



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Αναδιαρθρωσιμότητα Κεραιών με Χρήση
Μαγνητο-Διηλεκτρικών Υλικών:
Μοντελοποίηση, Σχεδίαση και Αξιολόγηση

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

της

Ευμορφίλης Χ. Ανδρέου

Αθήνα, Δεκέμβριος 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Αναδιαρθρωσιμότητα Κεραιών με Χρήση
Μαγνητο-Διηλεκτρικών Υλικών:
Μοντελοποίηση, Σχεδίαση και Αξιολόγηση

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

της

Ευμορφίλης Χ. Ανδρέου

Συμβουλευτική Επιτροπή: Γεώργιος Ι. Φικιώρης
Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Αντώνιος Α. Αλεξανδρίδης

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή 20/12/2022

.....
Γεώργιος Φικιώρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Αθανάσιος Παναγόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Αντώνιος Αλεξανδρίδης
Ερευνητής Α', ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος

.....
Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Παναγιώτης Παπακανέλλος
Επ. Καθηγητής, Σχολή Ικάρων

.....
Ηλίας Γλύτσης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Μιχαήλ Πίσσας
Ερευνητής Α', ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος

Αθήνα, Δεκέμβριος 2022

.....
Ευμορφίλη Χ. Ανδρέου

Πτυχιούχος Φυσικής Α.Π.Θ. (2010)

Διπλωματούχος Ηλεκτρονικής Φυσικής Α.Π.Θ. (2013)

Copyright © - Ευμορφίλη Χ. Ανδρέου, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στην κερδοσκοπική χρήση της εργασίας πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ειδικότερα, η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανώτατη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε. Μ. Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Στον γιο μου, Δημήτρη

Περίληψη

Η αλματώδης ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών αύξησε σημαντικά την ανάγκη για χαμηλού προφίλ, αποδοτικές, συμπαγείς κεραιές οι οποίες μπορούν να προσαρμόζονται τα χαρακτηριστικά τους ανάλογα με το περιβάλλον διάδοσης ή τις ειδικές απαιτήσεις του συστήματος. Το γεγονός αυτό, ώθησε τους μηχανικούς κεραιών να χρησιμοποιήσουν καινοτόμα υλικά, αντί των συμβατικών διηλεκτρικών υλικών, στη σχεδίαση των κεραιών. Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή εστιάζει στη μοντελοποίηση, στη σχεδίαση και στην αξιολόγηση αναδιαρθρώσιμων κεραιών μικροταινιακού καλύμματος με τη χρήση ανισοτροπικών μαγνητο-διηλεκτρικών υλικών των οποίων η μαγνητική διαπερατότητα μεταβάλλεται υπό την επίδραση ενός εξωτερικού στατικού μαγνητικού πεδίου του οποίου η ένταση μπορεί να μεταβάλλεται κατά βούληση, ανάλογα με την κατάσταση στην οποία επιδιώκεται να οδηγηθεί η λειτουργία της κεραίας. Η ενσωμάτωση των υλικών αυτών στη δομή της κεραίας προσφέρει τη δυνατότητα μεταβολής των χαρακτηριστικών εμπέδησης και ακτινοβολίας της με εύκολο και ελεγχόμενο τρόπο, διατηρώντας ταυτόχρονα την πολυπλοκότητα σχεδίασης και το κόστος υλοποίησης σε χαμηλά επίπεδα.

Αρχικά, δίνεται έμφαση στη μοντελοποίηση της μαγνητικής διαπερατότητας του μαγνητο-διηλεκτρικού υλικού. Το μαγνητικό πεδίο πόλωσης μπορεί να θεωρηθεί ως ένας “μηχανισμός μεταγωγής” που επιτρέπει τη μετάβαση του υλικού μεταξύ δύο καταστάσεων, την αμαγνήτιστη (απουσία μαγνητικού πεδίου) και την πλήρως μαγνητισμένη, και συνεπώς τη λειτουργία της κεραίας σε δύο διακριτές καταστάσεις. Προσδιορίζονται οι κρίσιμες παράμετροι που επηρεάζουν την ακρίβεια των αριθμητικών αποτελεσμάτων στις δύο καταστάσεις λειτουργίας και προτείνεται κατάλληλη μεθοδολογία για τη σχεδίαση και την ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση αναδιαρθρώσιμων κεραιών με μαγνητο-διηλεκτρικά υλικά. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η σχεδίαση, η προσομοίωση και η κατασκευή μιας κεραίας μικροταινιακού καλύμματος με τροφοδοσία σύζευξης μέσω γειτνίασης και ενσωματωμένο δείγμα μαγνητο-διηλεκτρικού υλικού στο ανώτερο υπόστρωμά της. Αποδεικνύεται ότι η μετάβαση από την αμαγνήτιστη στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση, οδηγεί στη δημιουργία δύο ζωνών συχνοτήτων λειτουργίας καθώς και στη μεταβολή της πόλωσης της κεραίας. Επιπλέον, παρουσιάζεται μια συγκριτική μελέτη μεταξύ των αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων με στόχο την επαλήθευση της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μια τεχνική καταπίεσης της αμοιβαίας σύζευξης η οποία αξιοποιεί τη χρήση μαγνητο-διηλεκτρικών υλικών. Παρουσιάζεται η σχεδίαση ενός συστήμα-

τος αποτελούμενο από δύο κεραιοστοιχεία μικροταινιακού καλύμματος με δυο κυλινδρικά δοκίμια μαγνητο-διηλεκτρικού υλικού ενσωματωμένα στο υπόστρωμα και μελετάται η μείωση της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ των στοιχείων για τις διάφορες καταστάσεις μαγνήτισης των δύο μαγνητο-διηλεκτρικών δοκιμίων. Η βασική ιδέα της προτεινόμενης τεχνικής είναι να αξιοποιηθεί η αναδιαρθρωσιμότητα πόλωσης που παρουσιάζει το κάθε κεραιοστοιχείο υπό την παρουσία στατικού μαγνητικού πεδίου. Αποδεικνύεται ότι η επιτεύξιμη μείωση της αμοιβαίας σύζευξης καθορίζεται από την κατάσταση μαγνήτισης των δοκιμίων και την πολικότητα του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου.

Με στόχο να ξεπεραστούν οι κατασκευαστικές δυσκολίες που προκύπτουν όταν μέρος του συμβατικού διηλεκτρικού υποστρώματος αντικαθίσταται από δείγμα μαγνητο-διηλεκτρικού υλικού σε συμπαγή μορφή, μελετάται η σχεδίαση και η ανάπτυξη κεραιών μικροταινιακού καλύμματος πάνω σε υπόστρωμα αποτελούμενο από σωματίδια μαγνητο-διηλεκτρικού υλικού τα οποία βρίσκονται ομοιογενώς διεσπαρμένα σε μη μαγνητική πολυμερική μήτρα. Εξετάζεται η δυνατότητα μεταβολής της συχνότητας συντονισμού και της πόλωσής τους υπό την επίδραση μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Επίσης, διερευνάται η επίδραση των διηλεκτρικών και των μαγνητικών ιδιοτήτων του υλικού του υποστρώματος στην απόδοση ακτινοβολίας της κεραίας και παρουσιάζεται η μελέτη εφικτότητας παρασκευής ενός σύνθετου υλικού πολυμερικής μήτρας-φερρίτη με βελτιωμένες ιδιότητες. Τέλος, χρησιμοποιώντας το μοντέλο κοιλότητας, αναλύεται η λειτουργία μιας κεραίας μικροταινιακού καλύμματος σε υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας-μαγνητοδιηλεκτρικού υλικού στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση.

Η Διατριβή ολοκληρώνεται με τη σύνοψη των αξιολογήσεων των επιδόσεων των δύο διαφορετικών κατηγοριών αναδιαρθρώσιμων κεραιών που σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν στα πλαίσια της διδακτορικής έρευνας. Η αξιολόγηση των επιδόσεών τους πραγματοποιείται μέσω μετρήσεων της προσαρμογής εισόδου και του εύρους ζώνης συχνοτήτων λειτουργίας, της πόλωσης, των διαγραμμάτων ακτινοβολίας και της απόδοσης ακτινοβολίας των προτεινόμενων κεραιών στις δύο καταστάσεις λειτουργίας τους.

Λέξεις Κλειδιά

Αναδιαρθρωσιμότητα, κεραιές μικροταινιακού καλύμματος, μαγνητικά υλικά, μαγνητική διαπερατότητα, τανυστής διαπερατότητας, κυκλική πόλωση, απώλειες υλικών, απόδοση ακτινοβολίας, αμοιβαία σύζευξη.

Abstract

The rapid development of wireless communications has significantly increased the need for low profile, efficient compact antennas that can adapt their operating characteristics depending on the communication channel conditions or specific system requirements. This fact has prompted antenna engineers to use novel materials in place of conventional dielectrics in antenna design. This PhD thesis focuses on the modeling, design and evaluation of reconfigurable microstrip patch antennas using magneto-dielectric materials that exhibit anisotropic behavior and tunable permeability by applying variable DC magnetic field. The use of magneto-dielectric materials in antenna design offers dynamic control of the antenna impedance and radiation characteristics in an easy and controllable manner, keeping at the same time the design complexity and implementation cost relatively low.

Initially, emphasis is given on the modeling of the permeability of the magneto-dielectric material. The magnetic bias field acts as a “switching mechanism” that enables the transition of the material between two states, the demagnetized state (absence of magnetic field) and the magnetically biased state, and thus the antenna operation in two discrete states. The key factors for the accurate simulation in both operating states are determined, and a proper methodology is proposed for the design and simulation of reconfigurable antennas with magneto-dielectric materials. Subsequently, the design, simulation and fabrication of a proximity-coupled fed microstrip patch antenna with a sample of magneto-dielectric material placed in the upper substrate is presented. It is proved that when a magnetic bias field is applied, two resonance frequencies appear and antenna polarization changes. Also, a comparative study between simulation and measurement results is presented to validate the proposed methodology.

Then, a suppression technique of mutual coupling between antennas of a multiple antenna system using magneto-dielectric materials is proposed. The design of a system consisting of two patch antenna elements with two cylindrical samples of magneto-dielectric material placed in the substrate is presented, and the reduction of the mutual coupling between the elements is investigated for various combinations related to the magnetization state of each sample. The idea is to exploit the polarization reconfigurable properties of each antenna element under the application of magnetic field. It is proved that the magnetization state of each element along with the direction and magnitude

of the applied static magnetic field play significant role in the reduction of the mutual coupling.

Aiming to overcome fabrication difficulties that arise by replacing part of the dielectric substrate with a bulk sample of magneto-dielectric material, the design and fabrication of microstrip patch antennas printed on a substrate consisting of ferrite particles homogeneously dispersed into a non magnetic polymer matrix are studied. Frequency and polarization reconfigurability is investigated by applying static magnetic field with intentionally varying strength. Also, the influence of the dielectric and magnetic losses of the substrate material on the antenna radiation efficiency is investigated and the feasibility study of fabricating a composite substrate with improved characteristics is presented. Finally, using the cavity model, the operation of a microstrip circular patch antenna on a polymer-magnetodielectric material substrate in the magnetically biased state is analyzed.

The Thesis is concluded with the overview of the evaluation of the reconfigurable antennas that were designed and fabricated in this research study. The evaluation is performed through measurements of the input matching and operating frequency bandwidth, the axial ratio, the radiation patterns and the radiation efficiency of the proposed antennas in both operating states.

Keywords

Reconfigurability, microstrip patch antennas, magnetic materials, magnetic permeability, permeability tensor, circular polarization, material losses, radiation efficiency, mutual coupling.

Ευχαριστίες

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ασύρματων Επικοινωνιών του Ινστιτούτου Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του ΕΚΕΦΕ “Δημόκριτος” σε συνεργασία με τον Τομέα Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ).

Μέρος της παρούσας διδακτορικής έρευνας πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου MAGELLAN της Πράξης “ΘΑΛΗΣ - ΕΚΕΦΕ “ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ”-ΜΑΓΝΗΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΣΕ ΚΕΡΑΙΕΣ ΜΕ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ” με κύριο συντονιστή το Ινστιτούτο Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του ΕΚΕΦΕ “Δημόκριτος”.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της παρούσας Διατριβής, Καθηγητή κ. Γεώργιο Φικιώρη για την ευκαιρία που μου έδωσε να εκπονήσω την παρούσα Διδακτορική Διατριβή, για την υποστήριξη και την άριστη συνεργασία μας όλα αυτά τα χρόνια.

Ευχαριστώ θερμά τον συνεπιβλέποντα Ερευνητή Α΄ κ. Αντώνιο Αλεξανδρίδη για την ερευνητική καθοδήγηση, την εμπιστοσύνη και τη συστηματική υποστήριξή του. Τον ευχαριστώ επίσης για την άριστη συνεργασία και τη δημιουργία των κατάλληλων προϋποθέσεων για την εκπόνηση της παρούσας Διατριβής.

Ακόμη εκφράζω τις ευχαριστίες μου στα υπόλοιπα μέλη της Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής, για τις χρήσιμες παρατηρήσεις και τις υποδείξεις τους.

