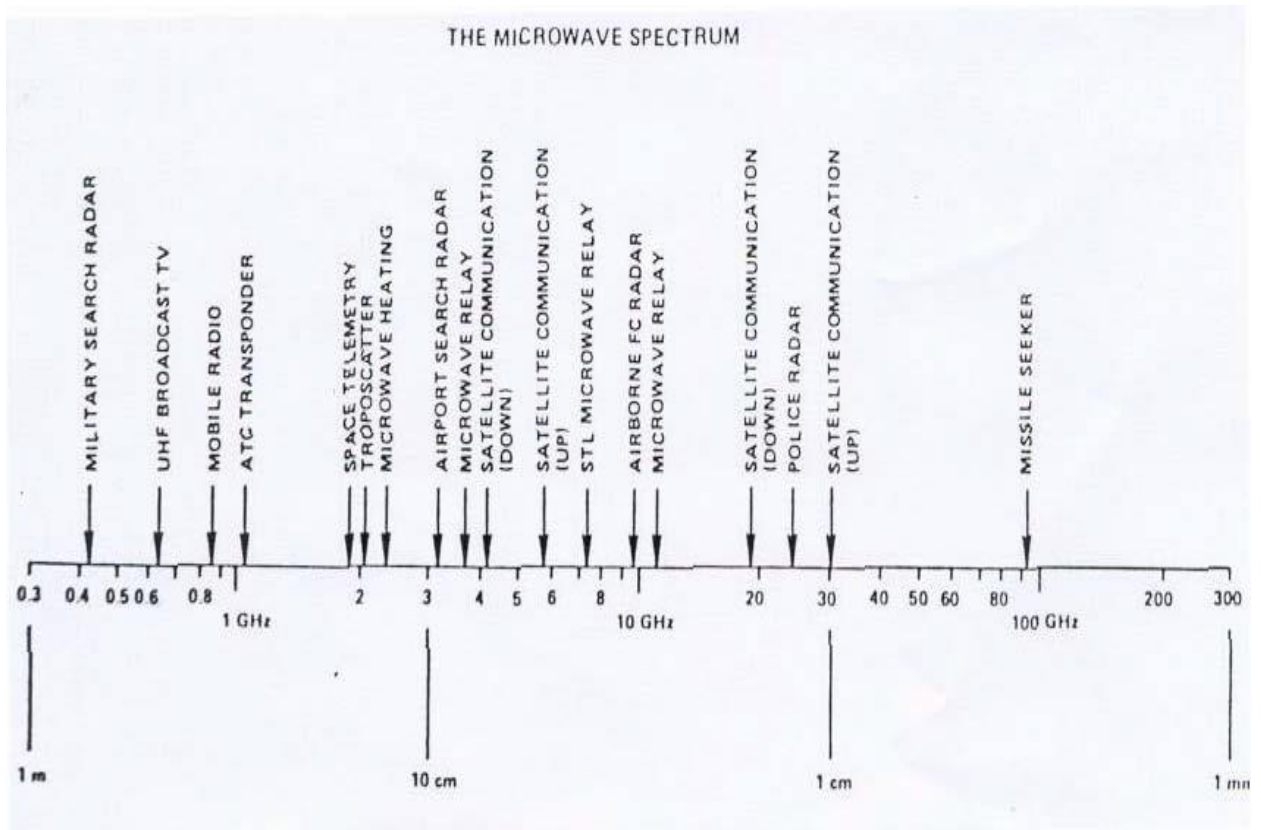
Ο μεγάλος λόγος διαστάσεων μήκους κύματος προς συσκευή έχει σαν αποτέλεσμα πολύ μικρές διαφορές φάσεως σε διαφορετικά σημεία δοκιμής. Οι μικρές διαφορές φάσεως σημαίνουν ότι δεν μπορεί να σχηματιστεί ένα στάσιμο κύμα, το οποίο είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ ενός προς τα εμπρός κινούμενου σήματος και της ανακλάσεώς του. Έτσι οι λύσεις των εξισώσεων του Maxwell απλοποιούνται πάρα πολύ και προκύπτει ο νόμος του Ohm και άλλα θεωρήματα που κάνουν το σχεδιασμό κυκλωμάτων σε χαμηλές συχνότητες σχετικά εύκολο. Ο Μηχανικός μικροκυμάτων δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει τις εξισώσεις των χαμηλών συχνοτήτων για να αναλύσει ή να σχεδιάσει ένα μικροκυματικό κύκλωμα.

Η μόνη αξιόπιστη πηγή είναι οι εξισώσεις Maxwell. Στις μικροκυματικές συχνότητες, το μήκος κύματος ενός σήματος είναι συγκρίσιμο ή ακόμη και μικρότερο από τις φυσικές διαστάσεις της συσκευής. Για παράδειγμα, το μήκος κύματος ενός σήματος 10 GHz είναι 3 cm. Έτσι, δύο γειτονικά σημεία δοκιμής μπορεί να έχουν σημαντική διαφορά φάσεως. Παρόμοια, επειδή ένα προς τα εμπρός κινούμενο κύμα μπορεί να ανακλαστεί μερικώς εξαιτίας μιας κακής προσαρμογής στο κύκλωμα, ένα σημείο δοκιμής στο κύκλωμα είναι η υπέρθεση του προς τα εμπρός και του ανακλώμενου κύματος. Αυτά τα δύο κύματα διαφέρουν μεταξύ τους κατά μία σημαντική γωνία φάσεως και κατά τη διεύθυνση της διάδοσής τους. Η πεπερασμένη διαφορά φάσεως μεταξύ του προς τα εμπρός κύματος και του ανακλώμενου κύματος έχει σαν αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός **στάσιμου κύματος**.

Επίσης, άλλα φαινόμενα υψηλής συχνότητας όπως οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας, οι διηλεκτρικές απώλειες και οι παρασιτικές χωρητικότητες καθιστούν το σχεδιασμό των μικροκυματικών κυκλωμάτων δύσκολο. Έτσι δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε απλά καλώδια και χαμηλής συχνότητας στοιχεία, όπως αντιστάσεις, πυκνωτές και πηνία, επειδή αυτά τα στοιχεία έχουν διαφορετική συμπεριφορά στις υψηλές συχνότητες που οδηγεί σε πιθανή αστοχία τους. Η κατασκευή δικτύων υψηλών συχνοτήτων είναι πολύ ευαίσθητη στο σχήμα και στις ασυνέχειες των αγωγών. Παρακάτω η εικόνα 6 δείχνει τις θέσεις διαφορετικών μέσων εκπομπής στο φάσμα συχνοτήτων και η εικόνα 7 δίνει έμφαση στο μικροκυματικό φάσμα.



Εικόνα 6: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα από συχνότητες MHz έως 10<sup>15</sup> Hz και εφαρμογές



Εικόνα 7: Το μικροκυματικό φάσμα από υπο-GHz συχνότητες μέχρι εκατοντάδες GHz και εφαρμογές.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό ενός μικροκυματικού σήματος είναι ότι μπορεί να διαδοθεί μέσα από την ιονόσφαιρα με ελάχιστες απώλειες. Όμως, οι υδρατμοί, η βροχή, το όζον και το οξυγόνο απορροφούν τα μικροκύματα σε ορισμένες συχνότητες. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε συχνότητες της τάξεως δεκάδων MHz και κάτω, δεν



μπορεί να εισχωρήσει στην ιονόσφαιρα αλλά ανακλάται πίσω. Τα μικροκύματα όμως, μπορούν να εισχωρήσουν στην ιονόσφαιρα υφιστάμενα κάποια περίθλαση. Έτσι οι διαστημικές επικοινωνίες χρησιμοποιούν μικροκύματα. Ένα άλλο στοιχείο των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων υψηλών συχνοτήτων είναι ότι ως φέροντα κύματα μπορούν να συγκεντρώσουν περισσότερη πληροφορία μέσα στο εύρος ζώνης τους. Για παράδειγμα, η τυπική συχνότητα φέροντος ενός σήματος AM είναι 1 MHz και η πληροφορία της μουσικής και της φωνής (που ονομάζονται ακουστική πληροφορία) περιέχονται σε ένα εύρος ζώνης 40 kHz, δηλαδή 4% του φέροντος. Αν χρησιμοποιηθεί ένα κύμα 10 GHz ως φέρον, τότε ένα εύρος ζώνης 1% θα είναι 100 MHz, που σημαίνει ότι  $100 \text{ MHz} / 40 \text{ kHz} = 25.000$  ξεχωριστές ομάδες ακουστικής πληροφορίας μπορούν θεωρητικά να διευθετηθούν. Πέρα από τις τηλεπικοινωνίες, η επιστήμη των μικροκυμάτων έχει εφαρμογές και σε άλλους τομείς, όπως είναι η απομάκρυνση οργανικού θείου και άλλων πιθανών 4-ρυπαντών από τον άνθρακα, η ανίχνευση των δινο-ρευμάτων σε ένα κομμάτι μετάλλου με ρωγμές κλπ.

Τα μικροκύματα παράγονται από έναν ηλεκτρικό ταλαντωτή και δεν διαδίδονται με επίπεδη πόλωση. Η διάδοση γίνεται στον άξονα z των καρτεσιανών συντεταγμένων με το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο να ταλαντώνονται κάθετα μεταξύ τους και κάθετα στον άξονα z. Δηλαδή το ηλεκτρικό πεδίο  $E_x$  ταλαντώνεται στον x ενώ το μαγνητικό πεδίο  $H_y$  στον άξονα y. Ο λόγος  $E/H$  του ηλεκτρικού πεδίου προς το αντίστοιχο μαγνητικό είναι γνωστός ως χαρακτηριστική αντίσταση η οποία για επίπεδα κύματα είναι ίση με  $\sqrt{\mu/\epsilon}$ , όπου  $\mu$  είναι η μαγνητική διαπερατότητα και  $\epsilon$  η ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Αυτό εύκολα μπορεί να αποδειχθεί αν παραγωγίσουμε τις λύσεις των κυματικών εξισώσεων για  $E_x$  και  $H_y$  και αντικαθιστώντας τις στις εξισώσεις του Maxwell. Από τις διαστάσεις των  $E_x$  και  $H_y$  γίνεται εύκολα κατανοητό ότι η μονάδα του  $\eta$  είναι το  $\Omega$  (Ohm). Για το κενό  $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$  και  $\epsilon = \epsilon_0 = (1/36) \times 10^{-9} \text{ F/m}$  επομένως  $\eta = 376.99 \Omega$ . Οι τιμές του  $\eta$  είναι αρκετά υψηλές καθώς το  $\epsilon$  είναι αμελητέο.

Οι εξισώσεις για την ταχύτητα c και τον συντελεστή απόσβεσης  $\alpha$  είναι :

$$c^2 = \frac{2}{\mu\epsilon' \sqrt{1 + \frac{\epsilon''^2}{\epsilon'^2}}} \quad (3.1)$$

Και

$$\alpha^2 = \frac{\omega^2 \epsilon''^2 \mu}{2\epsilon' \sqrt{1 + \frac{\epsilon''^2}{\epsilon'^2}}} \quad (3.2)$$

Όπου  $\omega$  είναι η γωνιακή συχνότητα και  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$  πραγματικό και φανταστικό μέρος του  $\epsilon$ . Με μικρή απόσβεση το  $\epsilon''$  τείνει στο μηδέν και η εξίσωση της ταχύτητας παίρνει σταθερή τιμή  $\sqrt{1/\mu}$ .

### 3.2 Κυματοδηγοί

Είναι γνωστό πως ο σκοπός όλων των συστημάτων μικροκυμάτων είναι η μεταβίβαση πληροφοριών με μορφή ΗΜ σημάτων από ένα σημείο σε ένα άλλο.

Κυματοδηγός είναι μια διάταξη που αποτελείται από έναν ομοιόμορφο αγωγίμο μεταλλικό σωλήνα με αυθαίρετη αλλά σταθερή διατομή (ορθογώνια ή κυκλική). Το ΗΜ

κύμα παγιδεύεται μέσα στον κυματοδηγό και οδεύει κατά μήκος του. Η θεωρία της διάδοσης εκφράζεται από τις εξισώσεις Maxwell. Θεμελιώδεις γνώσεις:

(α) Η σχέση ανάμεσα στο ρεύμα σε έναν αγωγό και το μαγνητικό πεδίο στο χώρο κοντά στον αγωγό.

(β) Σε κάθε ΗΜ κύμα το ηλεκτρικό πεδίο (E) και το μαγνητικό πεδίο (H) είναι πάντα κάθετα μεταξύ τους.

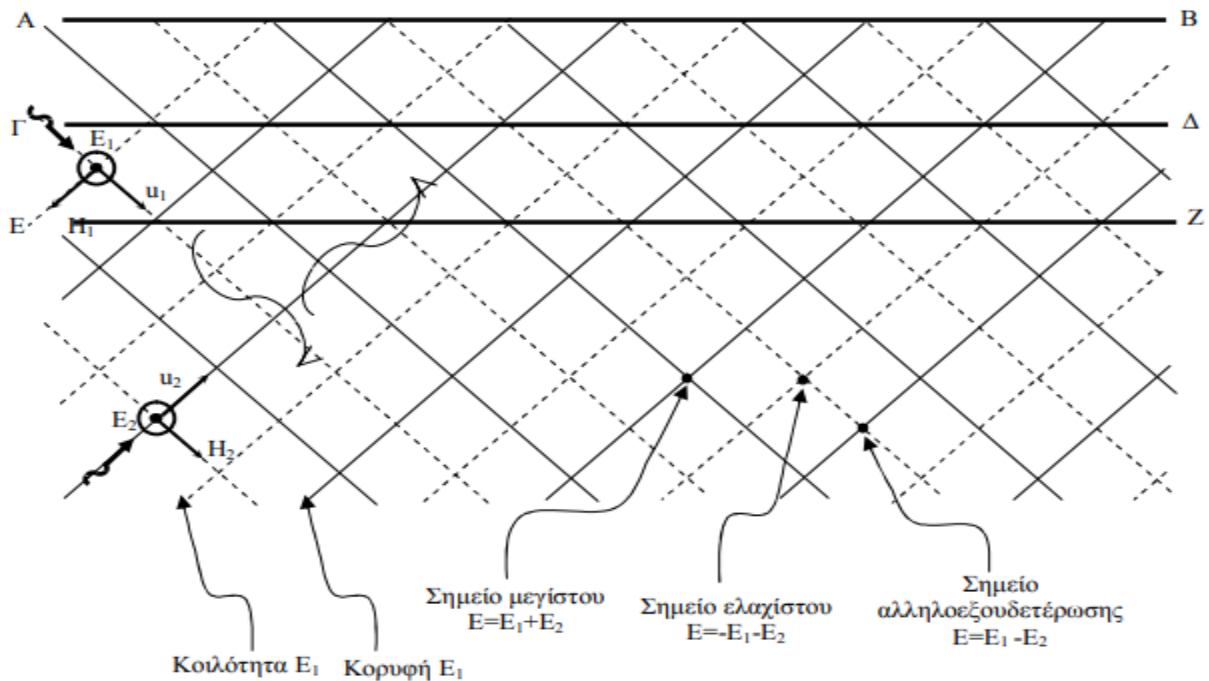
(γ) Οι ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές είναι πάντα κάθετες σε μία αγωγήμη επιφάνεια και οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές παράλληλες στην επιφάνεια

Έστω ταλαντωτής που δημιουργεί ηλεκτρικές ταλαντώσεις σε μεγάλη συχνότητα. Η έξοδος του συνδέεται με τα τοιχώματα του κυματοδηγού. Σε κάποια χρονική στιγμή  $t_1$  υπάρχει πλεόνασμα ηλεκτρονίων στο πάνω μέρος της επιφάνειας και έλλειμμα ηλεκτρονίων στο κάτω μέρος της επιφάνειας. Δημιουργείται διαφορά δυναμικού και επομένως και ηλεκτρικό πεδίο. Η διαφορά δυναμικού προκαλεί ροή ηλεκτρονίων (ηλεκτρικά ρεύματα) που δημιουργούν μαγνητικά πεδία τα οποία προσπαθούν να περιστραφούν γύρω από τα ρεύματα αυτά. Το συμπαγές μεταλλικό τοίχωμα τα περιορίζει. Λίγο αργότερα, κατά τη χρονική στιγμή  $t_2$ , ο ταλαντωτής αντιστρέφει την πολικότητά του. Τα E και H που δημιουργούνται από τα ρεύματα στο τοίχωμα δημιουργούν με επαγωγή άλλα ρεύματα, πιο πέρα στον κυματοδηγό που κι αυτά δημιουργούν άλλα E και άλλα H και η διαδικασία συνεχίζεται. Σε οποιοδήποτε σημείο του εσωτερικού τοιχώματος του κυματοδηγού θα παρατηρούμε τα γειτονικά ηλεκτρόνια πρώτα να κινούνται προς τα πάνω και ύστερα προς τα κάτω με ομαλό τρόπο. Λίγο πιο μακριά κατά μήκος του κυματοδηγού, η κίνηση των ηλεκτρονίων έχει αντίθετη κατεύθυνση από την προηγούμενη.

