

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών

[www.eee.uniwa.gr](http://www.eee.uniwa.gr)

Θηβών 250, Αθήνα-Αιγάλεω 12244  
Τηλ. +30 210 538-1225, Fax. +30 210 538-1226

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
Ηλεκτρικές & Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας



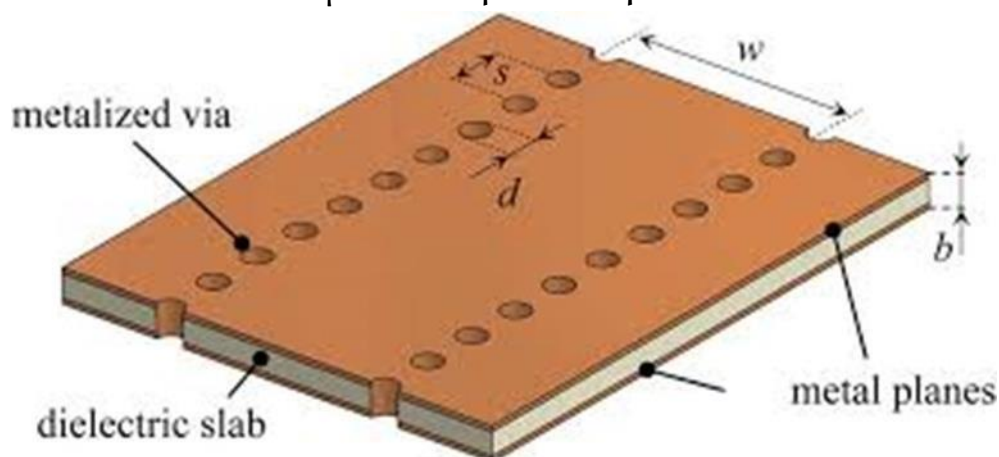
UNIVERSITY of WEST ATTICA  
FACULTY OF ENGINEERING  
Department of Electrical & Electronics Engineering

[www.eee.uniwa.gr](http://www.eee.uniwa.gr)  
250, Thivon Str., Athens, GR-12244, Greece  
Tel: +30 210 538-1225, Fax: +30 210 538-1226

Master of Science By Research in  
*Electrical & Electronics Engineering*

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Διερεύνηση της τεχνολογίας Substrate Integrated Waveguide - SIW  
για εφαρμογές χαμηλού κόστους σε χιλιοστομετρικές συχνότητες  
5G μέσω ευφών κεραιών



Μεταπτυχιακός Φοιτητής: Κοντορινάκης Ευστράτιος, AM 0006

Επιβλέπων: Βουδούρης Κωνσταντίνος, Καθηγητής

ΑΙΓΑΛΕΩ, 18/12/2020

---

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών  
[www.eee.uniwa.gr](http://www.eee.uniwa.gr)

Θηβών 250, Αθήνα-Αιγάλεω 12244  
Τηλ. +30 210 538-1225, Fax. +30 210 538-1226

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
Ηλεκτρικές & Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας



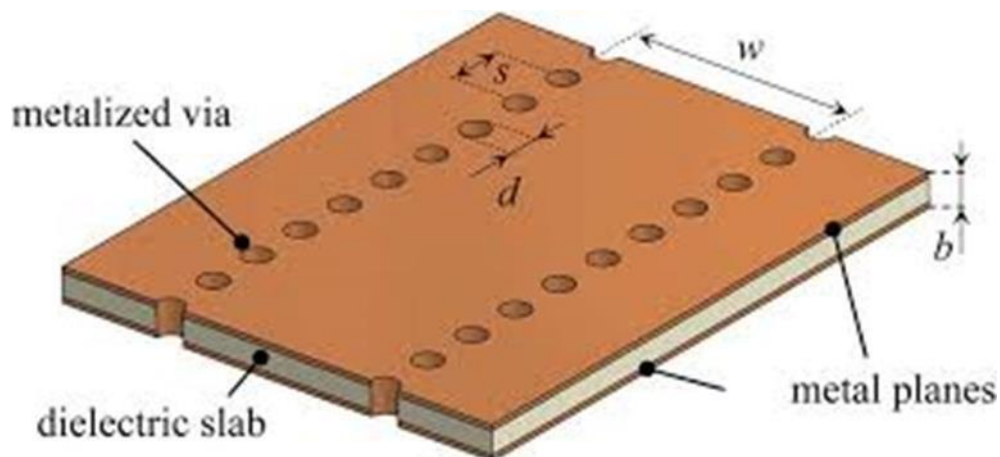
UNIVERSITY of WEST ATTICA  
FACULTY OF ENGINEERING  
Department of Electrical & Electronics Engineering  
[www.eee.uniwa.gr](http://www.eee.uniwa.gr)

250, Thivon Str., Athens, GR-12244, Greece  
Tel: +30 210 538-1225, Fax: +30 210 538-1226

Master of Science By Research in  
Electrical & Electronics Engineering

*MSc Thesis*

## Investigation of the Substrate Integrated Waveguide -(SIW) technologies for low cost millimetre Wave 5G applications via smart antennas



Student name: Efstratios Kontorinakis, Registration Number 0006

Supervisor: Konstantinos N. Voudouris, Professor

ATHENS, 18/12/2020

Η Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή, εξετάστηκε και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή Επιτροπή:

Επιβλέπων	Μέλος	Μέλος
Κωνσταντίνος Βουδούρης	Στυλιανός Σαββαΐδης	Ευάγγελος Ζέρβας
Καθηγητής	Καθηγητής	Καθηγητής

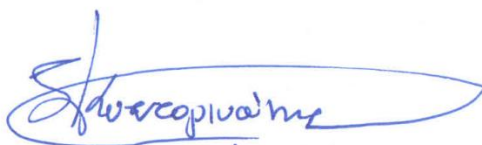
## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Κοντορινάκης Ευστράτιος του Νικολάου με αριθμό μητρώου 006 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών “Ηλεκτρικές και Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας” του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι ο συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας και κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του τίτλου μου».

Ο Δηλών



Μεταπτυχιακός Φοιτητής

## Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία προσεγγίζει τον τρόπο και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του κυματοδηγού ολοκληρωμένου υποστρώματος SIW, με έναν εναλλακτικό τρόπο σχεδίασης. Ο εναλλακτικός κυματοδηγός προσφέρει χαμηλές απώλειες, ευκολία στην κατασκευή με τη χρήση απλών τεχνικών, καθώς και την δυνατότητα ενσωμάτωσης ολόκληρης της δομής σε ένα επίπεδο. Η αντικατάσταση των συμβατικών μεταλλικών κυλίνδρων (vias) του siw κυματοδηγού με συντονιστές διακεκομμένου δακτυλίου (BCSRR) επιτρέπει την σχεδίαση ενός πλήρως επίπεδου κυματοδηγού. Ο siw-BCSRR ενισχύει την μαζική παραγωγή, την ενσωμάτωση και σχεδίαση ηλεκτρικών στοιχείων (ενεργών, παθητικών) σε ελαστικό υπόστρωμα, ξεπερνώντας τους περιορισμούς υλοποίησης των φορετών συστημάτων.

Η μελέτη και η σχεδίαση πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα προσομοίωσής και ανάλυσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων HFSS με σκοπό την λειτουργία στις συχνότητες του 5G δικτύου (24-28 GHz). Η μελέτη αρχικά του SIW κυματοδηγού έδωσε την βάση για την σχεδίαση του SIW-BCSRR κυματοδηγού.

Στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν τα προηγούμενα αποτελέσματα για την σχεδίαση 5G κεραίας σχισμών με αρκετά καλά αποτελέσματα καθιστώντας τον εναλλακτικό κυματοδηγό SIW-BCSRR κατάλληλο για την σχεδίαση ηλεκτρικών εξαρτημάτων στις 5G συχνότητες.

Τέλος αναλύονται τα αποτελέσματα συνοπτικά και προτείνονται σημεία που χρήζουν βελτίωση και αποτελούν το έναυσμα για μετέπειτα μελέτη.

**ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ:** Γραμμή μικροταινίας, Δίκτυο 5g, Έξυπνες κεραίες, Ηλεκτρομαγνητικά κύματα, Κυματοδηγοί, Μεταύλικά, SIW, CSRR.

## Abstract

This thesis approaches the mode and operation characteristics of the substrate integrated waveguide SIW with an alternative design method. This Alternative waveguide offer low losses, ease of construction using simple design techniques and the ability to integrate the entire structure in one level. The replacement of the conventional vias of the siw waveguide with broadband complementary split ring resonator BCSRR allows the design of a complete planar waveguide. SIW-BCSRR. The SIW-BCSRR enhances the mass production, integration and design of electrical elements (active, passive) in an elastic substrate, overcoming the implementation constrains of wearable systems.

The study and design was carried out in HFSS software simulation the of electromagnetic waves in order to operate on the frequencies of the 5G network (24-28 GHz). The study of the SIW waveguide initially provided the base for the design of the SIW-BCSRR waveguide.

The previous results are used to design the 5G slot antenna with fairly good results making the alternative SIW-BCSRR waveguide suitable for designing electrical components at 5G frequencies.

Finally, the results are analyzed briefly and study points that need improvement for further study.

**KEYWORDS:** CSRR, Electromagnetic waves, Metamaterials, Microstrip line, Network 5g, SIW, Smart antennas, Waveguides.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ Κωνσταντίνο Βουδούρη για την συνεχή βοήθεια του στην εκπόνηση της διπλωματικής μου Εργασίας. Με την σωστή του καθοδήγηση και τις στοχευόμενες παρατηρήσεις του μου έδωσε τα εφόδια να συνεχίσω και να ολοκληρώσω αυτήν την προσπάθεια. Τον ευχαριστώ και για την τόσο όμορφη συνεργασία μας. Επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ στην διευθύντρια του προγράμματος “Ηλεκτρικές και Ηλεκτρονικές επιστήμες μέσω Έρευνας” την κα. Ραγκούση Μαρία που στάθηκε δίπλα σε κάθε μεταπτυχιακό φοιτητή ενθαρρύνοντας τον να συνεχίσει και να ολοκληρώσει αυτήν την διαδρομή. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την σύζυγο μου Ζωή για την συμπαράσταση και την υπομονή της

Περίληψη .....	5
Abstract .....	6
Πίνακας Εικόνων .....	10
Πρόλογος .....	13
1.Εισαγωγή .....	15
1.1 Τεχνολογίες 5G και IOT.....	16
1.2 Εισαγωγή στην SIW τεχνολογία.....	17
2.Ανάλυση και σχεδίαση Κυματοδηγού SIW .....	19
2.1 Ανάλυση SIW κυματοδηγού.....	19
2.1.1. Εξισώσεις σχεδίασης SIW κυματοδηγού.....	21
2.1.2 Κανόνες παραμετροποίησης SIW .....	23
2.1.3. Μηχανισμοί απωλειών στους SIW .....	23
2.1.4. Βήματα σχεδίασης Συνοπτικά .....	24
2.2 Σχεδίαση SIW στα 24-28 GHz.....	25
3. Ανάλυση και σχεδίαση μετάβασης SIW με μικροταινία.....	29
3.1. Σύνδεση SIW κυματοδηγού με μικροταινία microstrip.....	29
3.1.1. Προσαρμογή SIW μικροταινίας.....	31
3.2. Σχεδίαση μετάβασης SIW με μικροταινία. ....	34
4. Ανάλυση και σχεδίαση Κυματοδηγού SIW-BCSRR.....	37
4.1. θεωρία Μεταϋλικών .....	37
4.1.1 Κατηγοριοποίηση Μεταϋλικών με βάση $\epsilon$ και $\mu$ .....	38
4.1.2 Ιδιότητες Διπλοαρνητικών Υλικών DNG.....	39
4.1.3 Συντονιστής διακεκομμένου δακτυλίου SRR και συμπληρωματική μορφή CSRR.....	41
4.2. Σχεδίαση συντονιστών.....	43
4.2.1 Σχεδίαση μονού συντονιστή CSRR .....	43
4.2.2. Σχεδίαση διπλού συντονιστή BC-CSRR .....	45
4.2.3 Επίδρασεις των διαφορετικών παραμέτρων .....	48
4.3 Σχεδίαση SIW-CSRR.....	51
5. Ανάλυση και σχεδίαση κεραίας SIW-BCSRR.....	54
5.1. Εισαγωγή στις κεραίες .....	54



5.1.1. Βασικά Χαρακτηριστικά κεραίας .....	55
5.1.2. Κεραία σχισμής (slot).....	59
5.2. Σχεδίαση κεραίας σχισμών SIW-CSRR.....	59
5.2.1. Σχεδίαση κεραίας τριών σχισμών SIW-CSRR.....	62
5.2.2. Σχεδίαση κεραίας έξι σχισμών SIW-CSRR .....	65
6.Συμπεράσματα Μελλοντικές προτάσεις .....	67
Βιβλιογραφία.....	69

## Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1. Απεικόνιση του πλήθους εφαρμογών που θα χρησιμοποιούν το 5g δίκτυο .....	16
Εικόνα 2. Επίπεδες γραμμές μεταφοράς. ....	18
Εικόνα 3. Απλή δομή ορθογώνιου κυματοδηγού. ....	18
Εικόνα 4. Βασικά χαρακτηριστικά SIW δομής [21] .....	19
Εικόνα 5. Επιφανειακά ρεύματα α) ορθογώνιου κυματοδηγού β) siw για TE <sub>10</sub> [1] .....	20
Εικόνα 6. α) κυματοδηγός γεμάτος αέρα (AFW) β) κυματοδηγός γεμάτος διηλεκτρικό (DFW) γ) κυματοδηγός ολοκληρωμένου υποστρώματος γεμάτος διηλεκτρικό ερ SIW ..	22
Εικόνα 7. Η βασική δομή της σχεδίασης SIW δομής στα 26GHz .....	26
Εικόνα 8. Απεικόνιση των S <sub>11</sub> , S <sub>12</sub> Παραμέτρων από την προσημείωση στο hfss.....	27
Εικόνα 9. Σταθερά διάδοσης για τους ρυθμούς TE <sub>10</sub> και TE <sub>20</sub> .....	27
Εικόνα 10. Χαρακτηριστική αντίσταση εισόδων Z <sub>0</sub> .....	28
Εικόνα 11. Γραφήματα έντασης Ηλεκτρικού πεδίου για 24-28 GHz .....	29
Εικόνα 12. Η συνολική κατασκευή ενοποίησης SIW-μικροταινίας [26].....	30
Εικόνα 13. Αναπαράσταση των ηλεκτρικών πεδίων α) ορθογώνιου κυματοδηγού β) μικροταινίας. ....	31
Εικόνα 14. Βασική δομή γραμμής μικροταινίας.....	31
Εικόνα 15. Απεικόνιση Quasi Tem ρυθμού διάδοση γραμμής μικροταινίας.....	32
Εικόνα 16. Εικονικό περιβάλλον του online microstrip calculator emTalk.....	34
Εικόνα 17. Τελική μορφή της σχεδίασης μετάβασης SIW-μικροταινία.....	35
Εικόνα 18. Διάγραμμα με τις S <sub>11</sub> ,S <sub>12</sub> παραμέτρους σκέδασης για TE <sub>10</sub> SIW-μικροταινίας .....	36
Εικόνα 19. Διάγραμμα με την χαρακτηριστική αντίσταση SIW- microstrip Z <sub>0</sub> .....	36
Εικόνα 20. Απεικόνιση του ηλεκτρικού κύματος για TE <sub>10</sub> ρυθμό στην συχνότητα α) 24 GHz και β)26 GHz και γ)28 GHz δ) TE <sub>20</sub> 28 GHz .....	37
Εικόνα 21. Κατηγοριοποίηση των υλικών σύμφωνα με την διηλεκτρική σταθερά και την μαγνητική διαπερατότητα.....	38
Εικόνα 22. Απεικόνιση του φαινομένου με δείκτη διάθλασης Α)Αριστερή εικόνα υλικό με $n > 0$ Β) Δεξιά εικόνα υλικό με $n < 0$ .....	40
Εικόνα 23. Συμπεριφορά του προσπίπτων κύματος σε διπλοαρνητικό μέσο DNG .....	40
Εικόνα 24. Κυκλωματικό ισοδύναμο αριστερά α) S-SRR και δεξιά β) S-CSRR [2].....	42
Εικόνα 25. Στα αριστερά η μορφή S-SRR και στα δεξιά η συμπληρωματική μορφή S-CS .....	44
Εικόνα 26. Ορισμός ομογενούς μαγνητικού πεδίου κατά την διαδικασία της σχεδίασης α) Μαγνητικό πεδίο, β) Ηλεκτρικό πεδίο, γ) Πόρτα σχεδίασης .....	44
Εικόνα 27. S παραμέτρους S <sub>11</sub> (κόκκινη γραμμή) και S <sub>21</sub> (σκούρα γραμμή).....	45
Εικόνα 28. Κυκλωματικό ισοδύναμο BC-CSRR.....	46
Εικόνα 29. Σχεδίαση της μορφής BC-CSRR με διηλεκτρικό υπόστρωμα α) κενό αέρα και β) Rogeer RT 5880.....	46

Εικόνα 30. Οι παράμετροι S11 και S21 του BC-CSRR με διηλεκτρικό υπόστρωμα αέρα.	47
Εικόνα 31. Οι παράμετροι S11 και S21 του BC-CSRR με διηλεκτρικό υπόστρωμα Roger rt 5880.....	47
Εικόνα 32. σχήμα με την αλλαγή της συχνότητας συντονισμού ανάλογα την διηλεκτρική σταθερά.....	48
Εικόνα 33. Η εξάρτησης συχνότητας συντονισμού με το ύψος του υποστρώματος και παραμέτρων S21 .....	49
Εικόνα 34. Σχέδιο με τους παραμέτρους S11για διαφορετικές τιμές στην εξωτερική ακτίνα .....	49
Εικόνα 35. Σχέδιο με τους παραμέτρους S11για διαφορετικές τιμές στην εσωτερική ακτίνα .....	50
Εικόνα 36. Σχεδιάγραμμα εξάρτησης πάχος δακτυλίου w με την συχνότητα συντονισμού fo.....	51
Εικόνα 37. S11και S21 παράμετροι κυματοδηγού SIW .....	52
Εικόνα 38. Οι S παράμετροι κυματοδηγού SIW-CSRR.....	53
Εικόνα 39. Γραφήματα ηλεκτρικού πεδίου στις συχνότητες 24-28GH.....	54
Εικόνα 40. Διάγραμμα ακτινοβολίας σε διαστάσεις 1d,2d,και 3d .....	57
Εικόνα 41. Από αριστερά προς τα δεξιά απεικονίζονται η γραμμική , κυκλική και ελλειπτική πόλωση ηλεκτρομαγνητικού κύματος [3]......	58
Εικόνα 42. Απεικόνιση της βασικής δομής κεραίας SIW-CSRR με μία σχισμή (slot).....	60
Εικόνα 43. Οι S11 παράμετροι συνάρτηση της συχνότητας για διαφορετικές αποστάσεις από τον τερματισμό.....	61
Εικόνα 44. Μεταβολή συχνότητας fo συνάρτηση της απόστασης βραχυκυκλώματος slot end.....	61
Εικόνα 45. Μεταβολή συχνότητας fo συνάρτηση της του μήκους της σχισμής .....	62
Εικόνα 46. Απεικόνιση της βασικής δομής κεραίας SIW-CSRR τριών slot α) κάτω πλευρά, β) πάνω πλευρά.....	63
Εικόνα 47 Παράμετροι σκέδασης S11 για την κεραίας με τις τρεις σχισμές. ....	63
Εικόνα 48. Διάγραμμα ακτινοβολίας κέρδους σε dBi στην συχνότητα συντονισμού 26.2 GHz .....	64
Εικόνα 49. Διάγραμμα συνολικής ακτινοβολίας σε dB στην συχνότητα συντονισμού 26.2 GHz .....	64
Εικόνα 50. Απεικόνιση της βασικής δομής κεραίας SIW-CSRR με έξι slot α) κάτω πλευρά, β) πάνω πλευρά.....	65
Εικόνα 51. Παράμετροι σκέδασης S11 για την κεραίας με έξι σχισμές. ....	65
Εικόνα 52. Διάγραμμα συνολικής ακτινοβολίας στην συχνότητα συντονισμού 26.6 GHz. ....	66
Εικόνα 53 .Διάγραμμα ακτινοβολίας κέρδους σε dBi στην συχνότητα συντονισμού 26.6 GHz. ....	66

Εικόνα 54. Διάγραμμα ακτινοβολίας κέρδους σε dBi στην συχνότητα συντονισμού 24.9 GHz. ....	67
--	----

## Πρόλογος

Η ραγδαία ανάπτυξη τεχνολογιών στις τηλεπικοινωνίες προσελκύει το ενδιαφέρον τόσο της βιομηχανίας όσο και των ερευνητών για νέες τεχνολογίες σε εφαρμογές όπου θα προσφέρουν υψηλές ταχύτητες και θα καλύπτουν μεγάλο αριθμό χρηστών. Αναζήτηση οικονομικών καλής ποιότητας κατασκευών που να επιτρέπουν την μαζική παραγωγή είναι το κλειδί της επιτυχίας. Οι τεχνολογίες των προηγούμενων ετών αδυνατούν να καλύψουν αυτό το κενό γιατί οι επίπεδες γραμμές μεταφοράς που είναι ικανές να μεταφέρουν ηλεκτρομαγνητικό κύμα πάσχουν από υψηλές απώλειες στις υψηλές συχνότητες. Σε αντίθεση οι κυματοδηγοί ξεπερνάνε αυτό το πρόβλημα αλλά είναι ογκώδεις και δύσκολοι στην κατασκευή τους.

Ο κυματοδηγός ολοκληρωμένου υποστρώματος (Substrate Integrated Waveguide) SIW είναι μια νέα τεχνολογία που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο προηγούμενων τεχνολογιών δημιουργώντας μια οικονομική μικρού μεγέθους και με χαμηλές απώλειες τηλεπικοινωνιακή δομή. Ο SIW επιτρέπει την μαζική παραγωγή με κατασκευαστικές τεχνολογίες επίπεδου υποστρώματος. Με βάση όλων των παραπάνω ο SIW κυματοδηγός είναι η τεχνολογία που μπορεί να καλύψει τις τωρινές τηλεπικοινωνιακές ανάγκες .

Βασικός στόχος της εργασίας είναι να δώσει όλα τα εφόδια θεωρητικά και σχεδιαστικά σχετικά με την δομή την λειτουργία και εκμάθηση της SIW τεχνολογίας. Με την χρήση σχεδιαστικού προγράμματος με βάση τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία HFSS θα σχεδιαστεί η βασική δομή SIW Κυματοδηγού θα γίνει προσημείωση και τέλος να αναλυθούν τα αποτελέσματα και να βγουν κρίσιμα συμπεράσματα.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στις τεχνολογικές επιτεύξεις και ορίζεται ο προβληματισμός και οι δυσκολίες που πρέπει να αντιμετωπιστούν.

Στο δεύτερο κεφάλαιο μελετάται η βασική δομή SIW κυματοδηγού παραθέτοντας σχεδιαστικούς κανόνες και εξισώσεις για το βέλτιστο αποτέλεσμα . Στην γίνεται η σχεδίαση του κυματοδηγού προσθέτοντας και το τμήμα μετάβασης της μικροταινίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται και σχεδιάζεται το τμήμα της μετάβασης μικροταινίας και στην συνέχεια ενσωματώνεται στον siw κυματοδηγό

Στο τέταρτο κεφάλαιο στηριζόμενη στην προηγούμενη μελέτη αναλύεται και σχεδιάζεται μια εναλλακτική μορφή του siw κυματοδηγού αντικαθιστώντας τα συμβατικά νίος με στοιχεία μεταύλικών BCSRR

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη εισαγωγή στα βασικά χαρακτηριστικά της κεραίας και στην συνέχεια σχεδιάζεται κεραία εγκοπής-σχισμής για λειτουργία στις συχνότητες δικτύου 5g.

Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο αναφέροντα τα συμπεράσματα που προέκυψαν και φωτίζονται προβληματικές πλευρές που χρίζουν βελτίωση παραθέτοντας υποψήφιες λύσεις.

## 1.Εισαγωγή

Νέες τεχνολογίες και πλήθος εφαρμογών στις τηλεπικοινωνίες αναπτύσσονται τα τελευταία χρόνια με γοργούς ρυθμούς και νέες απαιτήσεις για λειτουργία συσκευών και συστημάτων σε μεγαλύτερο φάσμα συχνοτήτων έρχονται στο παρασκήνιο. Η ανάπτυξη τεχνολογιών ενσωμάτωσης χιλιοστομετρικών κυμάτων (κύμα mm) είναι κρίσιμη για την εξέλιξη των ασύρματων συστημάτων και των ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών για τα επόμενα χρόνια. Σκοπός είναι η διαθεσιμότητα οικονομικά αποδοτικών τεχνολογιών που να επιτρέπουν την μαζική παραγωγή και να προσφέρουν υψηλή ποιότητα κατασκευής με χαμηλές απώλειες. Για εμπορικές εφαρμογές οι παραπάνω λόγοι αποτελούν αντικείμενο έρευνα και ανάπτυξης για τα επόμενα χρόνια.

Αυτή η τάση δεν θα μπορούσε να μην επηρεάσει και την σχεδίαση των κεραιών ως ένα από τα βασικότερα εξαρτήματα στις ασύρματες επικοινωνίες. Η πιο διαδεδομένη μορφή κεραιάς είναι η κεραιά μικροταινίας και είναι ιδιαίτερα γνωστή για την εύκολη κατασκευή σε επίπεδη μορφή. Η πρώτη κεραιά μικροταινίας αρχικά προτάθηκε το 1950[1] microstrip patch antenna MPA. Στην συνέχεια ποικιλία σχημάτων έχουν ερευνηθεί ώστε να βελτιώσουν τις διαστάσεις και το κέρδος[2]–[4] . Με βασικό μειονέκτημα τις αυξημένες πλευρικές απώλειες στις υψηλές συχνότητες και το στενό εύρος ζώνης ανοίγει τον δρόμο στην διερεύνηση νέων τεχνολογιών.

Ο κυματοδηγός ολοκληρωμένου υποστρώματος SIW substrate integrated waveguide στην συνέχεια αποτέλεσε την επίπεδη μορφή του ορθογώνιου μεταλλικού κυματοδηγού διατηρώντας τα πλεονεκτήματα του ορθογώνιου κυματοδηγού σε μειωμένο μέγεθος, βρίσκοντας χρήση σε πλήθος εφαρμογών . Ποικιλία τέτοιων εφαρμογών έχουν προταθεί σε διαφορετικούς τομείς, με εφαρμογές στην περιοχή συχνοτήτων στην X και K μπάντα συχνοτήτων περιλαμβάνοντας, ασύρματα δίκτυα[5] , ραντάρ αυτοκινήτου[6] εφαρμογές στον τομέα της υγείας[7]. Στον χώρο της μαζικής παραγωγής και των φορετών συστημάτων η συγκεκριμένη τεχνολογία υστερεί λόγω της δυσκολίας κατασκευής και της ακαμψίας που δημιουργούν η τοποθέτηση και επιμετάλλωση των μεταλλικών νιás.

Τα μεταύλικά είναι τεχνητές δομές που αποτελούνται από περιοδικά κελιά – unit με ποιο γνωστούς τους συντονιστές διακεκομμένου δακτυλίου και παρουσιάζουν μαγνητικές και ηλεκτρικές ιδιότητες που δεν εμφανίζονται στα φυσικά υλικά όπως προτάθηκε από τον J. Pendry το 1999[8].Οι συντονιστές διακεκομμένου δακτυλίου ποικίλουν σε σχήματα και μπορούν να χαραχθούν πάνω στην αγωγίμη επιφάνεια. Η χρήση συντονιστών διακεκομμένων δακτυλίων είναι ιδιαίτερα γνωστή στην σχεδίαση τηλεπικοινωνιακών εξαρτημάτων και ιδιαίτερα στις κεραιές μειώνοντας το μέγεθος της

κεραίας και βελτιώνοντας τους διάφορους παραμέτρους όπως ,αύξηση του κέρδους, ενίσχυση του εύρους λειτουργίας σε συχνότητες πολλαπλών ζωνών[9].

Συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας του siw (substrate integrated waveguide) και των συντονιστών μεταύλικών CSRR ποικιλία συσκευών έχουν δημιουργηθεί για λειτουργία σε υψηλότερες συχνότητες και την μείωση των φυσικών διαστάσεων[10]–[13] διατηρώντας όμως την δυσκολία κατασκευής λόγω της siw τεχνολογίας. Το 2017 ένας εναλλακτικός κυματοδηγός αντικαθιστά τα συμβατικών νίας με bcsrr δημιουργώντας έναν πλήρως επίπεδο κυματοδηγό διατηρώντας τις μικρές διαστάσεις, με ευκολία στην κατασκευή αποφεύγοντας τεχνικές επιμετάλλωσης[14]. Μεταγενέστερες μελέτες της νέας τεχνολογίας κυματοδηγού παρουσιάζουν δομές με χαμηλές απώλειες παρόμοιες με αυτή του siw σε επίπεδη δομή.

Σε αυτήν την εργασία προτείνεται η σχεδίαση μια πλήρως επίπεδης κεραίας για λειτουργία στις 5g συχνότητες δικτύων στην Ka μπάντα χρησιμοποιώντας απλές μαθηματικές εξισώσεις και στην συνέχεια την βελτιστοποίηση της σχεδίασης με την βοήθεια του hfss προγράμματος σχεδίαση και προσομοίωσης H/M κυμάτων. Η συγκεκριμένη κεραία λειτουργεί σε δύο συχνότητες με μέγιστο κέρδος στην κεντρική συχνότητα 5g (26,5ghz) κοντά στα 11dBi βρίσκοντας χρήση σε εφαρμογές των 5g δικτύων.

## 1.1 Τεχνολογίες 5G και IOT



Εικόνα 1. Απεικόνιση του πλήθους εφαρμογών που θα χρησιμοποιούν το 5g δίκτυο

Στο άμεσο μέλλον νέες τεχνολογίες δείχνουν το ενδιαφέρον τους στην εξέλιξη τηλεπικοινωνιακών συστημάτων σε ακόμα υψηλότερες συχνότητες . Η τεχνολογία



Internet of things η αλλιώς και τεχνολογία των πραγμάτων αποτελεί πλήθος συσκευών από βιομηχανικές συσκευές μέχρι και φορητές συσκευές wearable systems χρησιμοποιώντας ενσωματωμένους αισθητήρες συλλέγοντας και μεταδίδοντας δεδομένα με γρήγορους ρυθμούς.

Ακόμα μια ανερχόμενη τεχνολογία βασίζεται στο πρωτόκολλο 5G. Ένα καινούριο πρωτόκολλο επικοινωνίας το οποίο θα υποστηρίζει την διασύνδεση διαφορετικών συσκευών με ταχείς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και δυνατότητα εξυπηρέτησης πολλών χρηστών ταυτόχρονα. Στόχος του δικτύου 5g είναι οι υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων οι οποίες ξεπερνάνε κατά 10 φορές τις ταχύτητες που παρείχε η προηγούμενη γενιά 4G.

Το 5<sup>ης</sup> γενιάς δίκτυο 5G [15] θα λειτουργεί στις χιλιοστομετρικές συχνότητες σε τρεις βασικές κατηγορίες Α)χαμηλά (low) Β) μεσαία (mid) και Γ) υψηλά (high). Σύμφωνα με τον οργανισμό σύμφωνα με την Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων ΕΕΤΤ οι πιθανές συχνότητες λειτουργίας high για τη Ευρώπη την θα είναι 24.5-27.5 GHz

Α) 0.6-0.7 GHz

Β) 3.4-3.8 GHz

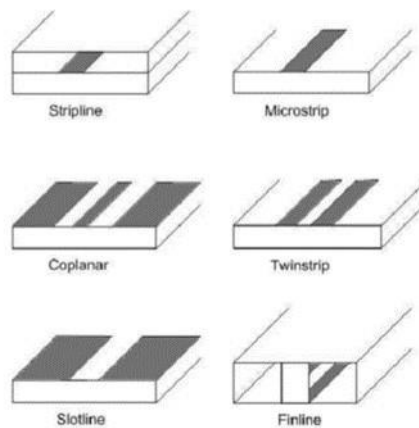
Γ) 24-39 GHz

Πλήθος εφαρμογών στον κλάδο των τηλεπικοινωνιών αναμένονται να δημιουργηθούν τα επόμενα χρόνια όπου έχει οριστεί να μπει και σε εφαρμογή η χρήση συχνοτήτων που να υποστηρίζουν το 5G δίκτυο. Το κλειδί για τις επόμενες τεχνολογίες στις τηλεπικοινωνίες είναι η ανάπτυξη δομών με χαμηλό κόστος, ευκολία στην κατασκευή και να υποστηρίζουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης πληροφορίας.

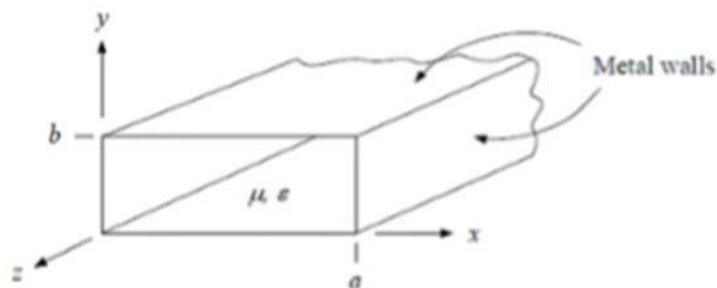
## 1.2 Εισαγωγή στην SIW τεχνολογία

Στις υψηλές συχνότητες που το μήκος κύματος είναι συγκρίσιμο με το ίδιο το καλώδιο, τα καλώδια σύνδεσης δεν λειτουργούν σαν απλά βραχυκυκλώματα αλλά οι ιδιότητες του καλωδίου επηρεάζουν σημαντικά την πληροφορία αυξάνοντας τις απώλειες. Τα καλώδια που δουλεύουν στις ψηλές συχνότητες ονομάζονται γραμμές μεταφοράς. Οι γραμμές μεταφοράς χρησιμοποιούνται για την μεταφορά ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας από ένα σημείο σε ένα άλλο σε υψηλές συχνότητες με χαμηλές απώλειες. Οι επίπεδες γραμμές μεταφοράς (planar transmission line) Εικόνα 2 είναι γνωστές γιατί είναι οικονομικές και μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν με άλλα ενεργά και παθητικά ηλεκτρονικά στοιχεία. Σε ακόμα υψηλότερες συχνότητες οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας, διηλεκτρικού υποστρώματος και επιδερμικού φαινομένου

(skin effect) τις καθιστούν όχι την βέλτιστη λύση για την σχεδίαση και χρήση εφαρμογών στην λειτουργία χιλιοστομετρικών συχνοτήτων[16]. Σε αντίθεση οι κλασικοί ορθογώνιοι κυματοδηγοί (Rectangular Waveguide) RWG Εικόνα 3 προσφέρουν υψηλή ποιότητα κατασκευής και παρουσιάζουν τις χαμηλότερες απώλειες από τις άλλες γραμμές μεταφοράς αλλά είναι ιδιαίτερα ογκώδεις και το κόστος κατασκευής είναι υψηλό. Ακόμα παρουσιάζουν μεγάλη δυσκολία στην σύνδεση με άλλες γραμμές μεταφοράς γιατί η κατασκευή γίνεται ιδιαίτερα περίπλοκη και απαιτεί μεγάλη ακρίβεια για να ενσωματωθεί με άλλα επίπεδα κυκλώματα.



Εικόνα 2. Επίπεδες γραμμές μεταφοράς.



Εικόνα 3. Απλή δομή ορθογώνιου κυματοδηγού.

Λύση στα παραπάνω προβλήματα έρχεται να δώσει μια νέα τεχνολογία η οποία συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του ορθογώνιου κυματοδηγού και της επίπεδης γραμμής μεταφοράς. Ο κυματοδηγός ολοκληρωμένου υποστρώματος (Substrate Integrated waveguide) SIW [17][18] προσφέρει χαμηλές απώλειες λόγω υψηλής

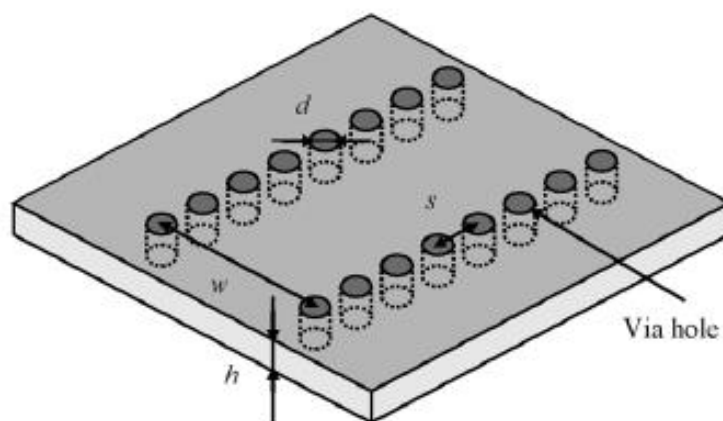
ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης, υψηλό συντελεστή ποιότητας  $Q$ , και την δυνατότητα υλοποίησής στο ίδιο υπόστρωμα. Η μορφή του SIW κυματοδηγού Εικόνα 4 είναι διάταξη που μοιάζει με την δομή του ορθογώνιου κυματοδηγού, καθώς αποτελείται από δύο παράλληλες σειρές κυλινδρικών αγωγών (vias) αντικαθιστώντας τα μεταλλικά πλευρικά τοιχώματα του RWG και από δύο λεπτά φύλλα αγωγίμου υλικού συνήθως χαλκού. Τα vias τοποθετούνται κάθετα στα δύο αγωγίμα φύλλα χαλκού διατρυπώντας το υπόστρωμα που βρίσκεται ανάμεσα και συνδέοντας τα δύο μεταλλικά επίπεδα.

Επίπεδες τεχνικές κατασκευής ηλεκτρικών πλακετών μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην τεχνολογία SIW με βασικές από αυτές LTCC (low-temperature co-fired ceramic) και HTCC (high-temperature co-fired ceramic)[19], κατασκευή PCB (printed circuit board)[20] υλοποιώντας όλα τα ηλεκτρικά στοιχεία (ενεργά στοιχεία και παθητικά) στο ίδιο επίπεδο της πλακέτας επιτρέποντας την μαζική παραγωγή με χαμηλό κόστος. Σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία λαμβάνοντας υπόψη τα κριτήρια κόστους, την ευκολία κατασκευής και της υψηλής απόδοσης, η τεχνολογία SIW είναι ή κατάλληλη τεχνολογία για την σύνθεση αξιόπιστων ηλεκτρικών κυκλωμάτων για την ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών.

## 2. Ανάλυση και σχεδίαση Κυματοδηγού SIW

### 2.1 Ανάλυση SIW κυματοδηγού

Ένας κυματοδηγός ολοκληρωμένος σε υπόστρωμα Εικόνα 4 αποτελείται από δύο αγωγίμες πλάκες συνήθως είναι χαλκός και ενδιάμεσα τοποθετείτε διηλεκτρικό υπόστρωμα. Στην συνέχεια δύο παράλληλες σειρές κυλινδρικών αγωγών vias τοποθετούνται κάθετα συνδέοντας τις δύο μεταλλικές πλάκες και διατρυπώντας στο ενδιάμεσο το υπόστρωμα.



Εικόνα 4. Βασικά χαρακτηριστικά SIW δομής [21]

Κατά την εισαγωγή των κυλινδρικών αγωγών η μεταξύ τους απόσταση θα πρέπει να είναι αρκετά μικρή (συγκρίσιμη με το μήκος κύματος του κυματοδηγού) έτσι ώστε να περιορίζει την διαρροή του ηλεκτρομαγνητικού κύματος από τον κενό χώρο μεταξύ τους. Το κύμα εγκλωβίζεται ανάμεσα από τις δύο σειρές και διαδίδεται κατά μήκος του κυματοδηγού παράλληλα των νίας. Η ομοιότητα των πλευρικών τοιχωμάτων του ορθογώνιου μεταλλικού κυματοδηγού RWG με τις αντίστοιχες σειρές των νίας στον SIW κυματοδηγό μεταφράζεται και στην ομοιότητα των χαρακτηριστικών της διάδοσης του κύματος.

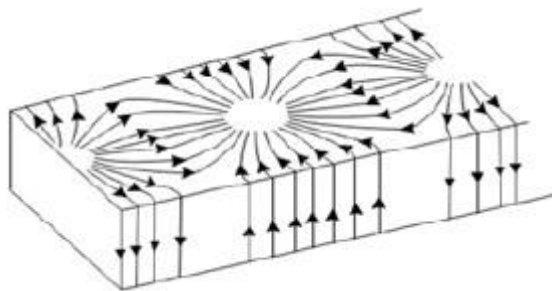
Τα βασικά χαρακτηριστικά που δομούν ένα SIW κυματοδηγό είναι:

$S$ : απόσταση μεταξύ των κέντρων δύο κυλινδρικών αγωγών νίας.

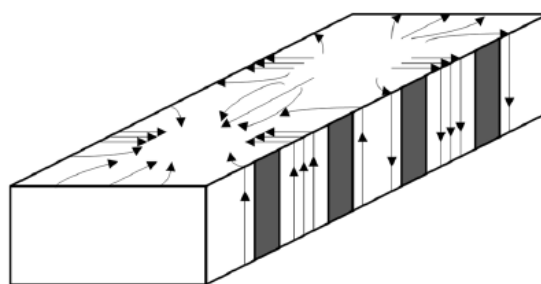
$d$ : διάμετρος των κυλινδρικών αγωγών νίας.

$h$ : ύψος του διηλεκτρικού υποστρώματος νίας.

$W$  : η απόσταση των απέναντι κυλινδρικών αγωγών από τα κέντρα τους.



α



β

Εικόνα 5. Επιφανειακά ρεύματα α) ορθογώνιου κυματοδηγού β) siw για TE<sub>10</sub> [1]

Παρά τις ομοιότητες των χαρακτηριστικών διάδοσης μεταξύ των δύο κυματοδηγών ο SIW αδυνατεί να διαδώσει όλους τους ρυθμούς των εγκάρσιων μαγνητικών κυμάτων και διαδίδει μόνο τους TE<sub>m0</sub> ρυθμούς των εγκάρσιων ηλεκτρικών

κυμάτων. Η αιτία αυτού του περιορισμού είναι ότι η συνιστώσα ρεύματος των ρυθμών που εμποδίζονται έχουν την ίδια κατεύθυνση με τον άξονα διάδοσης του κύματος μέσα στον κυματοδηγό. Για την διάδοση των  $TE_{mn}$  ρυθμών πρέπει τα επιφανειακά ρεύματα στα πλευρικά τοιχώματα να είναι συνεχή Εικόνα 5β. Στην διάδοση των  $TM$  και  $TE_{m0}$  τα επιφανειακά ρεύματα είναι διαμήκη στα πλευρικά τοιχώματα, το κενό ανάμεσα στα νίας θα δημιουργήσει σχισμές με αποτέλεσμα να ακτινοβολούν πλευρικά.

### 2.1.1. Εξισώσεις σχεδίασης SIW κυματοδηγού

Η διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο εσωτερικό του κυματοδηγού περιορίζεται από την φυσική δομή του με αποτέλεσμα να μην μπορεί να λειτουργήσει σε όλο το φάσμα συχνοτήτων αλλά από μια συχνότητα και πάνω. Η χαμηλότερη συχνότητα λειτουργίας ονομάζεται συχνότητα αποκοπής  $f_c$  και για τον κάθε ρυθμό είναι διαφορετική και δίνεται από την

Εξίσωση 1[22]. Η σχεδίαση ενός κυματοδηγού ξεκινά με την επιλογή του πλάτους  $a$  RWG με την συχνότητα αποκοπής  $f_c$  του να είναι χαμηλότερη από την μικρότερη συχνότητα του επιθυμητό εύρος λειτουργίας. Το εύρος ζώνης συχνοτήτων επιλέγεται να είναι μεταξύ  $1.25f_c$  και  $1.9f_c$  έτσι ώστε να υπάρχει η διάδοση μόνο του επικρατέστερου ρυθμού  $TE_{10}$  και εξασθένιση των υπολοίπων με τον αμέσως επόμενο να είναι ο  $TE_{20}$ . Η συχνότητες ενδιαφέροντος  $F_{BW}$  θα κυμαίνονται  $f_{cTE_{10}} < f < f_{cTE_{20}}$ .

*Εξίσωση 1*

$$f_c TE_{mn} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}$$

*Εξίσωση 2*

$$f_{cTE_{10}} = \frac{c}{2a}$$

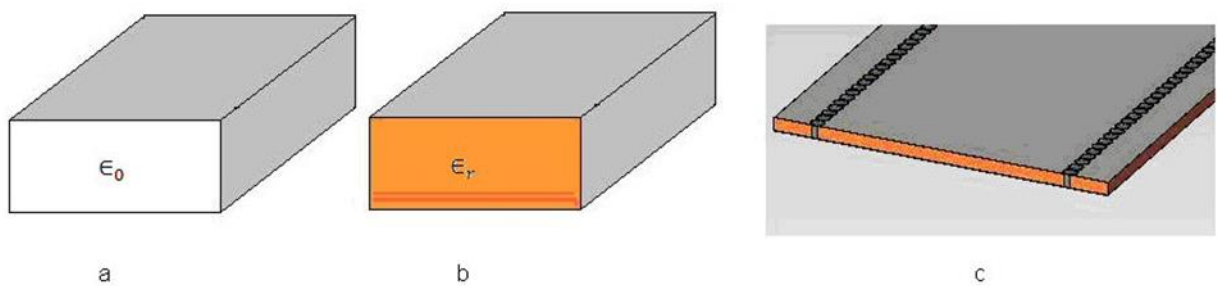
$c$  : Ταχύτητα του κύματος στο κενό

$m, n$  : οι ρυθμοί διάδοσης  $TE_{mn}$

$a$  : η πλευρά με το μεγαλύτερο πλάτος στον ορθογώνιο κυματοδηγού RWG.

Λόγω της περιοδικότητας και της ανομοιομορφίας της SIW δομής απαιτούνται εξειδικευμένες αναλύσεις και αναπτυγμένες υπολογιστικές μέθοδοι. Εκμεταλλευόμενοι την ομοιότητα SIW με τον RWG χρησιμοποιούμε τις γνωστές μεθόδους ενός κυματοδηγό ορθογώνιας διατομής RWG για να υπολογίσουμε τα φυσικά χαρακτηριστικά και στην συνέχεια θα τα αντικαταστήσουμε με αυτά του SIW.

Αντικαθιστώντας τον αέρα στο εσωτερικό του RWG Εικόνα 6.α με διηλεκτρικό  $\epsilon_r$  δημιουργούμε ένα ισοδύναμο πλάτος Εικόνα 6b «ενεργό πλάτος»  $W_{eff}$  (Εξίσωση 3)[23] θα χρησιμοποιηθεί στην συνέχεια αυτή η παράμετρος για να υπολογιστεί το πλάτος SIW κυματοδηγού. Εικόνα 6 .c[24]. Εφαρμόζοντας την εξίσωση 2 στην εξίσωση 3 έχουμε το πλάτος του SIW κυματοδηγού (Εξίσωση 4).



Εικόνα 6. α) κυματοδηγός γεμάτος αέρα (AFW) β) κυματοδηγός γεμάτος διηλεκτρικό (DFW) γ) κυματοδηγός ολοκληρωμένου υποστρώματος γεμάτος διηλεκτρικό  $\epsilon_r$  SIW

Εξίσωση 3

$$W_{eff} = \frac{c}{2f_{cTE_{10}}\sqrt{\epsilon_r}}$$

Εξίσωση 4

$$W_{siw} = W_{eff} + \frac{d^2}{0.95s}$$

Για να υπολογίσουμε την συχνότητα αποκοπής στον SIW χρησιμοποιούμε τη εξίσωση 5 με  $d$  και  $S$  είναι τα χαρακτηριστικά όπως απεικονίζονται στην εικόνα 4.

Εξίσωση 5

$$f_{cTE_{10}} = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \left( W_{eff} - \frac{d^2}{0.95s} \right)$$

### 2.1.2 Κανόνες παραμετροποίησης SIW .

Για την επιτυχή σχεδίαση SIW κυματοδηγού δεν αρκούν οι εξισώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω αλλά θα πρέπει να οριστούν κανόνες σχεδίασης που έχουν προκύψει από προηγούμενες έρευνες για το βέλτιστο αποτέλεσμα και ελαχιστοποίηση των απωλειών.

- Τα δύο μεγέθη της απόστασης  $S$  και της διατομής  $d$  των νίας συνδέονται μεταξύ τους από τον λόγο  $s/d$  και οδηγούν στην ελαχιστοποίηση των πλευρικών απωλειών ακτινοβολίας. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η πυκνή τοποθέτηση των νίας προσομοιάζουν ένα μεταλλικό τοίχωμα. Αντιθέτως η αραιή τοποθέτηση των νίας δημιουργούν κενά όπου μεγάλο ποσοστό του οδεύοντάς κύματος διαφεύγει. Μια ασφαλής περίπτωση με χαμηλές πλευρικές απώλειες είναι ο λόγος  $s/d < 2.5$
- Το πλάτος του κυματοδηγού  $W_{siw}$  και αντίστοιχα ο λόγος  $d/W_{siw}$  επηρεάζει τον λόγο  $s/d$ . Όταν το  $W_{siw} > 5d$  ο λόγος  $s/d$  παίρνει τιμές μικρότερες του 2 ενώ στην περίπτωση που  $W_{siw} > 8d$  ο λόγος  $s/d$  παίρνει τιμές μικρότερες του  $< 2.5$
- Για την αποφυγή εμφάνισης επόμενου ρυθμού διάδοσης και την διατήρηση της συχνότητας αποκοπής  $f_c$  σε συχνότητες εντός του εύρους ζώνης θα πρέπει η απόσταση  $s$  να είναι υποπολλαπλάσιο του μήκους κύματος στην συχνότητα αποκοπής  $\lambda_c$  σύμφωνα με την σχέση  $S < 0.25 \lambda_c$  (Εξίσωση 6).
- Λόγω φυσικών διαστάσεων η απόσταση  $s$  δεν μπορεί να είναι μικρότερη από την διάμετρο  $d$ .

*Εξίσωση 6*

$$\lambda_c = \frac{c_0}{f_{cTE10} \sqrt{\epsilon_r}}$$

Από τις παραπάνω σχέσεις το ύψος του διηλεκτρικού υποστρώματος δεν επηρεάζει την συχνότητα λειτουργίας με αποτέλεσμα να μην τίθεται κάποιος περιορισμός στην επιλογή της πλακέτας.

### 2.1.3. Μηχανισμοί απωλειών στους SIW

Μια SIW δομή παρουσιάζει τρεις διαφορετικούς μηχανισμούς απωλειών όπως αναφέρονται παρακάτω.

- Απώλειες αγωγού με σταθερά εξασθένησης  $l_c$  που παρουσιάζονται από την πεπερασμένη αγωγιμότητα των αγωγίμων επιφανειών συνήθως π.χ χαλκός
- Απώλειες διηλεκτρικού με σταθερά εξασθένησης  $l_d$  λόγω της διηλεκτρικής σταθεράς και της εφαιπτομένη του υλικού υποστρώματος.
- Απώλειες ακτινοβολίας με σταθερά εξασθένησης  $l_r$  που οφείλονται στις φυσικές διαστάσεις της διαμέτρου και της απόστασης των νίας με τον λόγο  $s/d$ .

Οι συνολικές απώλειες  $L_{total}$  που παρουσιάζονται σε έναν SIW κυματοδηγό αποτελούν το άθροισμα το απωλειών που αναφέρθηκαν παραπάνω και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$L_{total} = l_c + l_d + l_r$$

Σύμφωνα με προηγούμενες έρευνες [1] αναφέρεται ότι από τις συνολικές απώλειες την μεγαλύτερη βαρύτητα έχουν οι απώλειες που παρουσιάζει ο αγωγός  $l_c$ . Η χρήση καλής ποιότητας κατασκευαστικής πλακέτας είναι κρίσιμη στην σχεδίαση εξαρτημάτων για λειτουργία σε χιλιοστομετρικές συχνότητες, μειώνοντας τις απώλειες αλλά αυξάνοντας φυσικά και το κόστος όποτε κάθε σχεδίαση θέλει ιδιαίτερη προσοχή και στα υλικά που θα την δομήσουν και κατά πόσο εύκολη είναι η διαδικασίας της κατασκευής.

#### 2.1.4. Βήματα σχεδίασης Συνοπτικά

Για την σχεδίαση το επιθυμητό εύρος συχνοτήτων κυμαίνεται από τα  $24\text{GHz}$  μέχρι τα  $29\text{GHz}$  με σκοπό την λειτουργία στο 5g δίκτυο. Την βάση της σχεδίασης θα αποτελέσει η σχεδίαση του SIW κυματοδηγού έτσι ώστε να επιτρέπεται η διάδοση του επικρατέστερου ρυθμού TE<sub>10</sub> και την εξασθένηση του αμέσως επομένου TE<sub>20</sub>.

Συγκεντρωτικά τα βήματα για την σχεδίαση SIW κυματοδηγού περιγράφονται παρακάτω :

1. Η συχνότητα αποκοπής  $f_{cTE10}$  επιλέγεται να είναι κάτω από την χαμηλότερη συχνότητα του επιθυμητού εύρους συχνοτήτων δηλαδή να είναι χαμηλότερη από τα  $24\text{GHz}$ .
2. Έχοντας υπολογίσει την συχνότητα αποκοπής  $f_{cTE10}$  στην συνέχεια υπολογίζουμε και το αντίστοιχο μήκος κύματος  $\lambda_c = \frac{c_0}{f_{cTE10}\sqrt{\epsilon_r}}$



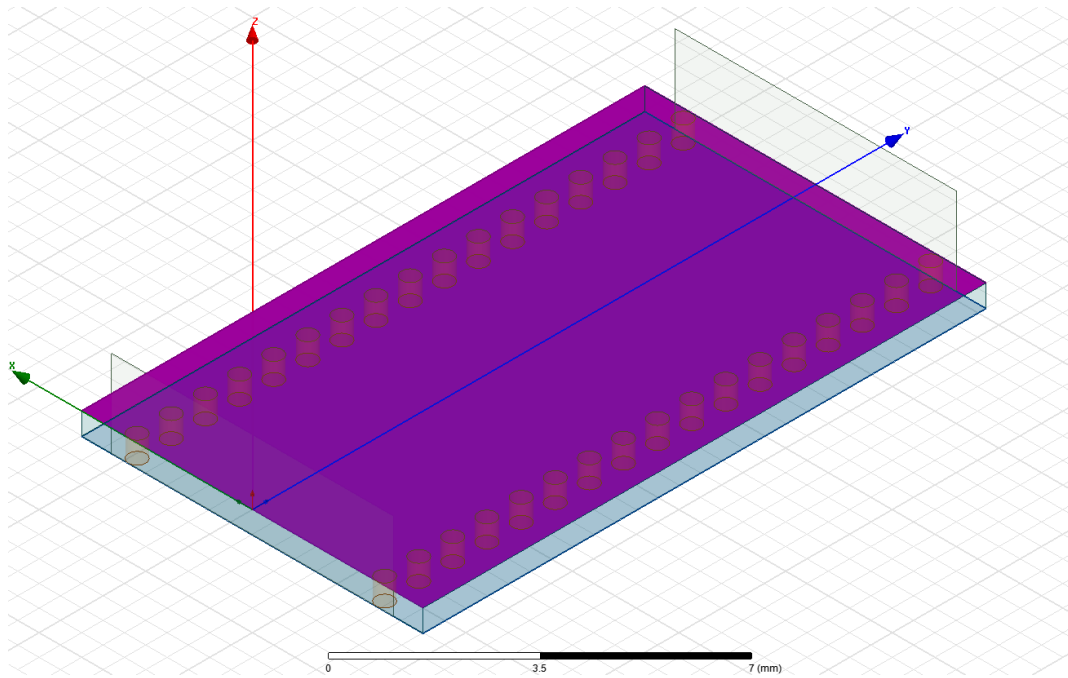
3. Η απόσταση  $S$  και η διάμετρος  $d$  των νιαι υπολογίζονται σύμφωνα την συνθήκη ότι  $0.005\lambda c < S < 0.25 \lambda c$
4. Υπολογισμός του πλάτους του ισοδύναμου κυματοδηγού  $w_{eff} = \frac{c}{2f_{cTE_{10}}\sqrt{\epsilon_r}}$
5. Σύμφωνα με το πλάτος του  $siw$  κυματοδηγού  $W_{siw}$  ελέγχουμε αν η επαληθεύεται η συνθήκη  $\frac{d}{w_{siw}} < \frac{1}{8}$  με  $d = \frac{s}{2}$
6. Υπολογισμός του πλάτους του SIW  $w_{siw} = W_{eff} + \frac{d^2}{0.95s}$

Στην πορεία της σχεδίασης οι υπολογιστικές μέθοδοι που έχουν περιγράψει στα θεωρητικά κεφάλαια δεν είχαν πάντα το επιθυμητό αποτέλεσμα οπότε με παραμετροποίηση των διαφόρων διαστάσεων επιτυγχάνεται το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα και στην συνέχεια με την χρήση tuning οδηγούμαστε στο τελικό αποτέλεσμα. Η σχεδίαση κάθε φορά επιλέχτηκε να γίνεται τμηματικά σχεδιάζοντας και αναλύοντας κάθε τμήμα μεμονωμένα για την κατανόηση και τον εύκολο έλεγχο των σφαλμάτων κατά την σύνθεση ολόκληρης της δομής.