Επίσης ευχαριστώ τα μέλη του Εργαστηρίου Ασύρματων Επικοινωνιών για τη συνεργασία, για τις ενδιαφέρουσες συζητήσεις σε ερευνητικά θέματα και για τη δημιουργία αρμονικού κλίματος εργασίας καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της Διατριβής. Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζω στον Δρ. Θεόδωρο Ζερβό, επιστημονικό συνεργάτη του Εργαστηρίου, για τη συνεργασία και την πολύτιμη βοήθειά του και στον Δρ. Κωνσταντίνο Καχόγιαννη για τις ενδιαφέρουσες συμβουλές του. Ακόμη ευχαριστώ τον τεχνικό του Εργαστηρίου κ. Ελευθέριο Αδειλίνη για τη βοήθεια και την πολύτιμη τεχνική υποστήριξη οποτεδήποτε κι αν χρειάστηκε.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ερευνητή Α΄ κ. Μιχαήλ Πίσσα, υπεύθυνο του Εργαστηρίου Υπεραγωγών και Μαγνητικών Οξειδίων του Ινστιτούτου Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας του ΕΚΕΦΕ “Δημόκριτος”, για τις υποδείξεις του σε θέματα που αφορούν

την επιστήμη των μαγνητικών υλικών. Ακόμα ευχαριστώ, την επιστημονική συνεργάτιδα του ίδιου Εργαστηρίου Ειρήνη Βαρούτη για την παρασκευή και τον χαρακτηρισμό των μαγνητο-διηλεκτρικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα Διατριβή.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στο σύζυγο μου, τους γονείς μου και τον αδερφό μου για την αμέριστη ηθική τους συμπαράσταση, την υπομονή και την αδιάκοπη στήριξη τους καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της Διδακτορικής μου Διατριβής.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Σχημάτων	xi
Κατάλογος Πινάκων	xvii
Κατάλογος Συντμήσεων	xix
1 Εισαγωγή	1
1.1 Χρήση Μαγνητο-Διηλεκτρικών Υλικών σε Κεραίες	1
1.2 Αντικείμενο και Δομή της Διατριβής	6
2 Φερρίτες	9
2.1 Εισαγωγή	9
2.2 Μαγνητικές Περιοχές και Βρόχος Υστέρησης	10
2.3 Σιδηρομαγνητικός Συντονισμός και Τανυστής Μαγνητικής Διαπερατότητας	13
2.4 Επιλογή Φερριτικού Υλικού	15
2.5 Μοντελοποίηση Μαγνητικής Διαπερατότητας Φερριτών	16
2.5.1 Αμαγνήτιστη Κατάσταση	17
2.5.2 Μερικώς Μαγνητισμένη Κατάσταση	17
2.5.3 Πλήρως Μαγνητισμένη Κατάσταση	19
3 Θέματα Μοντελοποίησης, Προσομοίωσης και Μετρήσεων Αναδιάρ-	
θρώσιμων Κεραίων με Μαγνητο-Διηλεκτρικά Υλικά	23
3.1 Παράμετροι Κεραίων: Ορισμοί, Ορολογία	23
3.1.1 Περιοχές Κοντινού και Μακρινού Πεδίου	24
3.1.2 Διάγραμμα Ακτινοβολίας	25
3.1.3 Ένταση Ακτινοβολίας και Κατευθυντικότητα	27
3.1.4 Απόδοση Κεραίας	28
3.1.5 Κέρδος	28
3.1.6 Πόλωση	29
3.1.7 Σύνθετη Αντίσταση Εισόδου και Συντονισμός	32
3.1.8 Συντελεστής Ανάκλασης και Απώλεια Επιστροφής	32
3.1.9 Εύρος Ζώνης	33

3.2	Κεραίες Μικροταινιακού Καλύμματος	34
3.3	Ανάπτυξη Αναδιαρθρώσιμων Κεραίων με Μαγνητο-Διηλεκτρικά Υλικά	36
3.4	Προτεινόμενη Μεθοδολογία Σχεδίασης και Προσομοίωσης Αναδιαρθρώσιμων Κεραίων με Μαγνητο-Διηλεκτρικά Υλικά	38
3.5	Μετρήσεις Αναδιαρθρώσιμων Κεραίων με Μαγνητο-Διηλεκτρικά Υλικά	40
3.5.1	Πόλωση Μαγνητο-Διηλεκτρικού Υλικού	40
3.5.2	Διάταξη Στήριξης για Μετρήσεις υπό Παρουσία Μεταβαλλόμενου Μαγνητικού Πεδίου	42
3.5.3	Περιβάλλον και Εξοπλισμός Μετρήσεων	43
3.5.4	Μεθοδολογία Μετρήσεων	44
3.5.5	Διαγράμματα Ακτινοβολίας	48
3.5.6	Μετρήσεις Πόλωσης	48
3.5.7	Απόδοση Ακτινοβολίας	50
4	Αναδιαρθρώσιμη Κεραία με Ενσωματωμένο Μαγνητο-Διηλεκτρικό Υλικό	53
4.1	Σχεδίαση Κεραίας και Η/Μ Μοντελοποίηση	53
4.2	Αριθμητικά Αποτελέσματα	55
4.3	Υλοποίηση Εργαστηριακού Πρωτοτύπου	58
4.4	Συγκριτική Μελέτη Αριθμητικών και Πειραματικών Αποτελεσμάτων	59
4.5	Συμπεράσματα Κεφαλαίου	67
5	Καταπίεση Αμοιβαίας Σύζευξης σε Συστήματα Πολλαπλών Κεραίων	69
5.1	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση για τις Τεχνικές Καταπίεσης Αμοιβαίας Σύζευξης	70
5.2	Προτεινόμενη Τεχνική με Χρήση Μαγνητο-Διηλεκτρικών Υλικών	73
5.3	Κεραία Μικροταινιακού Καλύμματος με Τροφοδοσία Σύζευξης Γειτνίασης και Μαγνητο-Διηλεκτρικό Υλικό	74
5.3.1	Παρασκευή και Χαρακτηρισμός Δείγματος με Δομή Γρανάτη YIG	74
5.3.2	Αριθμητικά Αποτελέσματα της Κεραίας YIG-PCF	78
5.3.3	Αποτελέσματα Μετρήσεων της Κεραίας YIG-PCF	81
5.4	Σύστημα Δύο Κεραίων με Τροφοδοσία Σύζευξης Γειτνίασης και Μαγνητο-Διηλεκτρικά Υλικά	85
5.4.1	Σχεδίαση Προτεινόμενου Συστήματος	86
5.4.2	Αριθμητικά Αποτελέσματα	86
5.4.3	Πειραματικά Αποτελέσματα	91
5.5	Συμπεράσματα Κεφαλαίου	94

6 Αναδιαρθρώσιμες Κεραίες σε Υπόστρωμα Πολυμερικής Μήτρας Μαγνητο-Διηλεκτρικού Υλικού	95
6.1 Σύνθετα Υλικά Πολυμερικής Μήτρας Μαγνητο-Διηλεκτρικού Υλικού	96
6.1.1 Προτεινόμενη Διαδικασία Παρασκευής	97
6.2 Αρχική Κεραία Μικροταινιακού Καλύμματος σε Υπόστρωμα Πολυμερικής Μήτρας-Φερρίτη	97
6.2.1 Παρασκευή και Χαρακτηρισμός Σύνθετου Δείγματος YIG/Epoxy .	97
6.2.2 Κατασκευή Εργαστηριακού Πρωτοτύπου	100
6.2.3 Πειραματικά Αποτελέσματα	101
6.2.4 Σύγκριση Αριθμητικών και Πειραματικών Αποτελεσμάτων	105
6.3 Επίδραση Διηλεκτρικών και Μαγνητικών Απωλειών στις Επιδόσεις της Κεραίας	106
6.3.1 Αμαγνήτιστη Κατάσταση Λειτουργίας	106
6.3.2 Πλήρως Μαγνητισμένη Κατάσταση Λειτουργίας	109
6.4 Σύνθετο Υλικό Πολυμερικής-Μήτρας Φερρίτη με Βελτιωμένες Ιδιότητες . .	112
6.5 Ανάλυση Κεραίας Μικροταινιακού Καλύμματος σε Υπόστρωμα Πολυμερικής Μήτρας-Φερρίτη	115
6.5.1 Θεωρητική Ανάλυση	116
6.5.2 Σχεδίαση Κεραίας	119
6.5.3 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Θεωρητικής Ανάλυσης και Προσομοίωσης	121
6.5.4 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης και Μετρήσεων	123
6.6 Συμπεράσματα Κεφαλαίου	128
7 Αξιολόγηση Αναδιαρθρώσιμων Κεραιών με Μαγνητο-Διηλεκτρικά Υλικά	131
7.1 Προτεινόμενες Αναδιαρθρώσιμες Κεραίες	131
7.2 Πειραματικά Αποτελέσματα - Αξιολόγηση	133
8 Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα	139
8.1 Συμπεράσματα	139
8.2 Μελλοντική Έρευνα	143
Βιβλιογραφία	145
Κατάλογος Δημοσιεύσεων	155

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Μεταβολή B (ή M) συναρτήσει του H_α για σιδηριμαγνητικό υλικό το οποίο ήταν αρχικά αμαγνήτιστο. Αναπαράσταση μαγνητικών περιοχών στα διάφορα στάδια μαγνήτισης του υλικού.	11
2.2	Τυπική μορφή βρόχου υστέρησης σιδηριμαγνητικού υλικού.	12
2.3	Μαγνητική διαπερατότητα μ_{dem} συναρτήσει της συχνότητας για γρανάτες με διαφορετική μαγνήτιση κόρου.	18
2.4	Πραγματικό και φανταστικό μέρος των μ και κ για διάφορες τιμές μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό φερριτικού δείγματος με μαγνήτιση κόρου $4\pi M_s = 1820$ G και πλάτος σιδηρομαγνητικού συντονισμού $\Delta H = 18$ Oe.	20
2.5	Φανταστικό μέρος του μ για διάφορες τιμές ΔH	20
3.1	Περιοχές πεδίου μιας κεραίας.	24
3.2	Τυπικές αλλαγές στην κατανομή του πεδίου από την περιοχή κοντινού πεδίου μέχρι την περιοχή μακρινού πεδίου.	25
3.3	Τριδιάστατο διάγραμμα πεδίου κατευθυντικής κεραίας με μέγιστη ένταση ακτινοβολίας στην κατεύθυνση $\theta = 0^\circ$	27
3.4	Είδη πόλωσης: α) ελλειπτική, β) κυκλική, γ) γραμμική πόλωση.	30
3.5	Έλλειψη της πόλωσης στη θέση $z = 0$ ως συνάρτηση του χρόνου.	31
3.6	Συνηθέστεροι τρόποι τροφοδοσίας κεραίας μικροταινιακού καλύμματος.	35
3.7	α) Χρήση μικροταινιακής γραμμής και μετασχηματιστή $\lambda/4$, β) Ένθετη τροφοδοσία.	36
3.8	Βασικά στάδια για την ανάπτυξη αναδιαρθρώσιμων κεραιών με τη χρήση μαγνητο-διηλεκτρικών υλικών.	37
3.9	Σχηματικό διάγραμμα με τα βασικά στάδια που απαιτούνται για τη σχεδίαση και την προσομοίωση αναδιαρθρώσιμων κεραιών με μαγνητο-διηλεκτρικά υλικά.	39
3.10	Διάταξη στήριξης για μετρήσεις κεραιών υπό την επίδραση μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.	43
3.11	Διάταξη μετρήσεων στον ανηχικό θάλαμο.	44
3.12	Σχηματικό διάγραμμα της διαδικασίας μέτρησης των προτεινόμενων αναδιαρθρώσιμων κεραιών στον ανηχικό θάλαμο.	45

3.13	Διάγραμμα πόλωσης.	49
4.1	α) Εμπρόσθια και β) Πλάγια όψη της προτεινόμενης αναδιαρθρώσιμης κεραίας μικροταινιακού καλύμματος με σύζευξη γειτνίασης και ενσωματωμένο μαγνητο-διηλεκτρικό υλικό YIG στο ανώτερο υπόστρωμα.	54
4.2	Συντελεστής ανάκλασης S_{11} της κεραίας μικροταινιακού καλύμματος με σύζευξη γειτνίασης και ενσωματωμένο μαγνητο-διηλεκτρικό υλικό όπως προέκυψε από την προσομοίωση (“κατάσταση OFF” και “κατάσταση ON”). Απεικόνιση της επίδρασης των πεπερασμένων διαστάσεων του δείγματος στον συντελεστή ανάκλασης.	56
4.3	Ηλεκτρικό πεδίο (E-field) σε τέσσερις διαφορετικές φάσεις (0° , 45° , 90° , 135°) στην επιφάνεια του μικροταινιακού καλύμματος στις δύο συχνότητες συντονισμού της κεραίας για $H_o = 1750$ Oe. Τα βέλη λευκού χρώματος δείχνουν τη στροφή του ηλεκτρικού πεδίου.	57
4.4	Ειδικός εκτυπωτής τυπωμένων κυκλωμάτων (αριστερά) και η κεφαλή χάραξης (δεξιά) που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των τυπωμένων αναδιαρθρώσιμων μικροταινιακών κεραίων με ενσωματωμένο μαγνητο-διηλεκτρικό υλικό.	59
4.5	Εργαστηριακό πρωτότυπο της προτεινόμενης αναδιαρθρώσιμης κεραίας: α) τα δύο κατασκευαστικά τμήματα, β) η εμπρόσθια όψη της κεραίας και οι μόνιμοι μαγνήτες που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή στατικού μαγνητικού πεδίου.	59
4.6	Το εργαστηριακό πρωτότυπο της κεραίας και ο μαγνήτης κυλινδρικού σχήματος τοποθετημένα στην ειδική διάταξη στήριξης για την πραγματοποίηση μετρήσεων υπό την παρουσία μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.	60
4.7	Επίδραση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου H_α στον συντελεστή ανάκλασης S_{11} της προτεινόμενης αναδιαρθρώσιμης κεραίας, όπως προέκυψε από τις μετρήσεις.	61
4.8	Προσδιορισμός του μαγνητικού πεδίου H_o στο εσωτερικό του φερριτικού δείγματος Y101 κατά μήκος του α) άξονα z και β) άξονα x για διάφορες τιμές εξωτερικού μαγνητικού πεδίου H_α	62
4.9	Κατανομή μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του φερριτικού δείγματος YIG στο α) επίπεδο yz και β) επίπεδο xy	63
4.10	Επίδραση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου H_α στο μέτρο του συντελεστή ανάκλασης $ S_{11} $ της προτεινόμενης αναδιαρθρώσιμης κεραίας, όπως προέκυψε από την προσομοίωση του H/M μοντέλου.	64
4.11	Αξονικός λόγος της προτεινόμενης κεραίας στο συχνοτικό εύρος λειτουργίας 4.6 – 5.5 GHz ($H_o = 1867$ Oe), όπως προέκυψε από την προσομοίωση του H/M μοντέλου και τις μετρήσεις.	65