Γενικά, τα ηλεκτρικά ρεύματα δημιουργούν μαγνητικά πεδία, αυτά με τη σειρά τους δημιουργούν νέα ρεύματα και ούτω καθεξής. Η σύζευξη του Ηλεκτρικού και Μαγνητικού πεδίου είναι η λεγόμενη Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Τα πεδία απομακρύνονται από μία πηγή όπως τα κύματα απομακρύνονται από ένα αντικείμενο που έπεσε σε δεξαμενή με νερό. Η αρχή των ραντάρ είναι η λήψη των ανακλώμενων κυμάτων γιατί αυτά δείχνουν την παρουσία και τη θέση ενός αντικειμένου. Αλλάζοντας το μήκος κύματος, άρα και τη συχνότητα (πρόκειται για την αρχή FM) ή αλλάζοντας το πλάτος της ακτινοβολίας (αρχή AM), μπορούμε να πάρουμε κι άλλες πληροφορίες. [1]

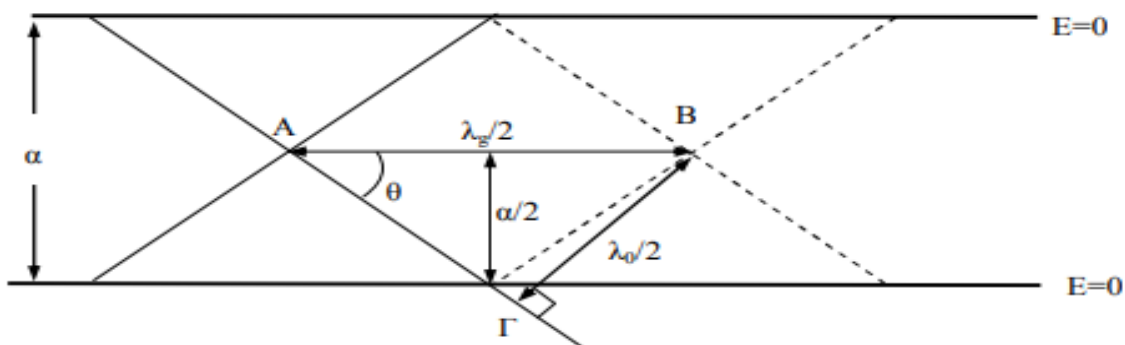
### 3.3 Τρόπος διάδοσης στον κυματοδηγό

Στο ακόλουθο σχήμα διακρίνουμε δύο επίπεδα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που κινούνται το ένα κάθετα στο άλλο (η πραγματική τους γωνία είναι  $2\theta$ ) και έχουν τα μαγνητικά τους πεδία στο επίπεδο της σελίδας και τα ηλεκτρικά τους πεδία κάθετα στη σελίδα. Οι διακεκομμένες γραμμές είναι κοιλότητες του ηλεκτρικού κύματος και οι συνεχείς γραμμές είναι κορυφές του κύματος. Επειδή το ηλεκτρικό πεδίο είναι κάθετο στη σελίδα, αρχίζει πάνω από το επίπεδο του χαρτιού και συνεχίζει κάτω από το επίπεδο του χαρτιού. Όταν αυτά τα δύο κύματα τοποθετηθούν το ένα πάνω στο άλλο, είναι φανερό ότι σε ορισμένα σημεία κατά μήκος των γραμμών AB, ΓΔ και EZ, ένα μέγιστο του ενός ηλεκτρικού κύματος συμπίπτει με ένα ελάχιστο του άλλου ηλεκτρικού κύματος. Αν τα κύματα είναι ίσα σε πλάτος, τότε στα σημεία αυτά δε θα υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο γιατί τα δύο κύματα αλληλοεξουδετερώνονται. Κατά συνέπεια, αν τοποθετήσουμε δύο μεταλλικά φύλλα κατά μήκος κάθε μίας από τις γραμμές AB, ΓΔ, δεν πρόκειται να αλλάξει τίποτα.



**Εικόνα 8: Κίνηση δύο επίπεδων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.**

Το συμπέρασμα λοιπόν είναι ότι αν εάν ηλεκτρομαγνητικό κύμα έχει την ίδια κατανομή όπως αυτή που υπάρχει ανάμεσα σε οποιοδήποτε ζεύγος μεταλλικών φύλλων του σχήματος, τότε αυτό το κύμα θα διαδίδεται ανάμεσα σε αυτά τα φύλλα. Στο σχήμα 9 φαίνεται ένα μικρό τμήμα της κατανομής ανάμεσα σε δύο πλάκες όπως φάνηκε στο προηγούμενο σχήμα. Μπορούμε να δούμε πως τα ηλεκτρικά διανύσματα αφαιρούνται στις εξωτερικές γραμμές με αποτέλεσμα μηδενικό ηλεκτρικό πεδίο, αλλά κατά μήκος των κεντρικών γραμμών προστίθενται και έτσι δημιουργείται μέγιστο άθροισμα με πλάτος το διπλάσιο του κάθε κύματος. Η απόσταση ανάμεσα σε δύο παράλληλες συνεχείς γραμμές είναι η απόσταση ανάμεσα σε δύο κορυφές του ηλεκτρικού πεδίου όταν είναι στον ελεύθερο χώρο, δηλαδή ένα μήκος κύματος ελευθέρου χώρου. Αυτό το ονομάζουμε  $\lambda_0$ . Κατά συνέπεια, η απόσταση ανάμεσα σε μία παράλληλη συνεχή γραμμή και μία διακεκομμένη είναι μισό μήκος κύματος στον ελεύθερο χώρο  $\Gamma\Delta = \lambda_0/2$ . Κατά τον ίδιο τρόπο, η απόσταση μεταξύ των σημείων τομής δύο συνεχών γραμμών κατά μήκος της γραμμής κέντρου είναι η απόσταση ανάμεσα σε δύο μέγιστα κύματος και το ίδιο είναι και το μήκος κύματος του σύνθετου κύματος που σχηματίζεται από την πρόσθεση των δύο χωριστών κυμάτων. Αυτό το ονομάζουμε μήκος κύματος του κυματοδηγού  $\lambda_g$ . Κατά συνέπεια, η απόσταση μεταξύ της τομής δύο συνεχών γραμμών και της τομής δύο διακεκομμένων είναι μισό μήκος κύματος κυματοδηγού, δηλαδή  $AB = \lambda_g/2$ . [1]



**Εικόνα 9: Μικρό τμήμα της κατανομής ανάμεσα σε δύο πλάκες.**

Το σχήμα μας έδειξε ότι το μήκος κύματος της τελικής κατανομής μέσα στον κυματοδηγό ( $\lambda_g$ ) είναι διαφορετικό από το μήκος κύματος ( $\lambda_0$ ) του κύματος στον ελεύθερο χώρο. Δείχνει επίσης ότι το μήκος κύματος στον κυματοδηγό είναι πάντα μεγαλύτερο από το μήκος κύματος στον ελεύθερο χώρο. Η παρακάτω απλή θεωρία μας δίνει τη σχέση ανάμεσα στο μήκος κύματος στον αέρα ( $\lambda_0$ ) και το μήκος κύματος στον κυματοδηγό ( $\lambda_g$ ).

$\lambda_0$  = Μήκος κύματος ελευθέρου χώρου. Ανάμεσα σε δύο παράλληλες συνεχείς γραμμές.  $B\Gamma = \lambda_0/2$

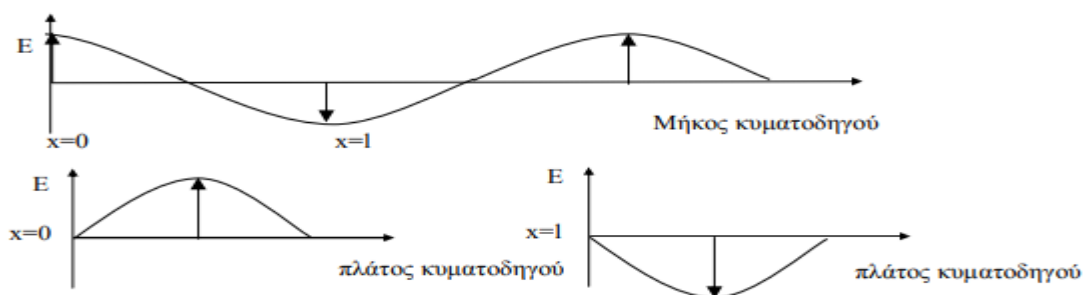
$\lambda_g$  = Μήκος κυματοδηγού. Απόσταση μεταξύ δύο κορυφών E1 ή E2 (σημείων μεγίστων – συνεχείς γραμμές).  $AB = \lambda_g/2$ .

$$\left. \begin{aligned} \epsilon\phi\theta &= \frac{a/2}{\lambda_g/4} = \frac{2a}{\lambda_g} \\ \eta\mu\theta &= \frac{\lambda_0/2}{\lambda_g/2} = \frac{\lambda_0}{\lambda_g} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \epsilon\phi^2\theta = \frac{\eta\mu^2\theta}{\text{συν}^2\theta} = \frac{\eta\mu^2\theta}{1-\eta\mu^2\theta} \Rightarrow \left(\frac{2a}{\lambda_g}\right)^2 = \frac{\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_g}\right)^2}{1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_g}\right)^2} \Rightarrow \boxed{\frac{1}{\lambda_g^2} = \frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{(2a)^2}}$$

Γενικά, ισχύει  $\lambda_g > \lambda_0$ . Προφανώς, αν  $\lambda_0 > 2a$  είναι αδύνατον να γίνει διάδοση.

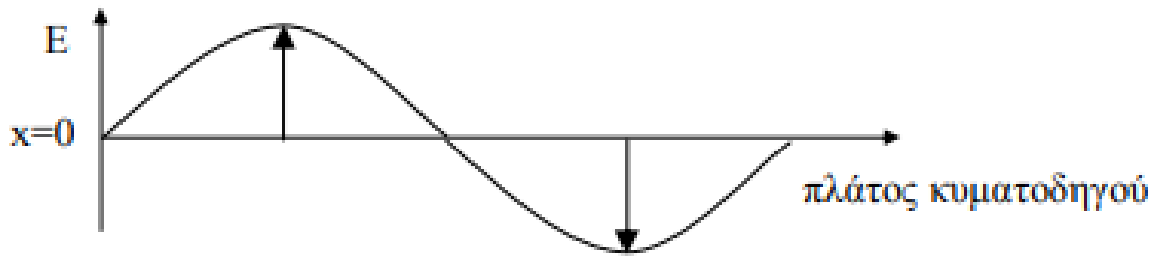
Αν  $\lambda_0 = 2a$  τότε  $\lambda_g = \infty$  και δεν γίνεται διάδοση. Αν  $\lambda_0 < 2a$  τότε γίνεται διάδοση. Εφόσον  $\lambda_0 = \frac{c}{f}$  ο κυματοδηγός μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα φίλτρο διέλευσης υψηλών συχνοτήτων με συχνότητα αποκοπής  $f_c = \frac{c}{2a}$ .

Αν κλείσουμε τις δύο παράλληλες πλάκες με άλλες δύο, προκειμένου να δημιουργήσουμε τον ορθογωνικό κυματοδηγό, δεν αλλάζει τίποτε από την προηγούμενη ανάλυση. [1]



**Εικόνα 10: Μήκος και πλάτος κυματοδηγού συναρτήσεσι του E.**

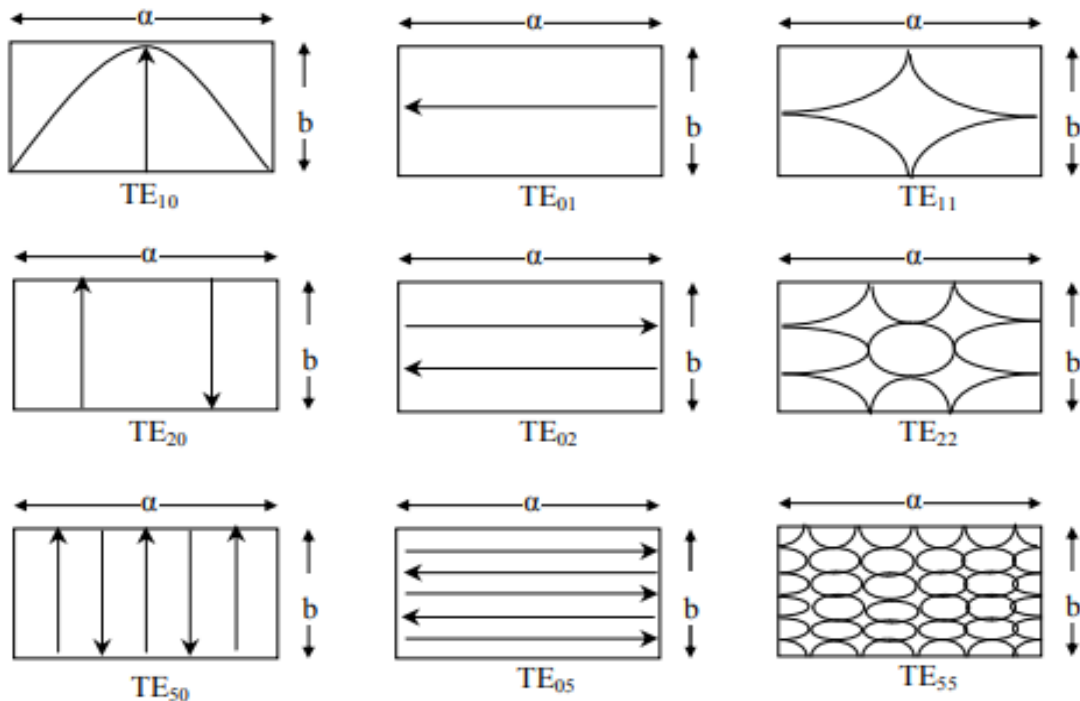
Στην περίπτωση E κοντά στον αγωγό, το E πρέπει να είναι κάθετο με τον αγωγό. Αν υπήρχε  $E_{\parallel}$  θα σήμαινε ότι σε δύο σημεία πάνω στην επιφάνεια υπάρχει διαφορά δυναμικού. Αυτό είναι άτοπο, αφού η επιφάνεια είναι αγωγίμη. Άρα,  $E_{\parallel} = 0$  και προφανώς  $H_{\kappa} = 0$ . Σε περίπτωση που παίρναμε μεγαλύτερη διατομή στον κυματοδηγό φαίνεται στη παρακάτω εικόνα 11.



Εικόνα 11: Μεγαλύτερη διατομή κυματοδηγού.

Κύμα TE ή H ορίζουμε το κύμα στο οποίο υπάρχει συνιστώσα μαγνητικού πεδίου κατά τη διεύθυνση διάδοσης μέσα στον κυματοδηγό. Το ηλεκτρικό πεδίο E κατά τη διεύθυνση διάδοσης είναι μηδενικό. Οι ρυθμοί οι οποίοι μπορούν να διαδοθούν σε ένα κυματοδηγό είναι αυτοί που παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα 12, TE<sub>m</sub>n όπου m ο αριθμός των μεταβολών του ηλεκτρικού πεδίου στη μεγαλύτερη διάσταση του κυματοδηγού και n ο αριθμός των μεταβολών του ηλεκτρικού πεδίου στη μικρότερη διάσταση του κυματοδηγού. Παρακάτω φαίνεται η συχνότητα αποκοπής του κυματοδηγού για κάθε ρυθμό.

$$f_{c,mn} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (3.3)$$



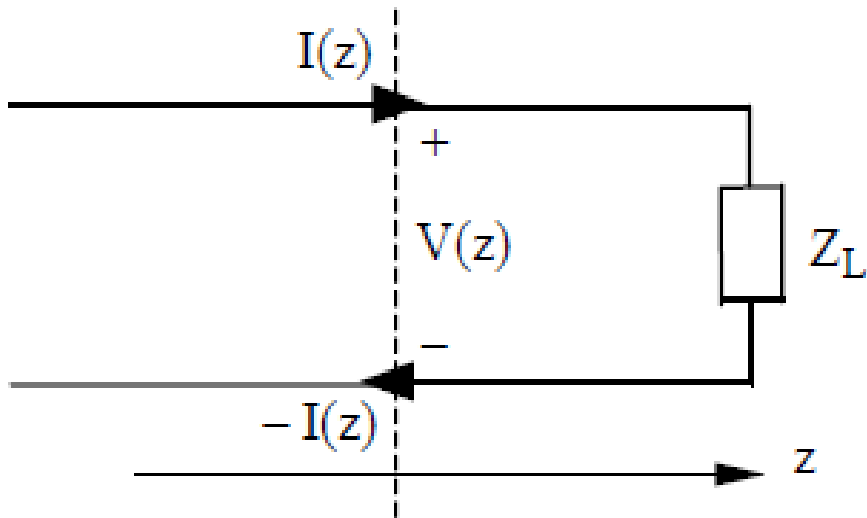
Εικόνα 12: Ρυθμοί διάδοσης σε κυματοδηγό.

## 4. ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

### 4.1 Βασικές έννοιες

Γραμμή μεταφοράς γενικά ονομάζεται διάταξη (συνήθως κατασκευασμένη από αγωγούς μαζί με μονωτικό διηλεκτρικό περίβλημα) στην οποία αναπτύσσονται οδεύοντα κύματα, και επομένως μεταφέρει ηλεκτρομαγνητική ενέργεια (και πληροφορία) από το ένα άκρο της στο άλλο. Στις σχετικά χαμηλότερες συχνότητες (μέχρι την τάξη των εκατοντάδων MHz ή κατ' εξαίρεση λίγων GHz) χρησιμοποιούνται γραμμές δύο αγωγών οι οποίοι είναι τοποθετημένοι είτε ο ένας παράλληλα στον άλλο ή συνεστραμμένος με αυτόν (δισύρματη γραμμή) είτε ο ένας σε κυλινδρικό σχήμα που περιβάλλει τον άλλο (ομοαξονική γραμμή) κτλ. Στις υψηλότερες συχνότητες (μερικών GHz και άνω) χρησιμοποιούνται οι κυματοδηγοί, οι οποίοι είναι αγωγιμοί σωλήνες που μπορούν να μεταφέρουν οδεύοντα κύματα, καθώς και μια παραλλαγή των γραμμών μεταφοράς, οι λεγόμενες μικροταινίες (microstrips), που αποτελούνται από μεταλλικές λωρίδες τυπωμένες πάνω σε κατάλληλη διηλεκτρική πλάκα και με βάση τις οποίες κατασκευάζονται σήμερα τα περισσότερα μικροκυματικά κυκλώματα. Σε ακόμη υψηλότερες συχνότητες, δηλ. στην οπτική περιοχή, χρησιμοποιούνται οι οπτικές ίνες, οι οποίες ουσιαστικά είναι κυματοδηγοί κατασκευασμένοι από διηλεκτρικά υλικά.

Οι γραμμές μεταφοράς είναι από τα σημαντικότερα στοιχεία των υψίσυχνων συστημάτων γενικά (και των μικροκυματικών συστημάτων ειδικότερα), όχι μόνο διότι χρησιμεύουν για την ενσύρματη μετάδοση του σήματος αλλά και διότι κατάλληλα τμήματα αυτών (ή αντίστοιχα των μικροταινιών) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή διάφορων κυκλωματικών στοιχείων στις υψηλές συχνότητες (π.χ. πυκνωτών και πηνίων, όπως θα δούμε αργότερα). Το κύριο χαρακτηριστικό μιας γραμμής μεταφοράς είναι ότι το μήκος της γραμμής είναι πολύ μεγαλύτερο από το μήκος κύματος που αντιστοιχεί στη συχνότητα λειτουργίας της, ενώ το πλάτος της (η απόσταση μεταξύ των 2 αγωγών) είναι μικρότερο από το μήκος κύματος. Δηλ. οι αγωγοί βρίσκονται κοντά ο ένας στον άλλο και αυτό συνεχίζεται για μεγάλο διάστημα. Για το λόγο αυτό οι αγωγοί, όταν διαρρέονται από εναλλασσόμενο ρεύμα, αλληλεπιδρούν με αποτέλεσμα να εμφανίζονται ηλεκτρομαγνητικά κύματα που διαδίδονται κατά μήκος της γραμμής, παραπλεύρως των αγωγών. (Αν ο αγωγός ήταν μόνο ένας, το ρεύμα θα δημιουργούσε κύματα που θα εκπέμπονταν προς τα έξω, φεύγοντας από τον αγωγό, αλλά η παρουσία δύο αγωγών σε κοντινή απόσταση έχει ως αποτέλεσμα τα κύματα αυτά ουσιαστικά να αλληλοαναιρούνται). Τα ηλεκτρομαγνητικά αυτά κύματα δημιουργούν αντίστοιχες διακυμάνσεις της τάσης και του ρεύματος κατά μήκος της γραμμής, δηλ. κύματα τάσης και ρεύματος πάνω στη γραμμή. Με άλλα λόγια, στην περίπτωση γραμμής μεταφοράς δεν μπορεί να γίνει δεκτή η απλή προσέγγιση ότι οι αγωγοί της γραμμής αποτελούν βραχυκυκλώματα και η τάση (και το ρεύμα) σε οποιοδήποτε σημείο αυτών είναι ίδια. Πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι η τάση και το ρεύμα σε κάθε σημείο της γραμμής μεταβάλλονται με την απόσταση. Ορίζοντας έναν άξονα, έστω  $z$ , κατά μήκος της γραμμής (δηλ. η τετμημένη  $z$  χαρακτηρίζει κάθε σημείο πάνω στη γραμμή), οι τιμές της τάσης και του ρεύματος γράφονται  $V(z)$  και  $I(z)$ , όπως δείχνει η εικόνα 13 (όπου φαίνεται και το φορτίο, έστω  $Z_L$ , στο οποίο, όπως λέμε, τερματίζεται η γραμμή). Οι συναρτήσεις  $V(z)$  και  $I(z)$  είναι μιγαδικές και αντιπροσωπεύουν τους φασιθέτες (phasors) τάσης και ρεύματος. Αυτό σημαίνει ότι σε όλα όσα ακολουθούν αναφερόμαστε στη συμπεριφορά γραμμής που μεταφέρει ημιτονοειδή σήματα, από τα οποία μπορεί με υπέρθεση, όπως είναι γνωστό από την ανάλυση Fourier, να συντεθεί και κάθε άλλο σήμα. [2]



Εικόνα 13: Τάση και ρεύμα σε γραμμή μεταφοράς.