## 2.2 Σχεδίαση SIW στα 24-28 GHz

Για την σχεδίαση επιλέχτηκε το υλικό του υποστρώματος RT/Duroid 5880, διηλεκτρικής σταθερά  $\epsilon_r = 2.2$ , εφαπτομένη απωλειών  $\tan \delta = 0,0009$  και πάχος  $0.508\text{mm}$ . Το υλικό αυτό επιλέχτηκε γιατί είναι αρκετά γνωστό με χαμηλές απώλειες και είναι διαθέσιμο στο εμπόριο. Τα στρώματα ανάμεσα στο υπόστρωμα ορίστηκαν σαν λεπτά αγώγιμα φύλλα χαλκού με πάχος  $17\mu\text{m}$ .

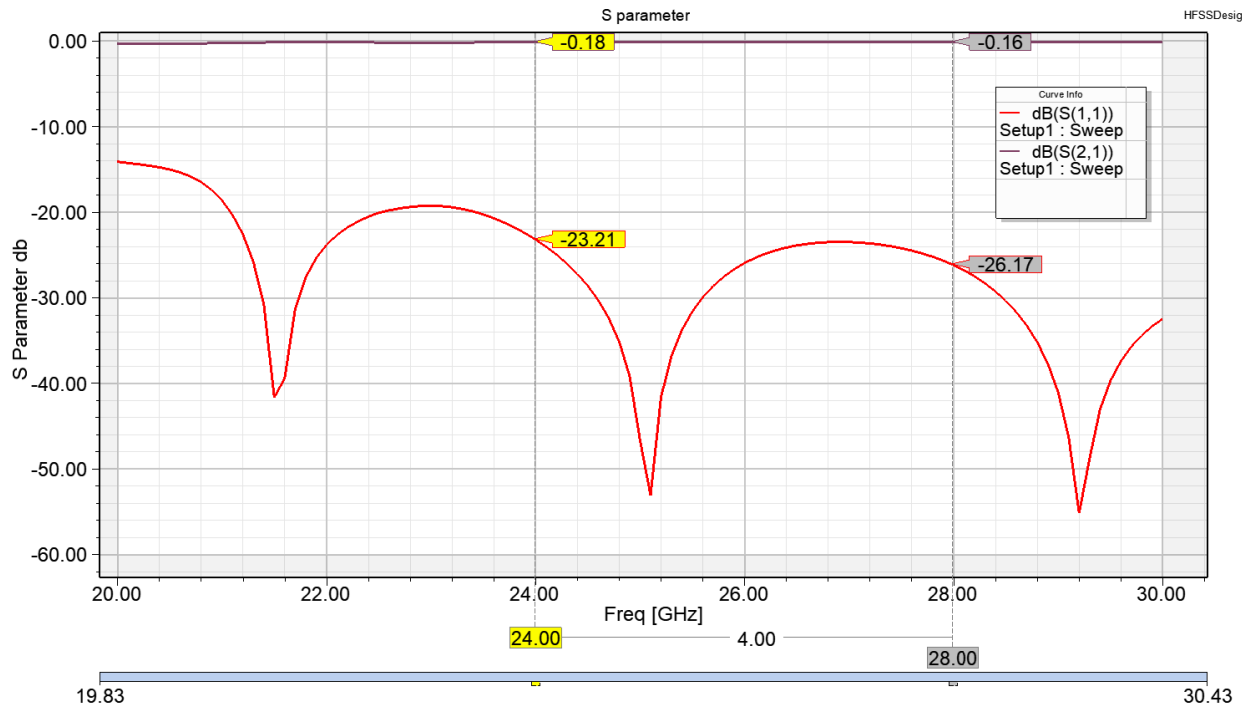
Τα βήματα σχεδίασης έχουν περιγράψει παραπάνω όπου θα χρησιμοποιήσουμε και τους αντίστοιχους τύπους για να υλοποιήσουμε και την σχεδίαση SIW (Εικόνα 7). Ακολουθώντας τα βήματα βρίσκουμε τις βασικές παραμέτρους για την σχεδίαση SIW. Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στην τήρηση των συνθηκών που περιγράφονται στα βήματα 3,5,7. Επίσης το συνολικό μήκος του SIW υπολογίζεται να είναι πολλαπλάσιο στη συχνότητα λειτουργίας.



Εικόνα 7. Η βασική δομή της σχεδίασης SIW δομής στα 26GHz

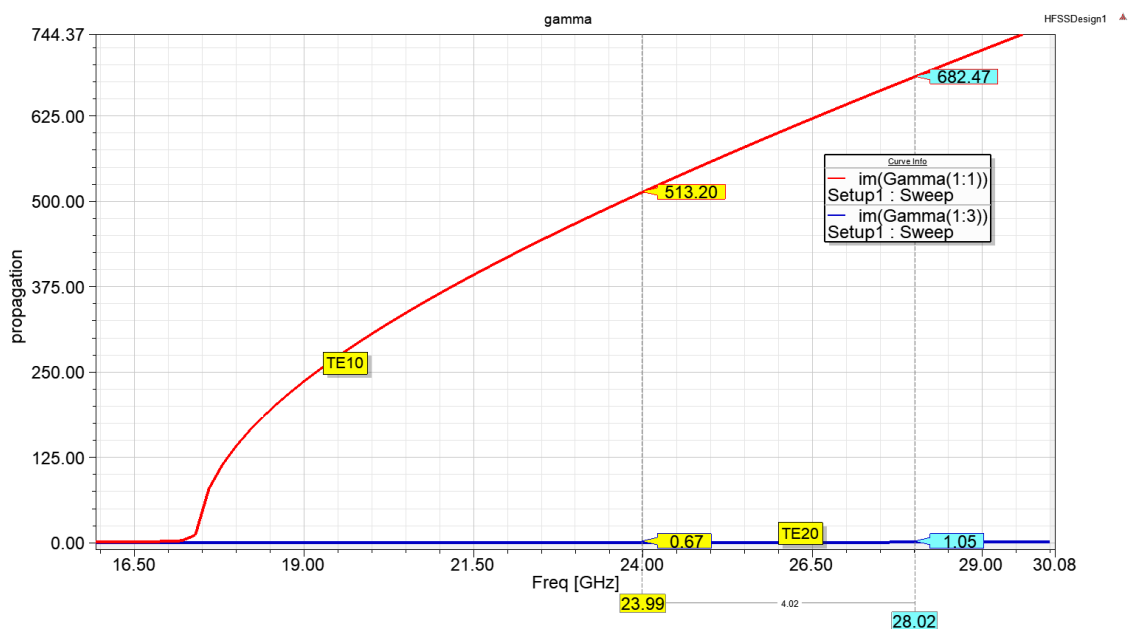
Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά SIW κυματοδηγού

Όνομασία	Περιγραφή	Τιμή
d	Διάμετρος vias	1.2mm
S	Απόσταση μεταξύ δύο vias	0.6mm
sb	Πάχος διηλεκτρικού υποστρώματος	0.508 mm
th	Ύψος του δακτυλιδιού	0.017 mm
w	Πλάτος μεταξύ κέντρων vias	5.8mm
$\epsilon_r$	Διηλεκτρική σταθερά του υποστρώματος	2.2

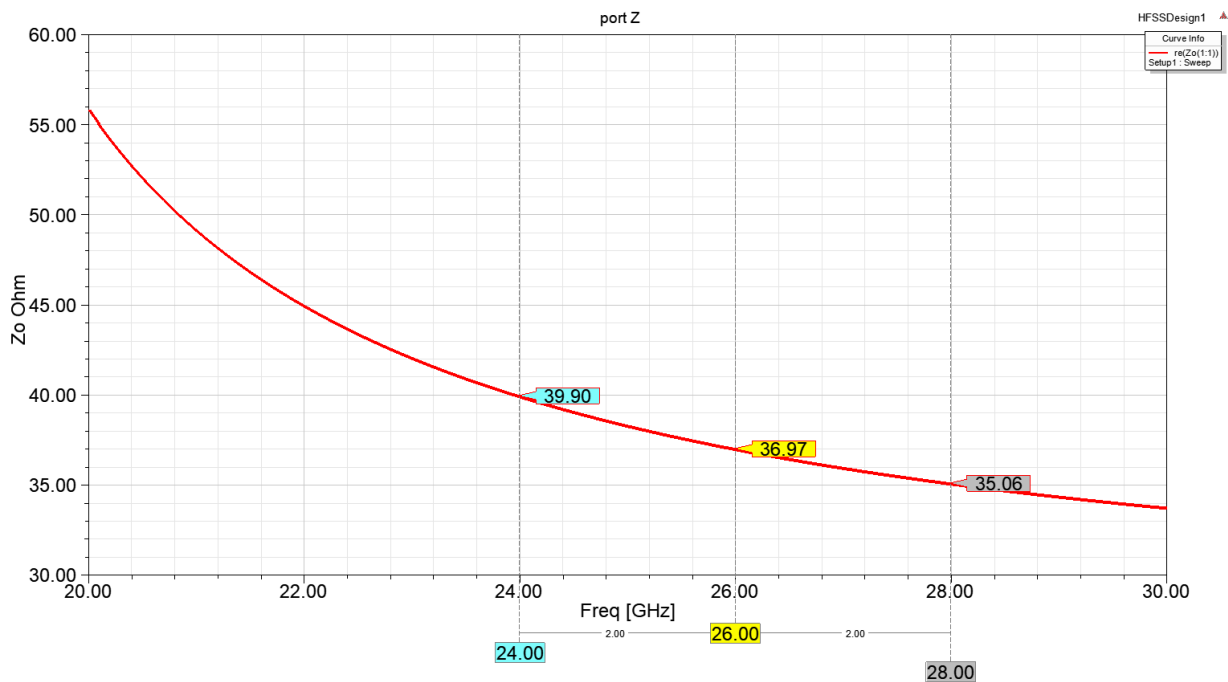


Εικόνα 8. Απεικόνιση των  $S_{11}$ ,  $S_{12}$  Παραμέτρων από την προσημείωση στο hfss.

Στην συνέχεια από το διάγραμμα Εικόνα 8 με τους παραμέτρους  $S_{11}$  και  $S_{12}$  έχουμε ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα που σημαίνει ότι η σχεδίαση είναι επιτυχής στο εύρος λειτουργίας του κυματοδηγού από τα 24-28 GHz με τις απώλειες ανάκλασης να είναι κάτω από -10dB παράμετρος σκέδασης  $S_{11}$



Εικόνα 9. Σταθερά διάδοσης για τους ρυθμούς  $TE_{10}$  και  $TE_{20}$

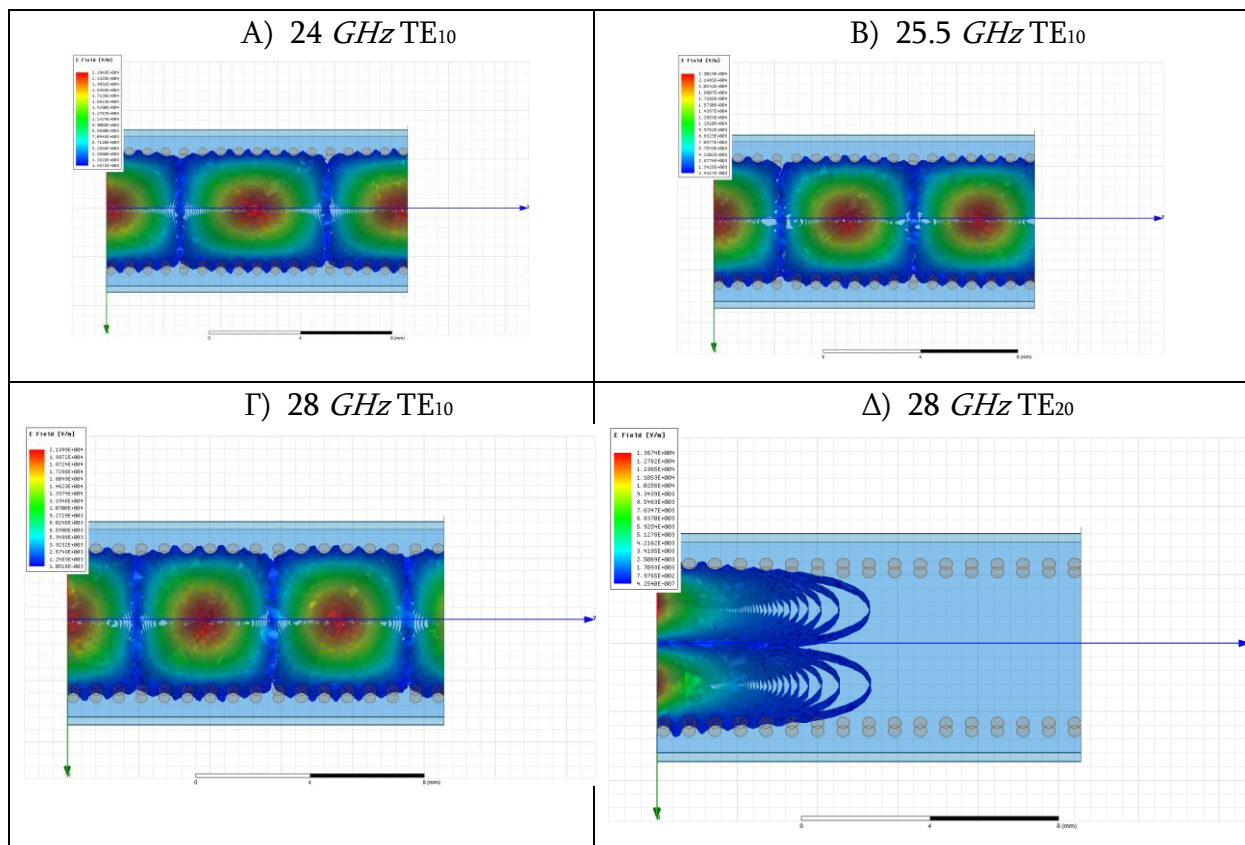


Εικόνα 10. Χαρακτηριστική αντίσταση εισόδων  $Z_0$

Αν η διάδοση του κύματος γίνεται στον άξονα  $x$  το κύμα διαδίδεται με τον εκθετικό όρο  $e^{-\gamma x}$ , όπου  $\gamma$  η μιγαδική σταθερά διάδοσης. Ισχύει  $\gamma = \alpha + j\beta$ , όπου  $\beta$  είναι η σταθερά διάδοσης του κύματος και μετράτε σε rad/m, και με  $\alpha$  είναι η σταθερά απωλειών και μετράτε σε Np/m. Στην σχεδίαση ο άξονας διάδοσης είναι ο  $y$ , σύμφωνα με το (Εικόνα 11) διάγραμμα δ μας πληροφορεί ότι στην υψηλότερη συχνότητα 28 GHz αδυνατεί να διαδοθεί ο  $TE_{20}$  ρυθμός το οποίο είναι σύμφωνο των προσδοκιών μας.

Στην Εικόνα 11 βλέπουμε ότι οι απώλειες διαρροής ακτινοβολίας είναι σχεδόν αμελητέες και για τις τρεις βασικές συχνότητες λειτουργίας Α,Β,Γ.

Στην Εικόνα 11 Δ είναι εμφανής ότι στην συχνότητα των 28 GHz αδυνατεί να διαδοθεί ο  $TE_{20}$  ρυθμός και διαδίδεται μόνο ο επικρατέστερος ρυθμός  $TE_{10}$  ενώ οι υπόλοιποι ρυθμοί να έχουν υψηλές απώλειες. Ενώ παρατηρείτε από την εικόνα 11Δ) σε υψηλότερη συχνότητα 28 GHz συνεχίζει να μην διαδίδεται ο  $TE_{20}$  ρυθμός. Τα συμπεράσματα συμφωνούν με τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στην Εικόνα 9 πράγμα που το οποίο μας βεβαιώνει και για την ορθότητα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης



Εικόνα 11. Γραφήματα έντασης Ηλεκτρικού πεδίου για 24-28 GHz

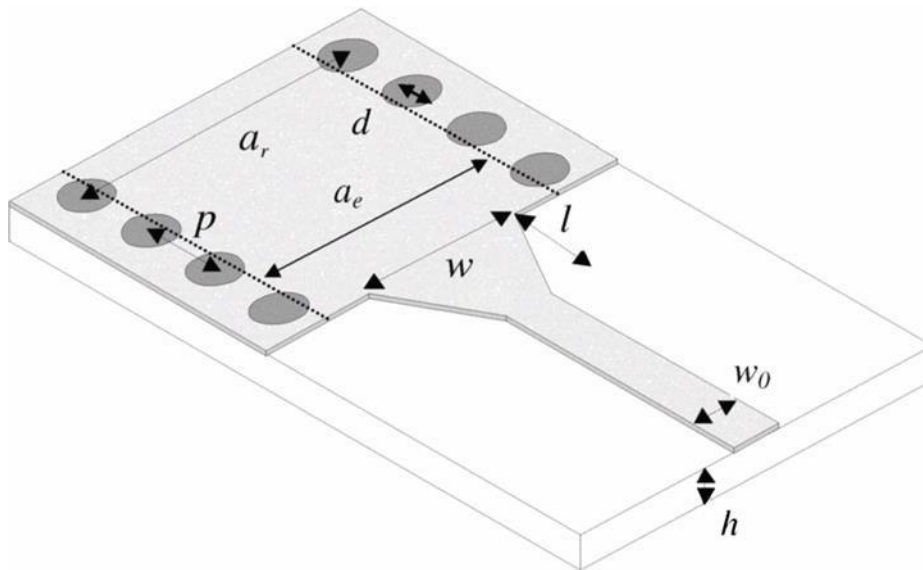
### 3. Ανάλυση και σχεδίαση μετάβασης SIW με μικροταινία

#### 3.1. Σύνδεση SIW κυματοδηγού με μικροταινία microstrip

Ο κλασικός ορθογώνιος κυματοδηγός RWG προσφέρει υψηλό συντελεστή ποιότητας και χαμηλές απώλειες και αποτελεί το βασικό στοιχείο για σχεδίαση εξαρτημάτων σε υψηλές συχνότητες. Η σύνδεση της μετάβασης (transition) με τον ορθογώνιο κυματοδηγό έχει ερευνηθεί στο παρελθόν[25]. Ωστόσο το τελικό κύκλωμα παραμένει ογκώδεις και η μαζική τους παραγωγή καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη. Επίσης αποτελούνται από διαφορετικά υλικά και ξεχωριστά τμήματα απαιτώντας έτσι μεγάλη ακρίβεια στην κατασκευή και υψηλές απώλειες λόγω κακής προσαρμογής.

Λύση στα παραπάνω προβλήματα αποτέλεσε η ενσωμάτωση του ολοκληρωμένου κυματοδηγού υποστρώματος SIW με το τμήμα της μικροταινίας (Εικόνα 12). Με την σύνδεση αυτή δημιουργείται μια υψηλής ποιότητας κατασκευή έχοντας το ίδιο διηλεκτρικό υπόστρωμα και μια ενιαία σύνδεση. Φυσικά οι απώλειες που παρουσιάζει οι μικροταινία λόγω αδυναμίας θωράκισης των πλευρικών απωλειών

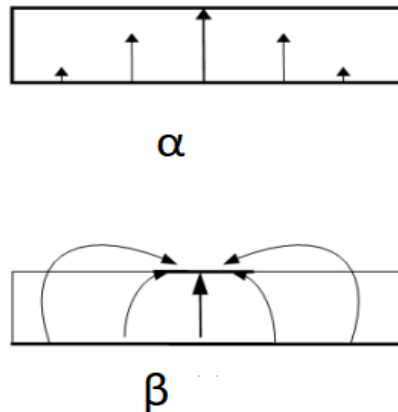
παραμένουν. Με την σύνδεση αυτή το κύκλωμα μπορεί να κατασκευαστεί με τις υπάρχουσες τεχνολογίες κατασκευής επίπεδου κυκλώματος.



Εικόνα 12. Η συνολική κατασκευή ενοποίησης SIW-μικροταινίας [26]

Η συνολική κατασκευή της ενοποίησης SIW με την μικροταινία όπως προτάθηκε από τον Deslanders [26] αποτελείται από δυο μέρη α) την γραμμή μικροταινίας με την οποία ρυθμίζοντας το πλάτος μπορούμε εύκολα να έχουμε αντίσταση εισόδου  $50 \Omega$  προσφέροντας μας την δυνατότητα την σύνδεση και με άλλα στοιχεία και β) το κωνικό τμήμα (tapered) το οποίο χρησιμεύει για την προσαρμογή (matching) της μικροταινίας με την SIW δομή.

Ο προσανατολισμός των ηλεκτρικών κυμάτων που αναπαρίστανται στο τμήμα του SIW (TE) του κυματοδηγού εικόνα 13α) είναι σχεδόν ομοιόμορφος με τον προσανατολισμό του τμήματος της μικροταινίας (quasi-TEM) εικόνα 13β). Η ομοιότητα των ηλεκτρικών κυμάτων επιτρέπει την διέγερση του κυματοδηγού μέσω του τμήματος της μικροταινίας.

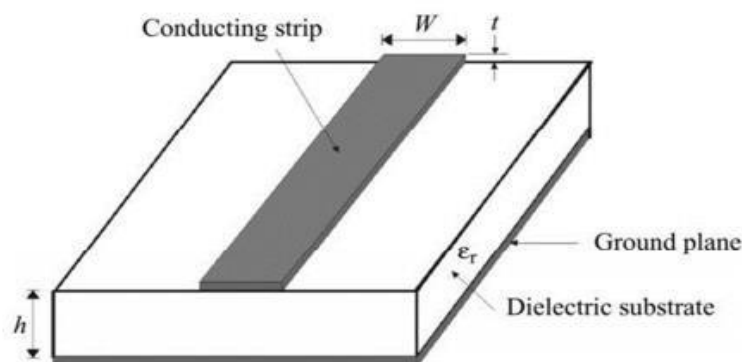


Εικόνα 13. Αναπαράσταση των ηλεκτρικών πεδίων α) ορθογώνιου κυματοδηγού β) μικροταινίας.

Παρακάτω θα αναλυθούν ξεχωριστά τα δύο τμήματα σύμφωνα με την θεωρία και τον τρόπο που έχει καθιερωθεί για την σχεδίαση και υλοποίηση της παραπάνω διάταξης από διάφορες βιβλιογραφικές αναφορές.

### 3.1.1. Προσαρμογή SIW μικροταινίας.

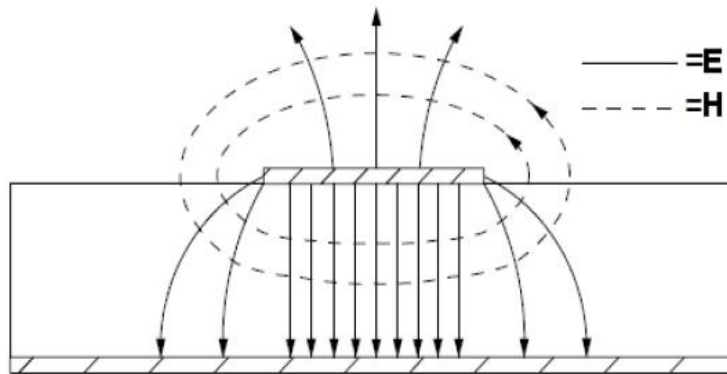
Η γραμμή μικροταινίας αποτελεί μια απλή και εύκολη κατασκευή, στελεχώνεται από μία στενή γραμμή από αγωγίμο υλικό, το διηλεκτρικό υπόστρωμα και τέλος μια αγωγίμη πλάκα στο μέγεθος του υποστρώματος. Η δομή αυτή μπορεί να ενσωματωθεί και με άλλα επίπεδα παθητικά και μικροκομματικά κυκλώματα αποτελώντας μια ενιαία δομή.



Εικόνα 14. Βασική δομή γραμμής μικροταινίας

Τα κύρια χαρακτηριστικά της μικροταινίας είναι το πλάτος  $W$  της λεπτής ταινίας, το ύψος του διηλεκτρικού υποστρώματος  $h$ , το ύψος της αγωγίμης λωρίδας  $t$  και με  $\epsilon_r$  η διηλεκτρική σταθερά του υποστρώματος Εικόνα 14 .

Λόγω της ασυνέχειας των δύο υποστρωμάτων ο κυρίαρχος ρυθμός διάδοσης είναι διαφορετικός από TEM είναι υβριδικός quasi-TEM (Εικόνα 15) με αποτέλεσμα η ταχύτητα φάσης, η διηλεκτρική σταθερά, η χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση να εξαρτώνται σε ένα βαθμό από την συχνότητα[27]. Με την αύξηση της συχνότητας η διηλεκτρική σταθερά πλησιάζει εκείνη του υποστρώματος. Ένας νέος όρος με την ονομασία ενεργό διηλεκτρική σταθερά λαμβάνει υπόψη αυτές τις διαφοροποιήσεις και ότι ένα μέρος από τα ηλεκτρικά πεδία δεν βρίσκονται εγκλωβισμένο στο υπόστρωμα αλλά στον αέρα στην πάνω πλευρά του υποστρώματος. Η ενεργό διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_{eff}$  ερμηνεύεται σαν την αντίστοιχη διηλεκτρική σταθερά ενός ομογενούς μέσου που αντικαθιστά τον αέρα και το διηλεκτρικό της (Εξίσωση 7).



Εικόνα 15. Απεικόνιση Quasi Tem ρυθμού διάδοσης γραμμής μικροταινίας

Η χαρακτηριστική αντίσταση της μικροταινίας επηρεάζεται άμεσα από την φυσικές διαστάσεις της δομής με κυριότερο λόγο να έχουνε το πλάτος της ταινίας και το ύψος του υποστρώματος. Από την βιβλιογραφία δίνεται ο τύπος για τον υπολογισμό της αντίστασης της μικροταινίας. Η εξίσωση 3.1 [28] είναι για  $w/h < 1$  είναι η εξίσωση 3.2 στην περίπτωση που  $w/h > 1$ .

Εξίσωση 7

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left(\frac{w}{h}\right)}} + 0.04 \left(1 - \left(\frac{w}{h}\right)\right)^2 \right]$$

Εξίσωση 8

$$z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left( 8 \left(\frac{h}{w}\right) + 0.25 \left(\frac{w}{h}\right) \right)$$



$$\varepsilon_{eff} = \frac{e_r + 1}{2} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left(\frac{w}{h}\right)}} \right]$$

Εξίσωση 9

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff}} \left[ \frac{w}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{w}{h} + 1.444 \right) \right]}$$

Για δεδομένη την χαρακτηριστική αντίσταση και γνωρίζοντας την διηλεκτρική σταθερά  $\varepsilon_r$  ο λόγος  $w/h$  μπορεί να βρεθεί από την εξίσωση.

Εξίσωση 10

$$\frac{w}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \quad \text{για } \frac{w}{h} < 2$$

Εξίσωση 11

$$\frac{w}{h} = \frac{2}{\pi} \left[ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r} \left( \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\varepsilon_r} \right) \right] \quad \text{για } \frac{w}{h} > 2$$

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\varepsilon_r} \right)}$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\varepsilon_r}}$$

B) Το κωνικού τμήμα (tapered) αποτελεί τον συνδετήριο κρίκο Microstrip line - SIW. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να προσαρμόσουμε την αντίσταση της μικροταινίας συνήθως 50 Ω με την αντίσταση  $Z_{siw}$  του SIW. Η εξίσωση 12 μας δίνει την ωμική αντίσταση στην είσοδο του SIW.