4.12	Διαγράμματα ακτινοβολίας της προτεινόμενης κεραίας στη συχνότητα συντονισμού $f_{res} = 5.68$ GHz στην αμαγνήτιστη κατάσταση στο α) επίπεδο xz ($\phi = 0^\circ$) και β) επίπεδο yz ($\phi = 90^\circ$), όπως προέκυψαν από την προσομοίωση του H/M μοντέλου και τις μετρήσεις.	66
4.13	Διαγράμματα ακτινοβολίας της προτεινόμενης κεραίας στη συχνότητα $f = 5.50$ GHz στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση στο α) επίπεδο xz ($\phi = 0^\circ$) και β) επίπεδο yz ($\phi = 90^\circ$), όπως προέκυψε από την προσομοίωση του H/M μοντέλου και τις μετρήσεις.	66
5.1	Τριδιάστατη όψη της κεραίας YIG-PCF α) εμπρόσθια όψη, β) ανάπτυγμα.	75
5.2	Στάδια παρασκευής του δείγματος με δομή γρανάτη YIG.	76
5.3	Μεταβολή της μαγνητικής ροπής $m(H_a)$ ανά γραμμάριο μάζας συναρτήσει του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου H_a για το δείγμα YIG.	77
5.4	Φάσμα FMR $d\chi''/dH_a$ (μαύρη συμπαγής γραμμή) και καμπύλη $\chi''(H_a)$ (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) για το δείγμα YIG.	77
5.5	Μέτρο του συντελεστή ανάκλασης στην είσοδο της κεραίας YIG-PCF στην αμαγνήτιστη κατάσταση και την πλήρως μαγνητισμένη για διάφορες τιμές H_o , όπως προέκυψε από την προσομοίωση του H/M μοντέλου.	79
5.6	Μέτρο του συντελεστή ανάκλασης και αξονικός λόγος της κεραίας YIG-PCF για $H_o = 1800$ Oe, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση.	80
5.7	Ηλεκτρικό πεδίο (E-field) στην επιφάνεια της κεραίας YIG-PCF στις συχνότητες συντονισμού στις δύο καταστάσεις λειτουργίας της.	80
5.8	Εργαστηριακό πρωτότυπο της κεραίας YIG-PCF: α) τα δύο κατασκευαστικά τμήματα και το κυλινδρικό δείγμα YIG, β) η εμπρόσθια όψη.	81
5.9	Πειραματικός συντελεστής ανάκλασης στην είσοδο της κεραίας YIG-PCF στις δύο καταστάσεις λειτουργίας της.	82
5.10	Το εργαστηριακό πρωτότυπο της κεραίας YIG-PCF και ο μόνιμος μαγνήτης για την παραγωγή μαγνητικού πεδίου 1800 Oe στο εσωτερικό του δοκιμίου τοποθετημένα εντός του ανηχωικού θαλάμου.	83
5.11	Μέτρο του συντελεστή ανάκλασης και αξονικός λόγος της κεραίας YIG-PCF για $H_o = 1800$ Oe, όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις.	83
5.12	Κανονικοποιημένο διαγράμμα ακτινοβολίας της κεραίας YIG-PCF στο επίπεδο yz στην αμαγνήτιστη κατάσταση ($f_{res} = 5.5$ GHz).	84
5.13	Κανονικοποιημένο διαγράμμα ακτινοβολίας εκπομπής της κεραίας YIG-PCF στο επίπεδο xz ($\phi = 0^\circ$) για $H_o = 1800$ Oe στη συχνότητα α) $f_1 = 4.738$ GHz και β) $f_2 = 5.217$ GHz.	84
5.14	Απολαβή εκπομπής της κεραίας YIG-PCF στην κατεύθυνση σκόπευσης ($\theta = 0^\circ$) στην “κατάσταση ON”.	85

5.15	Γεωμετρία του προτεινόμενου συστήματος αποτελούμενο από δύο κεραίες μικροταινιακού καλύμματος με σχισμές και ενσωματωμένα δοκίμια YIG α) εμπρόσθια όψη, β) ανάπτυγμα οπίσθιας όψης.	87
5.16	α) Συντελεστής ανάκλασης του πρώτου κεραιοστοιχείου, β) Συντελεστής μετάδοσης (αμοιβαία σύζευξη) μεταξύ των θυρών των στοιχείων για τις διάφορες καταστάσεις μαγνήτισης των δοκιμίων YIG (αποτελέσματα προσομοίωσης).	89
5.17	Απεικόνιση του μέτρου του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του προτεινόμενου συστήματος στην κατάσταση “OFF”-“OFF” όταν η θύρα 1 διεγείρεται και η θύρα 2 είναι τερματισμένη (επάνω), και όταν η θύρα 2 διεγείρεται και η θύρα 1 είναι τερματισμένη (κάτω).	90
5.18	Απεικόνιση του μέτρου του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του προτεινόμενου συστήματος στην κατάσταση “ON(+)”-“ON(-)” όταν η θύρα 1 διεγείρεται και η θύρα 2 είναι τερματισμένη (επάνω), και όταν η θύρα 2 διεγείρεται ενώ η θύρα 1 είναι τερματισμένη (κάτω). Τα βέλη λευκού χρώματος δείχνουν την στροφή του ηλεκτρικού πεδίου.	90
5.19	Εργαστηριακό πρωτότυπο του συστήματος δύο κεραιών YIG-PCF: α) δομικά στοιχεία β) εμπρόσθια όψη.	92
5.20	Εργαστηριακό πρωτότυπο του συστήματος δύο κεραιών και μόνιμοι μαγνήτες εντός του ανηχικού θαλάμου α) εμπρόσθια όψη, β) οπίσθια όψη.	92
5.21	α) Πειραματικός συντελεστής ανάκλασης του πρώτου κεραιοστοιχείου, β) Πειραματικός συντελεστής μετάδοσης (αμοιβαία σύζευξη) μεταξύ των στοιχείων για τις διάφορες καταστάσεις μαγνήτισης των δοκιμίων YIG.	93
6.1	Στάδια παρασκευής σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας-φερρίτη.	98
6.2	Μεταβολή της μαγνητικής ροπής $m(H_a)$ ανά γραμμάριο μάζας συναρτήσει του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου H_a για το YIG-Epoxy composite 1. . .	99
6.3	Φάσμα FMR $d\chi''/dH_a$ (μαύρη συμπαγής γραμμή) και καμπύλη $\chi''(H_a)$ (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) για το YIG-Epoxy composite 1.	99
6.4	Εργαστηριακό πρωτότυπο της κεραίας μικροταινιακού καλύμματος με ένθετη τροφοδοσία σε υπόστρωμα YIG-Epoxy composite 1: α) εμπρόσθια όψη, β) οπίσθια όψη.	100
6.5	Διάταξη στήριξης για μετρήσεις τυπωμένων κεραιών πάνω σε σύνθετο υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας-μαγνητοδιηλεκτρικού υλικού υπό την επίδραση μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.	101
6.6	Το εργαστηριακό πρωτότυπο της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 και στοίβα μόνιμων μαγνητών ορθογωνικού σχήματος τοποθετημένα εντός του ανηχικού θαλάμου.	102

6.7	α) Μέτρο του συντελεστή ανάκλασης και β) αξονικός λόγος της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 για διάφορες τιμές του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου B_{GND} , όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις.	103
6.8	α) Μέτρο του συντελεστή ανάκλασης και β) αξονικός λόγος της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 στις δύο καταστάσεις λειτουργίας της, όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις.	104
6.9	Συγκριτικά αποτελέσματα για α) το μέτρο του συντελεστή ανάκλασης και β) τον αξονικό λόγο της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 στην “κατάσταση ON” ($B_{GND} = 1.8$ kG).	107
6.10	Συγκριτικά κανονικοποιημένα διάγραμματα ακτινοβολίας της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 στη συχνότητα συντονισμού f_{res} στην “κατάσταση OFF” στο α) xz -επίπεδο και β) yz -επίπεδο.	108
6.11	Συγκριτικά κανονικοποιημένα διάγραμματα ακτινοβολίας της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 στη συχνότητα συντονισμού f_{res} στην “κατάσταση ON” στο α) xz -επίπεδο και β) yz -επίπεδο.	108
6.12	Επίδραση των διηλεκτρικών απωλειών του σύνθετου υλικού στο μέτρο του συντελεστή ανάκλασης της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 στην “κατάσταση OFF”.	110
6.13	Επίδραση των διηλεκτρικών απωλειών του σύνθετου υλικού στο μέτρο του συντελεστή ανάκλασης της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 στην “κατάσταση ON”.	111
6.14	Μεταβολή της εφαπτομένης απωλειών $\tan\delta_e$ συναρτήσει της συχνότητας για τα σύνθετα υλικά YIG-Epoxy composite 1, YIG-Epoxy composite 2 και τα επιμέρους συστατικά τους.	113
6.15	Μεταβολή της μαγνητικής ροπής $m(H_a)$ ανά γραμμάριο μάζας συναρτήσει του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου H_a για το YIG-Epoxy composite 2.	114
6.16	Φάσμα FMR $d\chi''/dH_a$ (μαύρη συμπαγής γραμμή) και καμπύλη $\chi''(H_a)$ (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) για το YIG-Epoxy composite 2.	115
6.17	Γεωμετρία κεραίας κυκλικού μικροταινιακού καλύμματος σε υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας με διεσπαρμένα σωματίδια φερρίτη.	117
6.18	Μοντέλο H/M προσομοίωσης για κεραία κυκλικού μικροταινιακού καλύμματος τυπωμένης πάνω στο υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας-φερρίτη YIG-Epoxy composite 2 α) εμπρόσθια και β) πλάγια όψη.	120
6.19	Συγκριτικά αποτελέσματα για τις συχνότητες συντονισμού της κεραίας κυκλικού μικροταινιακού καλύμματος πάνω στο υπόστρωμα YIG-Epoxy composite 2 για διάφορες τιμές H_o (μοντέλο κοιλότητας και προσομοιώσεις).	121
6.20	Διανυσματική κατανομή ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια της κεραίας στις συχνότητες συντονισμού f_{low} και f_{upper} ($H_o = 800$ Oe).	122

6.21	Αξονικός λόγος της κεραίας μικροταινιακού καλύμματος στο υπόστρωμα YIG-Epoxy composite 2 στο επίπεδο xz στις δύο καταστάσεις λειτουργίας (προσομοιώσεις).	123
6.22	Εργαστηριακό πρωτότυπο της κεραίας μικροταινιακού καλύμματος με υπόστρωμα YIG-Epoxy composite 2 και στοίβα μαγνητών τοποθετημένα στη διάταξη στήριξης για την πραγματοποίηση των μετρήσεων.	124
6.23	Πειραματικός συντελεστής ανάκλασης στην είσοδο της κεραίας μικροταινιακού καλύμματος με υπόστρωμα YIG-Epoxy composite 2 συναρτήσει του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου H_a	124
6.24	Συγκριτικά αποτελέσματα για το μέτρο του συντελεστή ανάκλασης της κεραίας μικροταινιακού καλύμματος με υπόστρωμα YIG-Epoxy composite 2 ($H_o = 800$ Oe).	125
6.25	Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αξονικό λόγο της κεραίας μικροταινιακού καλύμματος με υπόστρωμα YIG-Epoxy composite 2 στην κατεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας ($H_o = 800$ Oe).	126
6.26	Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αξονικό λόγο της κεραίας μικροταινιακού καλύμματος με υπόστρωμα YIG-Epoxy composite 2 στο επίπεδο xz στη χαμηλότερη συχνότητα λειτουργίας ($H_o = 800$ Oe).	127
7.1	Εργαστηριακά πρωτότυπα των αναδιαρθρώσιμων κεραιών α) YIG-PCF, β) YIG-Epoxy MSF-1, γ) YIG-Epoxy MSF-2.	132
7.2	Εργαστηριακό πρωτότυπο αναδιαρθρώσιμης κεραίας τοποθετημένο στη διάταξη στήριξης για τη διεξαγωγή μετρήσεων υπό την επίδραση μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου α) πλάγια όψη, β) κάτοψη.	133
7.3	Μέτρο του συντελεστή ανάκλασης στην είσοδο των κεραιών YIG-PCF, YIG-Epoxy MSF-1 και YIG-Epoxy MSF-2 στην “κατάσταση OFF”.	134
7.4	Μέτρο του συντελεστή ανάκλασης στην είσοδο των κεραιών YIG-PCF, YIG-Epoxy MSF-1 και YIG-Epoxy MSF-2 στην “κατάσταση ON”.	134
7.5	Διάγραμματα ακτινοβολίας της κεραίας YIG-PCF στη συχνότητα f_1 στην “κατάσταση OFF” και στην “κατάσταση ON” α) xz -επίπεδο, β) yz -επίπεδο.	137
7.6	Διάγραμματα ακτινοβολίας της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 στη συχνότητα f_1 στην “κατάσταση OFF” και στην “κατάσταση ON” α) xz -επίπεδο, β) yz -επίπεδο.	137
7.7	Διάγραμματα ακτινοβολίας της κεραίας YIG-Epoxy MSF-2 στη συχνότητα f_1 στην “κατάσταση OFF” και στην “κατάσταση ON” α) xz -επίπεδο, β) yz -επίπεδο.	138