#### 4.2 Το μοντέλο της γραμμής μεταφοράς

Για να μελετήσουμε τη γραμμή μεταφοράς χρησιμοποιούμε ένα μοντέλο που περιγράφει τη συμπεριφορά της τάσης και του ρεύματος σε αυτή με τη βοήθεια ισοδύναμων κυκλωμάτων, τα οποία όμως αναφέρονται σε «μικροσκοπικό» επίπεδο, δηλ. σε οποιοδήποτε στοιχειώδες (απειροστού μήκους) τμήμα της γραμμής. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στις λεγόμενες κατανεμημένες παραμέτρους της γραμμής, οι οποίες περιγράφουν τη συμπεριφορά οποιουδήποτε στοιχειώδους τμήματος αυτής. Αυτό διότι τα κυματικά φαινόμενα πάνω στη γραμμή λαμβάνουν χώρα πάνω σε ολόκληρο το μήκος αυτής, με συνεχή μεταβολή, και κατά συνέπεια δεν είναι δυνατόν να περιγραφούν επακριβώς από κάποιο απλούστερο μοντέλο το οποίο θα χρησιμοποιούσε συγκεντρωμένα στοιχεία σε ορισμένες θέσεις της γραμμής. Με άλλα λόγια, για να μελετήσουμε τα κύματα στη γραμμή θα μελετήσουμε τις μεταβολές που συμβαίνουν πάνω σε κάθε στοιχειώδες τμήμα αυτής. Πιο συγκεκριμένα, οι κατανεμημένες παράμετροι γραμμής μεταφοράς είναι στην πιο γενική περίπτωση οι ακόλουθες:

**R:** αντίσταση ανά μονάδα μήκους (σε  $\Omega/m$ )

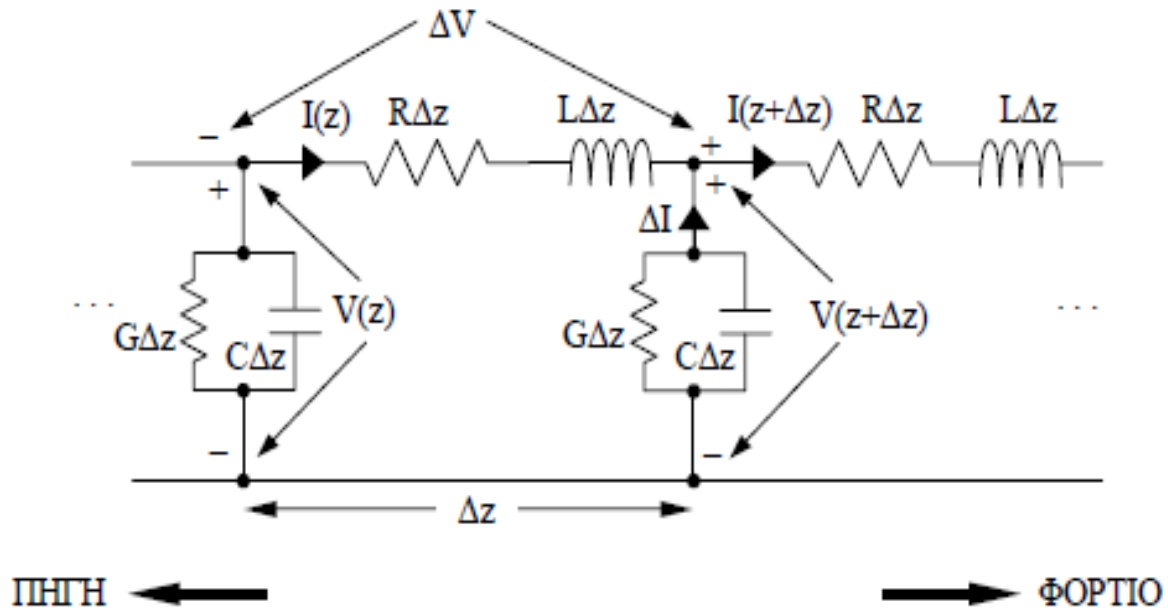
**G:** αγωγιμότητα ανά μονάδα μήκους (σε  $\Omega^{-1}/m$ )

**L:** αυτεπαγωγή ανά μονάδα μήκους (σε  $H/m$ )

**C:** χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους (σε  $F/m$ )

Παρατηρούμε ότι οι τιμές των τεσσάρων αυτών παραμέτρων εκφράζονται ανά μονάδα μήκους πράγμα που οφείλεται στον κατανεμημένο χαρακτήρα τους. Οι παράμετροι αυτές είναι συντελεστές που αν πολλαπλασιαστούν επί το μήκος ενός τμήματος της γραμμής θα δώσουν την τιμή αντίστασης, αγωγιμότητας, αυτεπαγωγής και χωρητικότητας που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο τμήμα. (Αυτό ισχύει με ακρίβεια για στοιχειώδη τμήματα.) Αν λοιπόν θεωρήσουμε ένα στοιχειώδες τμήμα της γραμμής μήκους  $\Delta z$ , αυτό θα χαρακτηρίζεται από αντίσταση, αγωγιμότητα, αυτεπαγωγή και χωρητικότητα  $R\Delta z$ ,  $G\Delta z$ ,  $L\Delta z$  και  $C\Delta z$  αντίστοιχα. (Προσοχή χρειάζεται ο συμβολισμός ώστε τα σύμβολα  $R$ ,  $G$ ,  $L$  και  $C$  να μην συγχέονται με τα αντίστοιχα κυκλωματικά μεγέθη για τα οποία χρησιμοποιούμε τα  $R\Delta z$ ,  $G\Delta z$ ,  $L\Delta z$  και  $C\Delta z$ ). Η φυσική ερμηνεία των κατανεμημένων παραμέτρων είναι ότι η  $R$  αντιστοιχεί στην ωμική αντίσταση των αγωγών της γραμμής, η  $G$  αντιστοιχεί στην αγωγιμότητα που μπορεί να έχει το διηλεκτρικό (μονωτικό) υλικό μεταξύ των αγωγών, η  $L$  στην αυτεπαγωγή ενός τμήματος της γραμμής λόγω του μαγνητικού πεδίου που δημιουργούν οι δύο αγωγοί στον χώρο μεταξύ τους και η  $C$  στην χωρητικότητα που εμφανίζουν οι δύο αγωγοί ενός τμήματος

της γραμμής αν θεωρηθούν ως οπλισμοί ενός πυκνωτή. Με βάση τις εν λόγω παραμέτρους, η συμπεριφορά κάθε στοιχειώδους τμήματος της γραμμής περιγράφεται από το μοντέλο (ισοδύναμο κύκλωμα) που φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Εικόνα 14: Μοντέλο γραμμής μεταφοράς με κατανεμημένες παραμέτρους.

Στην εικόνα 14 υπονοείται ότι το μοντέλο του στοιχειώδους τμήματος  $\Delta z$  επαναλαμβάνεται απεριόριστα τόσο προς την κατεύθυνση της πηγής (κατά σύμβαση προς τα αριστερά) όσο και προς την κατεύθυνση του φορτίου (**τερματισμού**) της γραμμής (προς τα δεξιά). Αρκεί όμως να μελετηθεί ένα στοιχειώδες τμήμα θέτοντας το μήκος του  $\Delta z \rightarrow 0$ . Από τους νόμους Kirchhoff στο ισοδύναμο κύκλωμα, με τις πολικότητες και φορές αναφοράς που φαίνονται στην εικόνα 14, γίνεται προφανές ότι ισχύει:

$$\Delta V = V(z + \Delta z) - V(z)$$

$$\Delta I = I(z + \Delta z) - I(z)$$

Και εφαρμόζοντας τις θεμελιώδεις σχέσεις των κυκλωματικών στοιχείων παίρνουμε :

$$\begin{cases} \Delta V = -(R\Delta z + j\omega L\Delta z)I(z) \\ \Delta I = -(G\Delta z + j\omega C\Delta z)V(z + \Delta z) \end{cases} \quad (4.1)$$

Και όταν το όριο  $\Delta z \rightarrow 0$  προκύπτει :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV(z)}{dz} = -(R + j\omega L)I(z) \end{array} \right. \quad (4.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI(z)}{dz} = -(G + j\omega C)V(z) \end{array} \right. \quad (4.3)$$

οι οποίες είναι οι διαφορικές εξισώσεις της γραμμής μεταφοράς.

Οι λύσεις αυτών των Δ.Ε. παρέχουν την πληροφορία για όλα τα φαινόμενα που θα εξετάσουμε σε σχέση με τη γραμμή μεταφοράς. Οι παραπάνω Δ.Ε. αποτελούν ένα σύστημα συζευγμένων γραμμικών διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξης. Συζευγμένες σημαίνει ότι υπάρχει αλληλεξάρτηση μεταξύ των δύο αγνώστων συναρτήσεων  $V(z)$  και



$I(z)$ . Προκειμένου να διευκολυνθεί η λύση του συστήματος παραγωγίζουμε καθεμιά από αυτές μία φορά ακόμα και συνδυάζουμε τις παραγώγους, δηλ. στην παράγωγο της (4.2) αντικαθιστούμε την  $dI/dz$  από την (4.3) και αντίστοιχα στην παράγωγο της (4.3) αντικαθιστούμε την  $dV/dz$  από την (4.2). Με τον τρόπο αυτό προκύπτουν οι ακόλουθες Δ.Ε. δεύτερης τάξης της γραμμής:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 V(z)}{dz^2} = \gamma^2 V(z) \end{array} \right. \quad (4.4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 I(z)}{dz^2} = \gamma^2 I(z) \end{array} \right. \quad (4.5)$$

Όπου  $\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta$ , η μιγαδική σταθερά διάδοσης ης γραμμής.

Το παραπάνω τέχνασμα της δεύτερης παραγωγίσης που χρησιμοποιήθηκε οδήγησε στην από σύζευξη των 2 εξισώσεων, δηλαδή καθεμιά από τις (4.4) και (4.5) εξαρτάται από μία μόνο άγνωστη συνάρτηση. [2]

### 4.3 Οι θεμελιώδεις εξισώσεις της γραμμής μεταφοράς

Οι διαφορικές εξισώσεις (4.4, 4.5) ανήκουν στην απλούστερη κατηγορία διαφορικών εξισώσεων που είναι οι γραμμικές Δ.Ε με σταθερούς συντελεστές. Όπως είναι γνωστό από τα μαθηματικά η γενική λύση μιας τέτοιας Δ.Ε δίνεται ως γραμμικός συνδυασμός εκθετικών συναρτήσεων, καθεμιά από τις οποίες έχει εκθέτη μία ρίζα του λεγόμενου χαρακτηριστικού πολυωνύμου. Στην περίπτωση μας όπου το πολυώνυμο έχει τις ρίζες  $+$ ,  $- \gamma$  η γενική λύση των Δ.Ε είναι :

$$V(z) = V_{\pi} e^{-\gamma z} + V_{\alpha} e^{+\gamma z} \quad (4.6)$$

$$I(z) = I_{\pi} e^{-\gamma z} + I_{\alpha} e^{+\gamma z} \quad (4.7)$$

Όπου  $V_{\pi}, V_{\alpha}, I_{\pi}, I_{\alpha}$  είναι συντελεστές οι οποίοι προσδιορίζονται από αρχικές συνθήκες.

$$I_{\pi} = \frac{V_{\pi}}{Z_0} \text{ και } I_{\alpha} = \frac{V_{\alpha}}{Z_0} .$$

Κατά συνέπεια η ζητούμενη γενική λύση των Δ.Ε είναι :

$$\left\{ \begin{array}{l} V(z) = V_{\pi} e^{-\gamma z} + V_{\alpha} e^{+\gamma z} = V_{\pi} e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} + V_{\alpha} e^{\alpha z} e^{j\beta z} \end{array} \right. \quad (4.8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I(z) = I_{\pi} e^{-\gamma z} + I_{\alpha} e^{+\gamma z} = \frac{V_{\pi}}{Z_0} e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} - \frac{V_{\alpha}}{Z_0} e^{\alpha z} e^{j\beta z} \end{array} \right. \quad (4.9)$$

Η παράμετρος  $Z_0$  λέγεται χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς και μετριέται σε  $\Omega$ . Η τιμή της θεωρητικά μπορεί να είναι μιγαδική, στην πράξη όμως είναι πραγματική σε όλες τις γραμμές που χρησιμοποιούνται. Οι εξισώσεις (4.8, 4.9) είναι οι θεμελιώδεις εξισώσεις της γραμμής μεταφοράς.

### 4.4 Η μορφή των κυμάτων

Οι εξισώσεις (4.8, 4.9) περιέχουν δύο κύματα η καθεμιά τα οποία είναι οδεύοντα και συγχρόνως εκθετικά φθίνοντα. Ο πρώτος όρος  $e^{-\alpha z} e^{-j\beta z}$  εκφράζει κύμα το οποίο οδεύει

και αποσβένεται προς τα δεξιά, δηλαδή από την πηγή προς το φορτίο και γι' αυτό αποκαλείται προσπίπτον κύμα. Ειδικότερα ο παράγοντας  $e^{-j\beta z}$  εκφράζει τη διάδοση του κύματος προς τα δεξιά. Ο παράγοντας  $e^{-\alpha z}$  εκφράζει την εκθετική απόσβεση καθώς το κύμα οδεύει προς τα δεξιά. Αντίστοιχα ο δεύτερος όρος  $e^{\alpha z} e^{j\beta z}$  εκφράζει κύμα που οδεύει και αποσβένεται προς τα αριστερά, δηλαδή προς την πηγή, άρα είναι ανακλώμενο κύμα. Ο συντελεστής  $V_{\Pi}$  και  $V_{\alpha}$  είναι τα μιγαδικά πλάτη των κυμάτων αυτών. Η σταθερά διάδοσης  $\beta$  όπως και ο κυματάριθμος  $k$  συνδέεται με το μήκος κύματος  $\lambda$  των κυμάτων στη γραμμή μεταφοράς με τη σχέση :

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4.10)$$

Από αυτή φαίνεται η φυσική σημασία της σταθεράς διάδοσης που είναι ο ρυθμός μεταβολής της φάσης ανά μονάδα μήκους, διότι όταν το μήκος  $\lambda$  προχωράει κατά μήκος  $\lambda$  η φάση μεταβάλλεται κατά  $2\pi$  rad. Η παραπάνω σχέση δείχνει ότι η μονάδα μέτρησης της σταθεράς διάδοσης  $\beta$  είναι το rad/m. Από τη σταθερά διάδοσης προκύπτει η ταχύτητα φάσης του κύματος στη γραμμή:

$$u_p = \frac{\omega}{\beta} \quad (4.11)$$

Με βάση την Ηλεκτρομαγνητική θεωρία των γραμμών αποδεικνύεται ο γενικός κανόνας: << Η ταχύτητα φάσης σε μία γραμμή μεταφοράς δύο αγωγών είναι ίδια με την ταχύτητα φάσης των Η.Μ κυμάτων στο υλικό που περιβάλλει τη γραμμή >>. Αν το διηλεκτρικό περίβλημα της γραμμής αποτελείται από υλικό με διηλεκτρική επιτρεπτότητα  $\epsilon$  και μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$  τότε η ταχύτητα φάσης των κυμάτων στη γραμμή δίνεται από τη σχέση :

$$u_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (4.12)$$

Στις εξισώσεις (4.8, 4.9) η σταθερά  $\alpha$  λέγεται συντελεστής απόσβεσης πλάτους και εκφράζει τον ρυθμό απόσβεσης του πλάτους του κύματος ανά μονάδα μήκους. Αυτή είναι μία λογαριθμική σταθερά διότι η απόσβεση του κύματος ακολουθεί εκθετικό νόμο σε σχέση με την απόσταση με αποτέλεσμα αυτό να σημαίνει ότι ο συντελεστής απόσβεσης σχετίζεται με τον λογάριθμο του πλάτους του κύματος.[2]

#### 4.5 Προέλευση και μορφή στάσιμων κυμάτων σε γραμμές μεταφοράς

Όπως είναι γνωστό από τη φυσική, εκτός από τα οδεύοντα κύματα τα οποία αποτελούν ταλαντώσεις που κινούνται (διαδίδονται) στο χώρο, υπάρχουν και τα στάσιμα κύματα, στα οποία οι ταλαντώσεις διατηρούν μορφής σταθερή στο χώρο (δεν διαδίδονται). Σε ένα στάσιμο κύμα, τα διάφορα σημεία που το αποτελούν παραμένουν στις ίδιες θέσεις στο χώρο και εκτελούν απλώς χρονική ταλάντωση, π.χ. τα σημεία μηδενισμού του κύματος και τα σημεία μεγιστοποίησής του βρίσκονται σε σταθερές θέσεις οι οποίες λέγονται δεσμοί ή κόμβοι για τα σημεία μηδενισμού και κοιλίες για τα σημεία μεγιστοποίησης. Στους δεσμούς το κυμαινόμενο μέγεθος είναι πάντοτε μηδενικό, ενώ στις κοιλίες εκτελεί ημιτονοειδή ταλάντωση, παραμένοντας όμως πάντοτε μέγιστο σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία. Από τη φυσική είναι επίσης γνωστό ότι ένα στάσιμο κύμα μπορεί να θεωρηθεί ως υπέρθεση δύο οδεύοντων κυμάτων με την ίδια διεύθυνση αλλά αντίθετη φορά και ίσα πλάτη. Χρησιμοποιώντας στιγμιαίες τιμές, αν συμβολίσουμε με  $\psi$  το οποιοδήποτε κυμαινόμενο μέγεθος, το γεγονός αυτό γράφεται ως εξής:

$$\psi(z, t) = A \cos(\omega t - kz) + A \cos(\omega t + kz + \varphi) = 2A \cos\left(\omega t + \frac{\varphi}{2}\right) \cos\left(kz + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (4.13)$$