Εξίσωση 12

$$Z_{siw} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon_0 \varepsilon_e} \frac{h}{w_e}}$$

$w_e$  είναι το πλάτος της μικροταινίας για το μεγάλο κωνικό τμήμα που έχει την ίδια αντίσταση με αυτή του SIW κυματοδηγού στα άκρα του,  $\mu$ : μαγνητική διαπερατότητα και  $\varepsilon_0$ : είναι η διηλεκτρική σταθερά στο κενό.

Το μήκος του κωνικού τμήματος επηρεάζει της ανακλάσεις της δομής παράμετρος σκέδασης  $S_{11}$  για την ελαχιστοποίηση επιλέγεται σαν πολλαπλάσιο του μήκους κύματος σύμφωνα με την εξίσωση 13[29]:

### Εξίσωση 13

$$L = \frac{n\lambda_g}{4} \quad n = 1,2,3,4 \dots$$

$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}}$$

Με  $\lambda_g$  είναι το μήκος κύματος στην κεντρική συχνότητα λειτουργίας και  $c$  η ταχύτητα στο κενό.

## 3.2. Σχεδίαση μετάβασης SIW με μικροταινία.

Στηριζόμενοι στην θεωρία της γραμμής μετάβασης μικροταινίας και της θεωρίας ενσωμάτωσης της με τον SIW κυματοδηγό στο παρόν κεφάλαιο θα χρησιμοποιήσουμε την μελέτη αυτή για την σχεδίαση και προσομοίωση του μέρους της διασύνδεσης μικροταινίας με τον SIW κυματοδηγού σαν ένα ενιαίο κομμάτι.

Πρώτο βήμα είναι να βρεθεί το πλάτος της γραμμής μικροταινία από τις εξισώσεις 7 και 8 στο οποίο θα παρουσιάζει χαρακτηριστική αντίσταση 50 Ωμ. Σκοπός είναι να σχεδιαστεί ένα ενιαίο υπόστρωμα οπότε θα χρησιμοποιεί τις ίδιες παραμέτρους του SIW κυματοδηγού αντίστοιχες και για το τμήμα της μικροταινίας δηλαδή θα αποτελεί συνέχεια του υποστρώματος και των αγώγιμων πλακών αντίστοιχα.

### Microstrip Line Calculator

conductor

W

L

h

dielectric ( $\epsilon_r$ )

ground

© emtalk.com

**Substrate Parameters**

Dielectric Constant ( $\epsilon_r$ ): 2.2

Dielectric Height (h): 0.508 mm

Frequency: 26 GHz

**Electrical Parameters**

Zo: 49.539900984 Ω

Elec. Length: 42.7061384464 deg

**Physical Parameters**

Width (W): 1.6 mm

Length (L): 1 mm

Synthesize

Analyze

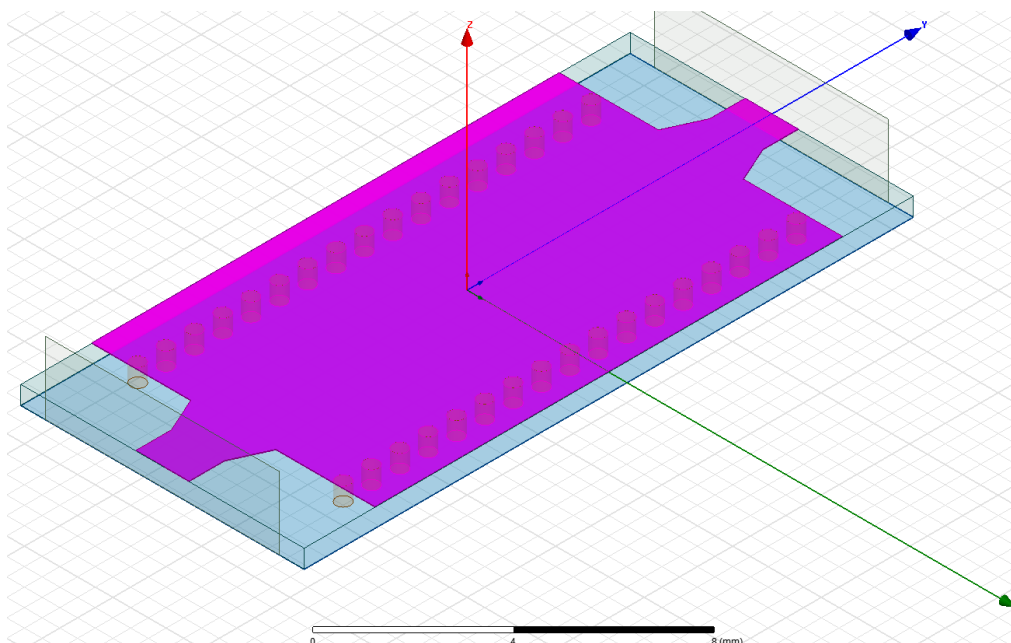
Εικόνα 16. Εικονικό περιβάλλον του online microstrip calculator emTalk

Το πρόγραμμα emTalk Εικόνα 16 χρησιμοποιήθηκε για να επαληθεύσει τα αποτελέσματα των υπολογισμών που έχουν γίνει σε φύλλο excel. Οι πράξεις του προγράμματος με του φύλλου excel συμφωνούν με μια μικρή απόκλιση η οποία οφείλεται στην στρογγυλοποίηση τιμών.

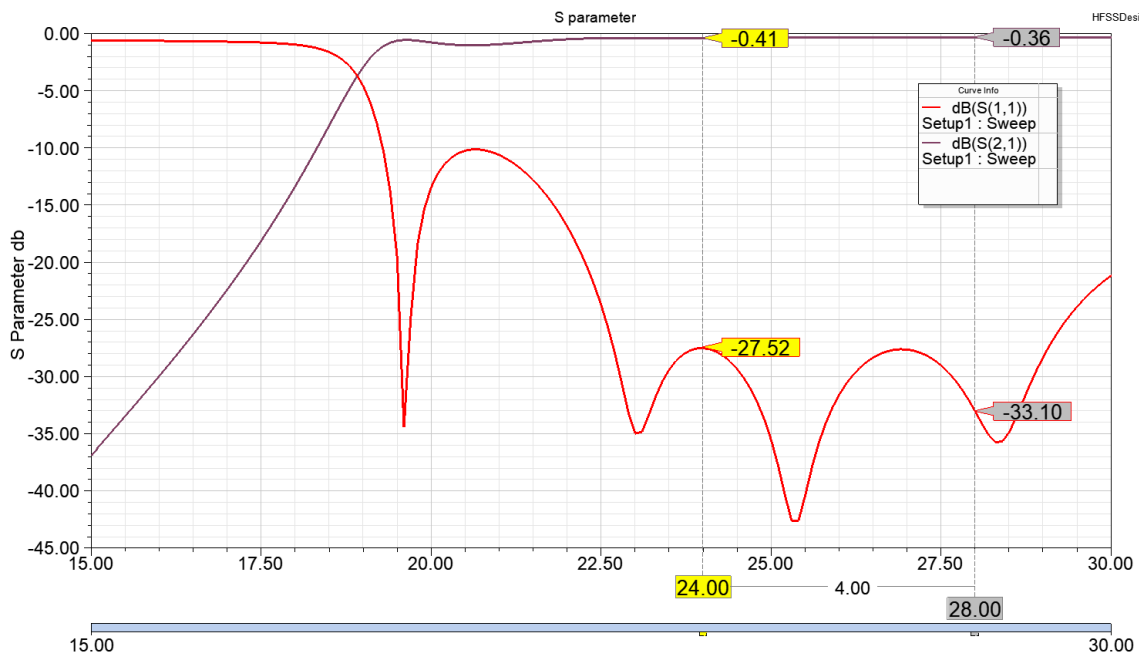
Υπολογίζοντας το πλάτος της μικροταινίας στην συνέχεια υπολογίζουμε τους παραμέτρους  $w_1$  και  $w_2$  του κωνικού τμήματος το οποίο όπως έχει μελετηθεί και χρησιμοποιείται για να κάνει την προσαρμογή της χαρακτηριστικής αντίστασης της μικροταινίας με την χαρακτηριστική αντίσταση που παρουσιάζει η SIW δομή στα άκρα της. Το μικρό πλάτος είναι το ίδιο με το πλάτος που υπολογίστηκε πιο πάνω 1,6 mm. Για να βρεθεί το πλάτος με την μεγάλη απόσταση χρησιμοποιούμε την εξίσωση 10 και 11 και θα την λύσουμε ως προς το  $w$ . Η πράξη είναι αρκετά πολύπλοκη και έγινε σε λογιστικό φύλλο excel για λόγους ταχύτητας. Τα αποτελέσματα των παραμετροποιήσεων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2 Χαρακτηριστικά σχεδίασης μετάβασης SIW- μικροταινίας

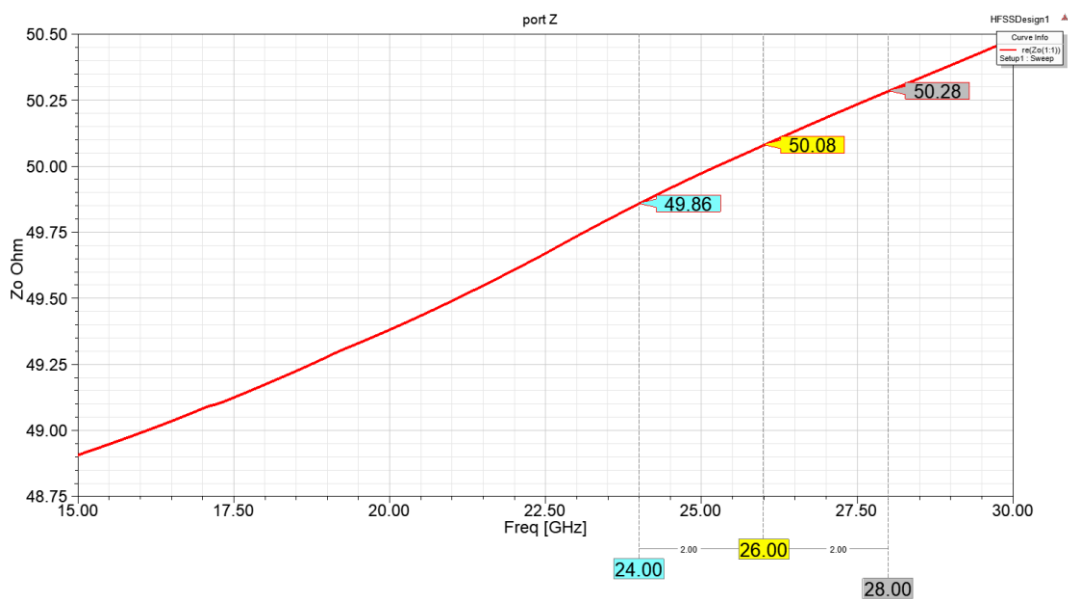
Όνομασία	Περιγραφή	Τιμή
w <sub>tap</sub>	Μεγάλο πλάτος κωνικού τμήματος	2.4mm
w <sub>micr</sub>	Πλάτος γραμμής μικροταινίας	1.5mm
L <sub>tap</sub>	Μήκος κωνικού τμήματος	2 mm
L <sub>micr</sub>	Μήκος γραμμής μικροταινίας	2 mm



Εικόνα 17. Τελική μορφή της σχεδίασης μετάβασης SIW-μικροταινία



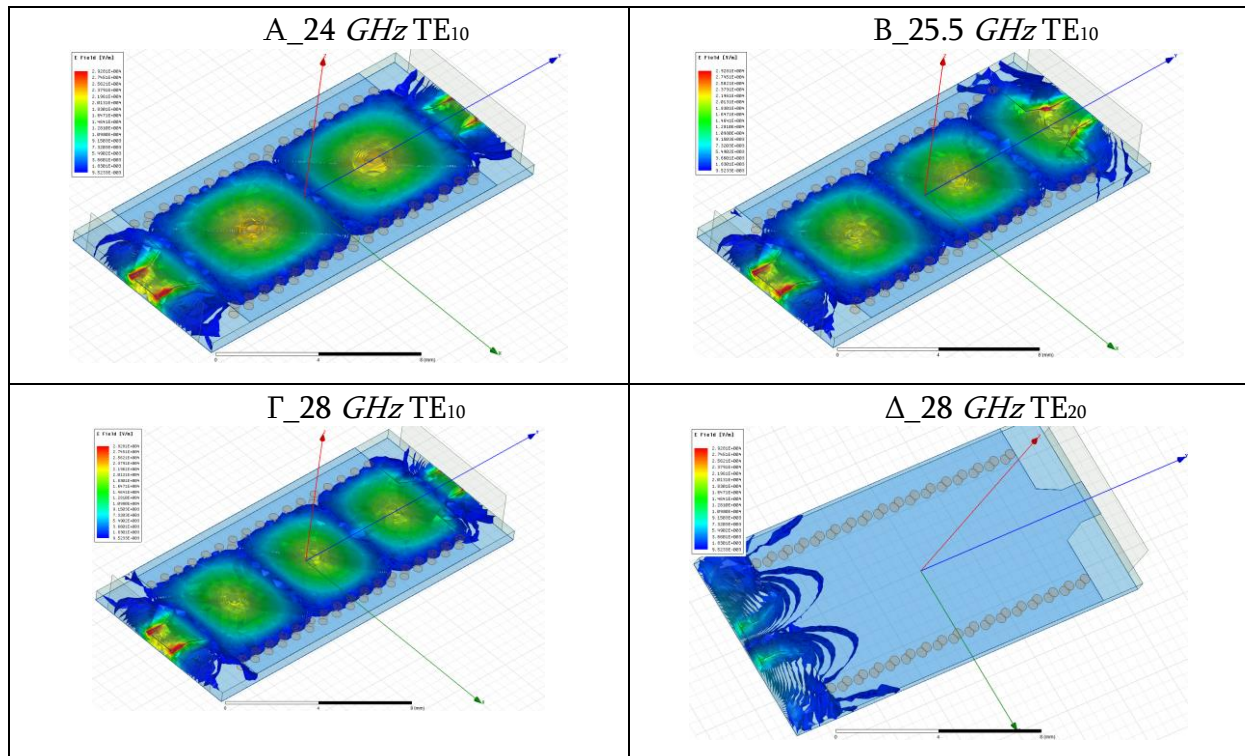
Εικόνα 18. Διάγραμμα με τις  $S_{11}, S_{12}$  παραμέτρους σκέδασης για TE<sub>10</sub> SIW-μικροταινίας



Εικόνα 19. Διάγραμμα με την χαρακτηριστική αντίσταση SIW- microstrip  $Z_0$

Από Εικόνα 17 διακρίνεται το κωνικό τμήμα μικροταινίας και η απλή γραμμή μικροταινίας όπου και καταλήγει στην είσοδο της πόρτας. Οι δύο πόρτες με το πράσινο χρώμα δεν αποτελούν μέρος του κυματοδηγού αλλά είναι αναγκαίες να οριστούν για την λειτουργία του προγράμματος HFSS αποτελώντας την τροφοδοσία με ηλεκτρομαγνητικό κύμα στην είσοδο της συνολικής δομής. Εικόνα 18 παρατηρούμε ότι

οι παράμετροι  $S_{11}$  είναι επίσης σε χαμηλά επίπεδα παρά την χρήση της μετάβασης. Το ταίριασμα των δύο αντιστάσεων SIW και microstrip είναι σε καλά επίπεδα και με τις ανακλάσεις για το εύρος συχνοτήτων είναι κάτω από 15 dB σε όλο το εύρος που μας ενδιαφέρει καθώς και όπως φαίνεται από Εικόνα 19 αντίσταση εισόδου στην κεντρική συχνότητα 26 GHz είναι σχεδόν 50 Ω.



Εικόνα 20. Απεικόνιση του ηλεκτρικού κύματος για TE<sub>10</sub> ρυθμό στην συχνότητα α) 24 GHz και β) 26 GHz και γ) 28 GHz δ) TE<sub>20</sub> 28 GHz

Η διάδοση του κυρίαρχου ρυθμού επικρατεί σε όλο το φάσμα 24-28 GHz Εικόνα 20 ενώ ο αμέσως επόμενος ρυθμός αδυνατεί να διαδοθεί.

## 4. Ανάλυση και σχεδίαση Κυματοδηγού SIW-BCSRR

### 4.1. Θεωρία Μεταύλικών

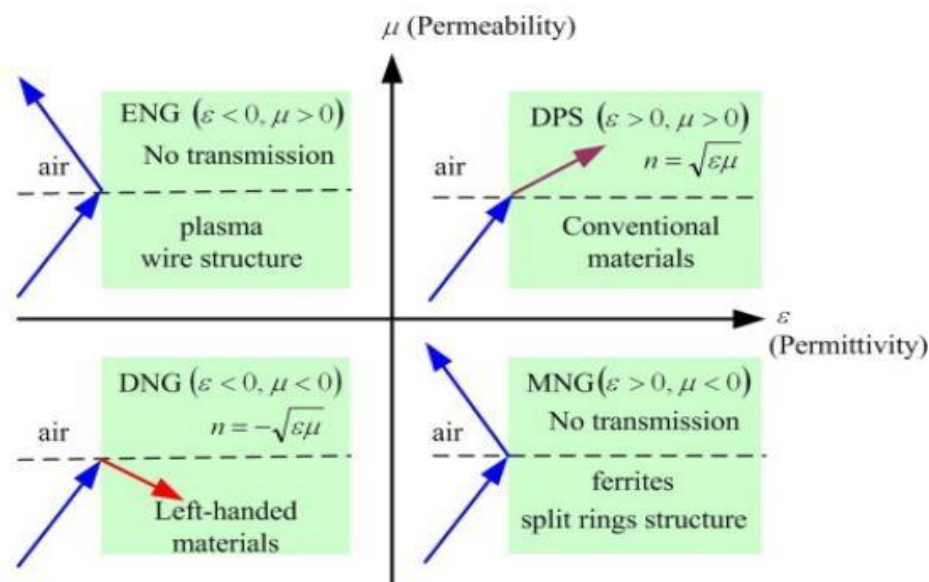
Τα μεταύλικά όπως δηλώνει και η ονομασία τους είναι διατεταγμένες περιοδικές δομές στοιχείων (unit -cell) και παρουσιάζουν ιδιότητες που δεν μπορούμε να συναντήσουμε στα φυσικά υλικά[30]. Η κατασκευή τέτοιων υλικών γίνεται συνθέτοντας υλικά όπως μέταλλα ή πολυμερή με συγκεκριμένη διάταξη δημιουργώντας δομές μεταύλικών από ένα μέχρι και τρία επίπεδα στον χώρο. Τα βασικά χαρακτηριστικά των ιδιοτήτων των μεταύλικών είναι διηλεκτρική σταθερά ( $\epsilon$ ) και η μαγνητική διαπερατότητα ( $\mu$ ) στοιχεία που περιγράφουν τον τρόπο που τα ηλεκτρομαγνητικά

κύματα αλληλεπιδρούν με το εκάστοτε υλικό σε συγκεκριμένες συχνότητες και είναι ο λόγος που έχουν απασχολήσει τον κλάδο των τηλεπικοινωνιών ιδιαίτερα στις πολύ υψηλές συχνότητες.

Το μέγεθος του κελιού έχει σημαντικό ρόλο και μπορεί να καθορίσει την συχνότητα λειτουργίας της δομής η οποία εξαρτάται από το μήκος κύματος  $\lambda_g$  του προσπίπτουν σήματος. Όσο το μήκος κύματος είναι αρκετά μεγαλύτερο από τις διαστάσεις του μοναδιαίου κελιού τότε τα μεταυλικά αποκτούν ενιαία δομή και συμπεριφέρονται σαν ενιαίο ισοδύναμο υλικό. Όταν το μήκος κύματος είναι συγκρίσιμο με τις φυσικές διαστάσεις του κελιού τότε αποτελεί ξεχωριστό τμήμα και φαινόμενα περίθλασης και σκέδασης λαμβάνουν χώρα, έτσι η ανάλυση περιορίζεται στο επίπεδο ενός μοναδιαίου κελιού. Από την αρχική μελέτη του V. Velsago [31] έχει διαπιστωθεί ότι όταν οι διαστάσεις ενός μοναδιαίου κελιού είναι μικρότερες από  $\lambda_g/10$  τότε το προσπίπτον κύμα συναντά μια συμπαγή δομή που περιγράφεται από ισοδύναμες τιμές σχετικής διηλεκτρικής και μαγνητικής διαπερατότητας  $\epsilon_{eff}$  και  $\mu_{eff}$  αντίστοιχα.

#### 4.1.1 Κατηγοριοποίηση Μεταυλικών με βάση $\epsilon$ και $\mu$ .

Σε όλα τα υλικά που βρίσκονται στην φύση έτσι και στα μεταυλικά, η διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon$ , η μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$  καθώς και ο δείκτης διάθλασης  $n$  (Εξίσωση 14) είναι ιδιότητες που περιγράφουν την απόκριση του συστήματος στο προσπίπτων ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Παρακάτω χωρίζονται τα υλικά σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα το πρόσημο των τιμών  $\epsilon$  και  $\mu$  Εικόνα 21[32], [33] :



Εικόνα 21. Κατηγοριοποίηση των υλικών σύμφωνα με την διηλεκτρική σταθερά και την μαγνητική διαπερατότητα

Εξίσωση 14



$$n = \pm\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}$$

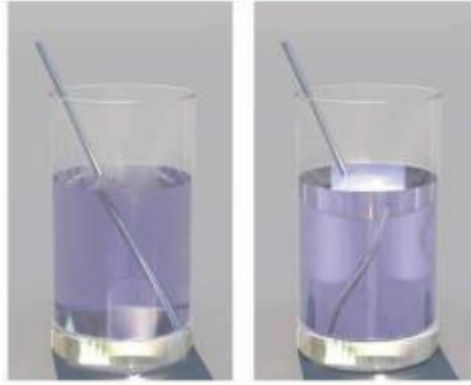
1. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν διπλοθετικά υλικά double-positive (DPS). Υλικά στα οποία και οι δύο τιμές  $\varepsilon$  και  $\mu$  είναι θετικές (εικόνα 21 το πάνω και δεξιά γράφημα). Τέτοιου είδους υλικά είναι και τα διηλεκτρικά υλικά.
2. Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα υλικά αρνητικού  $\varepsilon$  epsilon-negative (ENG). Υλικά με διηλεκτρική σταθερά  $\varepsilon$  αρνητικό και  $\mu$  θετικό (εικόνα 21 πάνω αριστερό γράφημα) έχουν την ίδια συμπεριφορά με αυτά τα υλικά εμφανίζουν και μερικά είδη πλάσματος σε συγκεκριμένες συχνότητες όπως άργυρος, χρυσός.
3. Στην Τρίτη κατηγορία ανήκουν τα μη μαγνητικά υλικά mu-negative (MNG). Υλικά με διηλεκτρική σταθερά  $\varepsilon$  θετική ενώ έχουν μαγνητική διαπερατότητα αρνητική (εικόνα 21 κάτω αριστερά γράφημα). τέτοιες ιδιότητες παρατηρούνται στα ανισοτροπικά υλικά με τον δείκτη διάθλασης να παίρνει αρνητικές τιμές και το προσπίπτων κύμα να φθίνει.
4. Στην τέταρτη κατηγορία ανήκουν τα διπλοαρνητικά υλικά double-negative (DNG). Υλικά με αρνητική διηλεκτρική σταθερά  $\varepsilon$  και αρνητική μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$ . Είναι υλικά τα οποία δεν απαντώνται στην φύση και πρέπει να κατασκευαστούν. Στα υλικά αυτά ο δείκτης διάθλασης λαμβάνει αρνητικές τιμές και το προσπίπτον κύμα αντιστέκεται στην φορά του.

Στην συνέχεια θα επικεντρωθούμε στις κατηγορίες ENG και DNG γιατί παρουσιάζουν ιδιότητες που αποσβένουν το κύμα εκθετικά εμποδίζοντας το κύμα να διαφύγει εκμεταλλευόμενοι τις ιδιότητες αυτές για την σχεδίαση μοναδιαίου κελιού με σκοπό να αντικαταστήσει τα συμβατικά νίσι του SIW κυματοδηγού.

#### 4.1.2 Ιδιότητες Διπλοαρνητικών Υλικών DNG

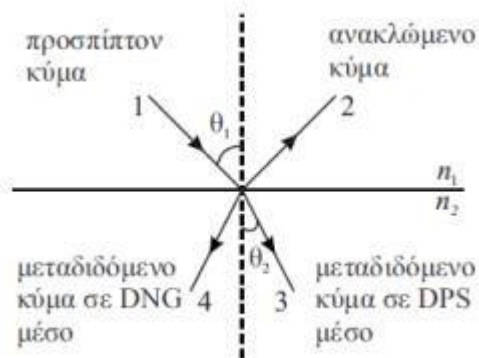
Οι ιδιότητες των διπλοαρνητικών υλικών DNG παρουσιάζονται περιληπτικά παρακάτω όπου παρουσιάζουν ενδιαφέρουσες ιδιότητες οι οποίες απορρέουν από τις αρνητικές τιμές  $\varepsilon$  και  $\mu$  είναι οι ακόλουθες:

- Αρνητικός δείκτης διάθλασης: Παρότι ο δείκτης διάθλασης δεν μπορεί να πάρει αρνητικές τιμές γιατί οι τιμές  $\varepsilon$  και  $\mu$  γιατί βρίσκονται μέσα σε ρίζα. Στην πραγματικότητα για υλικά με αρνητικές τιμές  $\varepsilon$  και  $\mu$  το πραγματικό μέρος του δείκτη διάθλασης παίρνει αρνητικές τιμές λόγω το ότι  $\varepsilon$  και  $\mu$  είναι μιγαδικές τιμές.



Εικόνα 22. Απεικόνιση του φαινομένου με δείκτη διάθλασης A) Αριστερή εικόνα υλικό με  $n > 0$  B) Δεξιά εικόνα υλικό με  $n < 0$

- Αναστροφή του φαινομένου Doppler: Όταν μια πηγή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας δεν είναι σταθερή αλλά κινείται προς το μέρος ενός σταθερού σημείου (παρατηρητή) τότε σύμφωνα με φαινόμενο Doppler η συχνότητα διάδοσης αυξάνεται όταν πλησιάζει τον παρατηρητή και μειώνεται όταν απομακρύνεται από αυτόν. Στα διπλοαρνητικά υλικά συμβαίνει το ανάποδο δηλαδή πλησιάζοντας τον παρατηρητή η συχνότητα μικραίνει.
- Αντιστροφή του νόμου του Snell: Τα διπλοαρνητικά υλικά παρουσιάζουν αντιστροφή του νόμου του Snell. Όταν ένα κύμα διαδίδεται σε μέσο με θετικό δείκτη διάθλασης  $n_1$  και μεταβαίνει μέσο με αρνητικό δείκτη διάθλασης  $n_2$ , τότε όπως απεικονίζεται και στην εικόνα 22 το μεταδιδόμενο κύμα συνεχίζει στην ίδια πλευρά του προσπίπτοντος κύματος.



Εικόνα 23. Συμπεριφορά του προσπίπτον κύματος σε διπλοαρνητικό μέσο DNG

- Αντιστροφή της φοράς του κυματικού διανύσματος: Το χρονικό μέσο διάνυσμα Poynting είναι αντιπάρλληλο με την φάση ταχύτητας. Το κύμα κατευθύνεται σε



αντίθετη κατεύθυνση από την ροή της ενέργειας με αποτέλεσμα η ταχύτητα φάσης και η ταχύτητα ομάδας να έχουν αντίθετες κατευθύνσεις σε αντίθεση με ένα δεξιόστροφο υλικό..

#### 4.1.3 Συντονιστής διακεκομμένου δακτυλίου SRR και συμπληρωματική μορφή CSRR

Οι συντονιστές διακεκομμένου δακτυλίου (SRR) όπως προτάθηκε πρώτη φορά από τον J. Pendry το 1999 ανήκουν στην κατηγορία των μεταϋλικών και βρίσκονται στην τρίτη κατηγορία στα *mu-negative* (MNG) από το Εικόνα 21 εκεί που συναντάμε θετική διηλεκτρική σταθερά και αρνητική μαγνητική διαπερατότητα, και το κύμα αποσβένει εκθετικά.

Ο μονός συντονιστής διακεκομμένου δακτυλίου αποτελεί την πιο απλή μορφή συντονιστή αποτελείται από ένα αγωγίμο μεταλλικό δακτυλίδι το οποίο μπορεί να πάρει διαφορά σχήματα όπως κυκλικά τετράγωνα εξάγωνα, σπειροειδή κ.α. Η παρακάτω μελέτη θα επικεντρωθεί αρχικά στον κοινό συντονιστή διακεκομμένου δακτυλιδιού SRR(Split Ring Resonator)και στην συνέχεια με την συμπληρωματικό του εικόνα CSRR(Complementary Split Ring Resonator)[34].