Κατάλογος Πινάκων

2.1	Μονάδες μέτρησης μαγνητικών μεγεθών και οι συντελεστές μετατροπής από το CGS στο SI σύστημα μονάδων [51].	10
2.2	Διηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες εμπορικά διαθέσιμων φερριτών. . . .	16
2.3	Συχνότητα γυρομαγνητικού συντονισμού φερριτικού δείγματος YIG με μαγνήτιση κόρου $4\pi M_s = 1820$ G όταν το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο ισούται με $H_\alpha = 2600$ Oe.	22
3.1	Οι ρυθμίσεις του διανυσματικού αναλυτή δικτυωμάτων κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης και μέτρησης των κεραιών.	47
4.1	Τελικές τιμές των παραμέτρων της μικροταινιακής κεραίας με σύζευξη γειννίασης και ενσωματωμένο μαγνητο-διηλεκτρικό υλικό. Όλες οι διαστάσεις είναι σε χιλιοστά (millimetre).	55
4.2	Χαρακτηριστικά λειτουργίας της κεραίας στην αμαγνήτιστη κατάσταση και στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση για εσωτερικό πεδίο $H_o = 1750$ Oe, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση του ηλεκτρομαγνητικού μοντέλου. .	58
4.3	Μαγνητική επαγωγή στο επίπεδο γείωσης, B_{GND} , του εργαστηριακού πρωτοτύπου της κεραίας και το αντίστοιχο μέσο πεδίο πόλωσης στο εσωτερικό του YIG, $H_{o_{aver}}$	64
5.1	Διηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες του δείγματος YIG.	78
5.2	Αμοιβαία σύζευξη, πόλωση και απόδοση ακτινοβολίας του προτεινόμενου συστήματος στην κεντρική συχνότητα της κοινής περιοχής λειτουργίας ($f_{center} = 5.18$ GHz) για τις διάφορες καταστάσεις μαγνήτισης των δοκιμίων YIG (αποτελέσματα προσομοίωσης).	91
5.3	Αμοιβαία σύζευξη του προτεινόμενου συστήματος στην κεντρική συχνότητα $f_{center} = 5.23$ GHz για τις διάφορες καταστάσεις μαγνήτισης των μαγνητο-διηλεκτρικών υλικών, όπως προέκυψε από τις μετρήσεις.	92
6.1	Διηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες του δείγματος YIG-Epoxy composite 1.	100

6.2	Χαρακτηριστικά λειτουργίας της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 στην “κατάσταση OFF” και στην “κατάσταση ON” για διάφορες τιμές του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου (μετρήσεις).	105
6.3	Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρήσεων για τον αξονικό λόγο πόλωσης της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 στις δύο καταστάσεις λειτουργίας.	109
6.4	Επίδραση της εφαπτομένης απωλειών του σύνθετου υλικού στα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 στην “κατάσταση OFF”.	109
6.5	Επίδραση των διηλεκτρικών απωλειών του σύνθετου υλικού στα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 στην “κατάσταση ON”.	111
6.6	Επίδραση του πλάτους σιδηρομαγνητικού συντονισμού του σύνθετου υλικού στα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 στην “κατάσταση ON” για $\tan\delta_e = 0.0024$	111
6.7	Μαγνητικές ιδιότητες των υλικών Y101 (Temex), YIG(INN/ Δ), YIG-Epoxy composite 1 και YIG-Epoxy composite 2.	115
6.8	Αξονικός λόγος και στροφή πόλωσης στις συχνότητες συντονισμού της κεραίας μικροταινιακού καλύμματος πάνω στο υπόστρωμα YIG-Epoxy composite 2 για διάφορες τιμές H_o , όπως προέκυψε από τις προσομοιώσεις.	122
6.9	Χαρακτηριστικά λειτουργίας της κεραίας μικροταινιακού καλύμματος με υπόστρωμα YIG-Epoxy composite 2 στις δύο καταστάσεις λειτουργίας (προσομοίωση και μετρήσεις).	127
7.1	Διηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες των υλικών που ενσωματώθηκαν στις κεραίες υπό μελέτη.	132
7.2	Συχνότητες συντονισμού των υπό μελέτη κεραίων στην “κατάσταση ON”.	135
7.3	Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας των κεραίων YIG-PCF, YIG-Epoxy MSF-1 και YIG-Epoxy MSF-2 στην “κατάσταση OFF”.	136
7.4	Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας των κεραίων YIG-PCF, YIG-Epoxy MSF-1 και YIG-Epoxy MSF-2 στην “κατάσταση ON”.	136

Κατάλογος Συντμήσεων

AMC	Artificial Magnetic Conductor
AR	Axial Ratio
AUT	Antenna Under Test
BW	Bandwidth
CGS	Centimeter-Gram-Second
CPU	Central Processing Unit
CST	Computer Simulation Technology
DC	Direct Current
dB	deciBel
dBi	deciBel isotropic
DGS	Defected Ground Structure
DRA	Dielectric Resonator Antenna
EBG	Electromagnetic Band Gap
EM	Electro-Magnetic
EPR	Electron Paramagnetic Resonance
FAC	Fully Anechoic Chamber
FBW	Fractional Bandwidth
FIT	Finite Integration Technique
FMR	FerroMagnetic Resonance
FRA	Ferrite Resonator Antenna
GdIG	Gadolinium Iron Garnet
GPT	Generalized Permeability Tensor
HPBW	Half-Power Beam Width

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IF	Intermediate Frequency
LHCP	Left-Hand Circular Polarization
LLG	Landau-Lifschitz-Gilbert
LTCC	Low Temperature Co-fired Ceramic
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MSF	MicroStrip Fed
MW	Microwave
NdFeB	Neodymium Iron Boron
PCB	Printed Circuit Board
PIM	Pattern Integration Method
PCF	Proximity Coupled Fed
RA	Reconfigurable Antenna
RF	Radio Frequency
RHCP	Right-Hand Circular Polarization
RL	Return Loss
ROL/AZ	Roll over Azimtuth
SI	International System of Units
SISO	Single Input Single Output
SLL	Side Lobe Level
Sm-Co	Samarium-Cobalt
SMA	SubMiniature Version A
SMLR	Slotted Meander-Like Resonator
SQUID	Superconducting Quantum Interference Device
SRR	Split Ring Resonator
VNA	Vector Network Analyzer
XRD	X-Ray Diffraction
Y-Al-Gd	Yttrium-Aluminum-Gadolinium
Y-Gd	Yttrium-Gadolinium
YIG	Yttrium Iron Garnet
ΑΕΠ	Αριστερόστροφη Ελλειπτική Πόλωση

ΑΚΠ	Αριστερόστροφη Κυκλική Πόλωση
ΔΕΠ	Δεξιόστροφη Ελλειπτική Πόλωση
ΔΚΠ	Δεξιόστροφη Κυκλική Πόλωση
ΕΚΕΦΕ	Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών
Η/Μ	Ηλεκτρομαγνητική
ΙΝΝ/Δ	Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας / Δημόκριτος
ΙΠΤ/Δ	Ινστιτούτο Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών / Δημόκριτος

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Χρήση Μαγνητο-Διηλεκτρικών Υλικών σε Κεραίες

Η αλματώδης ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών τις τελευταίες δεκαετίες, η ραγδαία αύξηση των ασύρματων φορητών τερματικών και η ολοένα αυξανόμενη ζήτηση για νέες υπηρεσίες, εφαρμογές και υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, καθιστά επιτακτική την ανάγκη για χαμηλού προφίλ, αποδοτικές, συμπαγείς κεραίες οι οποίες θα μπορούν να μεταβάλλουν με ελεγχόμενο τρόπο τα χαρακτηριστικά τους και ταυτόχρονα θα έχουν χαμηλή πολυπλοκότητα και χαμηλό κόστος. Προς αυτή την κατεύθυνση, οι μηχανικοί κεραίων ασχολήθηκαν με την ενσωμάτωση καινοτόμων υλικών, αντί των συμβατικών διηλεκτρικών υλικών, στη δομή των κεραίων. Μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα μαγνητο-διηλεκτρικά υλικά (σε αρκετές περιπτώσεις αναφέρονται απλά ως μαγνητικά υλικά) τα οποία έχουν σχετική διηλεκτρική επιτρεπτότητα και σχετική μαγνητική διαπερατότητα μεγαλύτερη της μονάδας ($\epsilon_r > 1$ και $\mu_r > 1$) [1–7]. Σύμφωνα με πλήθος δημοσιευμένων εργασιών, η χρήση μαγνητο-διηλεκτρικών υλικών σε διατάξεις κεραίων προσφέρει τη δυνατότητα σμίκρυνσης των διαστάσεων τους, βελτίωσης των χαρακτηριστικών τους (όπως του εύρους ζώνης, του κέρδους και της απόδοσης ακτινοβολίας) και δυνατότητα μεταβολής της συχνότητας συντονισμού, της πόλωσης και του διαγράμματος ακτινοβολίας τους με ελεγχόμενο τρόπο.

Μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις στη σχεδίαση κεραίων αποτελεί η μείωση του μεγέθους τους διατηρώντας ταυτόχρονα καλές επιδόσεις. Η εφαρμογή των περισσότερων τεχνικών σμίκρυνσης που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία, όπως είναι η φόρτιση της δομής της κεραίας με χρήση κυκλωματικών στοιχείων ή με χρήση διηλεκτρικών υλικών υψηλής σχετικής διηλεκτρικής επιτρεπτότητας και η τροποποίηση της γεωμετρίας και του σχήματος της κεραίας με την εισαγωγή εγχοπών ή σχισμών [8], προκαλεί αύξηση του συντελεστή ποιότητας με συνέπεια τη μείωση του εύρους ζώνης καθώς και μείωση της

απόδοσης ακτινοβολίας της κεραίας. Μία αρκετά υποσχόμενη λύση στα προαναφερθέντα προβλήματα αποτελεί η χρήση μαγνητο-διηλεκτρικών υλικών. Η ενσωμάτωση τέτοιου είδους υλικών με μέτριες τιμές σχετικής διηλεκτρικής επιτρεπτότητας και σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας στη δομή της κεραίας μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του μεγέθους της κατά τον ίδιο παράγοντα ($n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$) σε σχέση με τη χρήση διηλεκτρικών υλικών με υψηλή τιμή σχετικής διηλεκτρικής επιτρεπτότητας. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές εργασίες που παρουσιάζουν αριθμητικά και πειραματικά αποτελέσματα σχετικά με τις δυνατότητες και τους περιορισμούς που προκύπτουν από τη χρήση τέτοιου είδους υλικών με σκοπό τη μείωση του μεγέθους και τη βελτίωση του εύρους ζώνης μιας κεραίας [5–7], [9–14]. Έχει μελετηθεί εκτενώς εάν τα υποστρώματα στα οποία είναι ενσωματωμένα φυσικά μαγνητικά υλικά ή τα τεχνητά μαγνητο-διηλεκτρικά υποστρώματα, τα οποία αποτελούνται από μία συστοιχία μεταλλικών στοιχείων (όπως είναι οι συντονιστές διακοπτόμενου δακτυλίου (Split Ring Resonators, SRRs)), υπερτερούν των διηλεκτρικών υποστρωμάτων με υψηλό ϵ_r . Σύμφωνα με την εργασία [11], τα τεχνητά μαγνητο-διηλεκτρικά υποστρώματα με διασπορά δεν παρουσιάζουν κάποιο πλεονέκτημα έναντι των συμβατικών διηλεκτρικών όσον αφορά το εύρος ζώνης προσαρμογής της κεραίας. Για την επίτευξη σμίκρυνσης είναι συνήθως προτιμητέα μαγνητο-διηλεκτρικά υλικά με χαμηλές απώλειες και χαμηλή διασπορά, με τα υποστρώματα στα οποία έχουν ενσωματωθεί φυσικά μαγνητικά υλικά να είναι αρκετά υποσχόμενα [7], [14]. Η συχνοτική διασπορά και οι απώλειες των μαγνητο-διηλεκτρικών υλικών είναι ιδιαίτερα κρίσιμες παράμετροι, καθώς μπορούν να οδηγήσουν σε μείωση της απόδοσης και του εύρους ζώνης της κεραίας.