όπου  $\varphi$  είναι η οποιαδήποτε διαφορά φάσης ανάμεσα στα δύο κύματα. Η παραγοντική μορφή του δεξιού μέλους χαρακτηρίζει το στάσιμο κύμα. Αν χρησιμοποιήσουμε phasors, η παραπάνω σχέση μετατρέπεται στην:

$$\psi(z) = 2Ae^{\frac{j\varphi}{2}} \cos\left(kz + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (4.14)$$

Εδώ η ημιτονοειδής (και όχι μιγαδική εκθετική) εξάρτηση από το  $z$  χαρακτηρίζει το στάσιμο κύμα. Σε μια γραμμή μεταφοράς με ανακλάσεις, η ύπαρξη του προσπίπτοντος και του ανακλώμενου κύματος, δηλ. δύο οδεύοντων κυμάτων με αντίθετη φορά, δημιουργεί (σύμφωνα με τα προηγούμενα) στάσιμο κύμα στη γραμμή. Για την απλοποίηση της μελέτης θεωρούμε γραμμή μεταφοράς χωρίς απώλειες. Αν η ανάκλαση είναι ολική, δηλαδή το προσπίπτον και το ανακλώμενο κύμα έχουν το ίδιο πλάτος, τότε τα δύο αυτά κύματα συντίθενται και δημιουργούν ακριβώς ένα στάσιμο κύμα (όπως παραπάνω), οπότε στη γραμμή εμφανίζεται μόνο στάσιμο κύμα. Αν η ανάκλαση είναι μερική, δηλαδή το ανακλώμενο έχει μικρότερο πλάτος από το προσπίπτον, τότε ένα μέρος του προσπίπτοντος κύματος συντίθεται με το ανακλώμενο και δημιουργεί στάσιμο κύμα, ενώ το υπόλοιπο του προσπίπτοντος παραμένει σε μορφή οδεύοντος κύματος, και άρα στη γραμμή εμφανίζεται και οδεύον και στάσιμο κύμα.

$$\begin{aligned} V(z) &= V_{\pi}(e^{-j\beta z} + \rho_L e^{j\beta z}) = V_{\pi}(1 - \rho_L)e^{-j\beta z} + V_{\pi}\rho_L(e^{-j\beta z} + e^{j\beta z}) \Rightarrow \\ V(z) &= V_{\pi}(1 - \rho_L)e^{-j\beta z} + 2V_{\pi}\rho_L \cos(\beta z) \quad (4.15) \end{aligned}$$

Ο πρώτος όρος της παραπάνω εξίσωσης αντιπροσωπεύει το οδεύον κύμα και ο δεύτερος το στάσιμο. Εύκολα παρατηρούμε ότι στο οδεύον κύμα το μέτρο της τάσης παραμένει σταθερό κατά μήκος της γραμμής. Η σχέση που δίνει το μέτρο της τάσης

$|V(l)|$  συναρτήσει της απόστασης από τον τερματισμό είναι :

$$|V(l)| = |V_{\pi}| [1 + |\rho_L|^2 + 2|\rho_L| \cos(2\beta l - \varphi_L)]^{\frac{1}{2}} \quad (4.16)$$

Από την παραπάνω παρατηρούμε ότι το μέτρο της τάσης

- Παρουσιάζει περιοδικότητα ως προς το  $l$ , δηλαδή στο χώρο, και η χωρική περίοδος είναι :

$$\frac{2\pi}{2\beta} = \frac{2\pi}{4\pi/\lambda} = \frac{\lambda}{2} \quad (4.17)$$

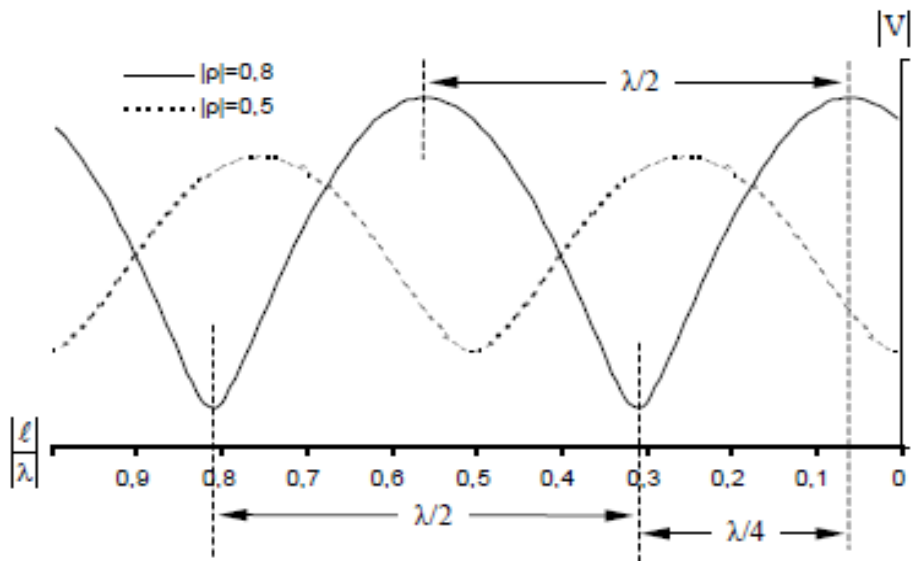
- Εμφανίζει μέγιστα και ελάχιστα σε συγκεκριμένες θέσεις που θα τα συμβολίζουμε με  $l_M$  (μέγιστα) και  $l_m$  (ελάχιστα) και προσδιορίζονται από τις ακόλουθες συνθήκες αν θέσουμε όπου  $\beta = 2\pi/\lambda$ :

$$l_M = n \frac{\lambda}{2} + \frac{\Phi_L}{4\pi} \lambda \quad (4.18)$$

$$l_m = n \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{4} + \frac{\Phi_L}{4\pi} \lambda \quad (4.19)$$

όπου ο ακέραιος  $n$  λαμβάνει άπειρες τιμές αλλά φυσικά πρέπει να είναι τέτοιος ώστε  $l_M, l_m > 0$ . Από τις σχέσεις αυτές είναι προφανές ότι η απόσταση μεταξύ δύο

διαδοχικών θέσεων μεγίστων (ή ελαχίστων) είναι  $\lambda/2$  (πράγμα αναμενόμενο εφόσον υπάρχει χωρική περιοδικότητα με περίοδο  $\lambda/2$ ), ενώ η απόσταση μεταξύ ενός μεγίστου και ενός γειτονικού ελαχίστου είναι  $\lambda/4$ , δηλ. τα ελάχιστα βρίσκονται στα μεσοδιαστήματα μεταξύ διαδοχικών μεγίστων (και αντίστροφα). Κατά συνέπεια, η μέτρηση της απόστασης μεταξύ δύο διαδοχικών ελαχίστων (ή μεγίστων) τάσης παρέχει έναν τρόπο πειραματικού προσδιορισμού του μήκους κύματος στη γραμμή μεταφοράς. Απεικονίζοντας γραφικά την (4.16) παίρνουμε μια τυπική εικόνα του μέτρου τάσης στη γραμμή παρουσία στάσιμων κυμάτων, όπως φαίνεται στην εικόνα 15 που ακολουθεί για δύο περιπτώσεις μιγαδικού φορτίου. Είναι εμφανές ότι ο μεγαλύτερος κατά μέτρο συντελεστής ανάκλασης αντιστοιχεί σε μεγαλύτερες μεταβολές της τάσης. Η τιμή στον τερματισμό εξαρτάται από τη φάση του συντελεστή ανάκλασης (δεν φαίνεται στο σχήμα).



Εικόνα 15: Μέτρο της τάσης σε γραμμή μεταφοράς με στάσιμα κύματα.

Ακόμη από την 4.16 εξίσωση προκύπτει η μέγιστη και ελάχιστη τιμή του μέτρου τάσης στη γραμμή

$$|V_{max}| = |V_{\pi}|(1 + |\rho_L|) \quad (4.20)$$

$$|V_{min}| = |V_{\pi}|(1 - |\rho_L|) \quad (4.21)$$

αλλά και τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές του ρεύματος :

$$I_{max} = \frac{V_{\pi}}{Z_0}(1 + |\rho_L|) \quad (4.22)$$

$$I_{min} = \frac{V_{\pi}}{Z_0}(1 - |\rho_L|) \quad (4.23)$$

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και ο υπολογισμός της αντίστασης εισόδου της γραμμής στις θέσεις ελαχίστων και μεγίστων. Οι τιμές αυτές φαίνονται παρακάτω και είναι οι μοναδικές πραγματικές τιμές που λαμβάνει η αντίσταση εισόδου σε μία γραμμή μεταφοράς .

$$Z_{in}^{max} = \frac{|V_{max}|}{|I_{min}|} \quad (4.24)$$

$$Z_{in}^{min} = \frac{|V_{min}|}{|I_{max}|} \quad (4.25)$$

#### 4.6 Ο λόγος του στάσιμου κύματος

Ο λόγος στάσιμου κύματος ( SRW – Standing wave ratio ) ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη τιμή του μέτρου της τάσης στη γραμμή και συμβολίζεται με S. Με τη βοήθεια των εξισώσεων (4.20, 4.21) προκύπτει η έκφραση που δίνει τον συντελεστή ανάκλασης :

$$S = \frac{|V_{max}|}{|V_{min}|} = \frac{1 + |\rho_L|}{1 - |\rho_L|} \quad (4.26)$$

Ενώ από τις (4.22, 4.23 ) φαίνεται ότι ο S μπορεί να ορισθεί και βάσει της μέγιστης και ελάχιστης τιμής του μέτρου του ρεύματος. Η αντίστροφη σχέση της 4.25 είναι :

$$|\rho_L| = \frac{S - 1}{S + 1} \quad (4.27)$$

Είναι φανερό ότι ο λόγος στάσιμου κύματος αποτελεί μέτρο του μεγέθους των διακυμάνσεων της τάσης (ή του ρεύματος) κατά μήκος της γραμμής, και επομένως (σύμφωνα με τα όσα προαναφέρθηκαν) δείχνει το μέγεθος των στάσιμων κυμάτων, άρα και το μέγεθος των ανακλάσεων στη γραμμή. Ο λόγος στάσιμου κύματος είναι το κατεξοχήν μέγεθος που χρησιμοποιείται στην πράξη για τη μέτρηση των ανακλάσεων σε γραμμή μεταφοράς (πολύ συχνότερα από ότι ο συντελεστής ανάκλασης που είναι πιο «θεωρητικό» μέγεθος) και υπάρχουν ειδικά όργανα για τη μέτρησή.

Από την 4.26 ο SWR είναι αδιάστατο μέγεθος και η τιμή του κυμαίνεται στην περιοχή  $1 \leq S \leq +\infty$ . Η ελάχιστη τιμή  $S=1$  αντιστοιχεί σε  $|\rho_L| = 0$  και σημαίνει μηδενικές ανακλάσεις ενώ η μέγιστη τιμή  $S \rightarrow +\infty$  αντιστοιχεί σε  $|\rho_L| = 1$  και σημαίνει ολική ανάκλαση, δηλαδή ότι όλο το κύμα στη γραμμή είναι στάσιμο. Συνήθως ο SWR εκφράζεται σε dB μέσω της σχέσης :

$$S_{dB} = 10 \log_{10} S \quad (4.28)$$

Με τη βοήθεια του S οι σχέσεις (4.24, 4.25) που δίνουν την αντίσταση εισόδου στις θέσεις μεγίστων και ελαχίστων μπορούν να πάρουν τη μορφή :

$$Z_{in}^{max} = SZ_0 \quad (4.29)$$

$$Z_{in}^{min} = \frac{Z_0}{S} \quad (4.30)$$

Συνδυάζοντας την 4.26 και τη 4.28 παίρνουμε μια σχέση για την ισχύ σε γραμμή μεταφοράς χωρίς απώλειες:

$$W = \frac{1}{2} \frac{|V_{max}|^2}{SZ_0} \quad (4.31)$$

Μία παρατήρηση που προκύπτει από την παραπάνω είναι ότι για δεδομένη ισχύ W που μεταφέρεται στη γραμμή, όσο μεγαλώνει ο SWR τόσο αυξάνει η μέγιστη τάση που θα εμφανισθεί σε κάποιο σημείο της γραμμής. Για μεγάλη ισχύ και συγχρόνως μεγάλο S αυτό σημαίνει ότι η ακραία τιμή τάσης σε κάποιο σημείο της γραμμής μπορεί να γίνει πολύ μεγάλη με κίνδυνο να συμβεί διάσπαση του προστατευτικού διηλεκτρικού περιβλήματος της γραμμής.

#### 4.7 Η συμπεριφορά των στάσιμων κυμάτων ανά περίπτωση φορτίου

Για να αποσαφηνισθούν πλήρως τα προηγούμενα, θα εξετάσουμε τη συμπεριφορά της γραμμής μεταφοράς ως προς τις ανακλάσεις, και κατά συνέπεια ως προς τα στάσιμα κύματα, για διάφορες ενδιαφέρουσες ειδικές περιπτώσεις φορτίων.

- **Προσαρμοσμένο φορτίο  $Z_L = Z_0$**

Για προσαρμοσμένο φορτίο  $\rho_L = 0$ , άρα  $S = 1$  και το μέτρο της τάσης είναι σταθερό κατά μήκος της γραμμής ( $V_{max} = V_{min}$ ). Στη γραμμή υπάρχει μόνο προσπίπτον κύμα και όχι ανακλώμενο (ή ισοδύναμα, υπάρχει μόνο οδεύον κύμα και καθόλου στάσιμο). Η ισχύς που έρχεται από την πηγή απορροφάται εξ ολοκλήρου από το φορτίο.

- **Βραχυκυκλωμένη γραμμή  $Z_L = 0$**

Όταν η γραμμή είναι τερματισμένη σε βραχυκύκλωμα, η 4.27 δίνει  $\rho_L = -1$ , οπότε

$\rho_L = 1$ ,  $\phi_L = \pi$  και  $S \rightarrow +\infty$ . Κατά συνέπεια έχουμε ολική ανάκλαση και το κύμα στη γραμμή είναι εξ ολοκλήρου στάσιμο. Όλη ισχύς που προσπίπτει στο φορτίο ανακλάται (πράγμα απόλυτα εύλογο διότι το βραχυκύκλωμα προφανώς δεν απορροφά καθόλου ισχύ). Το μέτρο της τάσης κατά μήκος της γραμμής προκύπτει ότι είναι:

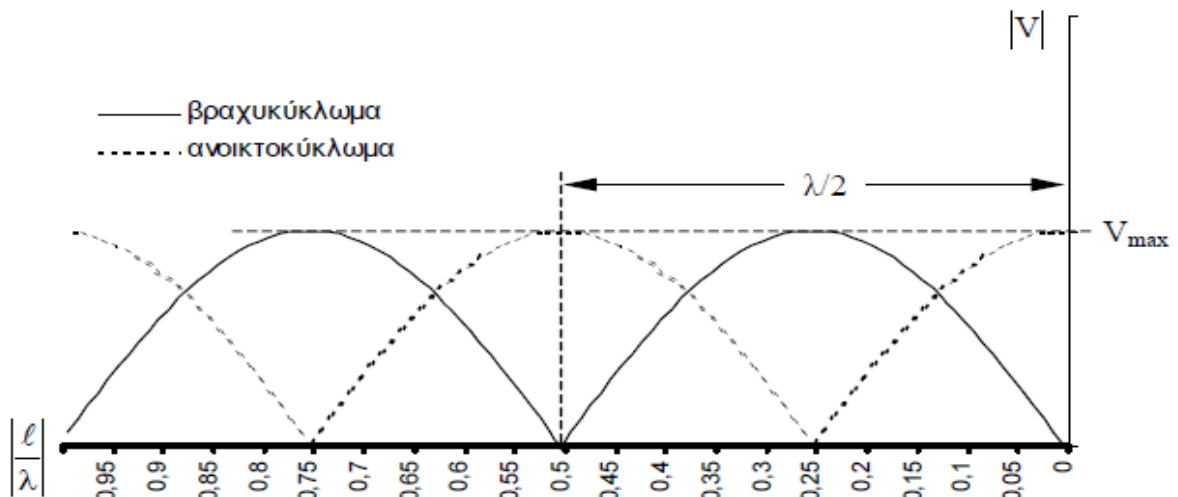
$$|V(l)| = 2|V_{\pi}| |\sin(\beta l)| \quad (4.32)$$

Ενώ η αντίσταση εισόδου της γραμμής είναι :

$$Z_{in}(l) = jZ_0 \tan(\beta l) \quad (4.33)$$

- **Ανοιχτοκυκλωμένη γραμμή  $Z_L = \infty$**

Στην περίπτωση αυτή  $\rho_L = 1$ ,  $\phi_L = 0$  και  $S \rightarrow +\infty$ . Η ανάκλαση είναι και πάλι ολική και η εικόνα στη γραμμή είναι παρόμοια με την περίπτωση βραχυκυκλώματος. Η μόνη διαφορά είναι ότι στη θέση τερματισμού της γραμμής εμφανίζεται πλέον μέγιστο αντί για ελάχιστο. Στην εικόνα 16 που ακολουθεί παρουσιάζεται η εικόνα των στάσιμων κυμάτων σε βραχυκυκλωμένη και ανοικτοκυκλωμένη γραμμή μεταφοράς.



Εικόνα 16: Στάσιμα κύματα σε βραχυκυκλωμένη και ανοικτοκυκλωμένη γραμμή.