Όταν ο συντονιστής SRR βρεθεί σε ένα χώρο με ηλεκτρομαγνητικά πεδία ένα κάθετα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο αλληλεπιδρά σε συχνότητα κοντά της συχνότητας συντονισμού δημιουργώντας κυκλικά ρεύματα που στην συνέχεια δημιουργούν σε φάση ένα άλλο τοπικό μαγνητικό πεδίο το οποίο μειώνει το αρχικό και οδηγεί σε αρνητική ενεργό μαγνητική διαπερατότητα. Ένας γρήγορος και απλός τρόπος να εντοπίσουμε την συχνότητα συντονισμού αρχικά είναι χρησιμοποιώντας την κυκλωματική ανάλυση της δομής. Συντονισμός εμφανίζεται στην συχνότητα όπου πυκνωτικά και αγωγίμα εξαρτήματα αντισταθμίζουν το ένα το άλλο. Η συχνότητα συντονισμού μπορεί να βρεθεί με το παρακάτω τύπο[35]:

*Εξίσωση 15*

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{ring}C_{gap}}}$$

Όπως φαίνεται και στην εικόνα οι βασικοί παράμετροι που καθορίζουν στην συχνότητα συντονισμού είναι

- Η εξωτερική ακτίνα  $r=r_{out}$
- Το πάχος του δακτυλιδιού  $w$
- Το μήκος του κενού  $g$

- Το ύψος του αγωγίμου δακτυλιδιού  $h$

Η εξίσωση για την αγωγιμότητα που δημιουργεί το αγωγίμο δακτυλίδι δίνεται

*Εξίσωση 16*

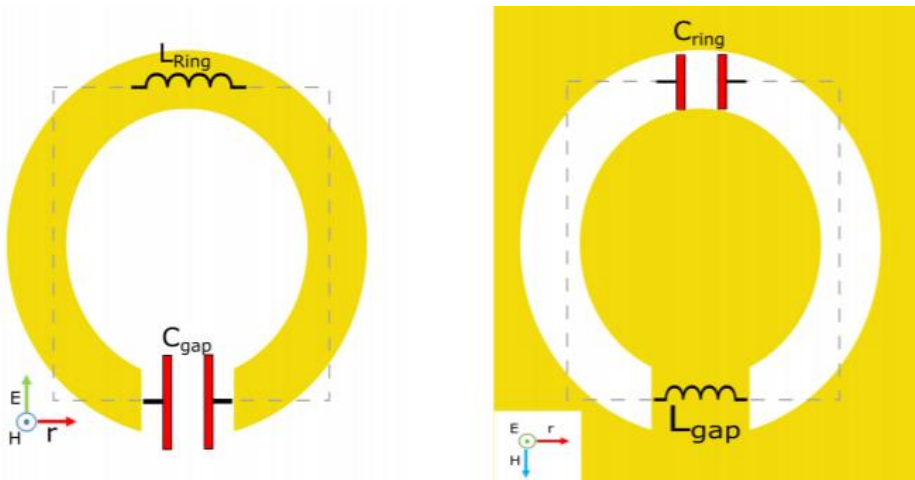
$$L_{ring} = \frac{\mu_0 \pi R_m^2}{h}$$

Όπου  $\mu_0$  είναι η μαγνητική διαπερατότητα στο κενό και  $R_m$  είναι η μέση ακτίνα του δακτυλιδιού και υπολογίζεται  $R_m = r - w/2$ . Στην συνέχεια το κενό που δημιουργείται από το κομμάτι του δακτυλιδιού που έχει αφαιρεθεί συμπεριφέρεται σαν δύο παράλληλες πλάκες ενός πυκνωτή με κενό αέρα ανάμεσα τους και περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση.

*Εξίσωση 17*

$$C_{gap} = \epsilon_0 \frac{hw}{g}$$

Όπου  $\epsilon_0$  είναι η ηλεκτρική διαπερατότητα στο κενό, Από τις εξισώσεις 16 και 17 μέσω της 15 μπορούμε να υπολογίσουμε την συχνότητα συντονισμού.



Εικόνα 24. Κυκλωματικό ισοδύναμο αριστερά α) S-SRR και δεξιά β) S-CSRR [2]

Μια διαφορετική δομή του S-SRR αποκαλούμενη ως συμπληρωματικό S-CSRR Single Complementary split ring resonator έχει ερευνηθεί και μπορεί να θεωρηθεί σαν η αντίστροφη εικόνα του S-SRR Εικόνα 24. Στην μορφή αυτή το μέρος του αγωγίμου δακτυλιδιού αντικαθιστάτε με κενό και το οποίο περιβάλλεται μέσα σε μια αγωγίμη πλάκα. Για να γίνει ποιο εύκολα κατανοητό περιγράφεται σαν να χαράζει ένα κενό δακτυλίδι πάνω σε αγωγίμη πλάκα.

Το S-CSRR εμποδίζει την διάδοση του κύματος σε αντίθεση με το S-SRR κοντά σε μια συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων την συχνότητα συντονισμού και αλληλεπιδρά όταν ένα κάθετα ηλεκτρικό πεδίο διεγείρει την δομή. Παρόλα αυτά η συχνότητα συντονισμού

παραμένει η ίδια και στους δύο συντονιστές SRR και CSRR και περιγράφεται εξίσου από τις ίδιες σχέσεις.

## 4.2. Σχεδίαση συντονιστών

Στόχος της παρακάτω σχεδίασης είναι να αναλυθούν διάφορες μορφές συντονιστών διακεκομμένου δακτύλου ώστε να αποφανθεί ποια είναι η βέλτιστη δομή για την σχεδίαση ενός συντονιστή όπου θα χρησιμοποιηθεί για να μπλοκάρει την διάδοση κύματος στο εύρος συχνοτήτων από 24-28 GHz. Το εύρος αυτό είναι σύμφωνα με τις συχνότητες λειτουργίας της επόμενης γενιάς 5g τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

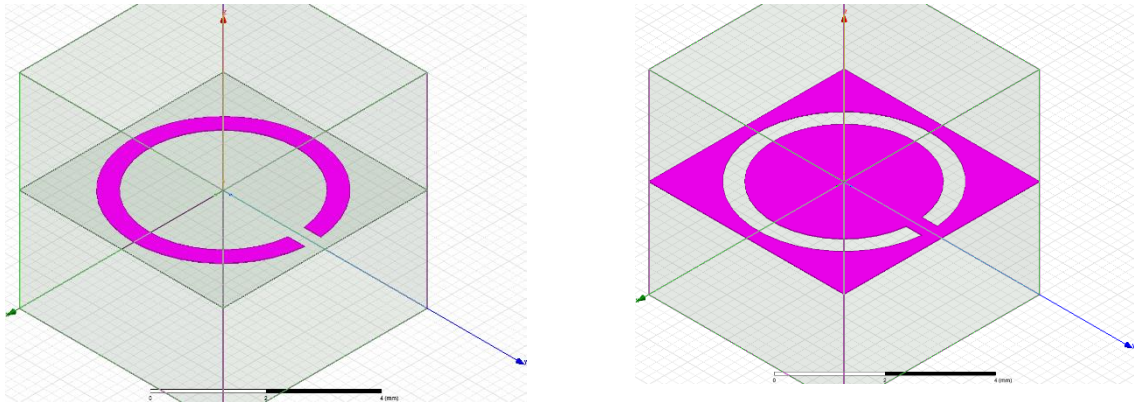
Για όλες τις σχεδιάσεις έχουν οριστεί το υπόστρωμα Rogger 5880 με διηλεκτρική σταθερά 2,2 και απώλειες  $\tan\delta=0.0009$ . Το πάχος του υποστρώματος κατά βάση είναι 0.508 mm και το πάχος της αγωγίμης πλάκας είναι  $t_h=0.0017$  mm από χαλκό.

Ένα από τα πρώτα βήματα είναι να βρούμε τις αρχικές τιμές των διαστάσεων του συντονιστή χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις που αναφέρονται στο προηγούμενο κεφάλαιο και να μπορέσουμε στην συνέχεια με την χρήση διαφόρων προσομοιώσεων μελετώντας κατά βάση τους S παραμέτρους και τις σταθερές διάδοσης και εξασθένησης του σήματος να κατανοήσουμε την συμπεριφορά του συντονιστή.

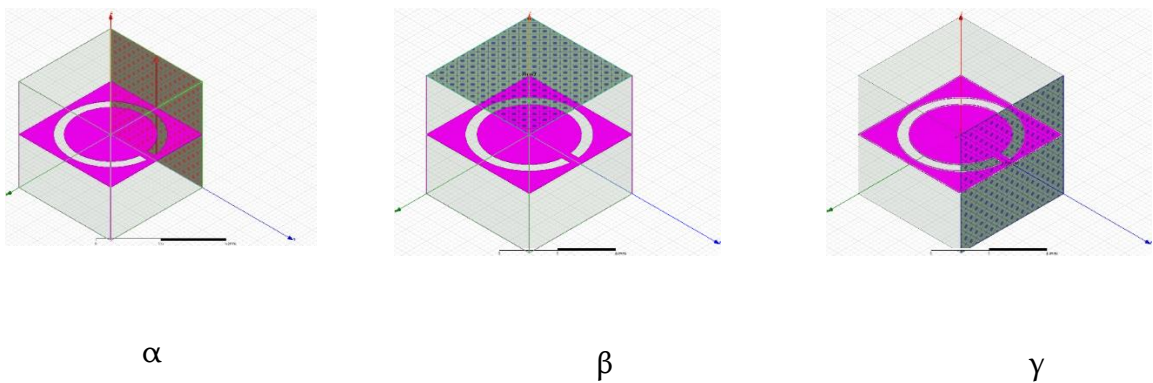
Ο εντοπισμός της συχνότητας συντονισμού με την χρήση των εξισώσεων δεν είναι ακριβείς ιδιαίτερα στις υψηλές συχνότητες και για τον ακριβή υπολογισμό απαιτούνται δύσκολες και πολύπλοκες μαθηματικές εξισώσεις ιδιαίτερα όταν περιλαμβάνουν και απώλειες. Για τον ακριβή προσδιορισμό της συχνότητας συντονισμού αρχικά θα οριστούν οι τιμές των παραμέτρων από τις εξισώσεις και στην συνέχεια θα χρησιμοποιηθεί το ANSYS HFSS πρόγραμμα σχεδιαστικής ανάλυσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων . Η επίλυση θα γίνει στον τομέα τη συχνότητας FDM (Frequency domain Solver).

### 4.2.1 Σχεδίαση μονού συντονιστή CSRR

Για την διέγερση του συντονιστή S-CSRR θα δημιουργήσουμε ένα περιβάλλον υπό συνθήκες boundaries με μπλε είναι το μαγνητικό  $H_t=0$  Εικόνα 26.α πεδίο και με πράσινο το ηλεκτρικό πεδίο  $E_t=0$  Εικόνα 26.β Οι πόρτες όπου θα τροφοδοτήσουν τον συντονιστή με ηλεκτρομαγνητικό κύμα έχει οριστεί “wave port” και βρίσκονται η μία απέναντί στην άλλη και έχουν διαστάσεις όσο και οι πλευρές του κουτιού Εικόνα 26.γ . Με την σύνθεση αυτή έχουμε δημιουργήσει ένα ομογενές μαγνητικό και ηλεκτρικό πεδίο στους άξονες XY και XZ αντίστοιχα για την κάθετη διέγερση Ηλεκτρικού πεδίου να διαπερνά το δακτυλίδι.



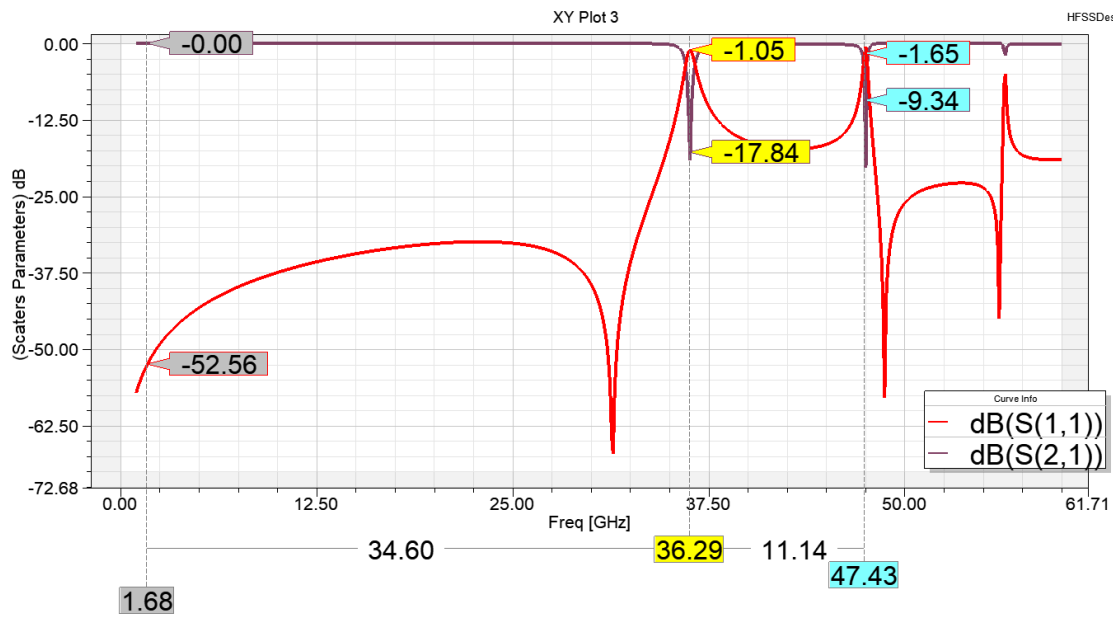
Εικόνα 25. Στα αριστερά η μορφή S-SRR και στα δεξιά η συμπληρωματική μορφή S-CS



Εικόνα 26. Ορισμός ομογενούς μαγνητικού πεδίου κατά την διαδικασία της σχεδίασης α) Μαγνητικό πεδίο, β) Ηλεκτρικό πεδίο, γ) Πόρτα σχεδίασης

Με την βοήθεια των παραμέτρων σκέδασης S-parameters μπορούμε να βρούμε την συχνότητα συντονισμού της δομής με σχετική ακρίβεια καθώς και τις αρμονικές που παρουσιάζονται. Στην παρούσα φάση η επιλογή της συχνότητας συντονισμού έχει επιλέγει να είναι ποιο υψηλή από αυτή που χρησιμοποιείτε στο εύρος 5g γιατί βοηθάει στην μελέτη και την ανάλυση γιατί σε επόμενη σχεδίαση η συχνότητά συντονισμού πέφτει.

Όπως παρατηρείται και στη Εικόνα 27 από την σχεδίαση με τις βασικές παραμέτρους της δομής του πίνακα 3 στην συχνότητα συντονισμού 36 GHz παρατηρείται ένα φραγμός δηλαδή το ηλεκτρομαγνητικό κύμα εμποδίζεται να περάσει μέσα από το δακτυλίδι.



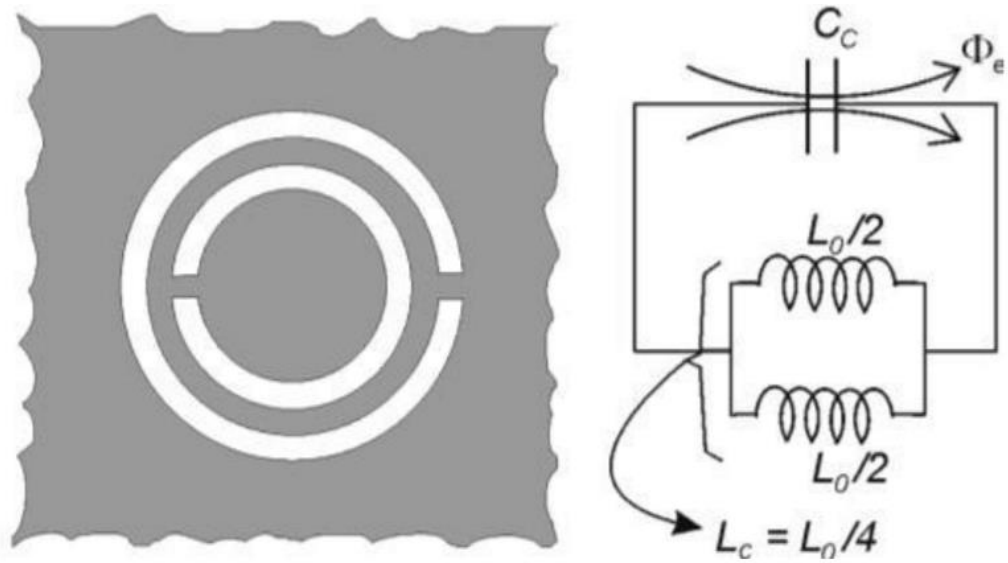
Εικόνα 27. S παραμέτρους S11 (κόκκινη γραμμή) και S21 (σκούρα γραμμή).

Πίνακας 3. Οι βασικές παράμετροι της σχεδίασης S-CSRR.

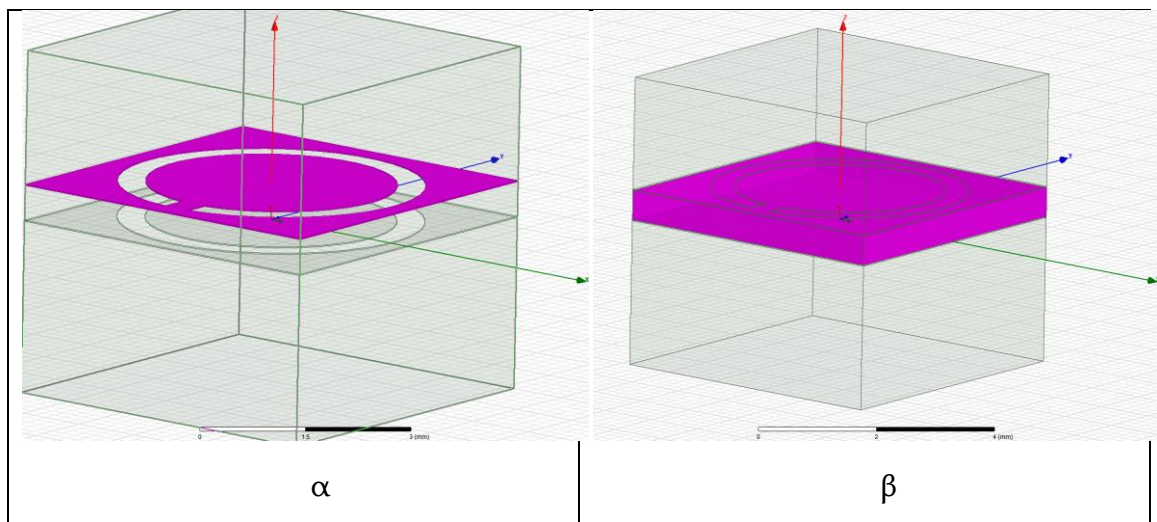
Όνομασία	Περιγραφή	Τιμή
Rout	Εξωτερική ακτίνα	0.85 mm
Rin	Εσωτερική ακτίνα	0.5 mm
g	Πλάτος του κενού	0.3 mm
h	Ύψος του δακτυλιδιού	0.017 mm

#### 4.2.2. Σχεδίαση διπλού συντονιστή BC-CSRR

Έχοντας μελετήσει την συμπεριφορά του συντονιστή μονού δακτυλιδιού διακεκομμένου δακτύλου στην συνέχεια θα προσθέσουμε ακόμα μια αγωγίμη πλάκα από την πάνω πλευρά σε ύψος 0.508mm και θα την περιστρέψουμε 180 μοίρες έτσι ώστε τα κενά των δύο δακτυλιδιών να βλέπουν σε διαφορετικές κατευθύνσεις.



Εικόνα 28. Κυκλωματικό ισοδύναμο BC-CSRR

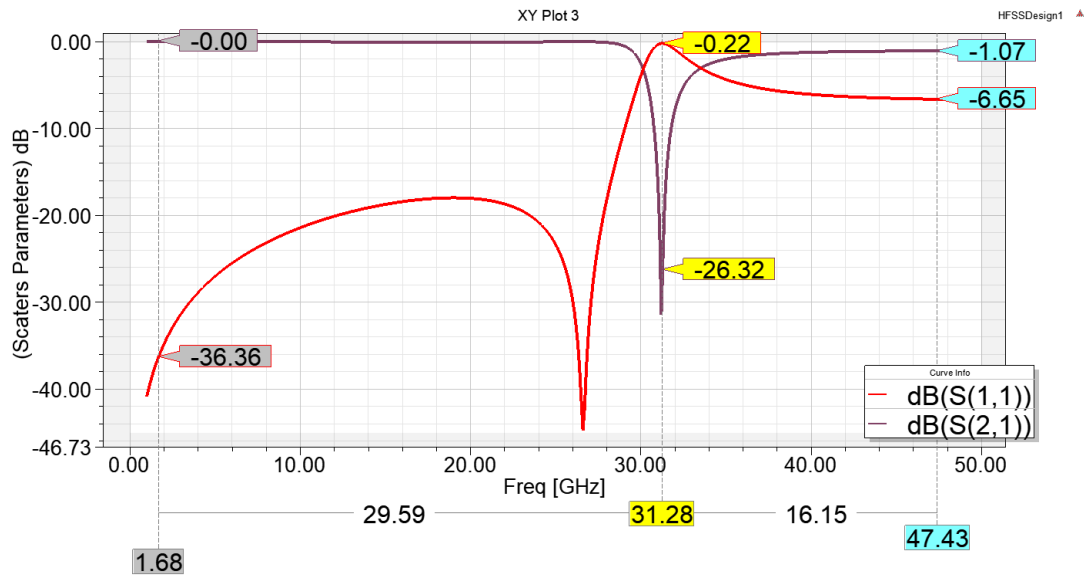


Εικόνα 29. Σχεδίαση της μορφής BC-CSRR με διηλεκτρικό υπόστρωμα α) κενό αέρα και β) Rogers RT 5880

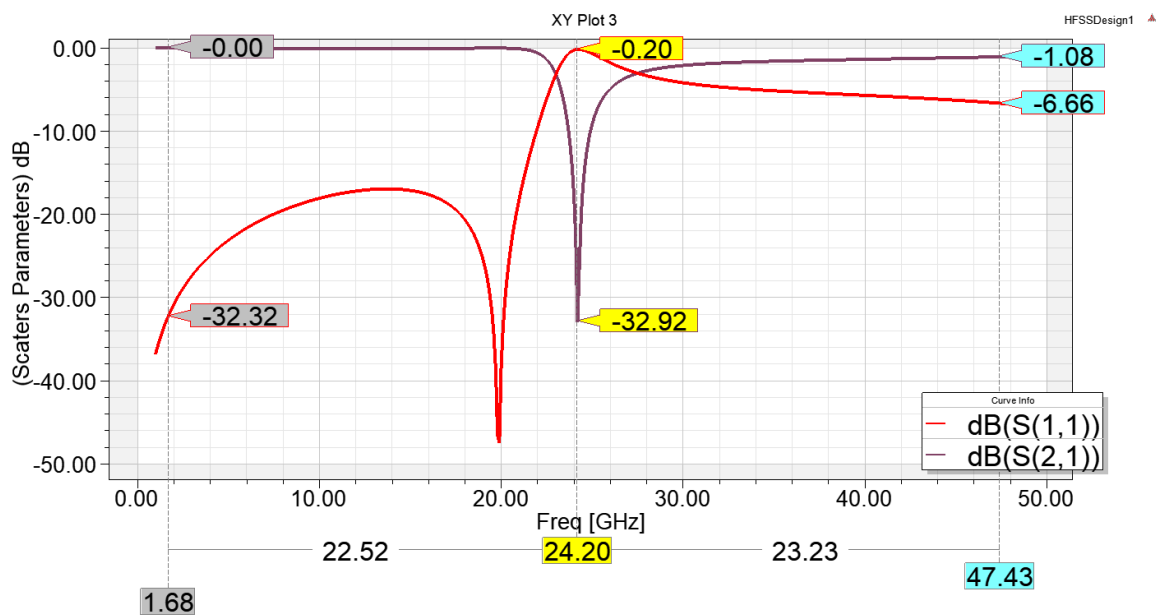
Για τις ίδιες ακριβώς διαστάσεις του πίνακα 3 η συχνότητα συντονισμού ολισθαίνει στα 31 GHz και αυτό οφείλεται στην αύξηση της χωρητικότητας καθώς και της αγωγιμότητας της συνολικής δομής όπως φαίνεται και από το κυκλωματικό ισοδύναμο Εικόνα 28 αλλά είναι εμφανές ότι ο φραγμός έχει γίνει ποιο ισχυρός Εικόνα 30. Στην συνέχεια αν αντικαταστήσουμε τον κενό αέρα με διηλεκτρικό υπόστρωμα το οποίο είναι



Roger/RT 5880 με  $\epsilon_r=2.2$  και  $\tan\delta=0.009$  η συχνότητα συντονισμού μικραίνει ακόμα περισσότερο Εικόνα 31.

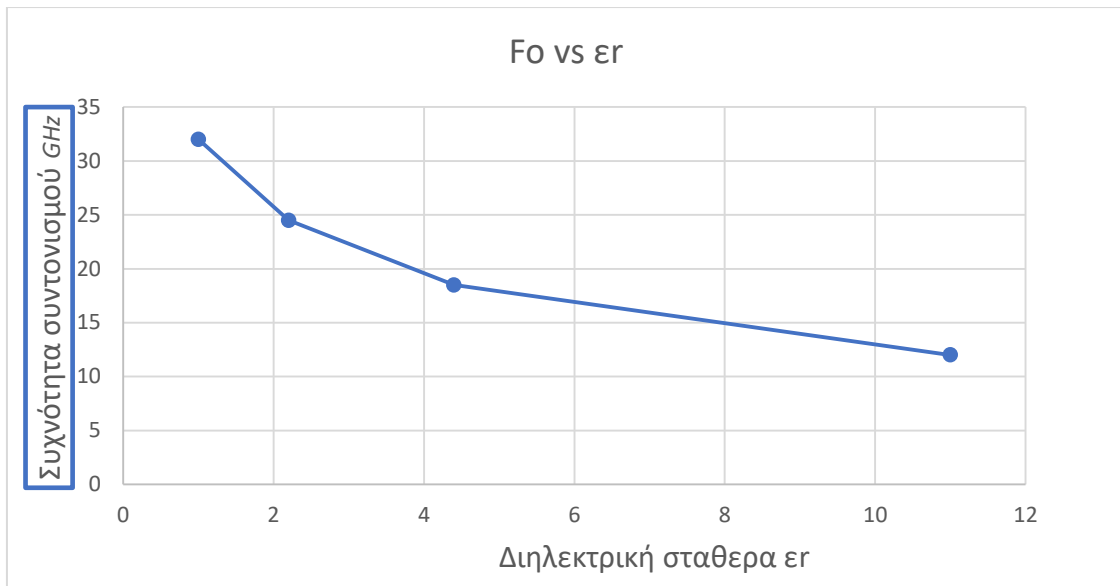


Εικόνα 30. Οι παράμετροι  $S_{11}$  και  $S_{21}$  του BC-CSRR με διηλεκτρικό υπόστρωμα αέρα.



Εικόνα 31. Οι παράμετροι  $S_{11}$  και  $S_{21}$  του BC-CSRR με διηλεκτρικό υπόστρωμα Roger rt 5880

Το είδος του υλικού σύμφωνα με την διηλεκτρική σταθερά του υποστρώματος επηρεάζει την συχνότητα συντονισμού και την απόδοση του συντονιστή με την συχνότητα να ανεβαίνει όσο διηλεκτρική σταθερά μικραίνει όπως φαίνεται και στο Εικόνα 32.



Εικόνα 32. Σχήμα με την αλλαγή της συχνότητας συντονισμού ανάλογα την διηλεκτρική σταθερά.