Το γεγονός ότι τα σύγχρονα συστήματα επικοινωνιών απαιτούν κεραίες που μπορούν να προσαρμόζουν τα χαρακτηριστικά τους ανάλογα με το περιβάλλον διάδοσης ή τις απαιτήσεις του συστήματος (όπως βελτιωμένο εύρος ζώνης, μεταβολή της συχνότητας λειτουργίας, της πόλωσης και του διαγράμματος ακτινοβολίας) οδήγησε στην ανάπτυξη διαφόρων μηχανισμών αναδιαρθρωσιμότητας. Η γενική ιδέα της αναδιαρθρωσιμότητας (reconfigurability) είναι ότι μέσω της εσκεμμένης ανακατανομής των ρευμάτων της ή ισοδύναμα της μεταβολής των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων του ενεργού ανοίγματος της, επιτυγχάνεται η μεταβολή των χαρακτηριστικών εμπέδησης εισόδου και ακτινοβολίας της κεραίας με ελεγχόμενο και αναστρέψιμο τρόπο [15]. Αρκετές δημοσιευμένες εργασίες παρουσιάζουν αναλυτικά τις εξελίξεις στον τομέα της σχεδίασης αναδιαρθρώσιμων κεραιών (reconfigurable antennas, RAs), καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των τεχνικών αναδιαρθρωσιμότητας [15–18]. Σε αντίθεση με τις συμβατικές κεραίες, οι αναδιαρθρώσιμες κεραίες προσφέρουν ευελιξία και αυξημένη λειτουργικότητα χωρίς να απαιτείται η χρήση πολλαπλών κεραιοστοιχείων με αποτέλεσμα να προσδίδουν επιπλέον βαθμούς ελευθερίας στην απόκριση του συστήματος. Τα πλεονεκτήματα αυτά τις καθιστούν ελκυστικές σε πληθώρα εφαρμογών, όπως είναι οι κυψελωτές και δορυφορικές επικοινωνίες, τα συστήματα ραντάρ, η επικοινωνία οχήματος με όχημα (vehicle-to-vehicle communication) και η τηλεπισκόπηση (remote sensing).

Ανάλογα με ποιο χαρακτηριστικό της κεραίας μεταβάλλεται, διακρίνονται οι εξής κατηγορίες αναδιαρθρωσιμότητας: (1) αναδιαρθρωσιμότητα συχνότητας (frequency reconfigurability) όταν μεταβάλλεται η συχνότητα συντονισμού της κεραίας, (2) αναδιαρθρωσιμότητα διαγράμματος (pattern reconfigurability) όταν μεταβάλλεται το διάγραμμα ακτινοβολίας όσον αφορά τη μορφή του και τις παραμέτρους της κατευθυντικότητας και του κέρδους της κεραίας, (3) αναδιαρθρωσιμότητα πόλωσης (polarization reconfigurability) όταν μεταβάλλεται η πόλωση της κεραίας (για παράδειγμα, από γραμμική σε κυκλική και το αντίστροφο, από δεξιόστροφη κυκλική σε αριστερόστροφη και το αντίστροφο), (4) συνδυασμός των παραπάνω κατηγοριών (compound reconfigurability) όπου μεταβάλλονται ταυτόχρονα δύο ή περισσότερα χαρακτηριστικά της κεραίας (για παράδειγμα, η συχνοτική απόκριση και η πόλωση της κεραίας).

Η σχεδίαση αναδιαρθρώσιμων κεραιών είναι μια απαιτητική και πολύπλοκη διαδικασία στην οποία παρουσιάζονται πληθώρα τεχνικών προκλήσεων. Για το λόγο αυτό, οι μηχανικοί κεραιών είναι απαραίτητο να απαντήσουν σε ορισμένα κρίσιμα ερωτήματα κατά τη διαδικασία σχεδίασης τέτοιου είδους κεραιών, όπως: ποια παράμετρος αναδιάρθρωσης (συχνότητα, διάγραμμα ακτινοβολίας, ή πόλωση) χρειάζεται να μεταβληθεί, πώς πρέπει να τροποποιηθεί η δομή της κεραίας ώστε να επιτευχθεί η αναδιαρθρωσιμότητα της καθώς και ποια τεχνική αναδιαρθρωσιμότητας δεν επηρεάζει αρνητικά τα χαρακτηριστικά εμπέδησης εισόδου ή/και ακτινοβολίας της κεραίας. Μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις προκύπτει όταν η αναδιαρθρωσιμότητα περιορίζεται σε ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό απόκρισης της κεραίας, ενώ ταυτόχρονα απαιτείται διατήρηση των υπολοίπων χαρακτηριστικών της. Σε αυτή την περίπτωση, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή προκειμένου να μελετηθούν ταυτόχρονα όλα τα χαρακτηριστικά απόκρισης της κεραίας. Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω, το πρωταρχικό βήμα στη διαδικασία σχεδίασης μιας αναδιαρθρώσιμης κεραίας είναι η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής αναδιαρθρωσιμότητας. Στην επιλογή αυτή, παίζουν σημαντικό ρόλο τόσο οι απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής όσο και η πολυπλοκότητα της σχεδίασης και το κόστος κατασκευής.

Οι προτεινόμενες τεχνικές αναδιαρθρωσιμότητας περιλαμβάνουν τη χρήση διατάξεων διακοπτικής λειτουργίας (όπως είναι οι μικροκυματικές δίοδοι), την τροποποίηση της δομής της κεραίας με τη βοήθεια μηχανικών μέσων, και τη μεταβολή των χαρακτηριστικών του υποστρώματος της κεραίας χρησιμοποιώντας υλικά των οποίων η διηλεκτρική επιτρεπτότητα ή η μαγνητική διαπερατότητα μπορεί να μεταβληθεί με την εφαρμογή εξωτερικού ηλεκτρικού ή μαγνητικού πεδίου αντίστοιχα, όπως είναι τα σιδηροηλεκτρικά (ferroelectric) υλικά, τα σιδηρμαγνητικά (ferrimagnetic) υλικά και οι υγροί κρύσταλλοι (liquid crystals). Η παρούσα Διατριβή εστιάζει στην σχεδίαση και υλοποίηση αναδιαρθρώσιμων κεραιών μικροταινιακού καλύμματος με τη χρήση ανισοτροπικών μαγνητο-διηλεκτρικών υλικών (συγκεκριμένα των φερριτών) των οποίων η μαγνητική διαπερατότητα μεταβάλλεται με την εφαρμογή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, του λεγόμενου πεδίου πόλωσης (bias field). Η ενσωμάτωση τους στη δομή της κεραίας προσφέρει τη δυνατότητα ελέγχου των χαρακτηριστικών της (συ-

χνότητα συντονισμού και πόλωση) με εύκολο τρόπο (μεταβάλλοντας ελεγχόμενα την ένταση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου) και ταυτόχρονα διατηρώντας χαμηλό το κόστος κατασκευής και την πολυπλοκότητα σχεδίασης του αναδιαρθρώσιμου κεραιοσυστήματος.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές εργασίες όπου προτείνεται η χρήση φερριτών σε κεραίες μικροταινιακού καλύμματος ή στοιχειοκεραίες και μελετάται η δυνατότητα μεταβολής της σύνθετης αντίστασης εισόδου ή των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας τους υπό την επίδραση εξωτερικού στατικού μαγνητικού πεδίου [19–33]. Οι Pozar & Sanchez [19] απέδειξαν πειραματικά ότι η συχνότητα συντονισμού μιας κεραίας μικροταινιακού καλύμματος τυπωμένης σε υπόστρωμα φερρίτη μπορεί να μετατοπιστεί κατά 40% μεταβάλλοντας την ένταση του μαγνητικού πεδίου που εφαρμόζεται κάθετα στην επιφάνεια της κεραίας. Στην [20] οι συγγραφείς πρότειναν τη χρήση φερριτών σε μορφή λεπτών υμενίων (thin films) εναποτεθειμένων πάνω στο διηλεκτρικό υπόστρωμα μιας κεραίας μικροταινιακού καλύμματος και έδειξαν ότι είναι εφικτή η μεταβολή της συχνότητας συντονισμού της εφαρμόζοντας στατικό μαγνητικό πεδίο παράλληλα στο επίπεδο του υποστρώματος. Η δυνατότητα μεταβολής της συχνότητας συντονισμού μιας κεραίας με ενσωματωμένο φερρίτη βασίζεται στις μεταβολές των εξαρτώμενων από τη συχνότητα στοιχείων του ταυστή μαγνητικής διαπερατότητας συναρτήσει του πεδίου πόλωσης, όπως αναφέρουν οι Mishra et al. [21]. Οι Tsang & Langley [26] μελέτησαν την επίδραση του πεδίου πόλωσης στη συχνότητα συντονισμού και τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας μιας μικροταινιακής κεραίας τυπωμένης σε υπόστρωμα φερρίτη. Έδειξαν ότι εφαρμόζοντας ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο κάθετα στην επιφάνεια της κεραίας εμφανίζονται δύο συντονισμοί με διαφορετική στροφή της πόλωσης (αριστερόστροφη και δεξιόστροφη κυκλική). Χωρίς την εφαρμογή του μαγνητικού πεδίου η κεραία παρουσιάζει έναν συντονισμό και γραμμική πόλωση. Επιπρόσθετα, επισήμαναν ότι αντιστρέφοντας την πολικότητα του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου, η στροφή της πόλωσης αλλάζει από αριστερόστροφη σε δεξιόστροφη κυκλική και αντίστροφα. Εναλλακτικά, οι Mavridis & Kyriacou [28], [30] πρότειναν την ενσωμάτωση δείγματος φερρίτη σε σχήμα κυλίνδρου ή δακτυλίου (τοροειδές) στο διηλεκτρικό υπόστρωμα μιας μικροταινιακής κεραίας, και απέδειξαν αναλυτικά και αριθμητικά τη δυνατότητα μεταβολής της συχνότητας συντονισμού της κεραίας υπό την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Τα δείγματα αυτά, λόγω του μικρότερου μεγέθους συγκριτικά με ένα υπόστρωμα φερρίτη, παρουσιάζουν μικρότερες απώλειες. Μειώνοντας το μέγεθος του φερριτικού δείγματος που ενσωματώνεται στο υπόστρωμα της κεραίας, γίνεται ένας συμβιβασμός ανάμεσα στις μαγνητικές απώλειες και την αναδιαρθρωσιμότητα τις κεραίας (μειώνεται μεν το εύρος μεταβολής της παραμέτρου αναδιάρθρωσης αλλά μπορούμε να επιτύχουμε αποδεκτές τιμές στην απόδοση ακτινοβολίας της κεραίας).

Ο τρόπος πόλωσης του μαγνητο-διηλεκτρικού υλικού είναι ένα σημαντικό ζήτημα για τις συμπαγείς τερματικές συσκευές. Συνήθως, για την πόλωση του υλικού χρησιμοποιούνται ηλεκτρομαγνήτες ή μόνιμοι μαγνήτες οι οποίοι τοποθετούνται σε μικρή απόσταση από το δείγμα, και το μέγεθος τους καθορίζεται από την απαιτούμενη ένταση του εφαρμοζόμενου

μαγνητικού πεδίου. Ισχυρότερο μαγνητικό πεδίο συνεπάγεται τη χρήση πιο ογκώδη ηλεκτρομαγνήτη ή μεγαλύτερου αριθμού μόνιμων μαγνητών. Μια πολλά υποσχόμενη λύση είναι η ενσωμάτωση μικροσκοπικών πηνίων στο υπόστρωμα φερρίτη με χρήση της πολυστρωματικής τεχνολογίας LTCC (low temperature co-fired ceramic). Στο πλαίσιο αυτό, οι συγγραφείς των εργασιών [34], [35] σχεδίασαν και υλοποίησαν κεραίες μικροταινιακού καλύμματος τυπωμένες σε LTCC υποστρώματα φερρίτη επιδεικνύοντας την δυνατότητα επίτευξης αναδιαρθρωσιμότητας της συχνότητας τους. Επιπλέον, σε ορισμένες εργασίες προτάθηκε η χρήση αυτο-πολωμένων (self-biased) φερριτών σε μορφή λεπτών υμενίων, δηλαδή υλικών στα οποία δεν απαιτείται η εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου για να πολωθούν [36–38]. Συγκεκριμένα, οι συγγραφείς των εργασιών αυτών εναπόθεσαν ένα ή περισσότερα λεπτά στρώματα (φιλμ) φερρίτη επάνω ή κάτω από το ακτινοβολούν κάλυμμα μιας μικροταινιακής κεραίας και μελέτησαν τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της συναρτήσει του αριθμού των φιλμ καθώς και της θέσης τοποθετήσής τους στη δομή της κεραίας. Κατέληξαν ότι η χρήση αυτο-πολωμένων λεπτών στρώματων φερρίτη οδηγεί σε σημαντική βελτίωση του εύρους ζώνης, του κέρδους και της απόδοσης ακτινοβολίας της κεραίας. Η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα ελκυστική για τις εφαρμογές όπου το μέγεθος της κεραίας είναι πρωταρχικής σημασίας.