▪ **Ωμικό φορτίο ( $Z$  πραγματικό)**

Θεωρούμε δεδομένο ότι η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής  $Z_0$  είναι επίσης πραγματική. Διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

- i.  $Z_L > Z_0$
- ii.  $Z_L < Z_0$

▪ **Άεργο φορτίο ( $Z_L = jX$ , με  $X$  πραγματικό)**

Στην περίπτωση αυτή έχουμε  $\rho_L = 1$ , οπότε  $S \rightarrow \infty$  και η ανάκλαση είναι ολική (πράγμα εύλογο αφού το άεργο φορτίο δεν απορροφά ισχύ και άρα όλη η ισχύς επιστρέφει). Το όρισμα  $\varphi_L$  παίρνει κάποια τιμή μεταξύ 0 και  $\pi$  (η οποία εξαρτάται από την τιμή του άεργου φορτίου  $X$ ). Για τον λόγο αυτό, η τάση στη θέση τερματισμού δεν είναι ούτε μέγιστη ούτε ελάχιστη αλλά παίρνει κάποια ενδιάμεση τιμή που εξαρτάται από την  $\varphi_L$ . [2]

## 5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### 5.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

Στα τέλη της δεκαετίας του εξήντα χρησιμοποιήθηκαν μικροκύματα χωρίς ιδιαίτερη επιτυχία. Από τα μέσα του 1992 είχαν γίνει πολλά πειράματα όπου χρησιμοποιούσαν ένα ανοιχτό κυματοδηγό, κυρίως για να ανιχνεύσουν μεγάλες ρωγμές στα μέταλλα. Τα πρώτα πειράματα που έγιναν μετακινούσαν τον κυματοδηγό ο οποίος ελεγχόταν από υπολογιστή και έβλεπαν τις διαφορές στο στάσιμο κύμα όταν υπήρχε ρωγμή. Η έλλειψη ρωγμών στη μεταλλική επιφάνεια συμπεριφέρεται ως βραχυκύκλωμα που τερματίζει τον κυματοδηγό. Ωστόσο, με την παρουσία ρωγμών δημιουργείται μια διαταραχή στην εικόνα στάσιμων κυμάτων, η οποία στη συνέχεια παρατηρείται από μια σχισμογραμμή με ανιχνευτή διόδου. Παρατηρήθηκε ακόμα, ότι όταν ο άξονας της ρωγμής ήταν παράλληλος με την μεγάλη πλευρά του κυματοδηγού, είχε σαν αποτέλεσμα οι μεταβολές στα στάσιμα κύματα να είναι μεγάλες όταν ο κυματοδηγός περνούσε πάνω στη ρωγμή. Μεταβολή υπήρχε ακόμα αν η ρωγμή ήταν στο κέντρο, στη μέση ή στην άκρη. Παρατηρήθηκε ακόμα ότι αν η ρωγμή δεν ήταν παράλληλη στη μεγάλη πλευρά του κυματοδηγού, τότε η μεταβολή στο σύστημα ήταν μικρή με αποτέλεσμα να είναι δύσκολο να ανιχνευθεί και η ρωγμή. [5]

Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι, όταν η ρωγμή είναι κατά μήκος της μικρής πλευράς του κυματοδηγού, είναι παράλληλη στη μεταλλική πλάκα που τερματίζει τον κυματοδηγό, με αποτέλεσμα να μην «διακόπτει» τα ρεύματα της επιφάνειας και έτσι να μην προκαλεί ιδιαίτερη μεταβολή σε αυτά. Από την άλλη πλευρά, όταν είναι κατά μήκος της μεγάλης πλευράς, δηλαδή κάθετη στα επιφανειακά ρεύματα, τότε προκαλεί σημαντική μεταβολή σε αυτά αφού τα «διακόπτει». Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι οι περισσότερες στην πραγματική ζωή δεν είναι ευθείες σε όλο το μήκος τους, αλλά για σχετικά μικρά μήκη (όπως η μεγάλη διάσταση του κυματοδηγού που χρησιμοποιήσαμε) πολλές φορές η ρωγμή μπορεί να προσεγγίζει την ευθύγραμμη. Τα πειραματικά και θεωρητικά θεμέλια αυτής της τεχνικής δίνονται, μαζί με αρκετά παραδείγματα. Αποδεικνύεται ότι ρωγμές με εύρος πλάτους ενός χιλιοστού εύκολα ανιχνεύονται σε περίπου 20 GHz ή χαμηλότερα [6]. Μικρότερες ρωγμές μπορούν να ανιχνευθούν σε υψηλότερες συχνότητες μικροκυμάτων. Παρατηρήθηκε επίσης ότι αυτή η μετατόπιση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σχετική θέση της ρωγμής εντός του ανοίγματος κυματοδηγού (δηλαδή αν η ρωγμή βρίσκεται στην άκρη ή στο κέντρο του ανοίγματος) [5]. Παρόλα αυτά έχει επίσης αποδειχθεί ότι η αύξηση της συχνότητας λειτουργίας δεν καθιστά απαραίτητα υψηλότερη ανάλυση μέτρησης σε όλες τις περιπτώσεις. Επιπλέον, η χωρική ανάλυση είναι συνάρτηση του αισθητήρα μικροκυμάτων που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα ορισμένοι τύποι αισθητήρων μπορεί να είναι (π.χ. κυματοδηγούς ανοιχτού άκρου, ομοαξονικές γραμμές ανοιχτού άκρου, συντονιστές κοιλοτήτων κλπ.)

Ένα χαρακτηριστικό που κάνει τη μέθοδο των μικροκυμάτων ιδανική είναι η διαθεσιμότητα πολλών διαφορετικών ανιχνευτών / αισθητήρων. Επιπλέον, η βελτιστοποίηση των παραμέτρων του συστήματος για την απόκτηση πιο ευαίσθητων αποτελεσμάτων καθιστά τις τεχνικές μικροκυμάτων NDT πολύ ισχυρές. Σημαντικό στην διαδικασία των μετρήσεων είναι να γίνει πρόβλεψη της μέτρησης έτσι ώστε μετά να μπορέσουμε να επικεντρωθούμε σε τρόπους με τους οποίους θα καταφέρουμε να αυξήσουμε την ευαισθησία της συσκευής. Τέλος αξίζει να επαναλάβουμε, ότι συνεχόμενη μελέτη θα οδηγήσει σε νέα ευρήματα πάνω στις τεχνικές των μικροκυμάτων, με αποτέλεσμα αυτή η μέθοδος στις NDT τεχνικές είτε να αποτελεί τη μόνη μέθοδο είτε να αποτελεί ένα σημαντικό συμπλήρωμα της. Μερικές φορές, έχοντας παράλογες προσδοκίες κατά τη χρήση αυτών των τεχνικών, ειδικά αν οι τεχνικές μικροκυμάτων NDT θεωρούνται η μόνη λύση σε ένα συγκεκριμένο πρόβλημα. Η ανάγκη



να κατανοήσουμε ότι πολλές από αυτές τις τεχνικές έχουν σχεδιαστεί κατά βέλτιστο τρόπο για να παρέχουν λύση για μια συγκεκριμένη εφαρμογή και για χρήση σε άλλες εφαρμογές. [5]

## 5.2 Γενικά για τους ταλαντωτές YIG (yttriumiron garnet Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>)

Ο **γρανάτης σιδήρου υπτρίου (YIG)** είναι μία δομή κρυστάλλου που έχει πολύ υψηλά χαρακτηριστικά Q (Αναφορικά κυμαίνονται σε μονάδες από 100 μέχρι 200). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι ταλαντωτές που χρησιμοποιούν αυτό το υλικό αλλά και φίλτρα, να παράγουν πολύ χαμηλό θόρυβο φάσης με δυνατότητα συντονισμού σε εύρος συχνοτήτων αρκετών οκτάβων στην περιοχή των μικροκυμάτων. Οι κρύσταλλοι YIG παράγονται παρόμοια με τους κρυστάλλους πυριτίου. Κατασκευάζονται από ένα και μόνο κρύσταλλο συνθετικού γρανάτη σιδήρου υπτρίου που τεμαχίζεται ξανά και ξανά με αποτέλεσμα να δημιουργούνται αρχικά μικροί κύβοι. Δυστυχώς, το σχήμα του κύβου είναι ανομοιόμορφο έτσι έχει ως αποτέλεσμα την ανομοιόμορφη σύζευξη ενέργειας σε ένα κύκλωμα συντονισμού YIG που ενεργεί ως ταλαντωτής. Αυτοί οι μικροί κύβοι YIG στη συνέχεια τοποθετούνται σε ένα ειδικό δοχείο που περιστρέφεται με αποτέλεσμα να μετατρέπει αργά-αργά τους YIG κύβους σε σφαίρες YIG (πολύ παρόμοια διαδικασία με την λείανση πολύτιμων λίθων για κοσμήματα). Το μέγεθος της διαμέτρου των σφαιρών YIG κυμαίνεται από 0,25 έως 0,75 χιλιοστά (mm). Η σφαίρα YIG είναι συνήθως τοποθετημένη στο τέλος μίας θερμικά αγωγίμης ράβδου (συνήθως βηρυλλίου). Αυτό είναι γίνεται για δύο λόγους: Πρώτο, η ράβδος λειτουργεί ως "ραβδί συντονισμού" για τον προσανατολισμό της σφαίρας YIG στο κύκλωμα συντονισμού, και δεύτερο, το YIG έχει καλύτερες επιδόσεις και ακρίβεια όταν η θερμοκρασία του διατηρείται σταθερή. Ουσιαστικά η ράβδος είναι ένας θερμικός αγωγός που μεταφέρει θερμότητα από ένα θερμαντήρα στη σφαίρα YIG ή και ανάστροφα. Αυτό δεν είναι απολύτως αναγκαίο και υπάρχουν ταλαντωτές YIG και φίλτρα χωρίς τη ράβδο και τον θερμαντήρα για μείωση του κόστους, πράγμα όμως που έχει αντίκτυπο στην απόδοση και περιορίζει τις εφαρμογές τους.

Πού στηρίζεται η **αρχή λειτουργίας του YIG** και πώς παράγει τις ταλαντώσεις με βάση τα φυσικά φαινόμενα; Το YIG είναι ένα φερριτικό υλικό που ταλαντώνεται σε μικροκυματικές συχνότητες όταν βυθίζεται σε ένα μαγνητικό πεδίο συνεχούς ρεύματος. Το μέγεθος αυτού του συντονισμού της ταλάντωσης είναι άμεσα ανάλογος με τη δύναμη του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου και έχει πολύ γραμμική απόκριση σε συχνότητες μικροκυμάτων πολλαπλών οκτάβων. Το μαγνητικό πεδίο συνεχούς ρεύματος παράγεται με τη χρήση ηλεκτρομαγνήτη ή ενός μόνιμου μαγνήτη ή ένας συνδυασμός του και των δυο. Το μαγνητικό πεδίο ενός ηλεκτρομαγνήτη μπορεί να συντονιστεί στο επιθυμητό μέγεθος χρησιμοποιώντας ένα μεταβλητό ρεύμα. Σε πιο μεγάλο βάθος, στο μοριακό επίπεδο, ο συντονισμός του κρυστάλλου YIG γίνεται με την ευθυγράμμιση των εξωτερικών τροχιών ηλεκτρονίων, δημιουργώντας ένα συνδυασμένο μαγνητικό δίπολο δηλαδή ένα μαγνητικό πεδίο που συντονίζεται σε μικροκυματικές συχνότητες γύρω από τη σφαίρα YIG.

Το **κύκλωμα ταλαντωτή FET κοινής πύλης** είναι η πιο κοινή τοπολογία ταλαντωτή YIG. Μπορεί να παρέχει ευρεία ρύθμιση ως προς το εύρος ζώνης (π.χ. 2-8 GHz, 6-18 GHz & 20-40 GHz) και μπορεί να επιτύχει συχνότητες άνω των 50 GHz. Αν και ο ταλαντωτής YIG με κύκλωμα FET κοινής πύλης έχει χαμηλότερο θόρυβο φάσης από τις περισσότερες τεχνολογίες (π.χ. VCOs - ταλαντωτές που ελέγχονται από τάση και DROs – ταλαντωτές συντονισμού μέσω διηλεκτρικού στοιχείου), δεν παρέχει το βέλτιστο θόρυβο φάσης: είναι τυπικά 12 db υψηλότερος από αυτόν που έχει το κύκλωμα ταλαντωτή YIG κοινής βάσης διπολικού τρανζίστορ. Αξίζει να σημειωθεί ότι, λόγω της διαθεσιμότητας διπλασιαστών συχνότητας σε μικρό κόστος, οι κατασκευαστές

ταλαντωτών YIG έχουν σταματήσει να παράγουν βασικούς ταλαντωτές άνω των 26,5 GHz.)

Ο ταλαντωτής **YIG κοινής βάσης διπολικού τρανζίστορ** έχει τον χαμηλότερο θόρυβο φάσης από όλους τους μικροκυματικούς ταλαντωτές (μη κρουγονικούς). Παρέχει επίσης, ευρεία ρύθμιση στο εύρος ζώνης (π.χ. 2-8 GHz). Η απόδοση του θορύβου φάσης όπως προαναφέρθηκε, είναι περίπου 12 db καλύτερη από του προηγούμενου τύπου κυκλωμάτων και γενικότερα για ασύρματες εφαρμογές στο φάσμα των μικροκυμάτων παρέχει καλύτερο θόρυβο φάσης ακόμα και με τον πολλαπλασιασμό των βασικών συχνοτήτων του. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα υπάρχοντα διπολικά τρανζίστορ είναι διαθέσιμα στα 14 GHz και υψηλότερες συχνότητες σχεδιάζονται και συνεχώς δοκιμάζονται για χρήση σε μελλοντικά κυκλώματα ταλαντωτή YIG.

Ο ταλαντωτής **YIG κοινής πηγής τρανζίστορ επίδρασης πεδίου FET** αναπτύχθηκε για εφαρμογές χαμηλού θορύβου φάσης άνω των 14 GHz. Αν και έχει θόρυβο φάσης περίπου 8 db μεγαλύτερο από το θόρυβο ενός κοινού διπολικού ταλαντωτή YIG και έχει περιορισμένο εύρος ζώνης συντονισμού (περίπου 5 GHz), είναι η πιο οικονομική λύση για εφαρμογές στενής ζώνης 14-24 GHz.

Ανακεφαλαιώνοντας, σε ένα γενικό πλαίσιο οι ταλαντωτές YIG έχουν πολλά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που καθορίζουν την εφαρμογή τους. Τα βασικότερα πλεονεκτήματα των ταλαντωτών YIG είναι ότι έχουν πολύ καλή ποιότητα σήματος με χαμηλό επίπεδο θορύβου φάσης σε σύγκριση με τους κλασικούς ταλαντωτές VCOs. Έχουν επίσης πολύ καλά χαρακτηριστικά μεγάλου εύρους ζώνης και έχουν γραμμική καμπύλη συντονισμού. Τα βασικότερα μειονεκτήματα και περιορισμοί του YIG είναι η κατανάλωση ενέργειας (λόγω του πηνίου) και ο βραδύτερος συντονισμός τους σε σχέση με τους ταλαντωτές με δίοδο varactor, λόγω του χρόνου που απαιτείται για την αλλαγή του ρεύματος μέσω του επαγωγέα, και η περιορισμένη απόκριση συχνότητας των μαγνητικών πυρήνων. Το τελευταίο μπορεί να αντιμετωπιστεί μερικές φορές με δύο πηνία, ένα υπεύθυνο για μεγάλο εύρος και το άλλο για τον έλεγχο κλειστού βρόχου. Ακόμα ένα μειονέκτημα είναι όπως και με όλους τους ταλαντωτές κρυσταλλων, είναι οι διακυμάνσεις στη συχνότητα λόγω της εξωτερικής θερμοκρασίας του περιβάλλοντος αλλά και της παραγωγής μεγάλης θερμοκρασίας από το ίδιο το πηνίο του ταλαντωτή λόγω απωλειών (αυτοθέρμανση). Όμως αυτά τα δύο μπορούν να αντισταθμιστούν, πρώτα χρησιμοποιώντας ρυθμιζόμενο θερμαντήρα (μικρή αντίσταση) για την αρχική γρήγορη θέρμανση του ταλαντωτή μέχρι την επιθυμητή θερμοκρασία λειτουργίας και έπειτα με την χρήση μεταλλικής ψύκτρας για την ψύξη του ταλαντωτή μεταφέροντας την θερμότητα για την αποφυγή ανάπτυξης μεγάλων ανεπιθύμητων θερμοκρασιών. [6]

### 5.3 Η πηγή που χρησιμοποιήθηκε

Η συσκευή παραγωγής μικροκυμάτων που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη διάταξη είναι ένας έτοιμος ταλαντωτής του εμπορίου τύπου Stellex 6755-726 (πανομοιότυπο σε προδιαγραφές με την σειρά MiniYIG της εταιρείας Endwave). Η κατασκευάστρια εταιρία δεν υπάρχει πλέον (απορροφήθηκε από την M/A-COM, σύμφωνα με διαδικτυακές πηγές). Ωστόσο είναι δυνατή η προμήθεια μεταχειρισμένων υλικών μέσω του διαδικτύου, όπως και έγινε στην περίπτωση μας. Είναι άλλωστε πιθανό ότι τα εν λόγω υλικά διατίθενται μεταχειρισμένα σε χαμηλές τιμές ακριβώς λόγω της διακοπής της παραγωγής και υποστήριξής τους από τον κατασκευαστή (σε τιμές χαμηλότερες από 100 € σε σύγκριση με κόστη προμήθειας αυτών των ταλαντωτών την προηγούμενη δεκαετία που είχαν μέγεθος μερικών χιλιάδων ευρώ).



## MiniYIG Oscillator

3 – 11 GHz Center Frequency YIG  
Tuned Oscillator

### Features

- Low Phase Noise: -105 dBc/Hz @ 10K (typ.)  
-128 dBc/Hz @ 100K (typ.)
- Output Power +14.5 dBm (typ.)
- Up to ±1 GHz Tuning Range
- Outstanding Phase Hit Performance in 64 and 128 QAM Radio Systems
- Available in SMA Connectorized Package



### Specifications\*

Characteristics	Typical <sup>1</sup>	Guaranteed <sup>1</sup> -40°C to +85° C
Center Frequency (Zero Tune Current)	3 GHz to 11 GHz	
Phase Noise		
10K offset	-105	-100
100K offset	-128	-123
Power Output (Min.)	12.0 dBm	9.0 dBm
Frequency Drift Over Temperature	±30 MHz	±60 MHz max
DC Circuit Current (Max.) at +8.5 Volts	100 mA	120 mA
<b>Harmonic Performance</b>		
Second Harmonic	-12dBc min	
Third Harmonic	-12dBc min	
Spurious Output	-60 dBc min	
<b>Tuning Characteristics</b>		
<b>Main Coil<sup>2</sup></b>		
Sensitivity	typically 5 MHz/mA ±10%	
Coil Impedance (various)	10 Ohms	
Modulation Bandwidth	>10 kHz	
<b>FM Coil<sup>2</sup></b>		
Sensitivity	150 KHz/mA ±20%	
Modulation Bandwidth	>400 kHz	
Deviation	±50 MHz	
Coil Impedance	1 ohm, 2 microH	

Εικόνα 17: Χαρακτηριστικά και προδιαγραφές του YIG.