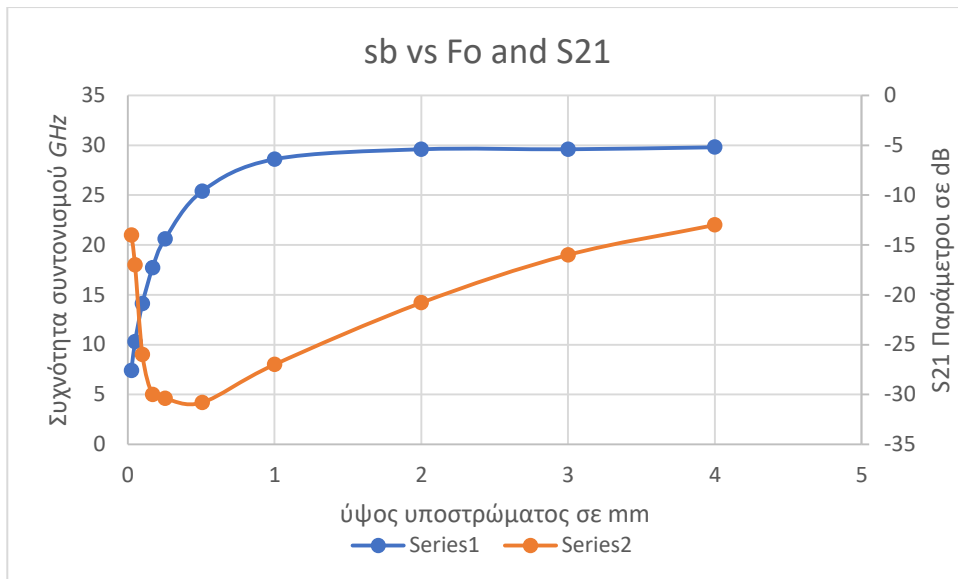
#### 4.2.3 Επιδράσεις των διαφορετικών παραμέτρων

Από την βασική δομή και σύμφωνα και με το κυκλωματικό σχέδιο με την αλλαγή σε κάθε μια από τις βασικές παραμέτρους του πίνακα 1 παρατηρείται και ολίσθηση της συχνότητας συντονισμού. Η αλλαγή σε κάθε μία από τις βασικές παραμέτρους μετατοπίζει την συχνότητα συντονισμού, με διαφορετική ισχύς απόσβεσης κάθε φορά..

##### 4.2.3.1. Ύψος υποστρώματος

Παράμετρος η οποία μπορεί να επηρεάσει την συχνότητα συντονισμού καθώς και την απόδοση φραγής είναι το ύψος του διηλεκτρικού υποστρώματος. Στο Εικόνα 33 είναι τα αποτελέσματα για σχεδιάσεις σύμφωνα με τον πίνακα 1 αλλάζοντας τις τιμές του ύψους του υποστρώματος με  $h$  από 0.025mm-4mm. Και εδώ παρατηρούμε ότι το ύψος του υποστρώματος το οποίο καθορίζει και την μεταξύ τους απόσταση των δύο αγωγικών πλακών επηρεάζει κατά αναλογία σχετικά με το συνολικό μέγεθος του δακτυλιδιού. Η συχνότητα αυξάνεται με την αύξηση του ύψους και αντίστοιχα όμως αυξάνονται και οι απώλειες του διηλεκτρικού που ενεργούν στην δομή.

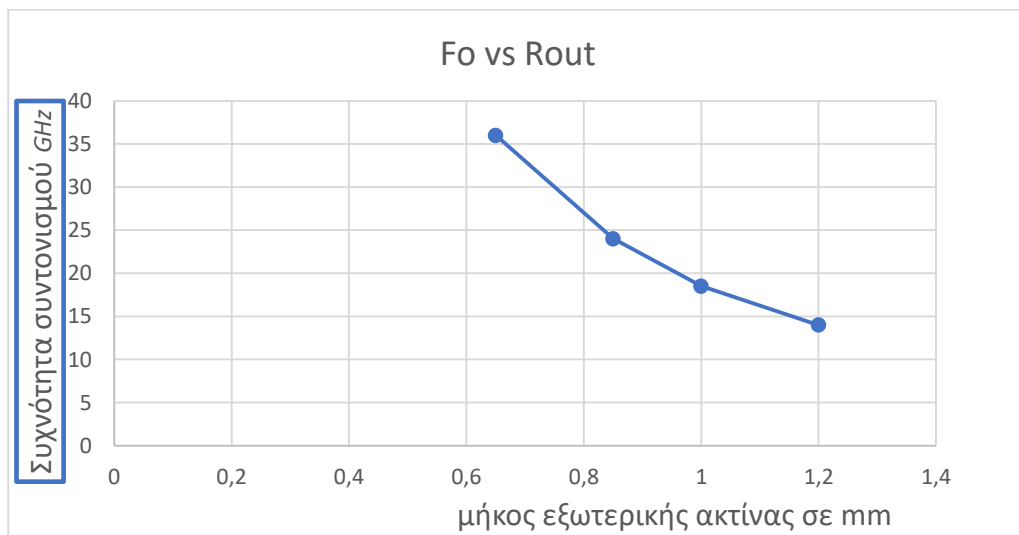




Εικόνα 33. Η εξάρτησης συχνότητας συντονισμού με το ύψος του υποστρώματος και παραμέτρων S21

#### 4.2.3.2. Εξωτερική ακτίνα Rout

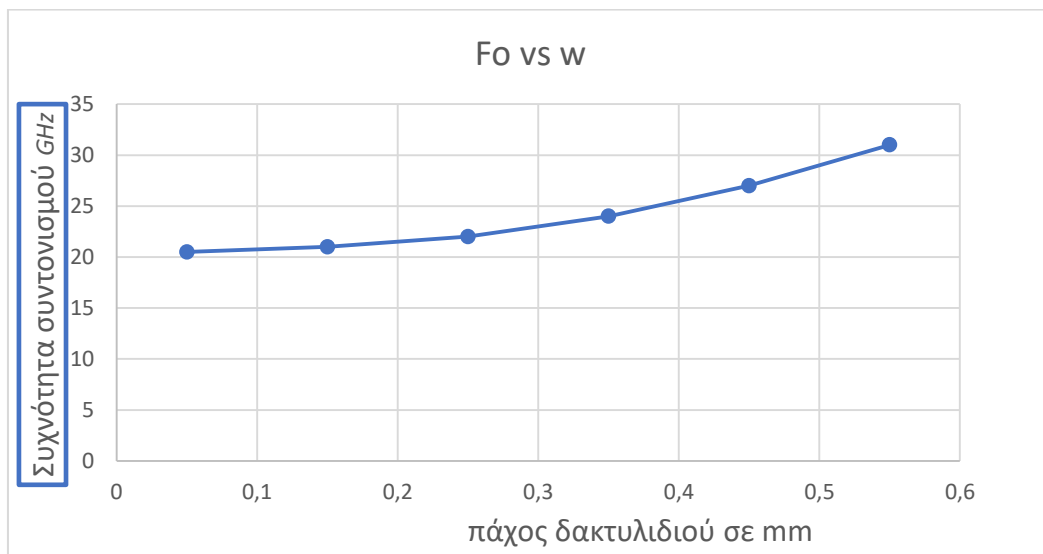
Ο συντονιστής S-CSRR καθώς και ο S-SRR αλληλεπιδρούν σε μήκη κύματος μικρότερα από το μέγεθος της συνολικής δομής κατά προσέγγιση 10 φορές μικρότερη. Έτσι όσο το μήκος της εξωτερικής ακτίνας μικραίνει αντίστοιχα μικραίνει και το μέγεθος της συνολικής δομής και έτσι η συχνότητα συντονισμού μεγαλώνει. Στο Εικόνα 34 φαίνονται αυτές οι αλλαγές στην συμπεριφορά του συντονιστή για ακτίνες εξωτερικού δακτυλιδιού από 0.5 mm έως 1.2mm. Όλες οι υπόλοιποι παράμετροι μένουν σταθερές.



Εικόνα 34. Σχέδιο με τους παραμέτρους S11 για διαφορετικές τιμές στην εξωτερική ακτίνα

#### 4.2.3.3. Πάχος δακτυλιδιού $w$ -εσωτερική ακτίνα $R_{in}$

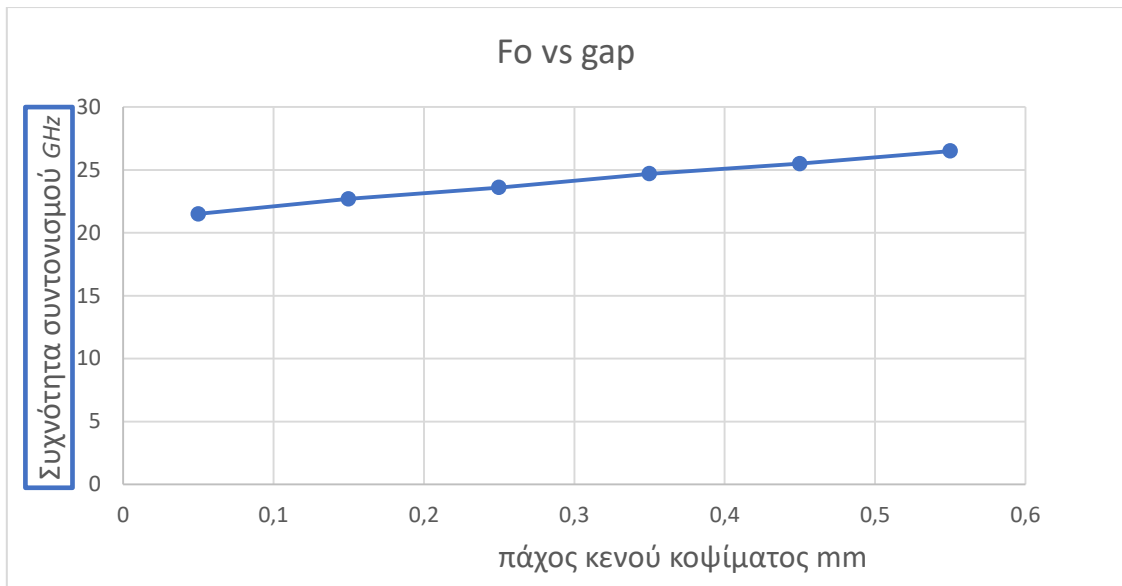
Για διαφορετικές τιμές της εσωτερικής ακτίνας δηλαδή διαφορετικό πάχος δακτυλιδιού το κενό- διηλεκτρικό υλικό αλλάζει και έτσι μεταβάλλεται η χωρητικότητα της δομής. Όταν το πλάτος του δακτυλίου μειωθεί, η χωρητικότητα αυξάνεται, και αντίστροφα. Αν και το παχύτερο δακτυλίδι αυξάνει την επαγωγή η διαφορά είναι πολύ μικρή ώστε να μπορέσει να αντισταθμίσει την μείωση της χωρητικότητας. Σαν αποτέλεσμα η συχνότητα συντονισμού αυξάνεται όσο αυξάνεται το πάχος του κενού δακτυλιδιού. Με την Εικόνα 35 επιβεβαιώνονται οι παραπάνω σχολιασμοί.



Εικόνα 35. Σχέδιο με τους παραμέτρους  $S_{11}$  για διαφορετικές τιμές στην εσωτερική ακτίνα

#### 4.2.3.4. Κενό διάστημα εγκοπής $gap$

Η τροποποίηση του πλάτους του κενού της εγκοπής του δακτυλιδιού  $g$  έχει άμεση επίδραση στην αυτεπαγωγή και την χωρητικότητα της δομής. Έτσι, όσο μικρότερο είναι το πλάτος, τόσο μεγαλύτερη είναι η επαγωγικότητα που είναι εγγενής στο μεταλλικό διάκενο. Η χωρητικότητα της δομής αυξάνεται επίσης καθώς η επιφάνεια του διηλεκτρικού δακτυλίου μεγαλώνει. Επομένως, για μεγαλύτερες τιμές του πλάτους του κενού, αναμένονται συχνότητες υψηλότερου συντονισμού. Το σχήμα επιβεβαιώνει αυτή την εκτίμηση για διαφορετικά πλάτη  $gap$  μεταξύ 0.05 mm και 0.6 mm.



Εικόνα 36. Σχεδιάγραμμα εξάρτησης πάχους δακτυλίου  $w$  με την συχνότητα συντονισμού  $f_0$

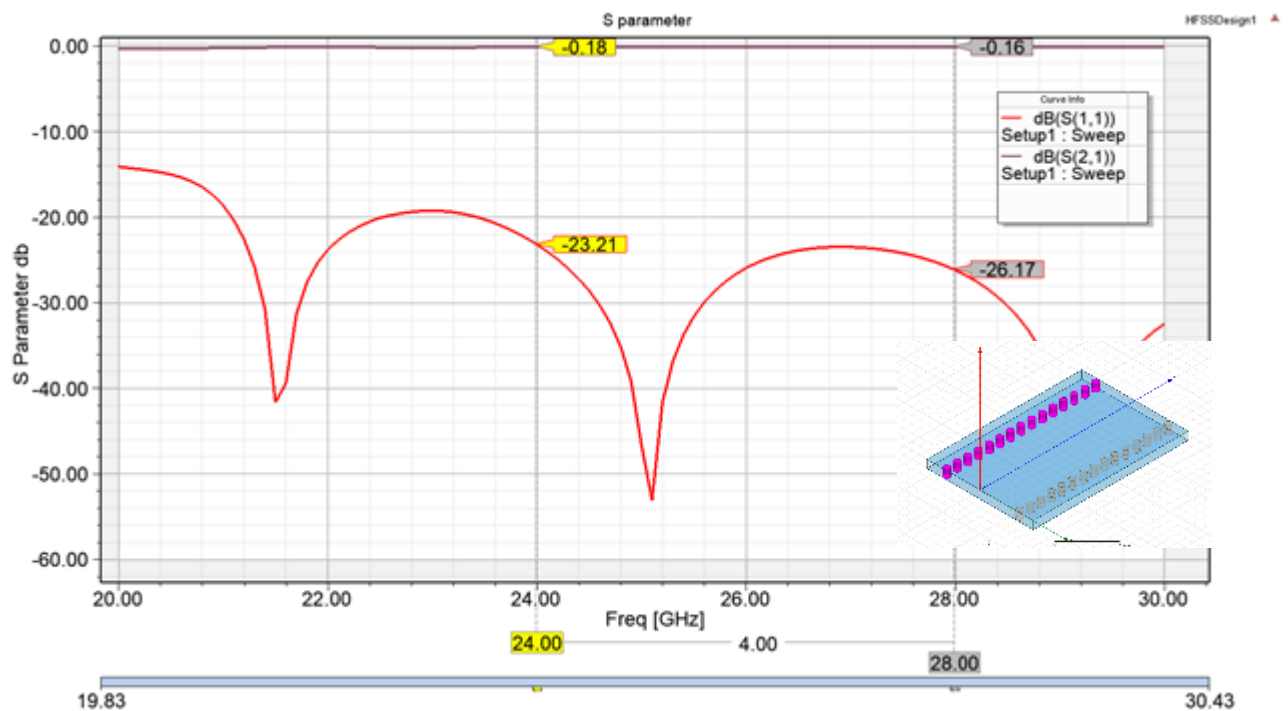
Πρέπει να σημειωθεί και εδώ ότι οι τιμές του κενού για πολύ μικρά ή μεγάλα κενά η ισχύς του φραγμού εξασθενεί. Όταν θέλουμε να κάνουμε μια μικρή ρύθμιση στην συχνότητα συντονισμού και να βελτιώσουμε και λίγο την απόδοση φραξίματος  $S_{21}$  τότε με την παραμετροποίηση του κενού  $gap$  καταφέρνουμε το βέλτιστο αποτέλεσμα. Στην ουσία μπορούμε να χρησιμοποιούμε το πλάτος  $g$  σαν μια μορφή tuning.

### 4.3 Σχεδίαση SIW-CSRR

Έχοντα μελετήσει στα πιο πάνω κεφάλαια της ιδιότητες και την συμπεριφορά του συντονιστή BC-CSRR για διαφορετικές τιμές των βασικών παραμέτρων της δομής του και πόσο επηρεάζουν την απόδοση του σε αυτό το κεφάλαιο θα αντικαταστήσουμε τους κυλινδρικούς αγωγούς (vias) του κυματοδηγού SIW με συμπληρωματικούς συντονιστές διακεκομμένου δακτύλου BC-CSRR .

Αρχικά θα σχεδιάσουμε έναν κυματοδηγό ολοκληρωμένου υποστρώματος στηριζόμενοι σε προηγούμενη μελέτη SIW κυματοδηγού και επιλέχτηκε η συχνότητα αποκοπής στα  $20 GHz$  όπου επιτρέπεται η μετάδοση του επικρατέστερου ρυθμού με τις χαμηλότερες απώλειες ενώ εξασθενεί την διάδοση των επόμενων TE ρυθμών μια σειρά από BC-CSRR συντονιστές αντί για τους κυλινδρικούς αγωγούς. Στην Εικόνα 37 αναλύονται οι  $S$  παράμετροι σκέδασης για την δομή που τα χαρακτηριστικά της μεγέθη περιγράφονται από τον Πίνακα 4. Βασικές παράμετροι SIW κυματοδηγού. Η

Σχεδίαση θεωρείτε επιτυχής εφόσον στον επιθυμητό εύρος συχνοτήτων παρατηρούνται χαμηλές απώλειες διάδοσης S21 και αντίθετα υψηλές απώλειες ανάκλασης S11.



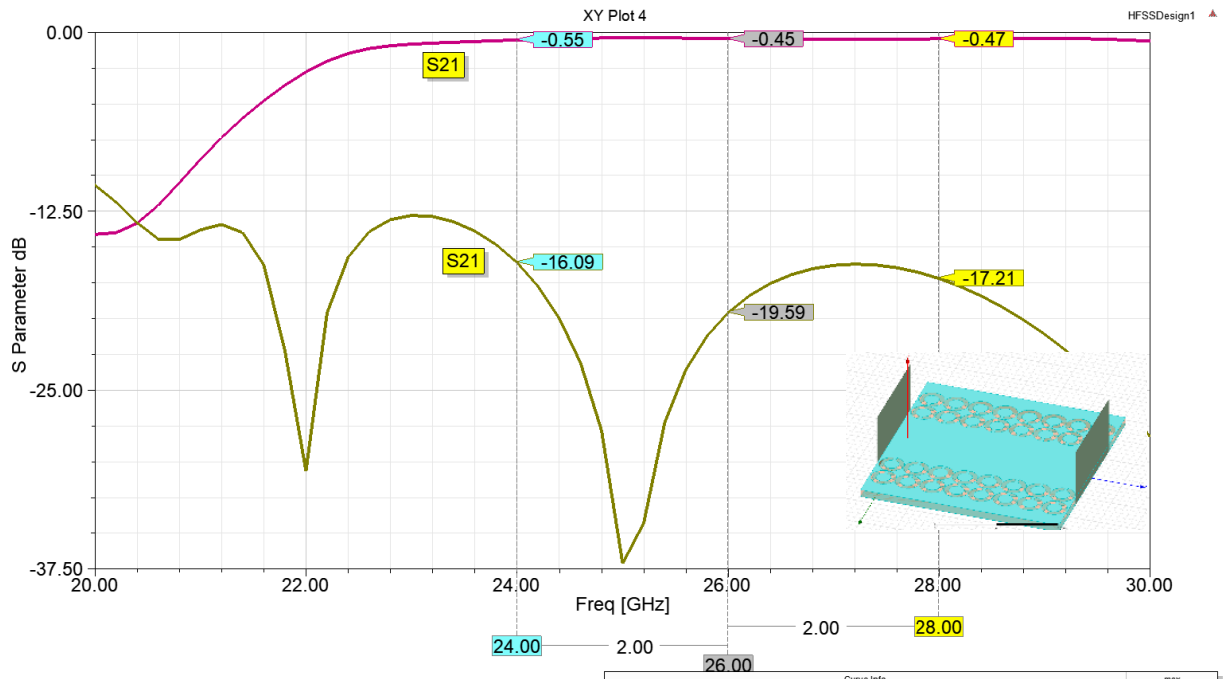
Εικόνα 37. S11 και S21 παράμετροι κυματοδηγού SIW

Πίνακας 4. Βασικές παράμετροι SIW κυματοδηγού

Όνομασία	Περιγραφή	Τιμή
d	Διάμετρο κυλινδρικού αγωγού	1.2 mm
t	Ύψος υποστρώματος	0.508 mm
w	Ενεργό πλάτος δομής	5.8 mm
S	Απόσταση μεταξύ δύο κυλινδρικών αγωγών	0.6 mm
nv	Αριθμός κυλινδρικών αγωγών	15
L	Συνολική μήκος της δομής	15 mm

Με γνώμονα την παραπάνω σχεδίαση διατηρώντας τις αρχικές διαστάσεις σταθερές αντικαθιστούμε του κυλινδρικούς αγωγούς με συντονιστές BC-CSRR που σχεδιάστηκαν στο κεφάλαιο 2. Ο Πίνακας 5 περιέχει τις βασικές τιμές της τελικής σχεδίασης και σύμφωνα με βοήθεια των παραμέτρων σκέδασης S11 και S21 από την Εικόνα 38. Οι S παράμετροι κυματοδηγού SIW-CSRR η συχνότητα λειτουργίας της δομής συμβαδίζει με το εύρος ενδιαφέροντος στις συχνότητες από 24 GHz μέχρι και 28 GHz. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι η σχεδίαση με μια μόνο σειρά δακτυλιδιών και στις δύο πλευρές παρουσίαζε υψηλότερες απώλειες διαρροής όπου

βελτιώθηκαν με την εισαγωγή και δεύτερης σειράς δακτυλιδιών. Σε δοκιμή εισαγωγής και τρίτης σειρά δακτυλιδιών η απώλειες ήταν ελάχιστες μικρότερες αλλά το συνολικό μέγεθος της δομής γινόταν αισθητά μεγαλύτερο. Θέλοντας να κρατήσουμε το συνολικό μέγεθος της δομής σε χαμηλά επίπεδα επικράτησε η σχεδίαση με δύο σειρές δακτυλιδιών.

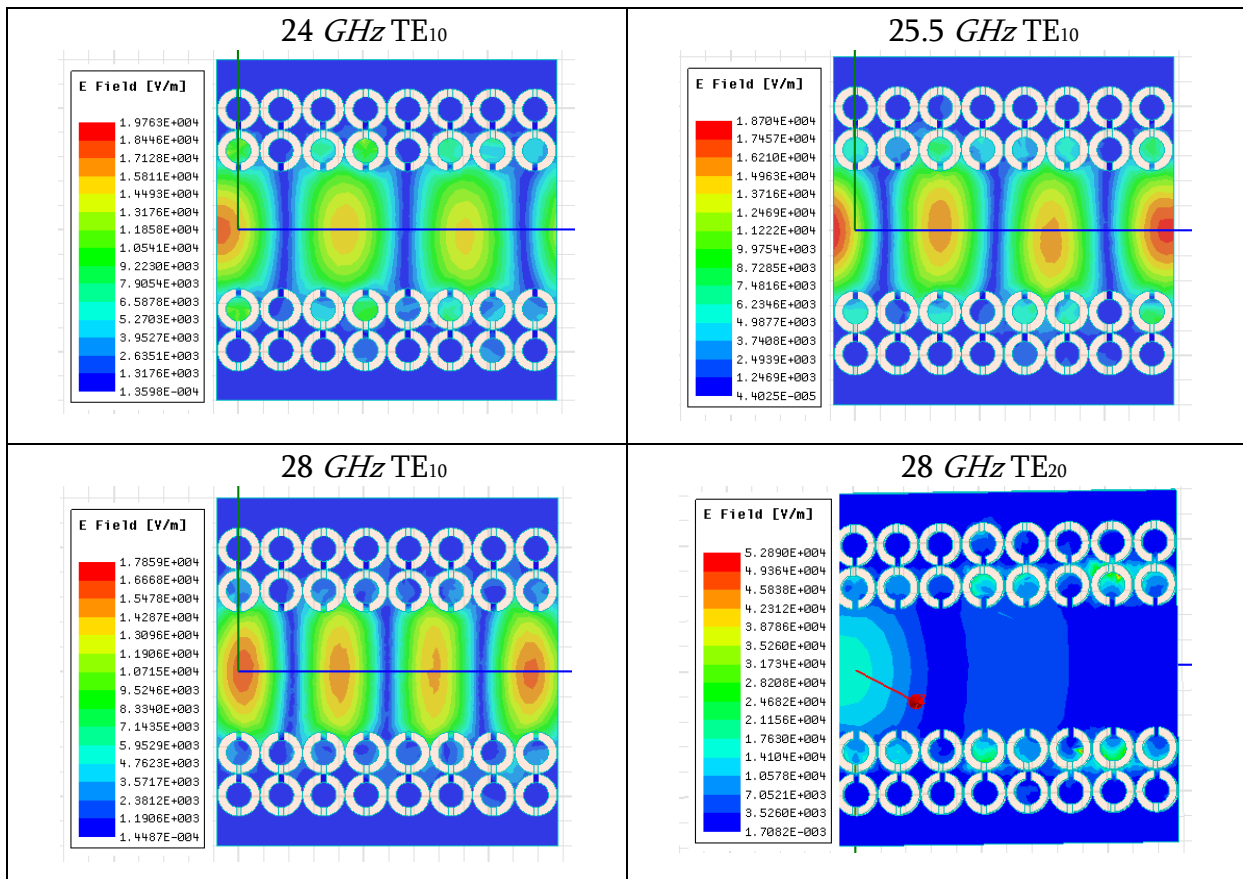


Εικόνα 38. Οι S παράμετροι κυματοδηγού SIW-CSRR

Πίνακας 5. Βασικές παράμετροι SIW-BCSRR κυματοδηγού

Όνομασία	Περιγραφή	Τιμή
Rout	Εξωτερική ακτίνα	0.85 mm
Rin	Εσωτερική ακτίνα	0.5 mm
g	Πλάτος του κενού	0.3 mm
S	Απόσταση μεταξύ δύο δακτυλιδιών	0.1 mm
Width	Ενεργό πλάτος της δομής	6.5 mm
t	Ύψος υποστρώματος	0.508 mm

Η Εικόνα 39. Γραφήματα ηλεκτρικού πεδίου στις συχνότητες 24-28GHz αποτελείται από 3 εικονικά γραφήματα της διάδοσης του επικρατέστερου ρυθμού TE<sub>10</sub> στις τρεις βασικές συχνότητες αρχή μέση και τέλος από το επιθυμητό εύρος λειτουργίας έχοντας σχεδόν μηδενικές πλευρικές απώλειες διαρροής από τις σειρές των δακτυλιδιών. Στην τελευταίο γράφημα είναι αδύνατη η διάδοση του κύματος στα 28 GHz όπου βεβαιώνει και την αδυναμία διάδοσης TE<sub>20</sub> και σε χαμηλότερες συχνότητες.



Εικόνα 39. Γραφήματα ηλεκτρικού πεδίου στις συχνότητες 24-28GHz

## 5. Ανάλυση και σχεδίαση κεραίας SIW-BCSRR

### 5.1. Εισαγωγή στις κεραίες

Η ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών με ολόένα και μικρότερες τηλεπικοινωνιακές συσκευές δεν θα μπορούσε να μην επηρεάσει και την κεραία σαν ένα από τα βασικότερα στοιχεία δόμησης τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού για την μεταφορά και λήψη δεδομένων σε μεγάλη απόσταση. Η κατασκευή επίπεδων κεραιών μικρού μεγέθους και η ικανότητα να μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν σε άλλες κυκλωματικές διατάξεις είναι τα βασικά κριτήρια που απασχολούν τον εκάστοτε σχεδιαστή. Η τεχνολογία που μελετήθηκε στα πιο πάνω κεφάλαια substrate integrated waveguide μπορεί ενσωματώσει και να συσκευαστούν κεραίες τέτοιους είδους όπως και

έχουν προταθεί και στο παρελθόν ποικιλία από διαφορετικές τεχνικές και διαφορετικά σχήματα.

Η κεραία μπορεί να λειτουργήσει σαν πομπός μετατρέποντας τα ηλεκτρικά σήματα της γραμμής μεταφοράς σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα στον ελεύθερο χώρο. Όπως και σαν δέκτης λαμβάνοντας τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα του χώρου και μετατρέποντας τα σε ηλεκτρικά σήματα στην γραμμή μεταφοράς και στην συνέχεια την ανάκτηση τη πληροφορίας. Ο μεγαλύτερος περιορισμός που αντιμετωπίζετε στη σχεδίαση και κατασκευή της κεραίας είναι ότι η συνολική της δομή είναι άμεσα εξαρτημένη από το μήκος κύματος της συχνότητας συντονισμού και την λειτουργία της κεραίας. Θα μελετήσουμε παρακάτω κάποια βασικά χαρακτηριστικά που προσδιορίζουν την λειτουργία μιας κεραίας όπως το διάγραμμα ακτινοβολίας, το εύρος ζώνης, χαρακτηριστική αντίσταση εισόδου κ.α.