Οι Fechine et al. στις εργασίες τους [39–41], πρότειναν την αντικατάσταση του διηλεκτρικού υλικού στις κεραίες διηλεκτρικού συντονιστή (Dielectric Resonator Antennas, DRAs) από σιδηριμαγνητικό υλικό με σκοπό τη βελτίωση των χαρακτηριστικών τους υπό την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Οι κεραίες αυτές αναφέρονται ως Ferrite Resonator Antennas (FRAs) λόγω της χρήσης του φερρίτη. Στην πρώτη εργασία [39], οι συγγραφείς σχεδίασαν και κατασκεύασαν FRAs χρησιμοποιώντας τα σιδηριμαγνητικά υλικά Gadolinium Iron Garnet (GdIG) και Yttrium Iron Garnet (YIG). Στις επόμενες εργασίες τους [40, 41] ανέμιξαν τα παραπάνω σιδηριμαγνητικά υλικά και μελέτησαν τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της προτεινόμενης κεραίας. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτά με εκείνα που προέκυψαν στην [39], διαπίστωσαν ότι μπορεί να επιτευχθεί ίδια ή ακόμα μεγαλύτερη βελτίωση του εύρους ζώνης της κεραίας μεταβάλλοντας τη σύνθεση του υλικού. Επιπρόσθετα, υπάρχουν εργασίες στις οποίες μελετάται η χρήση μαγνητο-διηλεκτρικών υλικών στη σχεδίαση κεραιών για συγκεκριμένες εφαρμογές των ασύρματων επικοινωνιών [42–45].

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική έρευνα που πραγματοποιήθηκε, διαπιστώθηκε η χρήση φερριτών σε κεραιοσυστήματα είτε ως υπόστρωμα της προτεινόμενης κεραίας, ως μέρος του συμβατικού διηλεκτρικού υποστρώματος (σε μορφή συμπαγή) ή ως υπέρστρωμα (superstrate) σε μορφή λεπτών υμενίων. Προκειμένου να ξεπεραστούν οι κατασκευαστικές δυσκολίες που προκύπτουν στην περίπτωση αντικατάστασης τμήματος του διηλεκτρικού υποστρώματος από δείγμα μαγνητο-διηλεκτρικού υλικού συγκεκριμένων διαστάσεων, πρόσφατες δημοσιευμένες εργασίες πρότειναν τη χρήση σύνθετων υποστρωμάτων που αποτελούνται από σωματίδια φερρίτη διεσπαρμένων σε πολυμερική μήτρα [46], [47]. Είναι προφανές ότι ανεξάρτητα από τη σύνθεση και τη δομή τους, η χρήση μαγνητο-διηλεκτρικών

υλικών σε κεραίες προσφέρει νέες δυνατότητες στη σχεδίαση και τη λειτουργία τους. Για να μελετηθούν αναλυτικά και αριθμητικά τα χαρακτηριστικά απόκρισης μιας τέτοιας κεραίας απαιτείται όσο το δυνατόν ακριβέστερη μοντελοποίηση του μαγνητο-διηλεκτρικού υλικού, η οποία βασίζεται στη μαθηματική περιγραφή της μαγνητικής διαπερατότητάς του.

1.2 Αντικείμενο και Δομή της Διατριβής

Το ερευνητικό αντικείμενο που πραγματεύεται η παρούσα Διατριβή αφορά τη μοντελοποίηση, τη σχεδίαση και την αξιολόγηση αναδιαρθρώσιμων κεραιών με τη χρήση μαγνητο-διηλεκτρικών υλικών για εφαρμογές ασύρματων επικοινωνιών στη ζώνη συχνοτήτων 5.5 GHz. Αν και το κυρίως ερευνητικό πεδίο της Διατριβής είναι η τεχνολογία κεραιών, αξιοποιεί γνώσεις της επιστήμης των υλικών με στόχο την ανάπτυξη καινοτόμων κεραιών διατηρώντας ταυτόχρονα χαμηλό το κόστος κατασκευής και την πολυπλοκότητα σχεδίασης του κεραιοσυστήματος. Συγκεκριμένα, οι στόχοι της Διατριβής είναι οι εξής:

Στόχος 1: Ανάπτυξη και επαλήθευση μεθοδολογίας για τη σχεδίαση και την προσομοίωση αναδιαρθρώσιμων κεραιών που ενσωματώνουν μαγνητο-διηλεκτρικά υλικά στη δομή τους.

Στόχος 2: Μελέτη καταπίεσης της αμοιβαίας σύζευξης σε σύστημα πολλαπλών κεραιών με τη χρήση μαγνητο-διηλεκτρικών υλικών.

Στόχος 3: Σχεδίαση, προσομοίωση και υλοποίηση αναδιαρθρώσιμων κεραιών μικροταινιακού καλύμματος χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνικές ενσωμάτωσης του μαγνητο-διηλεκτρικού υλικού στη δομή της κεραίας. Μελέτη της εφικτότητας αναδιαρθρωσιμότητας με την εφαρμογή στατικού μαγνητικού πεδίου.

Στόχος 4: Αξιολόγηση των επιδόσεων των προτεινόμενων αναδιαρθρώσιμων κεραιών.

Η Διατριβή είναι οργανωμένη σε οκτώ Κεφάλαια και εμφανίζει την ακόλουθη δομή, με σχετικές αναφορές στις δημοσιεύσεις (περιοδικά [Π] και συνέδρια [Σ]) που προέκυψαν στα πλαίσια της ερευνητικής εργασίας.

Το **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζει το θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται για την κατανόηση των υπόλοιπων Κεφαλαίων. Περιγράφονται οι βασικές ιδιότητες και η συμπεριφορά των μαγνητο-διηλεκτρικών υλικών που χρησιμοποιούνται στην παρούσα Διατριβή υπό την επίδραση στατικού μαγνητικού πεδίου με στόχο τη σχεδίαση και την ανάπτυξη αναδιαρθρώσιμων κεραιών. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μοντελοποίηση της μαγνητικής διαπερατότητας στις δύο καταστάσεις μαγνήτισης του υλικού: την αμαγνήτιστη κατάσταση (απουσία μαγνητικού πεδίου) και τη μαγνητισμένη κατάσταση. Κύριος στόχος είναι ο προσδιορισμός των κρίσιμων

παραμέτρων που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση των κεραιών που ενσωματώνουν στη δομή τους μαγνητο-διηλεκτρικά υλικά έτσι ώστε να βελτιωθεί η ακρίβεια των αριθμητικών αποτελεσμάτων.

Το **Κεφάλαιο 3** ξεκινά με την περιγραφή των θεμελιωδών μεγεθών που σχετίζονται με τις κεραιές αναφέροντας τους ορισμούς και την ορολογία που θα χρησιμοποιηθούν στο πλαίσιο της Διατριβής. Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη τις κρίσιμες παραμέτρους για την ακριβέστερη μοντελοποίηση της μαγνητικής διαπερατότητας, περιγράφονται αναλυτικά τα στάδια της προτεινόμενης μεθοδολογίας για τη σχεδίαση και την προσομοίωση αναδιαρθρώσιμων κεραιών με μαγνητο-διηλεκτρικά υλικά [Π1]. Επιπλέον, επισημαίνονται σημαντικά θέματα τα οποία προκύπτουν στη διαδικασία των μετρήσεων, όπως είναι η πόλωση του μαγνητο-διηλεκτρικού υλικού και η δυνατότητα διεξαγωγής μετρήσεων υπό την επίδραση μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, και παρουσιάζονται οι λύσεις που εφαρμόζονται. Τέλος, περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία των μετρήσεων χαρακτηρισμού προκειμένου να ελεγχθεί πειραματικά η δυνατότητα αναδιαρθρωσιμότητας των προτεινόμενων κεραιών.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται αναλυτικά η σχεδίαση, προσομοίωση και κατασκευή μιας αναδιαρθρώσιμης κεραιάς μικροταινιακού καλύμματος με τροφοδοσία σύζευξης μέσω γειτνίασης και ενσωματωμένο μαγνητο-διηλεκτρικό υλικό στο ανώτερο υπόστρωμά της, ακολουθώντας τη μεθοδολογία που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3. Η προτεινόμενη κεραιά κατασκευάζεται και πραγματοποιούνται μετρήσεις χαρακτηρισμού στις δύο διακριτές καταστάσεις λειτουργίας της, την “κατάσταση OFF” (το ενσωματωμένο δοκίμιο είναι αμαγνήτιστο) και την “κατάσταση ON” (το δοκίμιο βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού), και ελέγχεται πειραματικά η δυνατότητα μεταβολής της συχνότητας συντονισμού και της πόλωσης της κεραιάς. Το Κεφάλαιο κλείνει με μία συγκριτική μελέτη μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων με στόχο την επαλήθευση της προτεινόμενης μεθοδολογίας σχεδίασης και ηλεκτρομαγνητικής μοντελοποίησης [Π1].

Το **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζει μια τεχνική καταπίεσης της αμοιβαίας σύζευξης σε συστήματα πολλαπλών κεραιών η οποία βασίζεται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν τα μαγνητο-διηλεκτρικά υλικά υπό την επίδραση εξωτερικού στατικού μαγνητικού πεδίου. Αρχικά, γίνεται εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση των τεχνικών καταπίεσης του φαινομένου της αμοιβαίας σύζευξης και κατόπιν, περιγράφεται η προτεινόμενη τεχνική. Για τις ανάγκες της μελέτης, σχεδιάζεται και προσομοιώνεται ένα σύστημα αποτελούμενο από δύο κεραιές μικροταινιακού καλύμματος με τροφοδοσία σύζευξης γειτνίασης με δυο κυλινδρικά δοκίμια μαγνητο-διηλεκτρικού υλικού ενσωματωμένα στο ανώτερο υπόστρωμα κάτω από τα ακτινοβολούντα στοιχεία [Σ2]. Η βασική ιδέα της προτεινόμενης τεχνικής είναι να αξιοποιηθεί η αναδιαρθρωσιμότητα πόλωσης που παρουσιάζει το κάθε κεραιοστοιχείο υπό την παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου [Σ1]. Μελετάται η δυνατότητα περιορισμού της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ των στοιχείων για τις διάφορες καταστάσεις μαγνήτισης των δύο μαγνητο-διηλεκτρικών δοκιμίων. Επίσης, διερευνάται η περίπτωση εφαρμογής μαγνητικού πεδίου αντίθετης πολικότητας όταν τα δύο δοκίμια είναι μαγνητισμένα. Τέλος, το σύστημα

δύο κεραιών κατασκευάζεται και πραγματοποιούνται μετρήσεις του συντελεστή μετάδοσης S_{21} προκειμένου να επιβεβαιωθεί πειραματικά η εφικτότητα της προτεινόμενης τεχνικής.

Με κίνητρο την ανάπτυξη μιας μεθόδου ενσωμάτωσης του μαγνητο-διηλεκτρικού υλικού στη δομή των κεραιών απαλλαγμένης από τα κατασκευαστικά προβλήματα που παρουσιάζονται στην πρώτη κατηγορία αναδιαρθρώσιμων κεραιών και τα οποία σχετίζονται με τη δυσκολία ενσωμάτωσης του δοκιμίου σε συμπαγή μορφή στο υπόστρωμα της κεραίας, στο **Κεφάλαιο 6** μελετάται η σχεδίαση και κατασκευή κεραιών μικροταινιακού καλύμματος πάνω σε υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας μαγνητο-διηλεκτρικού υλικού. Αρχικά, σχεδιάζεται και κατασκευάζεται μια τυπωμένη κεραία μικροταινιακού καλύμματος με ένθετη τροφοδοσία πάνω σε υπόστρωμα αποτελούμενο από σωματίδια φερρίτη τα οποία βρίσκονται ομοιογενώς διεσπαρμένα σε μη μαγνητική πολυμερική μήτρα και εξετάζεται η δυνατότητα μεταβολής της συχνότητας συντονισμού και της πόλωσης της με την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου [Σ3]. Επίσης, μελετάται διεξοδικά η επίδραση των διηλεκτρικών και των μαγνητικών ιδιοτήτων του υλικού του υποστρώματος στην απόδοση ακτινοβολίας της κεραίας και παρουσιάζεται η μελέτη εφικτότητας παρασκευής ενός σύνθετου υλικού πολυμερικής μήτρας-φερρίτη με όσο το δυνατόν χαμηλότερες διηλεκτρικές και μαγνητικές απώλειες [Σ4]. Το Κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την ανάλυση μιας κεραίας κυκλικού μικροταινιακού καλύμματος σε υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας-φερρίτη στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση χρησιμοποιώντας το μοντέλο κοιλότητας (cavity model) [Π2]. Στόχος είναι να γίνει μια αρχική εκτίμηση των συχνοτήτων συντονισμού της κεραίας με γρήγορο και αξιόπιστο τρόπο. Για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη θεωρητική ανάλυση, πραγματοποιείται προσομοίωση πλήρους κύματος της τυπωμένης κεραίας με το υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας-φερρίτη με τις βελτιωμένες ιδιότητες και μετρήσεις του εργαστηριακού πρωτότυπου που κατασκευάστηκε.