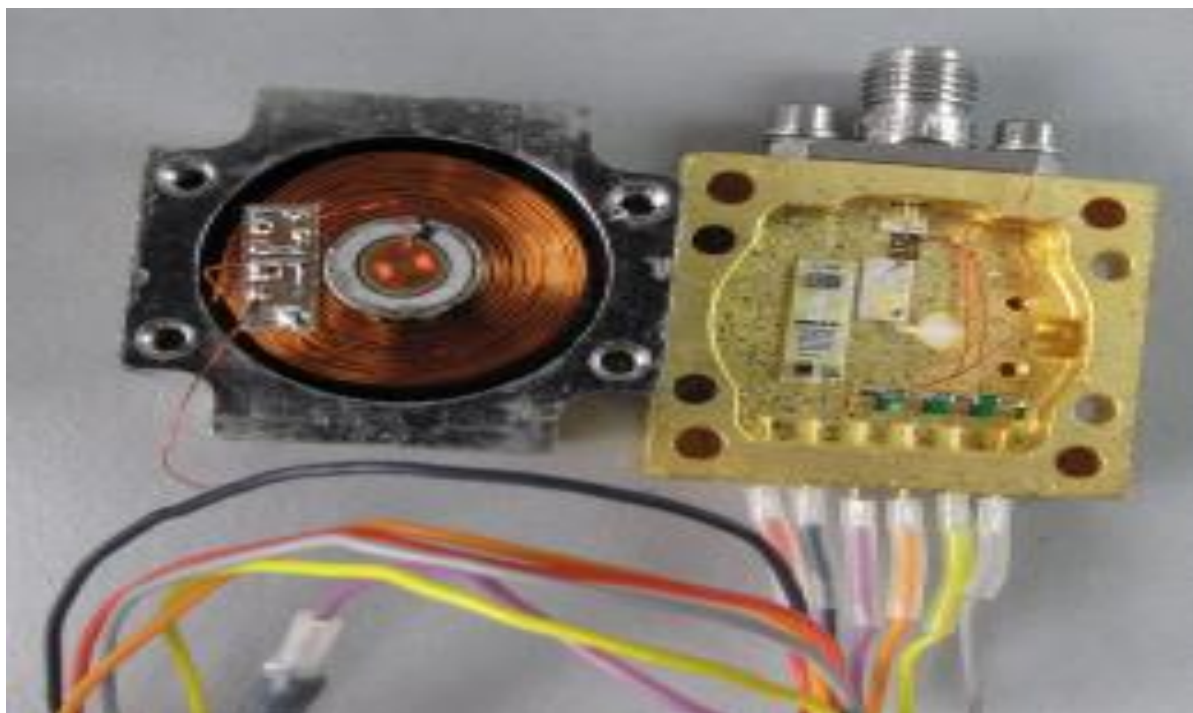
Οι περισσότεροι ταλαντωτές YIG αυτής της σειράς παραγωγής καλύπτουν την περιοχή συχνοτήτων της X-band, και χωρίς ρεύμα συντονισμού συνήθως παράγουν μια κεντρική συχνότητα κοντά στα 9 GHz. Είναι σε θέση να συντονιστούν πάνω ή κάτω περίπου 1 GHz από αυτή την κεντρική τους συχνότητα, χρησιμοποιώντας ένα σταθερό ρεύμα συντονισμού. Αυτό κάνει πιθανά κυκλώματα οδήγησης των ταλαντωτών YIG λίγο πιο περίπλοκα, αλλά το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα σταθερό σήμα RF (μικροκυματικής συχνότητας) με χαμηλό θόρυβο φάσης και περίπου +12 dBm ισχύ στην έξοδο. Ο ταλαντωτής είναι τοποθετημένος σε μεταλλικό περίβλημα και το μικροκυματικό σήμα δίνεται μέσω ομοαξονικού συνδετήρα (connector) τύπου SMA. Οι τάσεις και ρεύματα τροφοδοσίας και ελέγχου οδηγούνται στους ακόλουθους ακροδέκτες όπως φαίνεται στη παραπάνω εικόνα.

Το Stellex 6755-726 YIG έχει ευαισθησία συντονισμού γύρω στα 5 MHz ανά mA ρεύματος που ρέει μέσω των ακροδεκτών υπεύθυνων για τον συντονισμό του. Η θετική ροή ρεύματος αυξάνει τη συχνότητα εξόδου, ενώ η αρνητική ροή ρεύματος μειώνει τη συχνότητα εξόδου. Αυτό σημαίνει ότι για να συντονιστεί ο συγκεκριμένος ταλαντωτής YIG από τα 9 GHz μέχρι την περιοχή των 10 GHz, χρειάζονται περίπου 200 mA ενεργού ρεύματος που θα πρέπει να περάσουν από τις γραμμές συντονισμού του YIG. Αυτό το μοντέλο YIG έχει επίσης τη δυνατότητα να διαμορφώνεται μέσω της συχνότητας (FM), με ξεχωριστές γραμμές συντονισμού. Η διαμόρφωση FM του YIG είναι βασικά η ίδια με τη βασική ρύθμιση συντονισμού του YIG, με κύρια διαφορά ότι η περιοχή συχνοτήτων RF ανά mA του ρεύματος είναι πολύ μικρότερη, οπότε το σήμα διαμόρφωσης θα πρέπει να είναι σε μετατόπιση DC (DC offset) όταν εφαρμόζεται στον ενισχυτή ελέγχου. Προσοχή πρέπει να δοθεί λόγω του ότι οι γραμμές συντονισμού FM

του YIG δεν μπορούν να χειριστούν πολλά ρεύματα να ρέουν μέσα από αυτά. Θα πρέπει να διατηρείται το ρεύμα διαμόρφωσης αρκετά κάτω από τα 200 mA. Επίσης σημειώνεται ότι η χρήση του οδηγού FM στο YIG είναι προαιρετική εάν πρόκειται απλώς για μια συνεχής πηγή RF CW.

Όπως και οι περισσότεροι μικροκυματικοί ταλαντωτές (ουσιαστικά όλοι), ο ταλαντωτής αυτός κατά τη λειτουργία του εμφανίζει κάποιες διακυμάνσεις συχνότητας κυρίως λόγω μεταβολών της θερμοκρασίας και κατά περίπτωση και άλλων αιτίων, όπως μεταβολές στο ρεύμα των πηνίων του. Οι διακυμάνσεις αυτές είναι της τάξης των λίγων MHz(π.χ. το φύλλο δεδομένων δίνει τυπική τιμή 30 MHzκαι μέγιστη τιμή 60 MHzγια τη συνολική θερμοκρασιακή μεταβολή της συχνότητας), δηλ. πολύ μικρές σε σχετικά μεγέθη (αρκετά μικρότερες από 1% της συχνότητας 8 – 10 GHzτου ταλαντωτή). Σε πολλές περιπτώσεις η σταθερότητα αυτή είναι αποδεκτή, υπάρχουν όμως και εφαρμογές όπου η σταθερότητα της συχνότητας παίζει κρίσιμο ρόλο. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα κύκλωμα με βρόχο ανάδρασης, γνωστό ως PLL (Phase Locked Loop), το οποίο ελέγχει τον ταλαντωτή ώστε η φάση του, και άρα η συχνότητά του, να ακολουθεί με ακρίβεια κάποιο εξωτερικό σήμα. Επειδή σε χαμηλότερες συχνότητες (π.χ. μερικών δεκάδων MHz) μπορούν να κατασκευαστούν εξαιρετικά σταθεροί κρυσταλλικοί ταλαντωτές, χρησιμοποιώντας ένα πολλαπλάσιο συχνότητας ενός κρυσταλλικού ταλαντωτή ως εξωτερικό σήμα ελέγχου του PLL μπορεί κανείς να πετύχει σταθεροποίηση της συχνότητας ενός μικροκυματικού ταλαντωτή. Με κατάλληλα κυκλώματα μπορεί επίσης να ελεγχθεί ψηφιακά η συχνότητα ενός μικροκυματικού ταλαντωτή που σταθεροποιείται με τον τρόπο αυτό. Ένα τέτοιο σύστημα λέγεται συνήθως συνθέτης συχνότητας (frequency synthesizer). Στην πειραματική διάταξή μας χρησιμοποιήθηκε ένα τέτοιο synthesizer(προερχόμενο επίσης από την αγορά μεταχειρισμένων υλικών) από τον ίδιο κατασκευαστή για τη συγκεκριμένη μονάδα ταλαντωτή YIG, το οποίο επιτυγχάνει ρύθμιση της συχνότητας και σταθεροποίησή της με διακυμάνσεις λίγων kHz. Για την εισαγωγή των σημάτων ελέγχου στο synthesizerχρησιμοποιήθηκε μικροελεγκτής Arduino Nano με κατάλληλο πρόγραμμα σε PC, καθώς και απλό κύκλωμα με γραμμικούς σταθεροποιητές LM317 και LM7805και πηγή σταθερής τάσης (voltage reference) LM385 για την παροχή των τάσεων τροφοδοσίας 8,5 Vκαι 5 V και τάσης αναφοράς 2,5 Vπου απαιτεί το synthesizer.

Στην πραγματικότητα η σταθερότητα συχνότητας που προσφέρει το synthesizerείναι μεγαλύτερη από τις απαιτήσεις του πειράματος. Τα ίδια αποτελέσματα θα προέκυπταν και με τον ταλαντωτή χωρίς synthesizer επειδή, όπως θα φανεί από τις μετρήσεις που θα ακολουθήσουν, η τάση λόγω ρωγμής είναι πρακτικά ανεπηρέαστη από διακυμάνσεις συχνότητας της τάξης των λίγων MHz. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε το synthesizer είναι η πρακτική διευκόλυνση που παρέχει με την ακριβή ρύθμιση της συχνότητας από υπολογιστή, ώστε δεν χρειάζεται μέτρηση της συχνότητας κάθε φορά που μεταβάλλεται για να ληφθεί νέα πειραματική τιμή.



Εικόνα 18: Κάτοψη του εσωτερικού του ταλαντωτή YIG.

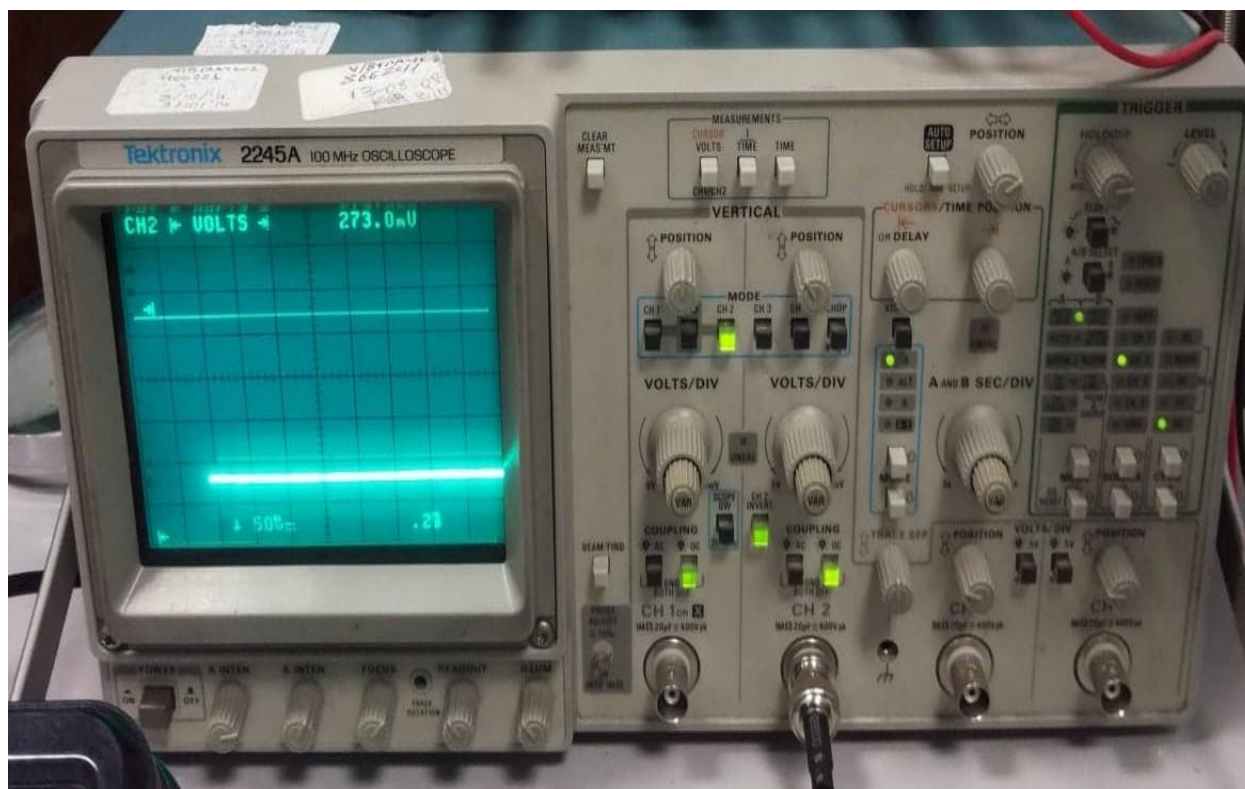
Η πηγή ήταν ένα μικροκυματικό synthesizer που ελέγχεται από το υπολογιστή και δίνει συχνότητες από 8 – 10 GHz.

#### 5.4 Αναλυτής φάσματος

Όπως αναφέρθηκε πολλές φορές ο αναλυτής φάσματος (spectrum analyzer) είναι το πιο βασικό εργαλείο που χρησιμοποιούμε για να θέσουμε μια συσκευή υπό εξέταση (Device Under Test) - στην προκειμένη περίπτωση τον ταλαντωτή YIG - έτσι ώστε να διεξάγουμε μετρήσεις και να καταλήξουμε σε συμπεράσματα όσο αφορά τα χαρακτηριστικά και την αποδοτική λειτουργία του. Ένας αναλυτής φάσματος μετρά το μέγεθος ενός σήματος εισόδου συναρτήσει της συχνότητας εντός της πλήρους περιοχής συχνοτήτων του μετρητικού οργάνου. Η κύρια χρήση είναι η μέτρηση της ισχύος του φάσματος γνωστών και άγνωστων σημάτων. Το σήμα εισόδου που μετράει ένας αναλυτής φάσματος είναι ηλεκτρικό, ωστόσο, οι φασματικές συνθέσεις άλλων σημάτων, όπως κύματα ακουστικής πίεσης και οπτικά κύματα φωτός, μπορούν να ληφθούν υπόψη μέσω της χρήσης ενός κατάλληλου μετατροπέα. Ουσιαστικά με την ανάλυση των φασμάτων των ηλεκτρικών σημάτων μπορούμε να παρατηρήσουμε την κυρίαρχη συχνότητα, την ισχύ, την παραμόρφωση, τις αρμονικές, το εύρος ζώνης και άλλα φασματικά συστατικά ενός σήματος που δεν είναι εύκολα ανιχνεύσιμα στις κυματομορφές του χρονικού πεδίου (δηλαδή του παλμογράφου).

Η απεικόνιση ενός αναλυτή φάσματος έχει συχνότητα στον οριζόντιο άξονα και το πλάτος που εμφανίζεται στον κατακόρυφο άξονα. Στον περιστασιακό παρατηρητή, ένας αναλυτής φάσματος μοιάζει με παλμογράφο και, στην πραγματικότητα, μερικά εργαστηριακά όργανα μπορούν να λειτουργήσουν ενίοτε ως παλμογράφος και ενίοτε ως αναλυτής φάσματος.





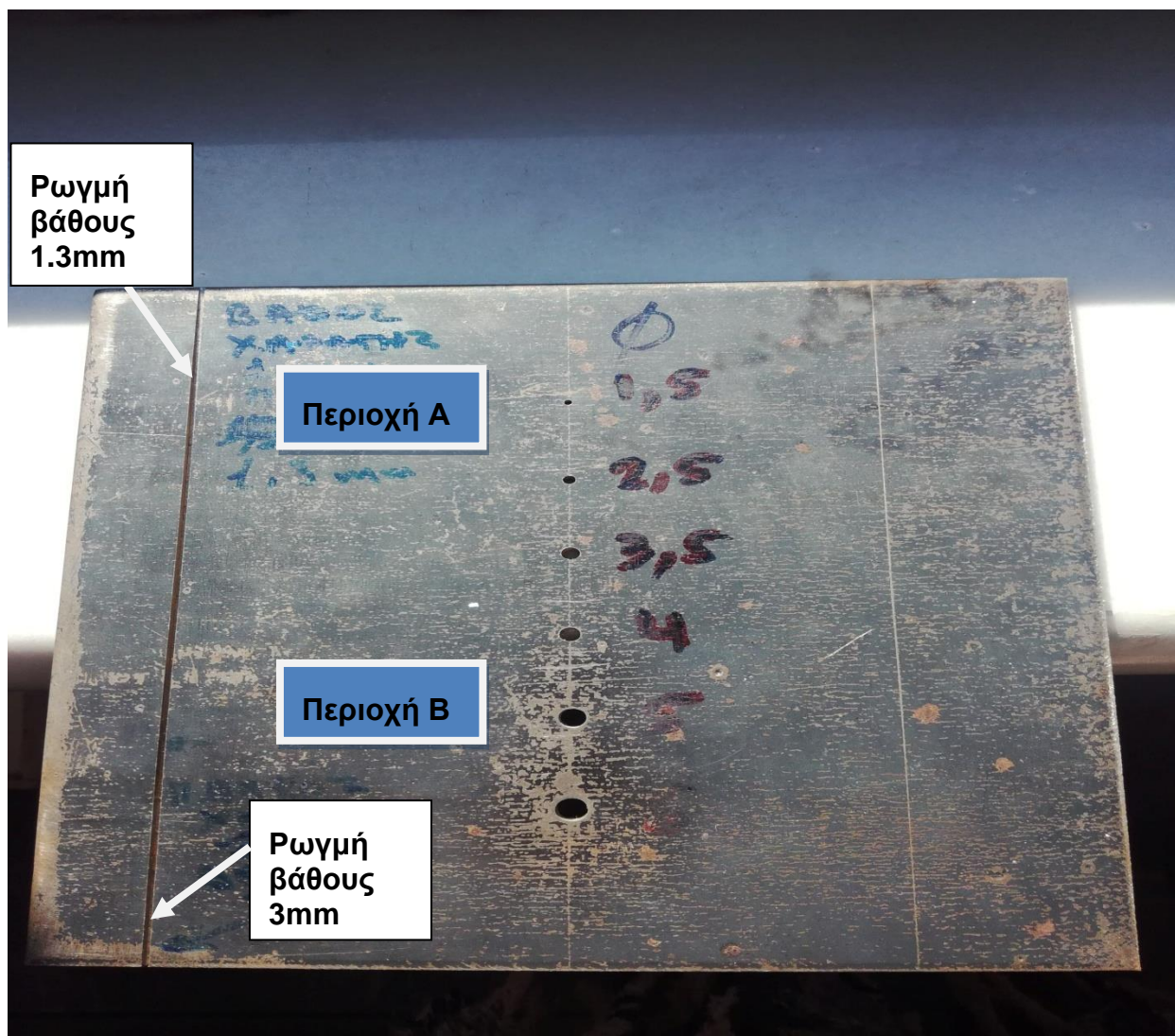
Εικόνα 19: Παλμογράφος.