### 5.1.1. Βασικά Χαρακτηριστικά κεραίας

Για την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας και της απόδοσης μια κεραίας κρίνεται απαραίτητο η εισαγωγή στην σύντομη αναφορά των βασικών χαρακτηριστικών που έχει μια κεραία τα οποία περιγράφονται εν συντομία παρακάτω [36][37]

- Σύνθετη αντίσταση εισόδου κεραίας  $Z_{in}$

Η σύνθετη αντίσταση της κεραίας περιγράφεται σαν ο λόγος τάσης προς το ρεύμα σύμφωνα με το κυκλωματικό ισοδύναμο της κεραίας. Θεωρείται σαν την αντίσταση που αν τοποθετηθεί στην άκρη της γραμμής μεταφοράς θα καταναλώνει την ίδια ισχύ με αυτήν της κεραίας. Έχει μιγαδική μορφή  $Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$  με το πραγματικό μέρος, να αντιπροσωπεύει την απώλεια ισχύς στο δίκτυο τροφοδοσίας της κεραίας  $R_{in} = R_a + R_L$ .

$R_{rad}$  Αντίσταση ακτινοβολίας ορίζεται ως ωμική αντίσταση που θα καταναλώσει την μέση ισχύ ακτινοβολίας αν διαρρέοταν από το ίδιο ρεύμα της εισόδου της κεραίας.

$$R_{rad} = P_{rad} / I_{rms}^2$$

$R_{loss}$  Αντίσταση απωλειών είναι η ωμική αντίσταση που όταν διαρρέεται με ρεύμα ίσο με αυτό της εισόδου της κεραίας δαπανά ισχύ ίση με την ισχύ που χάνεται με την μορφή της θερμότητας

Το φανταστικό μέρος αντιστοιχεί στην άεργο ισχύ που αποθηκεύεται στο κοντινό πεδίο της κεραίας κα είναι ανάλογο με της τάσης τροφοδοσίας της πηγής για την απαιτούμενη ισχύ ακτινοβολίας μεγάλες τιμές του φανταστικού απαιτούν και υψηλή τάση τροφοδοσίας για την επιθυμητή ισχύ. Η συχνότητα  $\omega_0$  στην οποία το φανταστικό

μέρος μηδενίζεται ονομάζεται συχνότητα συντονισμού της κεραίας. Στόχος είναι η αντίσταση μιας κεραίας να παρουσιάζει μόνο ωμική αντίσταση ώστε να είναι εύκολη η προσαρμογή της με την διάταξη τροφοδοσίας.

- Συντελεστής ανάκλασης

Ο συντελεστής ανάκλασης όπως το λέει και το όνομά του είναι όρος που περιγράφει κατά πόσο το κύμα ανακλάται εξαιτίας της διαφοράς χαρακτηριστική αντίστασης της γραμμής  $Z_{trans}$  μεταφοράς ή της πηγής και την χαρακτηριστική αντίσταση της εισόδου της κεραίας  $Z_{ant}$ . Συνήθως μετράτε σε dB και μπορούμε να μετρήσουμε την ανακλώμενη ισχύ στο σημείο τροφοδοσίας της κεραίας.

*Εξίσωση 18*

$$\Gamma(\omega) = \frac{Z_{ant} - Z_{trans}}{Z_{ant} + Z_{trans}}$$

- Στάσιμα κύματα VSWR

Ο όρος VSWR Voltage Standing Wave Ratio αποτελεί επιπλέον μια εκτίμηση της διαφοράς των σύνθετων αντιστάσεων κεραίας και γραμμής τροφοδοσίας και στοχεύουμε στην διατήρηση χαμηλών τιμών.

- Κέρδος

Το κέρδος μιας κεραίας μας περιγράφει την αποδοτικότητα της να στέλνει την εκπεμπόμενη ισχύ προς μία συγκεκριμένη διεύθυνση και δίνεται από τον λόγο της έντασης της συγκεκριμένης ακεραίας με αυτόν της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας σε μια ισοτροπικής κεραίας (κεραία αναφοράς) η οποία ακτινοβολεί προς όλες τις κατευθύνσεις ομοιόμορφα. Σαν κεραία αναφοράς θεωρείται το δίπολο Hertz  $\lambda/2$ . Το κέρδος της κεραίας μετράτε σε decibel dB και με την αύξηση του μήκους της κεραίας αυξάνεται και η τιμή του κέρδους.

- Κατευθυντικότητα και κέρδος ισχύος

Σε πολλές περιπτώσεις η κεραία δεν ακτινοβολεί ομοιόμορφα σε όλες τις κατευθύνσεις αλλά η μεγαλύτερη ακτινοβολούμενη ισχύ περιορίζεται- συγκεντρώνεται σε μια κατεύθυνση σχηματίζοντας ένα λοβό. Το μέτρο που υπολογίζει την κατευθυντικότητα της κεραίας ορίζεται ως η ένταση ακτινοβολίας σε μια διεύθυνση προς την μέση ένταση ακτινοβολίας που εκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις και περιγράφεται από τον παρακάτω τύπο



$$D=4\pi U/P_{rad}$$

Ένα επιπλέον μέγεθος που χρησιμοποιείται στο να περιγράψει το κέρδος μιας κεραίας είναι το κέρδος ισχύς και αποτελεί το μέτρο σύγκρισης της ισχύς εξόδου σε συγκεκριμένη κατεύθυνση σε σχέση με μια ιστροπική κεραία. Το κέρδος υπολογίζεται από τον τύπο

*Εξίσωση 19*

$$A(\text{dB})=10 \log_{10}(P_2/P_1)$$

Όπου  $A(\text{dB})$ : το κέρδος της κεραίας σε decibels.

$P_1$ : η εκπεμπόμενη ισχύς της μονοκατευθυντικής κεραίας.

$P_2$ : η εκπεμπόμενη ισχύς της ιστροπικής κεραίας.

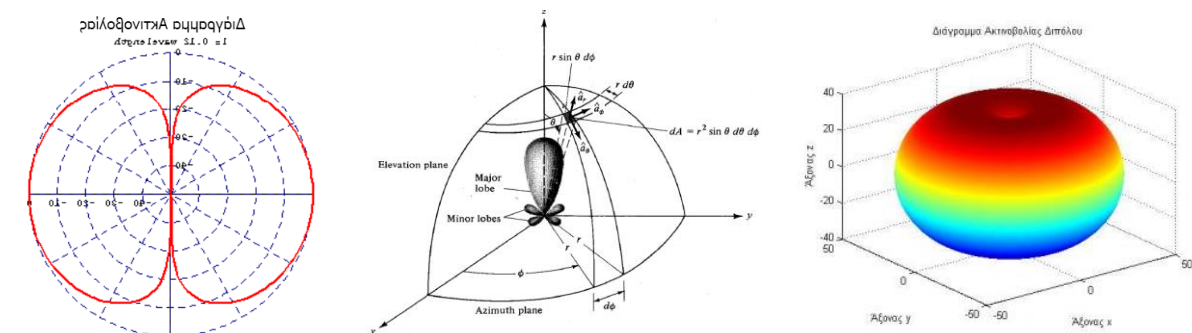
- Διάγραμμα ακτινοβολίας

Το ποσό της ισχύς που ακτινοβολεί μια κεραία στον χώρο συνάρτηση των χωρικών συντεταγμένων μπορεί να περιγράψει με το διάγραμμα ακτινοβολίας. Με το διάγραμμα ακτινοβολίας έχουμε τις ιδιότητες της ακτινοβολίας της κεραίας στο μακρινό πεδίο και μπορεί να περιγράψει σε δύο η και σε τρεις διαστάσεις Εικόνα 40. Ένα διάγραμμα ακτινοβολίας μπορεί να παριστάνει τη γωνιακή κατανομή:

(α)Μέτρο έντασης πεδίου

(β)Πυκνότητα ισχύος

(γ)Ένταση ακτινοβολίας. Το διάγραμμα ακτινοβολίας μπορεί να υπολογιστεί για το  $F_c$  είναι η μέση συχνότητα και υπολογίζεται  $\frac{F_{high}-F_{low}}{2}$



Εικόνα 40. Διάγραμμα ακτινοβολίας σε διαστάσεις 1d, 2d, και 3d

- Απόδοση ακτινοβολίας

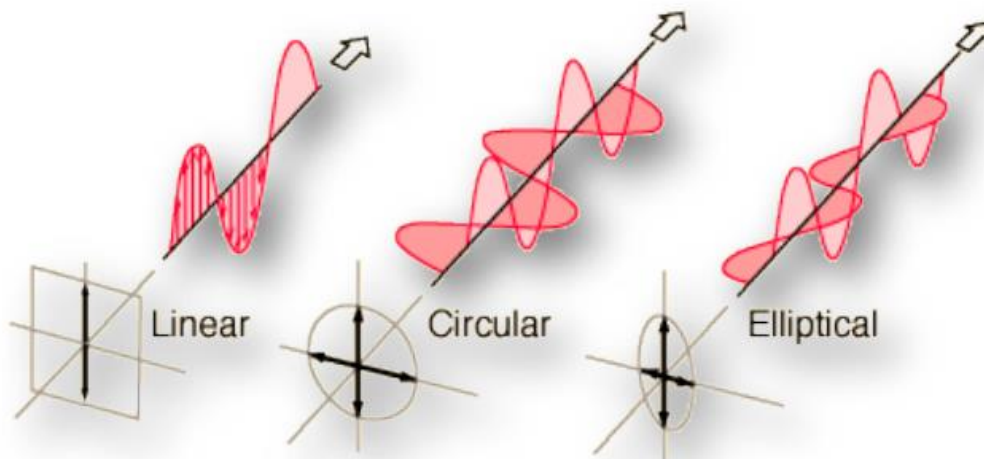
Ο λόγος ισχύος που απορροφάτε από την αντίσταση ακτινοβολίας  $R_{rad}$  προς την ισχύ που απορροφάτε από άθροισμα των αντιστάσεων  $R_{rad} + R_{loss}$  μας δίνει την απόδοση ακτινοβολίας και περιγράφεται από τον παρακάτω τύπο

*Εξίσωση 20*

$$e_{rad} = \frac{R_{rad}}{R_{loss} + R_{rad}}$$

- Πόλωση κεραίας

Με τον όρο πόλωση της κεραίας περιγράφουμε την τροχιά του κύματος συνάρτηση του χρόνου πάνω σε μια επιφάνεια κατά την διεύθυνση της διάδοσης. Όταν το κύμα περιγράφεται από σταθερά επίπεδα του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου τότε το κύμα ορίζεται σαν γραμμικά πολωμένο. Οι τρεις βασικές κατηγορίες πόλωσης γραμμική, κυκλική και ελλειπτική περιγράφονται παρακάτω.



*Εικόνα 41. Από αριστερά προς τα δεξιά απεικονίζονται η γραμμική, κυκλική και ελλειπτική πόλωση ηλεκτρομαγνητικού κύματος [3].*

- Εύρος ζώνης

Ορίζεται το εύρος συχνοτήτων μιας κεραίας που πληροί τις προϋποθέσεις του κατασκευαστή και κυμαίνεται μέσα σε αποδεκτά πλαίσια στις συγκεκριμένες

συχνότητες. Μια κεραία μπορεί να λειτουργεί σε μεγάλη περιοχή συχνοτήτων (ευρείας ζώνης) και το εύρος ορίζεται από

*Εξίσωση 21*

$$BW = \frac{F_{high}}{F_{low}} * 100\%$$

Για κεραίες με στενό εύρος ζώνης το εύρος δίνεται από

*Εξίσωση 22*

$$BW = \frac{F_{high} - F_{low}}{F_c} * 100\%$$

$F_c$  είναι η μέση συχνότητα και υπολογίζεται  $\frac{F_{high}-F_{low}}{2}$

### 5.1.2. Κεραία σχισμής (slot)

Η κεραία σχισμής έχει πλήθος εφαρμογών στον κλασικό ορθογώνιο κυματοδηγό προσφέροντας μια σχετικά εύκολη κατασκευή χαράζοντας σχισμές slots στις μεταλλικές επιφάνειες της διάταξης. Τέτοιου είδους κεραίες τα τελευταία χρόνια έχουν κατασκευαστεί και πάνω στον κυματοδηγό ολοκληρωμένου υποστρώματος SIW βασιζόμενοι στην ίδια φιλοσοφία. Η χάραξη επιφανειακών σχισμών αποτελεί μια εύκολη διεργασία και είναι δυνατή και με την χρήση απλών τεχνικών χάραξης μειώνοντας το κόστος και την δυσκολία της κατασκευής.

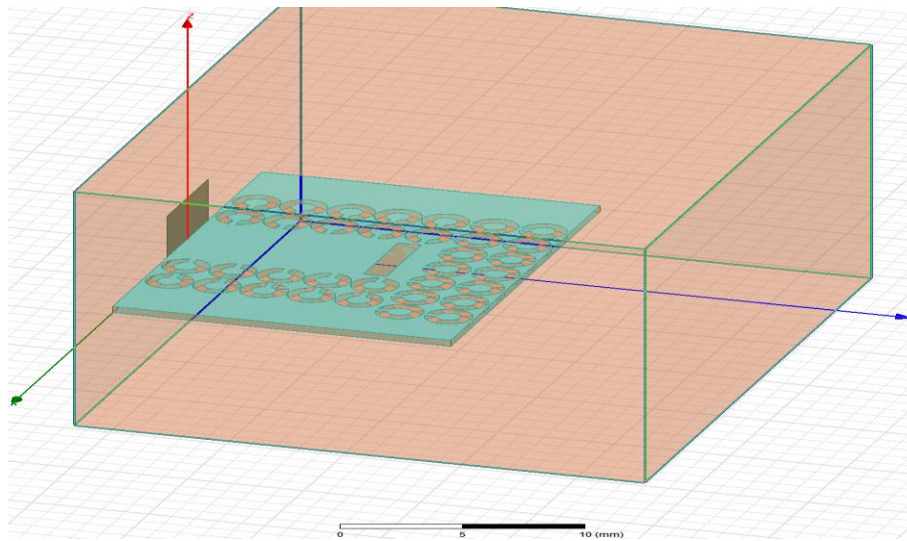
Όταν τα επιφανειακά ρεύματα της δομής διακοπούν τοποθετώντας μια σχισμή καθετή στην διεύθυνση της ροής του ρεύματος δημιουργείται ασυνέχεια στην ροή με αποτέλεσμα να το κύμα να ακτινοβολεί στο σημείο αυτό. Όταν η σχισμή έχει μήκος ίσο με  $\lambda/2$  συμπεριφέρεται σαν ένα συμπληρωματικό δίπολο  $\lambda/2$  και εκπέμπει ανάλογα στο περιβάλλοντα χώρο. Με την τοποθέτηση και άλλων σχισμών παράλληλα δημιουργούμε μια στοιχειοκεραία δίπολων.

Οι αποστάσεις των σχισμών θα πρέπει να σε σχετικά μικρή απόσταση έτσι ώστε η μία να βρίσκεται στο πεδίο επαγωγής της άλλης. Για να αποφύγουμε τις ακυρώσεις οι σχισμές τοποθετούνται σε αποστάσεις ίσες με  $\lambda g/2$  βελτιώνοντας την κατευθυντικότητα και την ενίσχυση του σήματος έχοντας συμφασική ακτινοβολία.

## 5.2. Σχεδίαση κεραίας σχισμών SIW-CSRR

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην σχεδίαση είναι ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν και στα προηγούμενα σχεδίαση χρησιμοποιώντας διηλεκτρικό υπόστρωμα Rogger RT 5880 με  $\epsilon_r$  2,2 και ύψος υποστρώματος 0.508mm και για τις δυο αγωγίμες πλάκες στην πάνω και κάτω πλευρά το υλικό είναι χαλκός. Τα δακτυλίδια

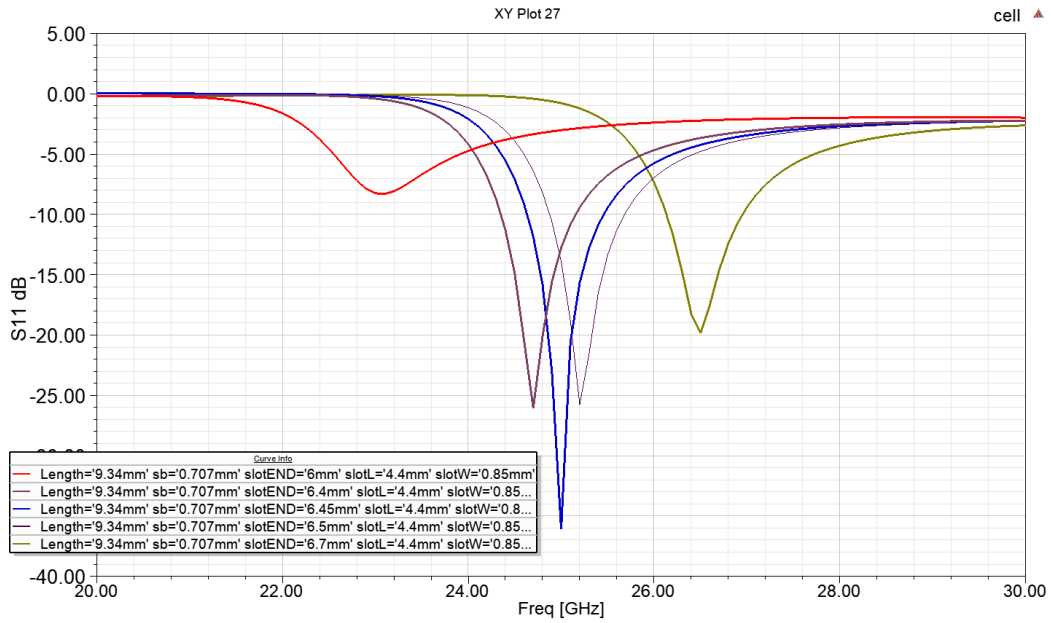
σχεδιάστηκαν με την αφαίρεση του χαλκού από το πάνω και κάτω στρώμα αντίστοιχα ενώ για την εγκοπή μόνο στο πάνω στρώμα όπως δείχνει η εικόνα 42.



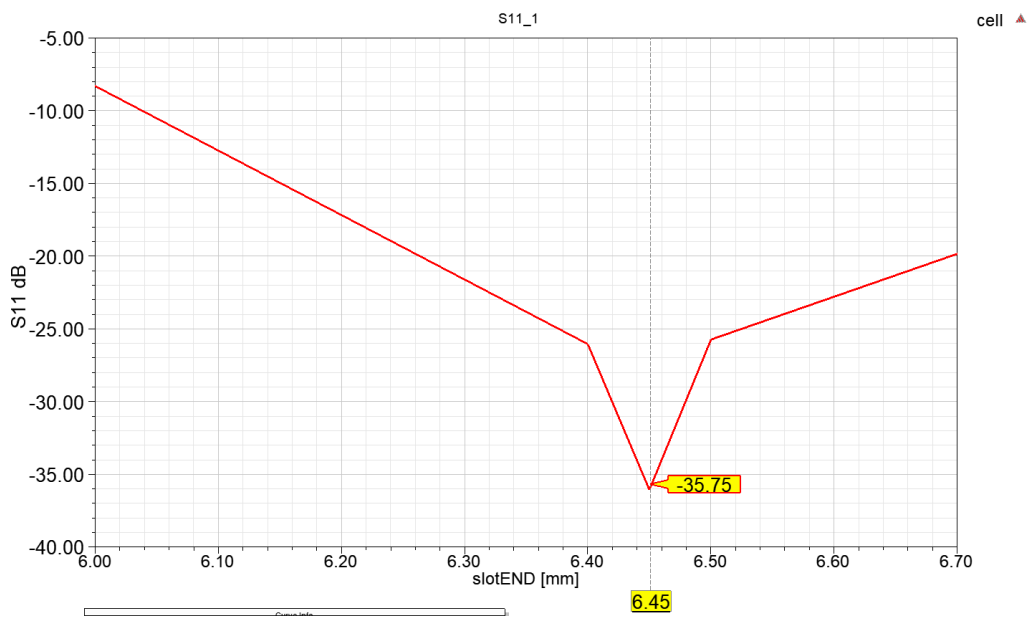
Εικόνα 42. Απεικόνιση της βασικής δομής κεραίας SIW-CSRR με μία σχισμή (slot).

Το πρώτο slot απέχει απόσταση από την είσοδο της κεραίας απόσταση ίση με  $3\lambda_g/4$  ενώ το τελευταίο slot της δομής απέχει απόσταση ίση με  $\lambda_g/4$  από το τέλος της κεραίας. Με  $\lambda_g$  αναφερόμαστε στο μήκος κύματος του κυματοδηγού. Για τον συντονισμό της κεραίας στην συχνότητα ενδιαφέροντος μεγάλη σημασία έχει η απόσταση από το κέντρο του slot με την γραμμή τερματισμού και το μήκος της εγκοπής-σχισμής (slot). Σαν γραμμή τερματισμού είναι η σειρά των δακτυλιδιών που βρίσκονται στη απέναντι πλευρά καις στόχος είναι ο ολικός φραγμός του κύματος ώστε το μεγαλύτερο μέρος να ακτινοβολείτε από τις συντονισμένες εγκοπές.

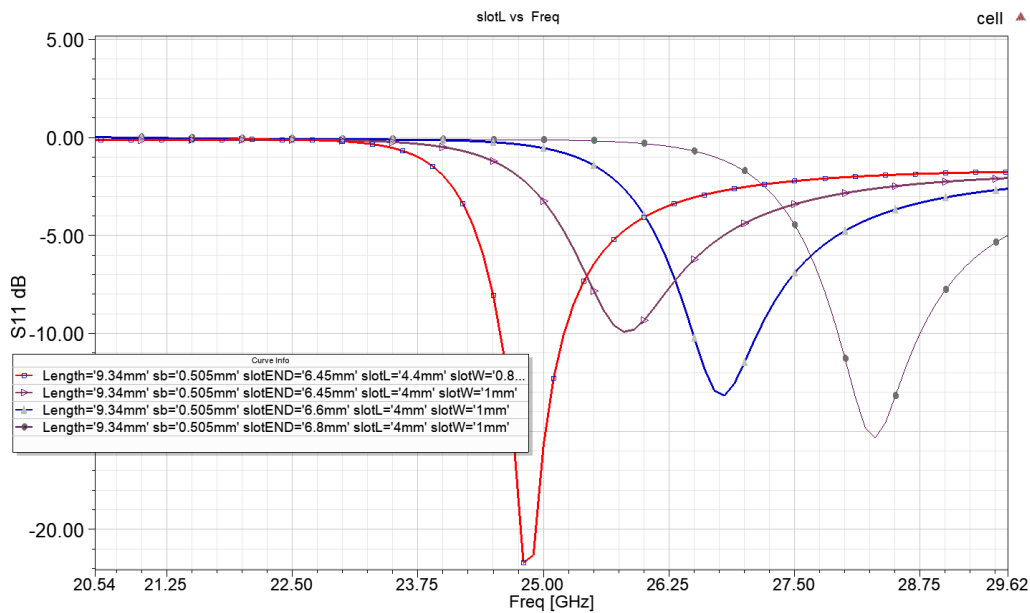
Οι διαστάσεις της εγκοπής slot καθορίζουν την συχνότητα συντονισμού-ακτινοβολίας της κεραίας, λόγω ότι η εγκοπή παρουσιάζει χωρητικά και επαγωγικά χαρακτηριστικά. Αρχικά βρίσκουμε τις διαστάσεις της εγκοπής slot που συντονίζουν στην συχνότητα των  $26.5 \text{ GHz}$ . Από την εικόνα 42 παρατηρείται ότι το μήκος της εγκοπής είναι αυτό που καθορίζει την συχνότητα συντονισμού της κεραίας  $f_0$  και επιλέγεται να είναι κοντά στο  $\lambda_g/2$ . Με την αλλαγή του πλάτος της σχισμής η συχνότητα  $f_0$  μεταβάλλεται με χαμηλότερο ρυθμό.



Εικόνα 43. Οι S11 παράμετροι συνάρτηση της συχνότητας για διαφορετικές αποστάσεις από τον τερματισμό.



Εικόνα 44. Μεταβολή συχνότητας  $f_0$  συνάρτηση της απόστασης βραχυκυκλώματος slot end.



Εικόνα 45. Μεταβολή συχνότητας  $f_0$  συνάρτηση της του μήκους της σχισμής .

Για το ταίριασμα της εισόδου της κεραίας στα 50 Ωμ θα εισάγουμε αντίστοιχο τμήμα μετάβασης μικροταινίας όπου η μελέτη έχει γίνει σε προηγούμενο κεφάλαιο. Οι τελικές διαστάσεις της μετάβασης μικροταινίας σχεδιάστηκαν σύμφωνα με τον πίνακα 6.

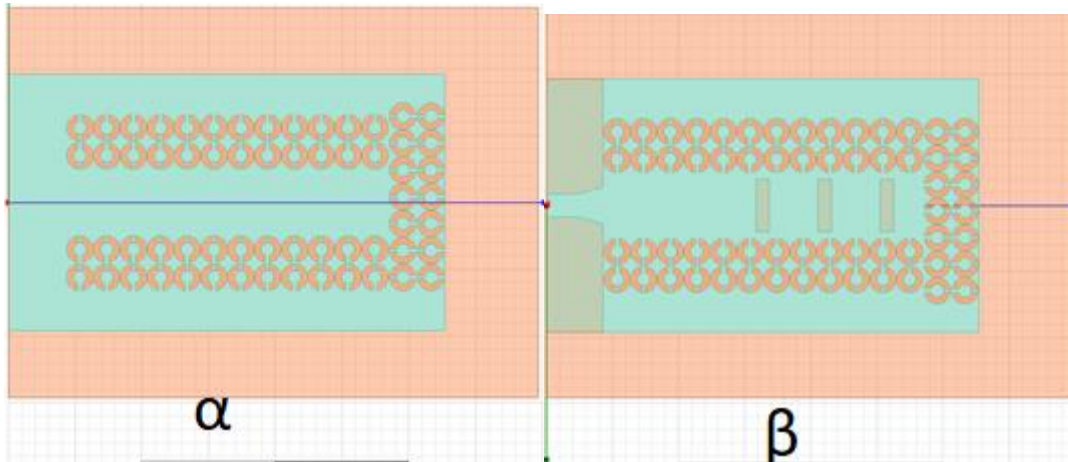
Πίνακας 6. Τα χαρακτηριστικά της SIW-CSRR slot antenna

Όνομασία	Περιγραφή	Τιμή
wtap	Μεγάλο πλάτος κωνικού τμήματος	2mm
wmicr	Πλάτος γραμμής μικροταινίας	1.5mm
Ltap	Μήκος κωνικού τμήματος	2,5mm
Lmicr	Μήκος γραμμής μικροταινίας	2,5 mm

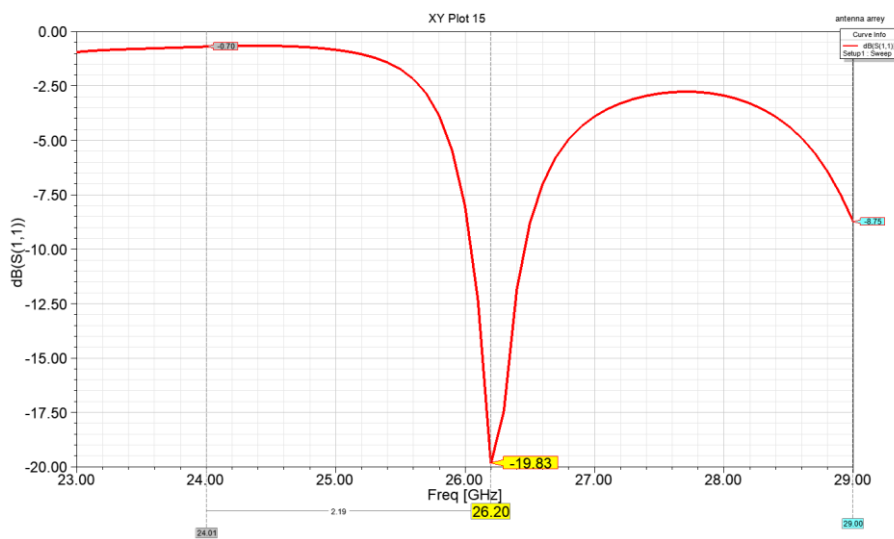
### 5.2.1. Σχεδίαση κεραίας τριών σχισμών SIW-CSRR

Με την τοποθέτηση και άλλων σχισμών slot κατά μήκος του κυματοδηγού ενισχύουμε την κατευθυντικότητα και αυξάνεται το κέρδος στον λοβό αλλά ταυτόχρονα δημιουργούνται και επιπλέον δευτερεύων λοβοί οι οποίοι όμως αρκετά ποιο χαμηλά σε

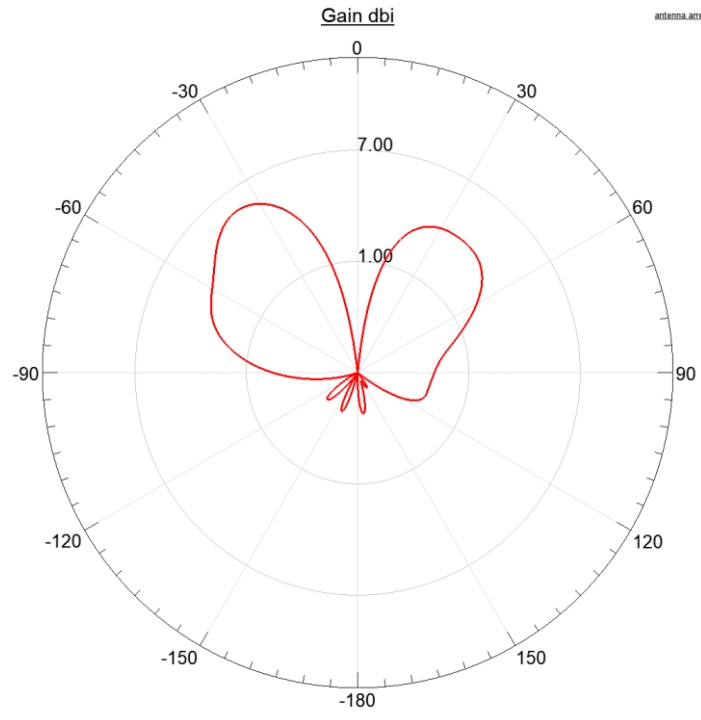
σύγκριση με τους βασικούς λοβούς ακτινοβολίας και δεν δημιουργούν πρόβλημα στην σχεδίαση μας. Από εικόνα 47 παρατηρείται η κεραία να αποδίδει την μεγαλύτερη κατευθυντικότητα στις (-30 κ +30) γωνίες προς τον παρατηρητή ό οποίος βρίσκεται στην ίδια ευθεία με την διάδοση του κύματος.