Στο **Κεφάλαιο 7** παρουσιάζεται η συγκριτική μελέτη των επιδόσεων των δύο διαφορετικών κατηγοριών αναδιαρθρώσιμων κεραιών που σχεδιάστηκαν, προσομοιώθηκαν και κατασκευάστηκαν στα πλαίσια της διδακτορικής έρευνας [Σ5]. Η αξιολόγηση των επιδόσεών τους γίνεται, μέσω μετρήσεων σε ανηχικό θάλαμο, στις δύο διακριτές καταστάσεις λειτουργίας τους. Συγκεκριμένα, πραγματοποιούνται μετρήσεις του συντελεστή ανάκλασης, της πόλωσης, των διαγραμμάτων ακτινοβολίας και της απόδοσης ακτινοβολίας της κεραίας μικροταινιακού καλύμματος με τροφοδοσία σύζευξης μέσω γειτνίασης και ενσωματωμένο μαγνητο-διηλεκτρικό στο ανώτερο υποστρώμα της και της κεραίας μικροταινιακού καλύμματος σε υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας-φερρίτη που παρουσιάστηκαν στα Κεφάλαια 5 και 6 αντίστοιχα. Στα πλαίσια της μελέτης αυτής, κατασκευάζεται μία ακόμα τυπωμένη κεραία μικροταινιακού καλύμματος σε υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας-φερρίτη με βελτιωμένες ιδιότητες και εξετάζεται η δυνατότητα βελτίωσης της απόδοσης ακτινοβολίας της σε σύγκριση με την κεραία που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 6.

Στο **Κεφάλαιο 8** συνοψίζονται τα αποτελέσματα της ερευνητικής εργασίας και διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2

Φερρίτες

Στόχος του παρόντος Κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει το θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται για την κατανόηση των υπόλοιπων κεφαλαίων και αφορά τις βασικές ιδιότητες των μαγνητο-διηλεκτρικών υλικών που θεωρούνται κατάλληλα για χρήση στη δομή των κεραιών με στόχο την επίτευξη αναδιαρθρωσιμότητας. Περιγράφεται αναλυτικά η συμπεριφορά αυτών των υλικών (φερρίτες) υπό την επίδραση στατικού μαγνητικού πεδίου καθώς και η απόκρισή τους σε εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο επεξηγώντας το φαινόμενο του σιδηρομαγνητικού συντονισμού. Κατόπιν, γίνεται αναφορά στους λόγους που επιλέγεται η κατηγορία των γρανάτων και συγκεκριμένα ο γρανάτης υτρίου-σιδήρου για το σκοπό της παρούσας Διατριβής. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μοντελοποίηση της μαγνητικής διαπερατότητας των φερριτών στις διαφορετικές καταστάσεις μαγνήτισης του υλικού.

2.1 Εισαγωγή

Η επιλογή των μαγνητο-διηλεκτρικών υλικών που θα χρησιμοποιηθούν στη δομή των κεραιών με σκοπό την επίτευξη αναδιαρθρωσιμότητας έχει μεγάλη σημασία. Σε συστήματα κεραιών υψηλών συχνοτήτων, πρέπει να επιλέγονται μαγνητο-διηλεκτρικά υλικά με υψηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση έτσι ώστε να είναι επιτρεπτή η διείσδυση ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας στο υλικό και συνεπώς οι απώλειες δινορευμάτων (eddy current losses) να είναι πολύ χαμηλές. Ειδικά, τα σιδηρομαγνητικά οξειδία (ή αλλιώς φερρίτες) λόγω της μονωτικής συμπεριφοράς τους και των μοναδικών μαγνητικών ιδιοτήτων που παρουσιάζουν υπό την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, θεωρούνται κατάλληλα για χρήση σε μικροκυματικές διατάξεις όπως είναι οι κεραιές.

Οι φερρίτες είναι μιστά μαγνητικά οξειδία τα οποία έχουν ως κύριο συστατικό το οξείδιο του σιδήρου και ταξινομούνται με βάση την κρυσταλλική δομή τους σε τρεις κατηγορίες: τους σπινέλιους (spinel), τους εξαγωνικούς φερρίτες (hexaferrites) και τους γρανάτες (garnets) [48]. Οι σπινέλιοι είναι οι πιο συνηθισμένοι φερρίτες στην περιοχή συχνοτήτων 3 – 30 GHz, με τους φερρίτες νικελίου να προτιμώνται για εφαρμογές υψηλής ισχύος [49]. Οι εξαγωνικοί

Πίνακας 2.1: Μονάδες μέτρησης μαγνητικών μεγεθών και οι συντελεστές μετατροπής από το CGS στο SI σύστημα μονάδων [51].

Μέγεθος	CGS	Συντελεστής Μετατροπής	SI
Μαγνητική Επαγωγή, B	G	10^{-4}	T
Ένταση Μαγνητικού Πεδίου, H	Oe	$10^3/4\pi$	A/m
Μαγνήτιση Κόρου, $4\pi M_s$	G	$10^3/4\pi$	A/m
Πλάτος Σιδηρομαγνητικού Συντονισμού, ΔH	Oe	$10^3/4\pi$	A/m
Μαγνητική Διαπερατότητα, μ	Αδιάστατο	$4\pi \cdot 10^{-7}$	Wb/(A · m)

SI: International System of Units, G: gauss, Oe: oersted, T: tesla.

φερρίτες είναι κατάλληλοι για εφαρμογές σε υψηλότερες συχνότητες έως και 100 GHz [49], ενώ οι γρανάτες χρησιμοποιούνται στην περιοχή συχνοτήτων 1 – 10 GHz. Συνήθως, οι φερρίτες έχουν υψηλή σχετική διηλεκτρική επιτρεπτότητα ($10 \leq \epsilon_r \leq 20$) και πολύ χαμηλές διηλεκτρικές απώλειες ($10^{-4} \leq \tan\delta_e \leq 10^{-3}$).

Οι μαγνητικές ιδιότητες των φερριτών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε εγγενείς (intrinsic) και εξωγενείς (extrinsic). Οι εγγενείς μαγνητικές ιδιότητες, όπως είναι η μαγνήτιση κόρου $4\pi M_s$, η θερμοκρασία Curie T_c και η μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία, σχετίζονται με την κρυσταλλική δομή και τη χημική σύνθεση του υλικού. Οι εξωγενείς μαγνητικές ιδιότητες περιγράφουν την αλληλεπίδραση του υλικού με εξωτερικά πεδία και περιλαμβάνουν ιδιότητες του βρόχου υστέρησης, όπως είναι το συνεχτικό πεδίο H_c και η παραμένουσα μαγνήτιση M_r , και μικροκυματικές ιδιότητες όπως το πλάτος σιδηρομαγνητικού συντονισμού ΔH . Οι ιδιότητες αυτές εξαρτώνται από τη μικροδομή και τη διαδικασία παρασκευής του σιδηρομαγνητικού υλικού [50], γεγονός που παρέχει τη δυνατότητα παρασκευής υλικών με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

Παρόλο που το Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI) είναι πλέον το καθιερωμένο, για την περιγραφή των φυσικών μεγεθών που σχετίζονται με τις μαγνητικές ιδιότητες των σιδηρομαγνητικών υλικών χρησιμοποιούνται συνήθως μονάδες του συστήματος centimetre–gram–second (CGS). Στον Πίνακα 2.1 παρατίθενται οι μονάδες μέτρησης των μαγνητικών μεγεθών που αναφέρονται στην παρούσα Διατριβή καθώς και οι συντελεστές μετατροπής τους από το CGS στο SI σύστημα μονάδων.

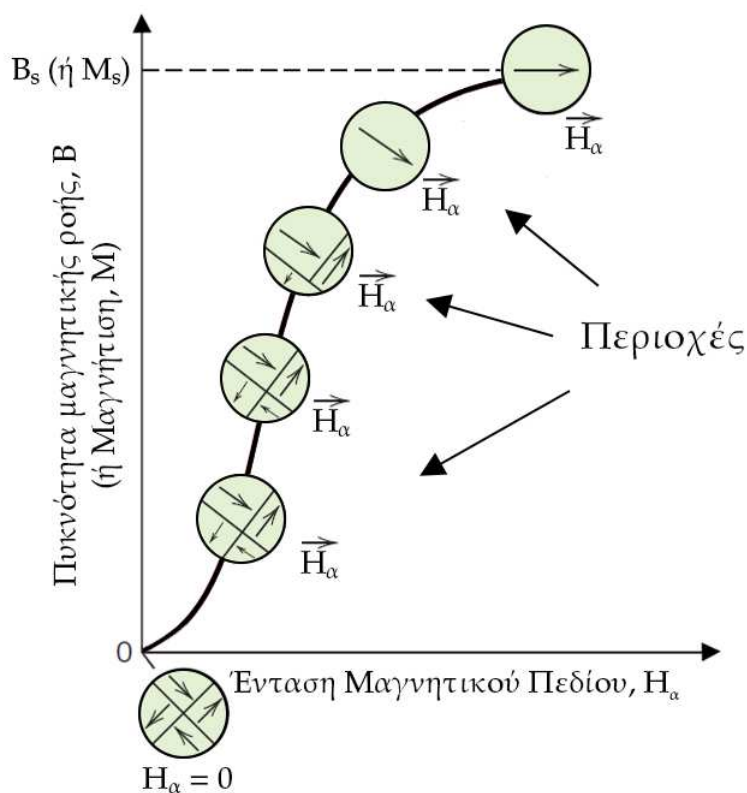
2.2 Μαγνητικές Περιοχές και Βρόχος Υστέρησης

Οι φερρίτες είναι πολυκρυσταλλικά υλικά όπου κάθε κρυσταλλίτης (κόκκος) αποτελείται από πολλές περιοχές μικρού όγκου στις οποίες οι ατομικές μαγνητικές ροπές έχουν τον ίδιο προσανατολισμό. Μια τέτοια περιοχή ονομάζεται μαγνητική περιοχή ή περιοχή Weiss. Η διεύθυνση προσανατολισμού είναι διαφορετική σε κάθε περιοχή και οι γειτονικές περιοχές χωρίζονται μεταξύ τους με τα τοιχώματα των περιοχών. Η συνολική μαγνήτιση του υλικού ισούται με το διανυσματικό άθροισμα των μαγνητίσεων όλων των περιοχών. Όταν το υλικό

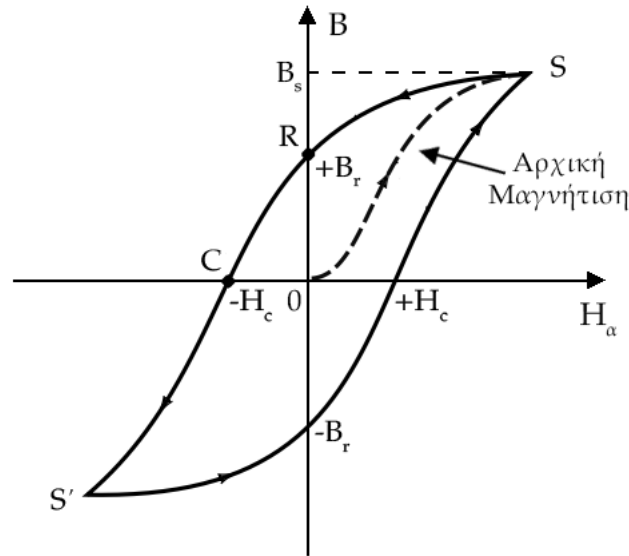
δεν είναι μαγνητισμένο (εξωτερικό μαγνητικό πεδίο $H_\alpha = 0$), οι περιοχές αυτές είναι τυχαία προσανατολισμένες και η συνολική μαγνήτιση M είναι μηδενική.

Στα σιδηριμαγνητικά υλικά, η πυκνότητα μαγνητικής ροής (ή μαγνητική επαγωγή) B δεν είναι γραμμική συνάρτηση της έντασης του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου H_α . Εάν το υλικό είναι αρχικά αμαγνήτιστο, η πυκνότητα μαγνητικής ροής μεταβάλλεται συναρτήσει του H_α , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Καθώς η ένταση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου αυξάνεται, το B αρχίζει να αυξάνεται σταδιακά. Στην αρχή αργά, έπειτα με πιο γρήγορο ρυθμό, και τελικά σταθεροποιείται και γίνεται ανεξάρτητο του H_α . Η μέγιστη αυτή τιμή του B ονομάζεται πυκνότητα μαγνητικής ροής κόρου B_s , και η αντίστοιχη μαγνήτιση ονομάζεται μαγνήτιση κόρου M_s .

Καθώς το $H_\alpha > 0$ αυξάνεται, τα μαγνητικά τοιχώματα μετακινούνται με αποτέλεσμα το σχήμα και το μέγεθος των περιοχών να αλλάζει. Συγκεκριμένα, οι περιοχές που είναι ευθυγραμμισμένες (ή σχεδόν ευθυγραμμισμένες) με την κατεύθυνση του H_α μεγαλώνουν σε βάρος των υπολοίπων. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται έως ότου δημιουργηθεί μια περιοχή η οποία θα είναι σχεδόν ευθυγραμμισμένη με το πεδίο. Το σιδηριμαγνητικό υλικό φθάνει στην κατάσταση κόρου (saturated state), όταν η περιοχή αυτή προσανατολιστεί με το εφαρμοζόμενο πεδίο H_α . Στο Σχήμα 2.1 απεικονίζεται η διαμόρφωση των μαγνητικών



Σχήμα 2.1: Μεταβολή B (ή M) συναρτήσει του H_α για σιδηριμαγνητικό υλικό το οποίο ήταν αρχικά αμαγνήτιστο. Αναπαράσταση μαγνητικών περιοχών στα διάφορα στάδια μαγνήτισης του υλικού.