## 5.5 Πειραματική διάταξη - οργανολογία

Η πειραματική διάταξη που κατασκευάστηκε στηρίχτηκε στο πείραμα που περιγράφεται στην εργασία των (YehandZoughi, 1994). Εκτενέστερη παρουσίαση σχετικών πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων υπάρχει στο σύγγραμμα (Zoughi, 1994). Στην παρούσα εργασία, ο πρωταρχικός στόχος είναι η επιβεβαίωση της δυνατότητας ανίχνευσης, με απλό πειραματικό εξοπλισμό και όσο δυνατόν χαμηλό κόστος και απλή διαδικασία μετρήσεων. Ακόμα ο χειριστής της συγκεκριμένης συσκευής δεν χρειάζεται να είναι εμπειρογνώμων για να διεξάγει τις μετρήσεις.

Από τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για το πείραμα μας αυτά χωρίζονται σε βασικά και σε δευτερεύοντα. Βασικά όργανα είναι η γεννήτρια, ο κυματοδηγός, η πλάκα τα οποία αποτελούν τη βασική δομή του πειράματος και στο συγκεκριμένο πείραμα η μέτρηση που πήραμε από τον παλμογράφο ήταν της τιμής του 1mV. Δευτερεύοντα είναι τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία του σήματος του αποτελέσματος της μικροκυματικής διάταξης.

Για την υλοποίηση του πειράματος κατασκευάστηκε μια μεταλλική πλάκα πάνω στην οποία χαράχθηκαν ρωγμές διαφορετικού βάθους και πλάτους προκειμένου να υπολογιστεί η κατάλληλη συχνότητα, σύμφωνα με την οποία θα είμαστε σε θέση να καταγράψουμε τις μεταβολές στην ανάκλαση, όταν το άκρο του κυματοδηγού εισέρχεται πάνω στον παλμογράφο.



Εικόνα 20: Η πλάκα που χρησιμοποιήθηκε στη διάρκεια του πειράματος.

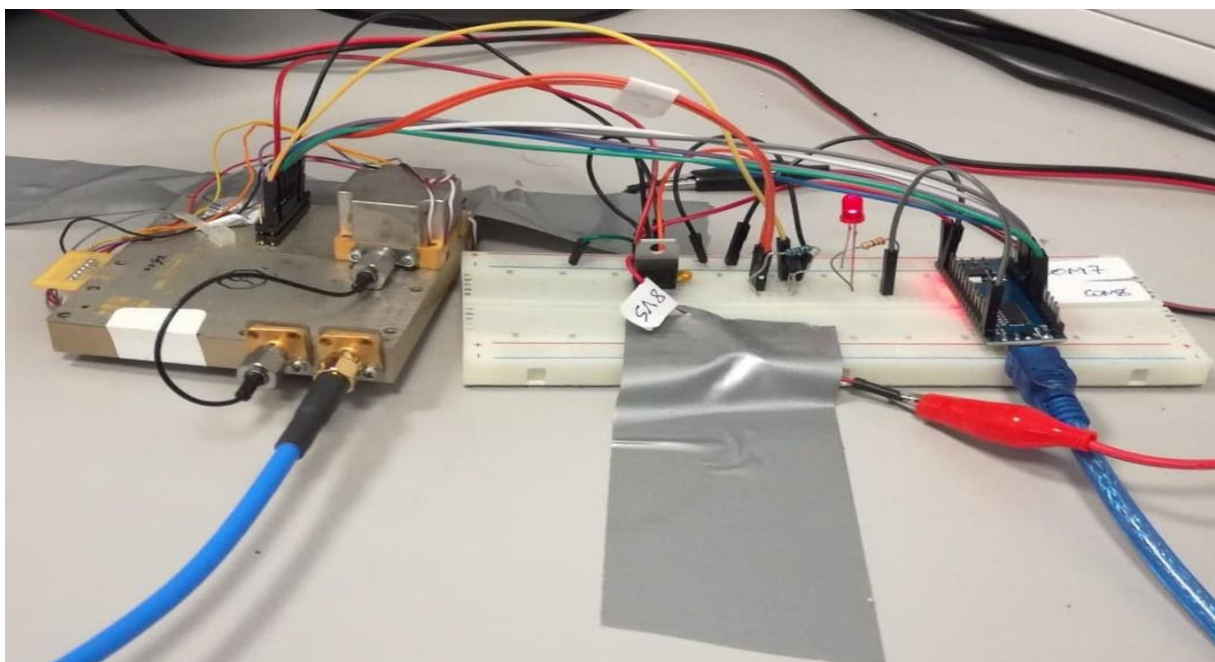
Αναλυτικότερα όπως φαίνεται στη παραπάνω εικόνα στην πλάκα χαράχτηκε μια ρωγμή που είχε βάθος  $d_1 = 1.3 \text{ mm}$  και κατέληγε να έχει βάθος  $d_2 = 3 \text{ mm}$  με πλάτος  $1,3 \text{ mm}$  προκειμένου να διαπιστώσουμε αν θα υπήρχε κάποια μεταβολή στο στάσιμο κύμα. Έτσι αν παρατηρούσαμε μεταβολή θα μας έδειχνε σε ποιο εύρος συχνοτήτων είναι ανιχνεύσιμη. Ένα άλλο βασικό όργανο που χρησιμοποιήσαμε στη διάρκεια του πειράματος ήταν ένας απλός κυματοδηγός. Στον κυματοδηγό μετακινούσαμε τη σχισμογραμμή προκειμένου να βρούμε το ελάχιστο έτσι ώστε διάφορα τάσης να είναι η μέγιστη και με αυτό τον τρόπο να υπάρχει και ευκολία στις μετρήσεις. Όσο πιο βαθιά είναι το πινάκιο στον κυματοδηγό τόσο καλύτερο σήμα θα δώσει ο αισθητήρας που βρίσκεται τοποθετημένος πάνω σε αυτό. Για τον λόγο αυτό η τοποθέτηση έγινε εμπειρικά εκεί όπου είχαμε το καλύτερο σήμα στον παλμογράφο με σκοπό τις μεσαίες τιμές της τάσης ώστε να είναι εύκολα αναγνωρίσιμη η διαφορά τάσης από το διάγραμμα  $V_0 - V$ . Όπως είχε παρατηρηθεί και σε προηγούμενα πειράματα η πλευρά του κυματοδηγού με την οποία σαρώνουμε την πλάκα έπαιζε ρόλο στο αν θα μπορούσαμε να διακρίνουμε μεταβολή στην τάση ή όχι. Επομένως σε όλη τη διάρκεια του πειράματος, η μεγάλη πλευρά του κυματοδηγού ήταν παράλληλη με τη σχισμή. Παρακάτω φαίνεται ο κυματοδηγός με τη σχισμογραμμή που χρησιμοποιήθηκαν στη διάρκεια των μετρήσεων.





**Εικόνα 21: Σχισμογραμμή στον κυματοδηγό.**

Όσο αναφορά την συνδεσμολογία, για κεντρική τροφοδοσία χρησιμοποιήσαμε μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος DC 0-30V (ΤΤi EL302Tv Triple power supply). Χρησιμοποιήσαμε και τις δύο κύριες εξόδους της, η πρώτη για τροφοδοσία του ταλαντωτή στην περιοχή των 8,4 VDC και την δεύτερη για τροφοδοσία του πηνίου μαγνήτισης που ήταν υπεύθυνο για την μεταβολή της κεντρικής συχνότητας του ταλαντωτή YIG (λεγόμενο και πηνίο συντονισμού). Έπειτα τα θετικά καλώδια της τροφοδοσίας συνδέονται σε σειρά με δύο μετρητές έντασης και τα αρνητικά καλώδια των μετρητών συνδέονται στους κατάλληλους ακροδέκτες του ταλαντωτή. Τέλος, συνδέσαμε την έξοδο του ταλαντωτή μέσω ενός εύκαμπτου (semi - rigid) ομοαξονικού καλωδίου στην είσοδο του αναλυτή φάσματος ή στο μετρητή ισχύος (Hewlett - Packard 432A Power meter)



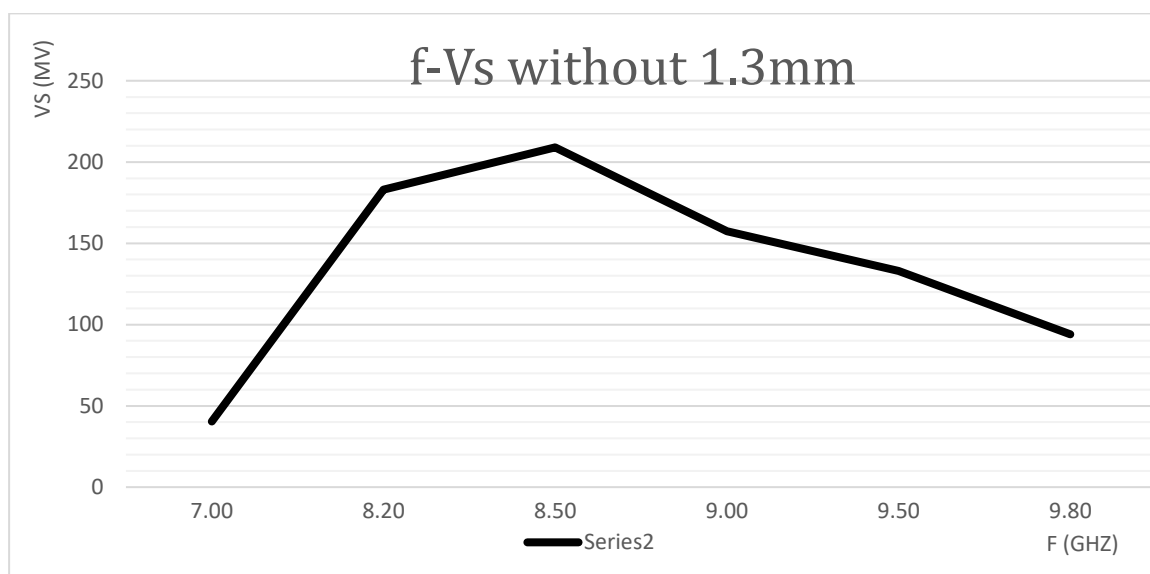
**Εικόνα 22: Συνδεσμολογία.**



## 5.6 Μετρήσεις - Αποτελέσματα

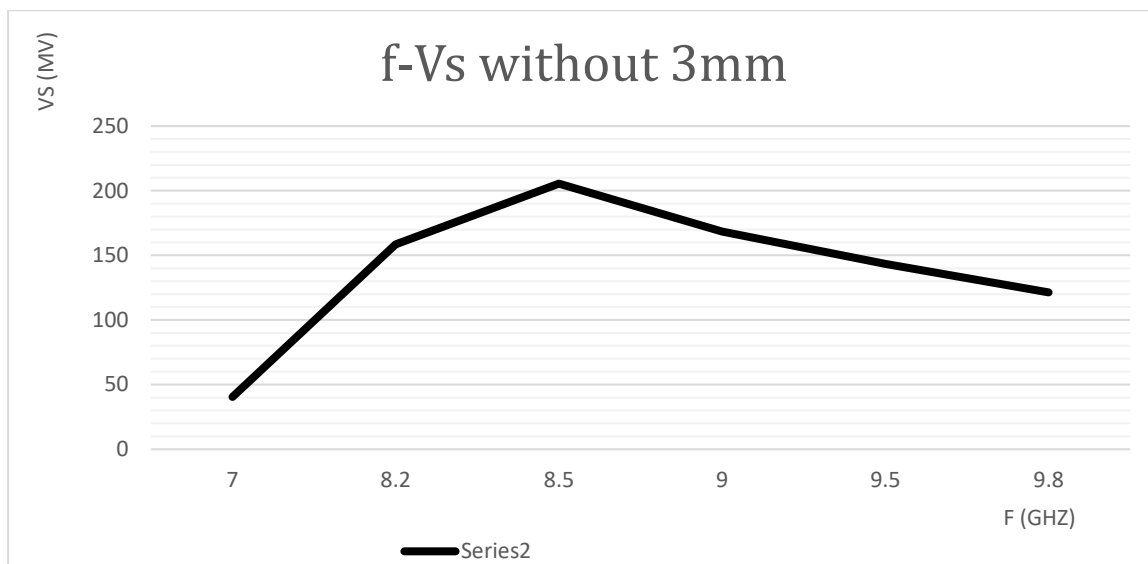
Σε πρώτη φάση, στόχος της πειραματικής διαδικασίας ήταν να καθορίσουμε τις ιδανικότερη συχνότητα. Αρχικά επιλέχθηκε η θέση της σχισμογραμμής. Η θέση ήταν τέτοια έτσι ώστε να έχουμε τη μικρότερη δυνατή τάση, προκειμένου να μπορέσουμε να ξεχωρίσουμε με μεγαλύτερη ευκολία τη γρήγορη εναλλαγή των τάσεων που υπήρχε κάθε φορά που ο κυματοδηγός περνούσε πάνω από τη σχισμογραμμή.

Στη συνέχεια πήραμε κάποιες πρώτες μετρήσεις στις περιοχές A και B, όπως φαίνεται στην εικόνα 20, ακριβώς δίπλα από τα αντίστοιχα βάθη της ρωγμής. Αυτή η διαδικασία έγινε για όλο το εύρος των συχνοτήτων που επιλέξαμε στις μετρήσεις μας, Κύριος λόγος που έγινε ήταν να ελέγξουμε αν θα παρατηρηθεί διαφορά στις συχνότητες σε αυτές τις δύο περιοχές που βρίσκονταν ακριβώς δίπλα από τα διαφορετικά βάθη που ερευνούσαμε. Στη συνέχεια μελετήθηκαν το βάθος της ρωγμής 1,3mm και μετά για το βάθος της ρωγμής 3mm στο εύρος συχνοτήτων ( 8,2GHz – 9,8GHz ) Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα από τις μετρήσεις προκειμένου να εξάγουμε κάποια συμπεράσματα σχετικά με την ιδανικότερη συχνότητα. Τα δύο πρώτα διαγράμματα αναφέρονται στην πρώτη περίπτωση που μελετούσαμε τις δύο περιοχές A και B δίπλα ακριβώς από τη ρωγμή και όλα τα υπόλοιπα αναφέρονται στις ρωγμές βάθους 1,3mm και 3mm.



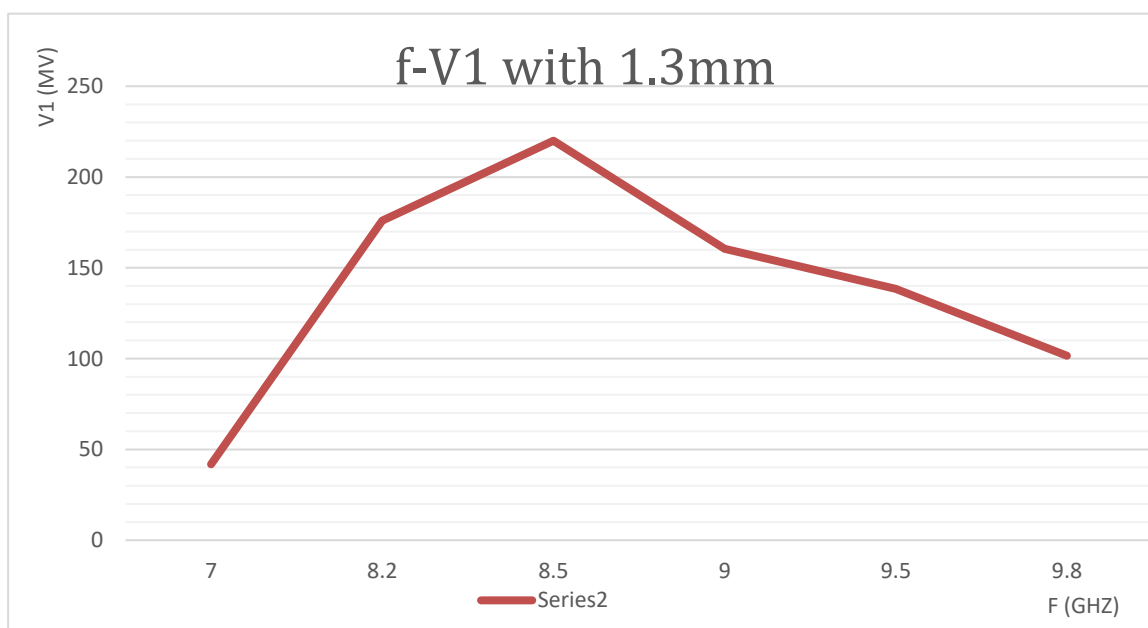
Εικόνα 23: Διάγραμμα Τάσης – Συχνότητας στη περιοχή A ακριβώς δίπλα από τη ρωγμή βάθους 1,3 mm.

Φαίνεται και στα δύο διαγράμματα ότι η μέγιστη τάση παρατηρείται στο εύρος συχνοτήτων 8,2GHz-8,5GHz ενώ σε όλες τις υπόλοιπες συχνότητες παρατηρούμε ελάχιστες τιμές τάσεων.



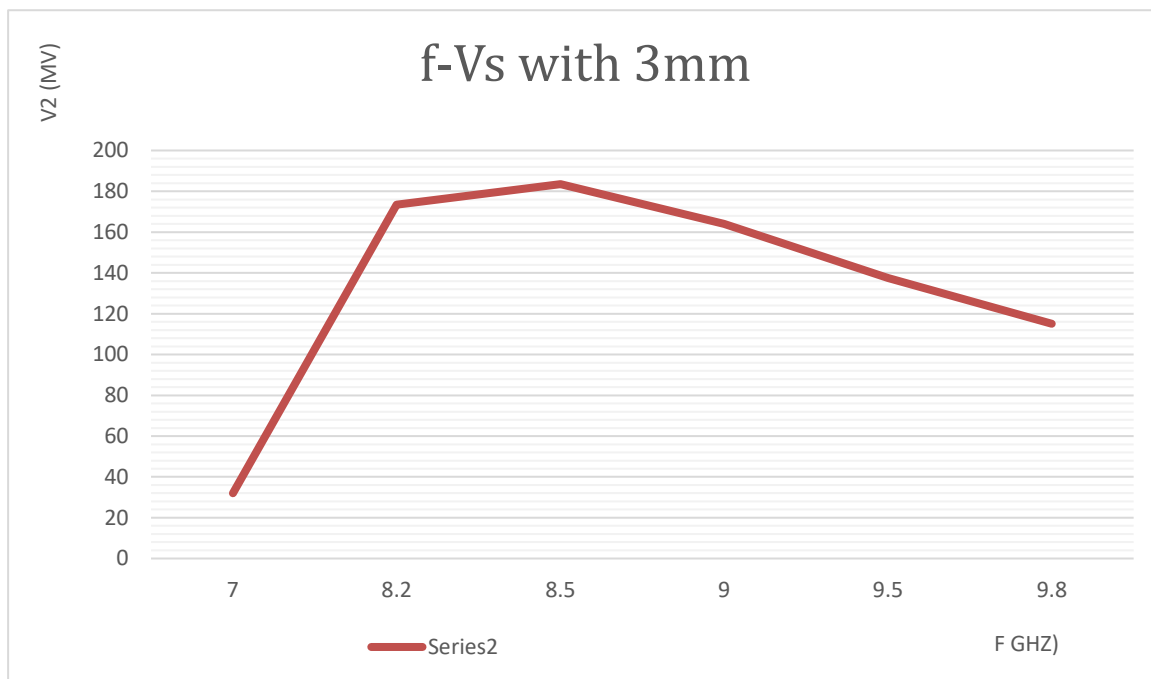
Εικόνα 24: Διάγραμμα Τάσης – Συχνότητας στη περιοχή Β ακριβώς δίπλα από τη ρωγή βάθους 3 mm.