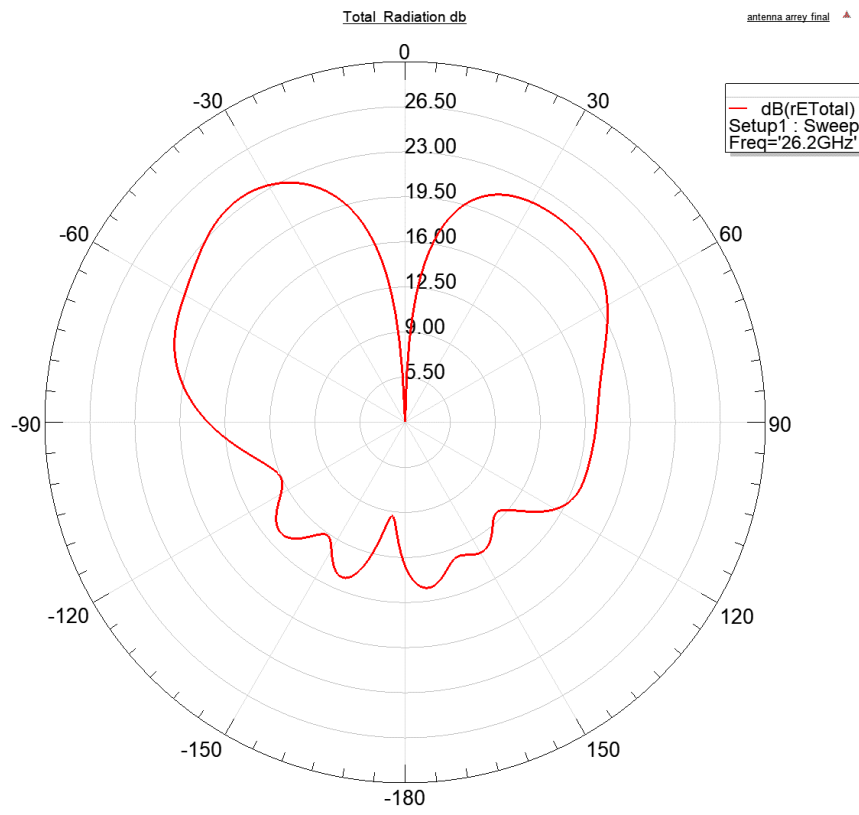
Εικόνα 46. Απεικόνιση της βασικής δομής κεραίας SIW-CSRR τριών slot α) κάτω πλευρά, β) πάνω πλευρά.



Εικόνα 47 Παράμετροι σκέδασης S11 για την κεραίας με τις τρεις σχισμές.



Εικόνα 48. Διάγραμμα ακτινοβολίας κέρδους σε dBi στην συχνότητα συντονισμού 26.2 GHz .

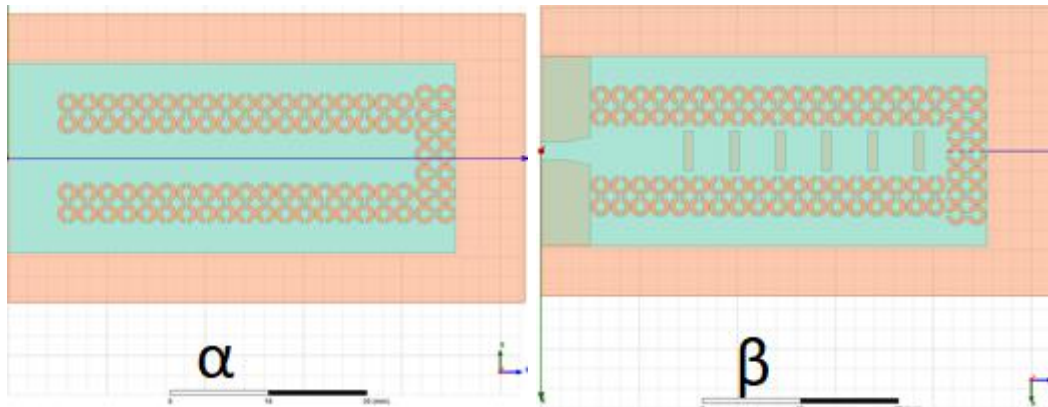


Εικόνα 49. Διάγραμμα συνολικής ακτινοβολίας σε dB στην συχνότητα συντονισμού 26.2 GHz

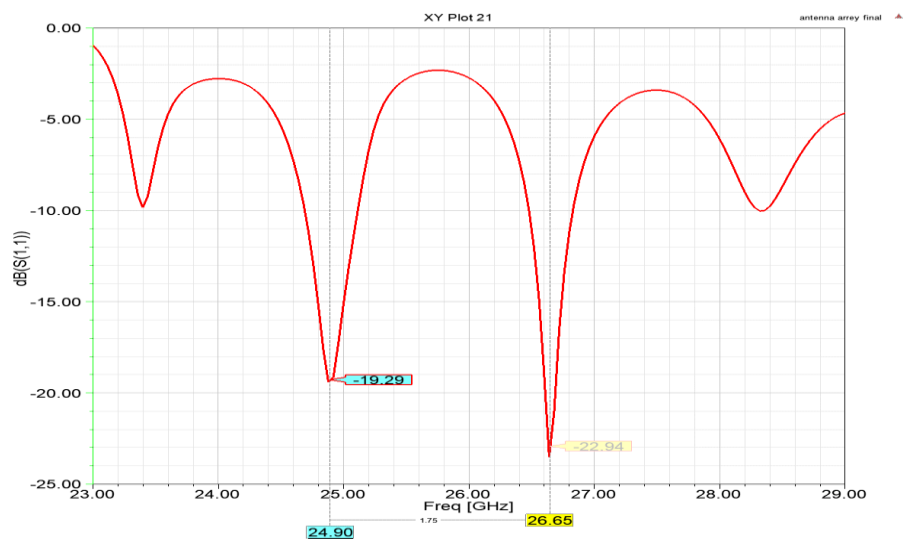


### 5.2.2. Σχεδίαση κεραίας έξι σχισμών SIW-CSRR

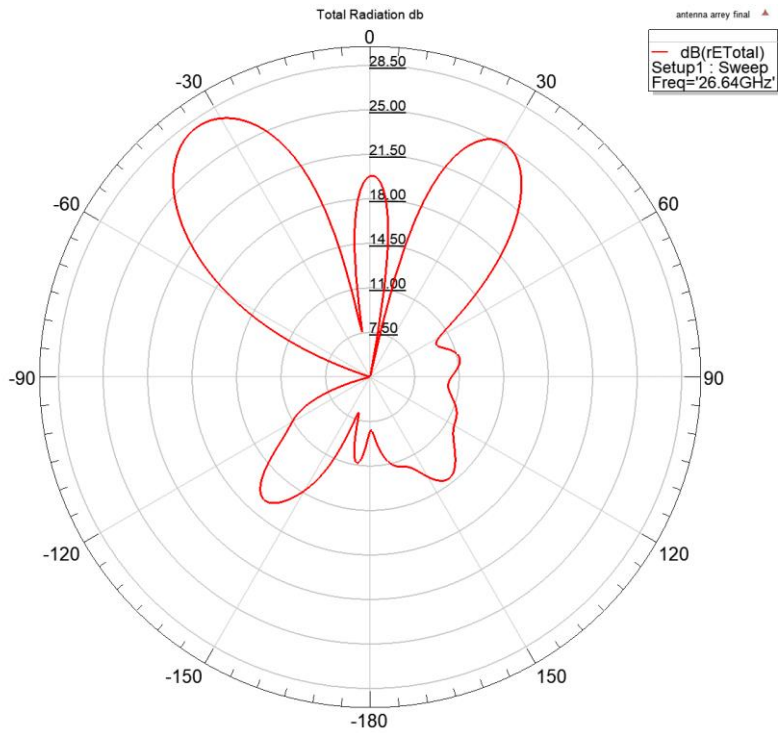
Για να αυξήσουμε την κατευθυντικότητα όπως και το μέγιστο κέρδος της κεραίας θα προσθέσουμε επιπλέον τρεις σχισμές κατά μήκος της δομής Εικόνα 50. Με αποτέλεσμα την αύξηση της συνολικής δομής αλλά αποτυγχάνοντας λοβούς με κέρδος που πλησιάζει τα 11 dBi Εικόνα 51. Επιπλέον παρουσιάζεται από την εικόνα 51 και δεύτερη συχνότητα λειτουργίας με κεντρική συχνότητας να είναι στα 25 GHz με μέγιστο κέρδος κοντά στα 7 dBi Εικόνα 52.



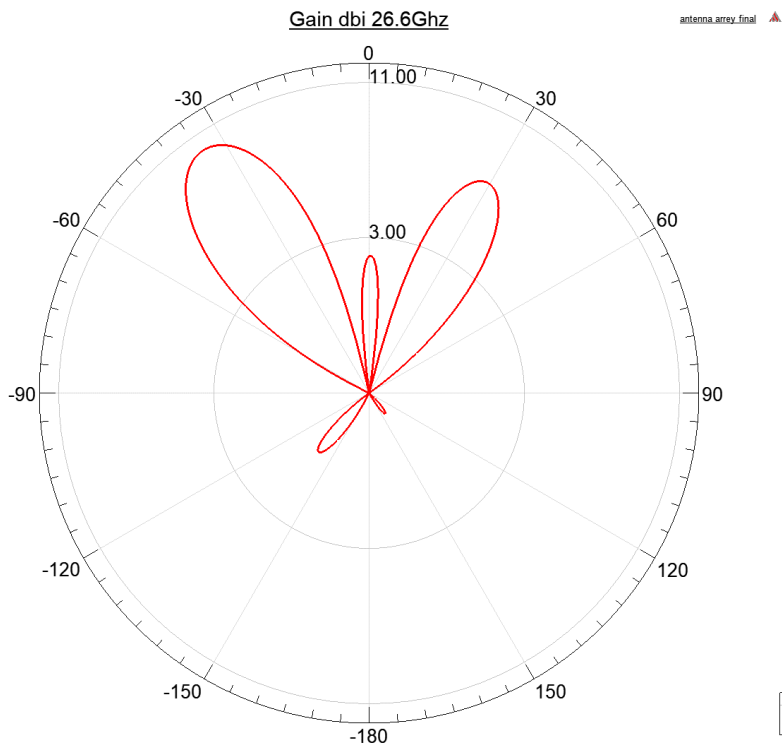
Εικόνα 50. Απεικόνιση της βασικής δομής κεραίας SIW-CSRR με έξι slot α) κάτω πλευρά, β) πάνω πλευρά..



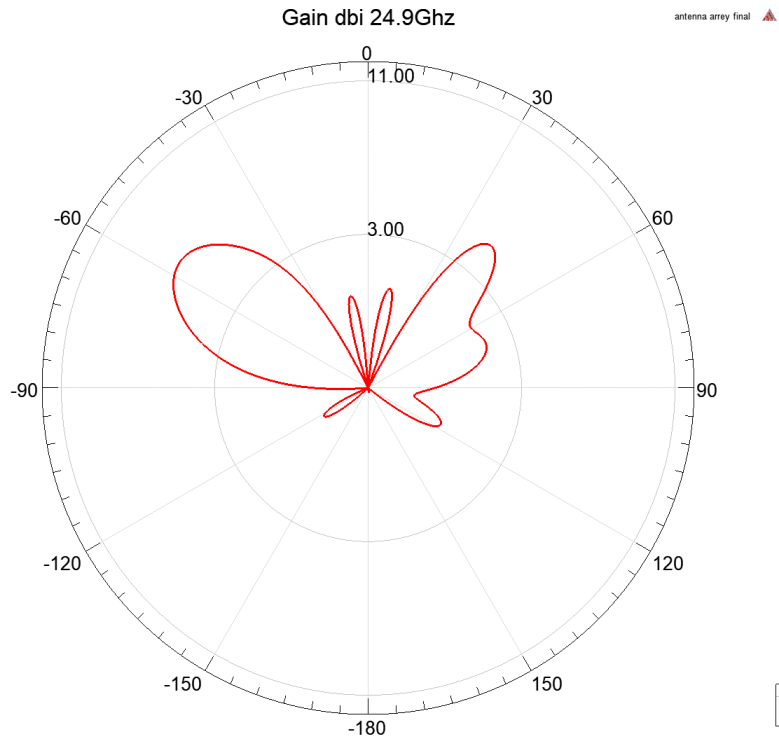
Εικόνα 51. Παράμετροι σκέδασης S11 για την κεραίας με έξι σχισμές.



Εικόνα 52. Διάγραμμα συνολικής ακτινοβολίας στην συχνότητα συντονισμού 26.6 GHz.



Εικόνα 53. Διάγραμμα ακτινοβολίας κέρδους σε dBi στην συχνότητα συντονισμού 26.6 GHz.



Εικόνα 54. Διάγραμμα ακτινοβολίας κέρδους σε dBi στην συχνότητα συντονισμού 24.9 GHz.

## 6. Συμπεράσματα Μελλοντικές προτάσεις

Στην παρούσα εργασία προτάθηκε μια μικροκυμματική δομή για μελέτη και διερεύνηση η οποία συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του ορθογώνιου κυματοδηγού και των επίπεδων γραμμών μεταφοράς. Ο κυματοδηγός ολοκληρωμένου υποστρώματος SIW είναι μια δομή με υψηλή ποιότητα Q χαμηλές απώλειες ακτινοβολίας, μικρή σε διαστάσεις, μπορεί να δομήσει παθητικά εξαρτήματα (φίλτρα διαλεκτές, επίπεδες κεραίες κ.α) αλλά και να ενσωματωθεί σε ενεργά κυκλώματα επίπεδου υποστρώματος και να αποτελέσει μια οικονομική κατασκευή υλοποιώντας με επίπεδες κατασκευαστικές τεχνολογίες που επιτρέπουν την μαζική παραγωγή.

Εκμεταλλούμενοι στην συνέχεια τις ιδιότητες των μεταλλικών και συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας τη συμπληρωματική μορφή του διακεκομμένου δακτυλίου αντικαταστήσαμε τα συμβατικά νίσι του SIW με CSRR. Ο BC-SRR χαρακτηρίζεται σαν ένα ηλεκτρικό δίπολο όπου κοντά στην συχνότητα συντονισμού διαρρέεται από ρεύμα το οποίο εμποδίζει την διέλευση του κύματος προς την κατεύθυνση των δακτυλιδιών. Η σχεδίαση κεραίας με την νέα τεχνολογία SIW-BCSRR έχει σχεδόν ίδια χαρακτηριστικά με σχεδίαση ενός συμβατικού SIW κυματοδηγού.

Τέλος η σχεδίαση κεραίας σχισμής οδεύοντος κύματος με την χρήση της εναλλακτικής τεχνολογίας κυματοδηγό SIW-BCSRR έδειξε αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα με χαμηλές απώλειες συγκρίσιμες με αυτές του SIW. Κερδίζοντας έδαφος στην σχεδίαση επιπλέον εξαρτημάτων(φίλτρα, κεραίες, πολυπλέκτες κ.α) στο ίδιο υπόστρωμα, για την χρήση τόσο σε τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές όπως και εφαρμογές στον τομέα της υγείας.

Η σχεδίαση και προσημείωση στο πρόγραμμα σχεδίασης και προσομοίωσης HFSS έδωσε την δυνατότητα μελέτης και κατανόησης διαφόρων παραμέτρων που οδηγούν στην βελτιστοποίηση της συνολικής σχεδίασης με τελικό στόχο την σχεδίαση 5g κεραίας. Κάθε μέρος της εργασίας έδωσε εφόδια για την συνέχιση της μελέτης και στόχευση σε προβληματικές πλευρές. Κατά την διάρκεια της μελέτης και εκπόνησης της παρούσας εργασίας προέκυψαν κάποιες μελλοντικές προτάσεις προς μελέτη σε σημεία όπως:

A) Η χρήση διαφορετικών συντονιστών από τους BC-SRR με συντονιστές με μεγαλύτερο εύρος φραγής του κύματος θα μπορούσε να πλησιάσει ακόμα περισσότερο την SIW δομή όπως φάνηκε να είναι και ένα μειονέκτημα στη σύγκριση SIW με BC-SRR

B) Η σχεδίαση της SIW-BCSRR κεραίας λόγω του πλήθους των δακτυλιδιών αυξάνει κατά πολύ τον χρόνο προσημείωσης. Με την βοήθεια του προγράμματος του HFSS μπορούμε να σχεδιάσουμε και να παραμετροποιήσουμε διαστάσεις με την χρήση script αρχείων σε γλώσσα προγραμματίσμου visual basic ή python. Η σχεδίαση ενός προγράμματος API διεπαφής με το πρόγραμμα HFSS (Application Programming Interface) θα μας δώσει την δυνατότητα στην αυτοματοποίηση κάποιων διαδικασιών χωρίς να είναι απαραίτητη η εποπτεία από ανθρώπινο παράγοντα και την εξ ολοκληρωμένου αυτοματοποιημένη σχεδίαση χρησιμοποιώντας τεχνικές μηχανικής μάθησης (machine learning).

Γ) Η εναλλακτική σχεδίαση κυματοδηγού και κεραίας αντικαθιστώντας τα κλασικά μεταλλικά νίας με διακεκομμένα δακτυλίδια bc-csrr δημιουργεί το κατάλληλο έδαφος για την σχεδίαση φορετών τηλεπικοινωνιακών εξαρτημάτων όπου η χρήση ελαστικών υλικών για τις αγωγίμες επιφάνειες όπως και το υπόστρωμα δεν αποτελεί πλέον εμπόδιο.

## Βιβλιογραφία

- [1] G. A. Deschamp, "Microstrip microwave antennas," 1953.
- [2] S. Sadat, M. Fardis, G. Dadashzadeh, and R. K. Bae, "Proximity-coupled microstrip patch antenna miniaturization using new fractal geometry," *IEEE Antennas Propag. Soc. AP-S Int. Symp.*, vol. 3 A, pp. 262–265, 2005, doi: 10.1109/APS.2005.1552230.
- [3] A. S. Mekki, M. N. Hamidon, A. Ismail, and A. R. H. Alhawari, "Gain Enhancement of a Microstrip Patch Antenna Using a Reflecting Layer," *Int. J. Antennas Propag.*, vol. 2015, 2015, doi: 10.1155/2015/975263.
- [4] R. Nishabegam and R. Srithulasiraman, "The study of microstrip antenna and their applications," in *IC-GET 2015 - Proceedings of 2015 Online International Conference on Green Engineering and Technologies*, 2016, pp. 31–33, doi: 10.1109/GET.2015.7453852.
- [5] T. Deckmyn, M. Cauwe, D. Vande Ginste, H. Rogier, and S. Agneessens, "Dual-Band (28,38) GHz Coupled Quarter-Mode Substrate-Integrated Waveguide Antenna Array for Next-Generation Wireless Systems," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 67, no. 4, pp. 2405–2412, 2019, doi: 10.1109/TAP.2019.2894325.
- [6] M. Nanda Kumar and T. Shanmuganatham, "Division shaped substrate integrated waveguide slot antenna for millimeter wireless/automotive radar applications," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 71, pp. 667–675, 2018, doi: 10.1016/j.compeleceng.2018.08.011.
- [7] H. Mansor and R. Abdul-Rahman, "Air-Filled substrate integrated waveguide for smart health applications," *Malaysian J. Med. Heal. Sci.*, vol. 16, no. 6, pp. 23–27, 2020.
- [8] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2075–2084, 1999, doi: 10.1109/22.798002.
- [9] T. Ali, A. W. Mohammad Saadh, R. C. Biradar, J. Anguera, and A. Andújar, "A miniaturized metamaterial slot antenna for wireless applications," *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 82, no. August, pp. 368–382, 2017, doi: 10.1016/j.aeue.2017.10.005.
- [10] Y. M. Huang, Z. Shao, Z. He, C. J. You, and D. Jiang, "A bandpass filter based on half mode substrate integrated waveguide-to-defected ground structure cells," *Int. J. Antennas Propag.*, vol. 2015, 2015, doi: 10.1155/2015/969035.
- [11] A. Munir, A. Saputra, and H. Ludyati, "Compact X-Band SIW Antenna with Reduced Size Using CSRR Incorporation," *RFM 2018 - 2018 IEEE Int. RF Microw. Conf. Proc.*, no. December 2018, pp. 61–64, 2018, doi: 10.1109/RFM.2018.8846474.
- [12] M. Nanda Kumar and T. Shanmuganatham, "Design of Microstrip Transition to Substrate Integrated Waveguide Fed Slot Antenna for 60 GHz Applications BT - Proceedings of 2nd International Conference on Micro-Electronics, Electromagnetics and Telecommunications," 2018, pp. 547–554.
- [13] H. Zhang, W. Kang, and W. Wu, "Miniaturized Dual-Band Differential Filter Based on CSRR-Loaded Dual-Mode SIW Cavity," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 28, no. 10, pp. 897–899, 2018, doi: 10.1109/LMWC.2018.2867082.
- [14] M. Nitas, M. T. Passia, and T. V. Yioultsis, "Analysis and design of a CSRR-based fully planar substrate-integrated waveguide for millimeter-wave circuits and antennas," *2017 11th Eur. Conf. Antennas Propagation, EUCAP 2017*, pp. 3501–3505, 2017, doi: 10.23919/EuCAP.2017.7928832.
- [15] "5G OBSERVATORY," 2020. <https://5gobservatory.eu/5g-spectrum/national-5g-spectrum-assignment/>.
- [16] M. David ;Pozar, "Microwave Engineering," Second., John Wiley & sons, 1993.
- [17] D. Deslandes and K. Wu, "Single-substrate integration technique of planar circuits and waveguide filters," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 51, no. 2, pp. 593–596, 2003, doi: 10.1109/TMTT.2002.807820.
- [18] N. Athanasopoulos, D. Makris, and K. Voudouris, "Development of a 60 GHz substrate integrated waveguide planar diplexer," *2011 IEEE MTT-S Int. Microw. Work. Ser. Millim. Wave Integr. Technol. IMWS 2011*, pp. 128–131, 2011, doi: 10.1109/IMWS3.2011.6061855.
- [19] S. Annas, "Advances in low temperature co-fired ceramic (LTCC) for ever increasing microelectronic

- applications,” in *53rd Electronic Components and Technology Conference, 2003. Proceedings.*, 2003, pp. 1691–1693, doi: 10.1109/ECTC.2003.1216529.
- [20] Q. Yuan, Z. C. Hao, M. C. Tao, and Y. W. Wu, “A LTCC Ridge SIW Bandpass Filter for Q-band applications,” *2019 IEEE MTT-S Int. Wirel. Symp. IWS 2019 - Proc.*, pp. 2019–2021, 2019, doi: 10.1109/IEEE-IWS.2019.8803702.
- [21] F. Xu and K. Wu, “Guided-wave and leakage characteristics of substrate integrated waveguide,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 53, no. 1, pp. 66–72, 2005, doi: 10.1109/TMTT.2004.839303.
- [22] M. Pasian, M. Bozzi, and L. Perregrini, “A formula for radiation loss in substrate integrated waveguide,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 62, no. 10, pp. 2205–2213, 2014, doi: 10.1109/TMTT.2014.2341663.
- [23] M. Bozzi, F. Xu, D. Deslandes, and K. Wu, “Modeling and design considerations for substrate integrated waveguide circuits and components,” *8th Int. Conf. Telecommun. Mod. Satell. Cable Broadcast. Serv. TELSIS 2007, Proc. Pap.*, 2007, doi: 10.1109/TELSIS.2007.4375921.
- [24] “Substrate Integrated Waveguide.” <https://www.microwaves101.com/encyclopedias/substrate-integrated-waveguide>.
- [25] Y.-C. Leong and S. Weinreb, “Full band waveguide-to-microstrip probe transitions,” in *1999 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (Cat. No.99CH36282)*, 1999, vol. 4, pp. 1435–1438 vol.4, doi: 10.1109/MWSYM.1999.780219.
- [26] D. Deslandes, “Design equations for tapered microstrip-to-Substrate Integrated Waveguide transitions,” *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 704–707, 2010, doi: 10.1109/MWSYM.2010.5517884.
- [27] T.-Y. Huang, T.-M. Shen, and R.-B. Wu, “Design and Modeling of Microstrip Line to Substrate Integrated Waveguide Transitions,” *Passiv. Microw. Components Antennas*, 2010, doi: 10.5772/9418.
- [28] M. I. Nawaz, Z. Hui-ling, and M. Kashif, “Substrate Integrated Waveguide (SIW) to Microstrip Transition at X-Band,” 2014.
- [29] H. Kumar, “A Review on Substrate Integrated Waveguide and its Microstrip Interconnect,” *IOSR J. Electron. Commun. Eng.*, vol. 3, no. 5, pp. 36–40, 2012, doi: 10.9790/2834-0353640.
- [30] R. Wasler, “Introduction to Complex Mediums for Optics and Electromagnetics,” SPIE Press, 2003.
- [31] S. P. Uspekhi, “Soviet Physics Uspekhi Related content THE ELECTRODYNAMICS OF SUBSTANCES WITH SIMULTANEOUSLY NEGATIVE VALUES OF  $\mu$  OF  $\epsilon$  AND  $M$ ,” 1968.
- [32] “Μεταύλικά και εφαρμογες στη σχεδίαση κεραιών,” 2018.
- [33] C. Caloz, “Perspectives on EM metamaterials,” *Mater. Today*, vol. 12, no. 3, pp. 12–20, 2009, doi: 10.1016/S1369-7021(09)70071-9.
- [34] M. K. T. Al-Nuaimi and W. G. Whittow, “Compact microstrip band stop filter using SRR and CSSR: Design, simulation and results,” in *EuCAP 2010 - The 4th European Conference on Antennas and Propagation*, 2010, no. May.
- [35] C. Reimann, “Sensitivity Analysis of Single Split Ring Resonators and Single Complementary Split Ring Resonators coupled to Planar Transmission Lines Sensitivitätsanalyse von Einzel-Splitring Resonatoren,” 2017.
- [36] Ν. Αλμπερτ, “Σχεδίαση και ανάλυση της λογαριθμικής περιοδικής κεραίας,” 2010.
- [37] H. J. Visser, *Antenna Theory and Applications*. 2012.