Συνεχίζουμε στο διάγραμμα τάσης – συχνότητας για τη ρωγή βάθους 1,3mm παρατηρείται μέγιστη τάση στα 8,5 GHz ενώ ελάχιστη τάση στο εύρος των συχνοτήτων 9-9,8GHz



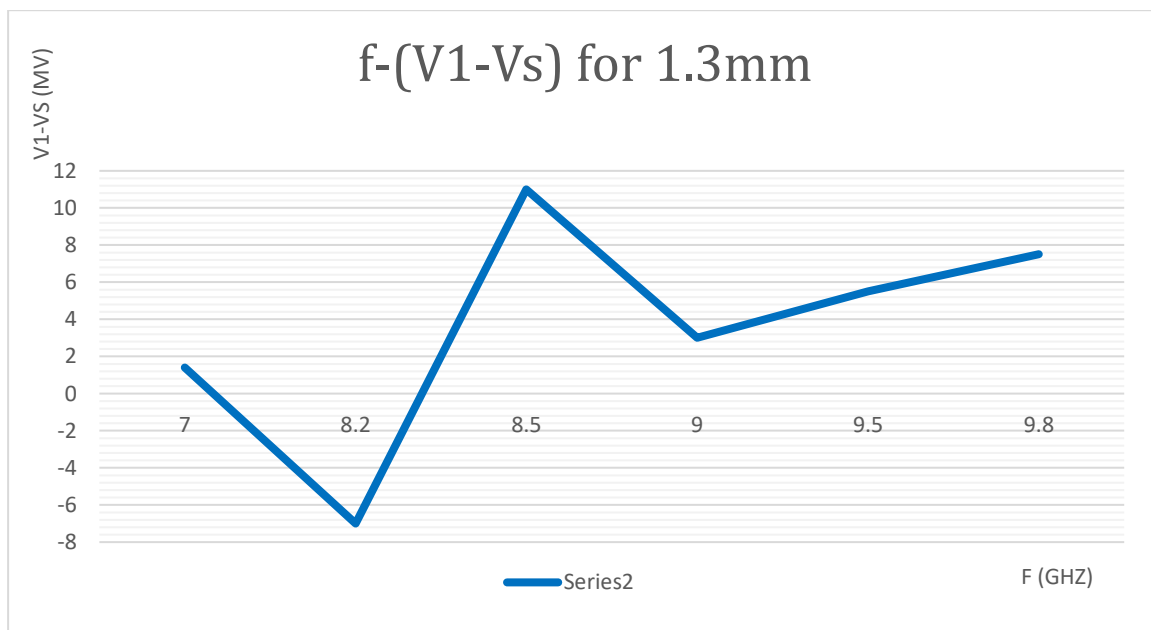
Εικόνα 25: Διάγραμμα Τάσης-Συχνότητας για τη ρωγή βάθους 1,3mm.

Ομοίως και για την ρωγή βάθους 3mm παρατηρείται μέγιστη τάση στο εύρος συχνοτήτων 8,2GHz-8,6GHz.



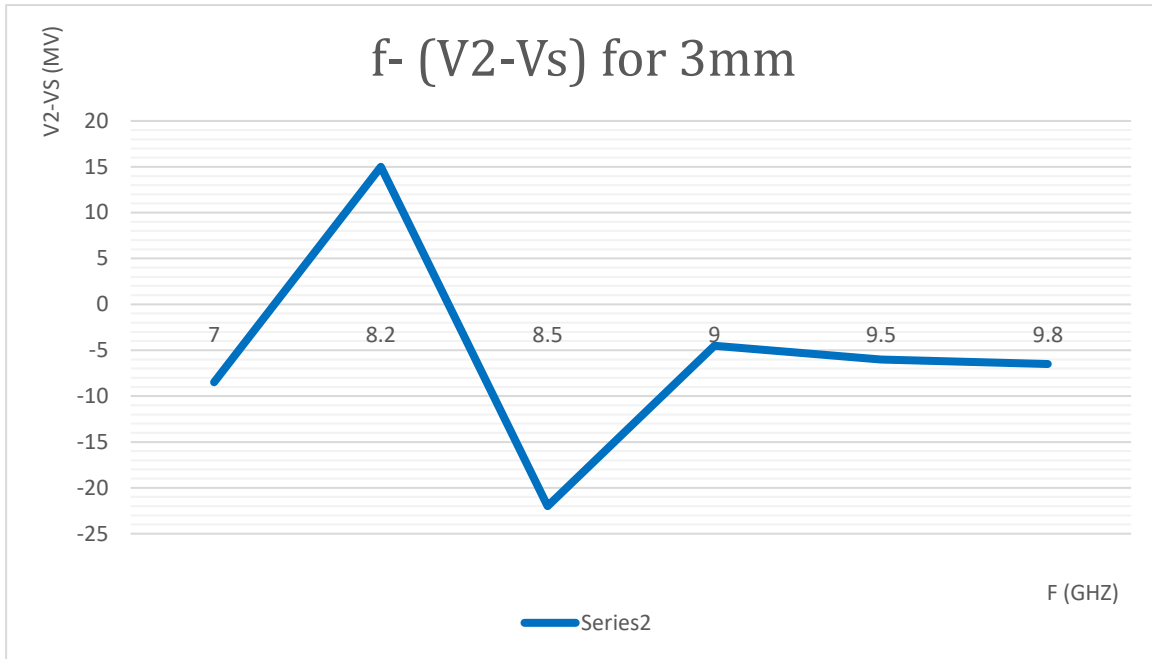
Εικόνα 26: Διάγραμμα Τάσης-Συχνότητας για τη ρωγή βάθους 3mm.

Αφού πήραμε τις αρχικές μετρήσεις προκειμένου να τις συγκρίνουμε με τις τιμές των τάσεων δημιουργήσαμε τη διαφορά τάσεων, χρησιμοποιώντας την τάση του υλικού χωρίς τη ρωγή και την τάση του υλικού με τη ρωγή.



Εικόνα 27: Διάγραμμα διαφοράς τάσεων-Συχνότητας για τη ρωγή βάθους 1,3mm.

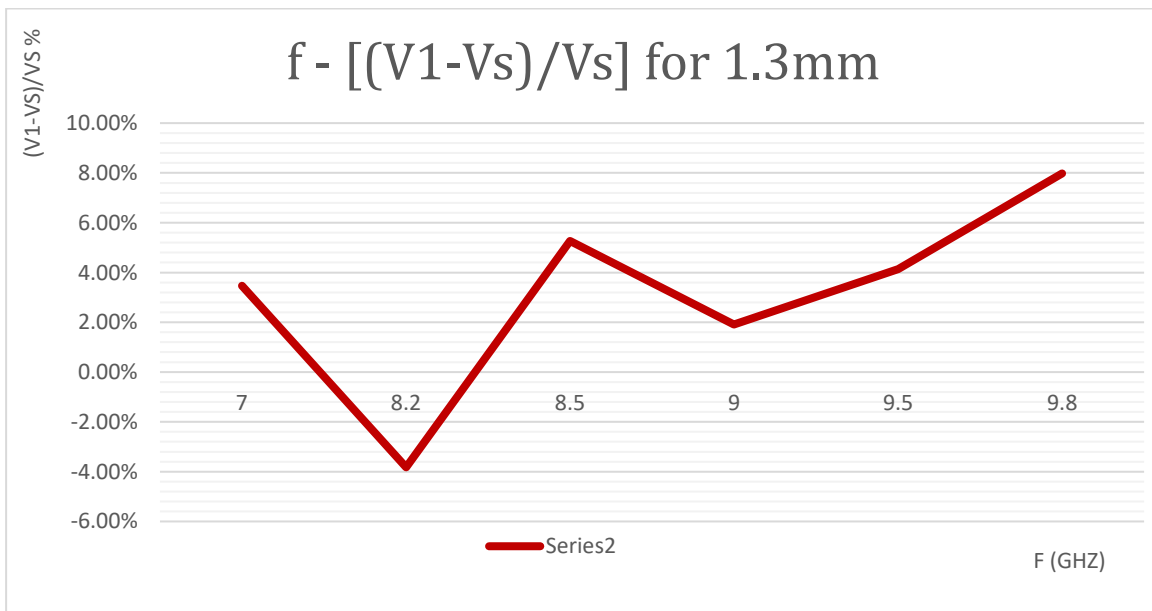
Με βάση το παραπάνω διάγραμμα που αφορά τη ρωγή βάθους 1,3 mm οι περισσότερες διαφορές είναι θετικές. Χρήσιμη διαφορά τάσης εμφανίζεται στη συχνότητα 8,5GHz με τιμή 11mV. Ακόμη υπάρχει μία περίπτωση στα 8,2GHz όπου η διαφορά είναι αρνητική στα -7mV.



**Εικόνα 28: Διάγραμμα διαφοράς τάσεων-Συχνότητας για τη ρωγή βάθους 3mm.**

Αντίστοιχα για τη ρωγή βάθους 3mm που φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα μεγάλη διαφορά τάσεων παρουσιάζεται στη συχνότητα 8.2GHz με τιμή 15mV και αρνητική διαφορά στα 8.5GHz με τιμή -22mV, δηλαδή ακριβώς το αντίθετο αποτέλεσμα που είχε βγει στη ρωγή βάθους 1.3mm.

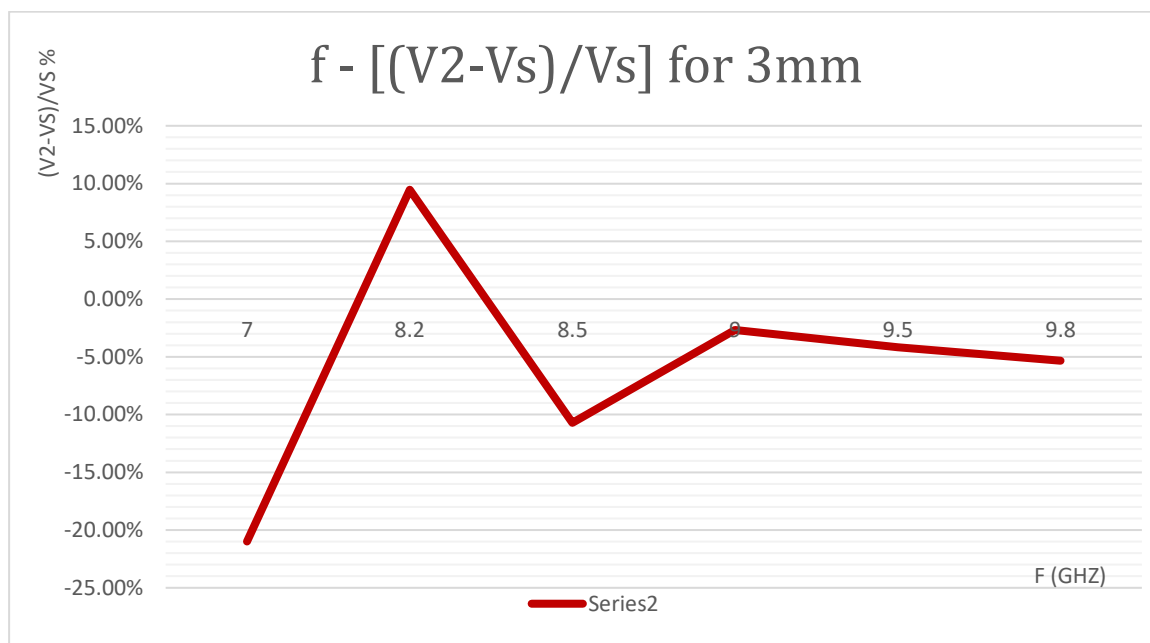
Στη συνέχεια προκειμένου να συγκρίνουμε τις τάσεις υπολογίσαμε την ποσοστιαία αύξηση ή μείωση που παρατηρήσαμε. Οι μεταβολές αυτές παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



**Εικόνα 29: Διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς τάσεων-Συχνότητας για τη ρωγή βάθους 1,3mm.**

Το συγκεκριμένο διάγραμμα μας φανερώνει και άλλες συχνότητες στις οποίες θα μπορούσαμε να δουλέψουμε και να αξιοποιήσουμε στην πειραματική μας διάταξη.

Συμβαίνει διότι με το διάγραμμα αυτό γίνονται πιο σαφείς αρκετές μεταβολές που δεν ήταν εμφανής στο προηγούμενο διάγραμμα.



**Εικόνα 30: Διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς τάσεων-Συχνότητας για τη ρωγή βάθους 3mm.**

Κατά τη διάρκεια του πειράματος παρατηρήθηκε επίσης ότι κάποια σημεία πάνω στην πλάκα έδιναν διαφορετική ανάκλαση στον παλμογράφο. Αυτό συνέβη ενδεχομένως λόγω κάποιας αλλαγής του υλικού που υπήρχε στην περιοχή εκείνη. Το γεγονός αυτό δεν επηρέασε τις μετρήσεις μας διότι αυτό που θέλαμε να δούμε ήταν το ποσοστό της μεταβολής που θα υπήρχε προκειμένου να το αυξήσουμε με τον κατάλληλο τρόπο. Από τις μετρήσεις που κάναμε οδηγηθήκαμε στο συμπέρασμα ότι η ιδανικότερη συχνότητα για τη ρωγή βάθους 1.3 mm στην οποία πρέπει να συνεχίσουμε είναι η 8,5GHz ενώ για τη ρωγή βάθους 3mm είναι η 8.2 GHz.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με αφορμή το πείραμα του των Yeh and Zoughi βασικό κίνητρο ήταν να επιβεβαιωθεί ότι είναι εύκολο και δυνατό να γίνει ανίχνευση ρωγμών σε μεταλλικές επιφάνειες με τη μέθοδο των μικροκυμάτων, χρησιμοποιώντας απλό και οικονομικό εξοπλισμό.

Υλοποιώντας όλο τη πειραματική διαδικασία, στο εργαστήριο της Σχολής Ναυτικών Δοκίμων, επιτεύχθηκε αυτό που θέλαμε να παρατηρήσουμε. Στο εύρος των συχνοτήτων που επιλέξαμε για τις μετρήσεις μας κατά τη μετακίνηση του κυματοδηγού πάνω από τα δύο βάθη της ρωγμής παρατηρήθηκε μεταβολή στο στάσιμο κύμα. Αυτό είναι κάτι που επιβεβαιώνει με σιγουριά την ύπαρξη τους.

Επαναλαμβάνοντας τις μετρήσεις για όλο το εύρος των προτεινόμενων συχνοτήτων ο απώτερος σκοπός ήταν να βρούμε τη συχνότητα εκείνη που θα παρουσίαζε τη καλύτερη μεταβολή στο στάσιμο κύμα. Βασικό ρόλο σε αυτό έπαιξε η σωστή θέση που ήταν τοποθετημένο το πινάκιο του κυματοδηγού ώστε το καλύτερο σήμα να βρίσκεται στις μεσαίες τιμές τάσεων για να είναι πιο εύκολα αναγνωρίσιμη η διαφορά των τάσεων.

Επιπλέον αξίζει να σημειωθεί ότι σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων η μεγάλη πλευρά του κυματοδηγού ήταν παράλληλη με τη σχισμή στη πλάκα. Αυτή η επιλογή έγινε γιατί με βάση τη θεωρία, η μικρή πλευρά του κυματοδηγού είναι παράλληλη προς τα επιφανειακά ρεύματα στη μεταλλική πλάκα με αποτέλεσμα να μη διακόπτει τα ρεύματα της επιφάνειας και να μην προκαλεί μεγάλη μεταβολή σε αυτά.

Στη συνέχεια μετά τις μετρήσεις για τη κάθε ρωγμή από τις τιμές των τάσεων που προέκυψαν για τις αντίστοιχες συχνότητες φτιάξαμε αναλυτικά 8 διαγράμματα τα οποία επικεντρώνονται στο κύριο στόχο μας την εύρεση τη κατάλληλης συχνότητας. Παρατηρήθηκε πως για ρωγμή μεγάλου βάθους κατάλληλη είναι μικρότερη συχνότητα ενώ για ρωγμή μικρού βάθους καταλληλότερη είναι μεγαλύτερη συχνότητα.

Τέλος με όλα τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι η μέθοδος των μικροκυμάτων για την ανίχνευση ρωγμών σε μεταλλική πλάκα είναι ικανή και αποτελεσματική. Αμέσως επόμενο ερευνητικό ενδιαφέρον φαίνεται να είναι η μελέτη άλλων σχισμών διαφορετικού πλάτους και βάθους η ακόμη και υλικά διαφορετικού είδους για την ανίχνευση ρωγμών ή γενικά διάφορων ατελειών.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Ευαγγελία Καραγιάννη, Σημειώσεις Κυματοδηγών, Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, Πειραιάς.
- [2] Χρήστος Βαζούρας, 2014, Σημειώσεις Μικροκυμάτων Κεραίων- Ραδιοσυζεύξεων , Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, Πειραιάς.
- [3] Δημήτριος Αγγελής, Θεόδωρος Ματίκας , 2015, Μη καταστροφικοί έλεγχοι , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [4] Moake G.L, Stanley R.K, 1985, Electromagnetic Methods of Nondestructive Testing W Lord, New York.
- [5] R.Zoughi, A Novel Microwave Method for Detection of Long surface Cracks In Metals, Missouri University of Science and Technology.
- [6] R.Zoughi, S. Kharkovsky, Microwave and Millimetre wave sensors for crack detection.
- [7] Jack Blitz, S.E 1997, Electrical and Magnetic of Methods of Non- Destructive Testing ,Palatino, AFS Image Setters Ltd, Glasgow.
- [8] Stumn W, 1985, Electromagnetic Methods of Nondestructive Testing, W Lord, New York.
- [9] Νεκτάριος Βλαχάκης, Σημειώσεις Ηλεκτρομαγνητισμού, Φυσικό Αθήνας.