Σχήμα 2.2: Τυπική μορφή βρόχου υστέρησης σιδηριμαγνητικού υλικού.

περιοχών σε διάφορα σημεία κατά μήκος της καμπύλης $B - H_{\alpha}$.

Από το σημείο κόρου (σημείο S, Σχήμα 2.2), καθώς το H_{α} αρχίζει να ελαττώνεται σταδιακά η καμπύλη δεν ακολουθεί την αρχική διαδρομή. Όταν το εφαρμοζόμενο πεδίο γίνει μηδέν (σημείο R), η πυκνότητα μαγνητικής ροής δε μηδενίζεται και το υλικό παραμένει μαγνητισμένο (φαινόμενο υστέρησης). Το υπολειπόμενο αυτό πεδίο ονομάζεται παραμένουσα πυκνότητα μαγνητικής ροής B_r και η αντίστοιχη μαγνήτιση ονομάζεται παραμένουσα μαγνήτιση M_r . Προκειμένου να μηδενιστεί η παραμένουσα πυκνότητα μαγνητικής ροής ή μαγνήτιση (σημείο C), χρειάζεται να εφαρμοστεί μαγνητικό πεδίο σε αντίθετη κατεύθυνση ($-H_c$) από το αρχικό πεδίο. Το H_c ονομάζεται συνεκτικό πεδίο (coercivity). Καθώς το μαγνητικό πεδίο εξακολουθεί να αυξάνεται αρνητικά, το υλικό θα φτάσει σε μαγνήτιση κόρου προς την αντίθετη φορά (σημείο S'). Μια δεύτερη αντιστροφή του μαγνητικού πεδίου έως το σημείο του αρχικού κορεσμού (σημείο S), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2, ολοκληρώνει το συμμετρικό βρόχο υστέρησης του σιδηριμαγνητικού υλικού.

Με βάση το συνεκτικό πεδίο, τα σιδηριμαγνητικά υλικά διακρίνονται σε μαλακά και σκληρά. Τα μαλακά σιδηριμαγνητικά υλικά έχουν χαμηλό συνεκτικό πεδίο και μπορούν να φθάσουν στην κατάσταση κόρου με την εφαρμογή ενός σχετικά ασθενούς μαγνητικού πεδίου. Αυτό συνεπάγεται ότι, μπορούν να μαγνητίζονται και να απομαγνητίζονται εύκολα. Σε αντίθεση, τα σκληρά σιδηριμαγνητικά υλικά έχουν υψηλό συνεκτικό πεδίο και χρειάζεται η εφαρμογή ισχυρού μαγνητικού πεδίου προκειμένου να μαγνητιστούν και να απομαγνητιστούν.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η μαγνητική συμπεριφορά των σιδηριμαγνητικών υλικών εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του υλικού, αυξάνονται οι θερμικές δονήσεις των ατόμων οδηγώντας σε εξουδετέρωση των δυνάμεων σύζευξης μεταξύ των γειτονικών ατομικών διπολικών ροπών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η μαγνήτιση κόρου να μειώνεται σταδιακά και σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία να μηδενίζεται απότομα.

Η θερμοκρασία αυτή ονομάζεται θερμοκρασία Curie ή κρίσιμη θερμοκρασία T_c και είναι διαφορετική για κάθε υλικό. Όταν η θερμοκρασία υπερβεί την κρίσιμη θερμοκρασία T_c , το υλικό συμπεριφέρεται σαν παραμαγνητικό.

2.3 Σιδηρομαγνητικός Συντονισμός και Τανυστής Μαγνητικής Διαπερατότητας

Η εξίσωση κίνησης της μαγνητικής ροπής \vec{m} ενός ατόμου που βρίσκεται υπό την επίδραση ομοιόμορφου στατικού μαγνητικού πεδίου μαγνητικής επαγωγής \vec{B} είναι:

$$\frac{d\vec{J}}{dt} = \vec{T} = \vec{m} \times \vec{B} = \mu_o \vec{m} \times \vec{H}_\alpha \quad (2.1)$$

όπου \vec{J} είναι η ολική στροφορμή του ατόμου, \vec{T} είναι η ροπή που ασκείται στο μαγνητικό δίπολο και \vec{H}_α είναι το εφαρμοζόμενο στατικό μαγνητικό πεδίο. Η μαγνητική ροπή και η ολική στροφορμή του ατόμου συνδέονται με τη σχέση $\vec{m} = -\gamma \vec{J}$, όπου $\gamma = \frac{gq_e}{2m_e} = 1.76 \cdot 10^7$ (rad/s)/Oe ή 2.8 MHz/Oe είναι ο γυρομαγνητικός λόγος ο οποίος συνδέει τη μάζα του ηλεκτρονίου $m_e = 9.109 \cdot 10^{-31}$ kg και το φορτίο του ηλεκτρονίου $|q_e| = 1.602 \cdot 10^{-19}$ [52], [53] με τον παράγοντα Lande g (ο οποίος για τους φερριτές είναι $\cong 2$). Συνεπώς, η (2.1) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\frac{d\vec{m}}{dt} = -\mu_o \gamma \vec{m} \times H_\alpha \quad (2.2)$$

Από την (2.2) προκύπτει ότι η μαγνητική ροπή εκτελεί ελεύθερη μεταπτωτική κίνηση (κινείται στην επιφάνεια ενός κώνου) γύρω από τον άξονα του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου με γωνιακή ταχύτητα $\omega_0 = \mu_o \gamma H_\alpha$, όπου μ_o είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού. Η γωνιακή ταχύτητα της ελεύθερης μεταπτωτικής κίνησης ονομάζεται συχνότητα μετάπτωσης ή συχνότητα Larmor [53].

Η συνολική μαγνήτιση του φερριτικού υλικού δίδεται από τη σχέση $\vec{M} = N\vec{m}$, όπου N είναι ο αριθμός των μαγνητικών διπόλων ανά μονάδα όγκου, οπότε η (2.2) γίνεται:

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\mu_o \gamma \vec{M} \times \vec{H}_\alpha \quad (2.3)$$

Σε δείγματα φερριτών πεπερασμένων διαστάσεων, το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του υλικού διαφέρει από το εξωτερικό εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο ($H_o \neq H_\alpha$) λόγω των οριακών συνθηκών στην επιφάνεια του υλικού [52]. Για λόγους απλότητας, σε αυτό το σημείο θα θεωρήσουμε ότι το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του υλικού είναι ίδιο με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο ($H_o = H_\alpha$), κάτι που ισχύει για ιδανικά (απείρων διαστάσεων) δοκίμια φερρίτη. Η επίδραση της ανισοτροπίας σχήματος αναλύεται σε επόμενη υποενότητα (§2.5.3).

Ας υποθέσουμε ότι το στατικό μαγνητικό πεδίο H_α είναι αρκετά ισχυρό ώστε το υλικό να φθάσει σε κατάσταση κόρου ($\vec{M} = \vec{M}_s$) και ότι ένα αρμονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο $|\vec{h}_{RF}| \ll H_\alpha$ (προσέγγιση μικρού σήματος) εφαρμόζεται στο πολωμένο υλικό. Το συνολικό μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του υλικού είναι:

$$\vec{H} = \vec{H}_\alpha + \vec{h}_{RF} \quad (2.4)$$

και η συνολική μαγνήτιση του υλικού δίδεται από τη σχέση:

$$\vec{M} = \vec{M}_s + \vec{M}_{RF} \quad (2.5)$$

όπου M_s είναι η DC (Direct Current) μαγνήτιση κόρου και $\vec{M}_{RF} \ll M_s$ είναι η πρόσθετη μαγνήτιση λόγω του εφαρμοζόμενου εναλλασσόμενου πεδίου. Η αλληλεπίδραση του εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου με το μαγνητικά κορεσμένο φερριτικό υλικό, θα προκαλέσει εξαναγκασμένη μετάπτωση των μαγνητικών διπόλων γύρω από τη διεύθυνση του πεδίου πόλωσης H_α με συχνότητα ίση με τη συχνότητα του εφαρμοζόμενου εναλλασσόμενου πεδίου \vec{h}_{RF} . Η μεταπτωτική αυτή κίνηση περιγράφεται ικανοποιητικά από την εξίσωση Landau-Lifschitz-Gilbert (L-L-G) [54]:

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma (\vec{M} \times \vec{H}) - \frac{\alpha\gamma}{M_s} [\vec{M} \times (\vec{M} \times \vec{H})] \quad (2.6)$$

Η εξίσωση αυτή προκύπτει εισάγοντας έναν φαινομενολογικό όρο απόσβεσης (είναι ο δεύτερος όρος του δεξιού μέλους) στην (2.3), όπου $\alpha > 0$ είναι μια αδιάστατη σταθερά απόσβεσης. Ο όρος αυτός αντιστοιχεί στις ενεργειακές απώλειες που σχετίζονται με τον εφησυχασμό (relaxation) του συστήματος, δηλαδή τη φυσική τάση του συστήματος να επιστρέψει στην κατάσταση ισορροπίας όταν έχει απομακρυνθεί από αυτή λόγω της εφαρμογής ενός εξωτερικού πεδίου. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει κάποιος μηχανισμός απόσβεσης ($\alpha \rightarrow 0$), η μελέτη της μαγνητικής συμπεριφοράς του υλικού υπό την επίδραση του εναλλασσόμενου πεδίου ανάγεται στην επίλυση της εξίσωσης (2.3).

Η μέγιστη μεταφορά ενέργειας από το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο στο φερριτικό υλικό επιτυγχάνεται όταν λαμβάνει χώρα ο φερρομαγνητικός συντονισμός (ferromagnetic resonance, FMR), δηλαδή όταν η κυκλική συχνότητα του εφαρμοζόμενου εναλλασσόμενου πεδίου \vec{h}_{RF} γίνει ίση με τη συχνότητα Larmor ($\omega = \omega_o$). Η σταθερά απόσβεσης καθορίζεται από το πλάτος του συντονισμού ΔH στο μισό της μέγιστης απορρόφησης (το οποίο ονομάζεται πλάτος σιδηρομαγνητικού συντονισμού ή πλάτος σιδηρομαγνητικής απορρόφησης) με τη βοήθεια της σχέσης:

$$\alpha = \frac{\mu_0\gamma\Delta H}{2\omega_{meas}} \quad (2.7)$$

όπου ω_{meas} είναι η συχνότητα στην οποία έχει προσδιοριστεί πειραματικά το ΔH . Το πλάτος σιδηρομαγνητικής απορρόφησης είναι ανεξάρτητο από τις μεταβολές της έντασης του εφαρμοζόμενου πεδίου και αντιπροσωπεύει τις απώλειες που παρατηρούνται στο σιδηρομαγνητικό συντονισμό. Οι απώλειες αυτές σχετίζονται με τη μεταφορά ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας από το μαγνητικό υποσύστημα σε άλλα υποσυστήματα, όπως είναι το πλέγμα και τα μαγνητικά ιόντα που βρίσκονται στη μαγνητική δομή.

Η ανισοτροπική συμπεριφορά που παρουσιάζουν οι φερρίτες υπό την επίδραση ενός στατικού μαγνητικού πεδίου περιγράφεται από έναν τανυστή μαγνητικής διαπερατότητας $\bar{\mu}$, τα στοιχεία του οποίου εξαρτώνται από τη συχνότητα. Η γενική μορφή του είναι:

$$\bar{\mu} = \begin{pmatrix} \mu_{xx}(\omega) & \mu_{xy}(\omega) & \mu_{xz}(\omega) \\ \mu_{yx}(\omega) & \mu_{yy}(\omega) & \mu_{yz}(\omega) \\ \mu_{zx}(\omega) & \mu_{zy}(\omega) & \mu_{zz}(\omega) \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

Πρόκειται για έναν μη-συμμετρικό τανυστή δεύτερης τάξης, ο οποίος μπορεί να καθοριστεί επιλύοντας την εξίσωση (2.6) ή την (2.3) όταν $\alpha \rightarrow 0$. Τα στοιχεία του τανυστή δεν είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους αλλά ικανοποιούν τη σχέση Onsager-Casimir $\bar{\mu}(H_\alpha) = \bar{\mu}^T(-H_\alpha)$ [55]. Μεταβάλλοντας την ένταση του πεδίου πόλωσης τα στοιχεία του τανυστή διαφοροποιούνται, ενώ ανάλογα με τη διεύθυνση του πεδίου πόλωσης κάποια μη-διαγώνια στοιχεία μηδενίζονται. Για παράδειγμα, αν το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται κατά τη διεύθυνση του άξονα z τότε ο τανυστής $\bar{\mu}$ παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$\bar{\mu} = \begin{pmatrix} \mu_{xx}(\omega) & \mu_{xy}(\omega) & 0 \\ \mu_{yx}(\omega) & \mu_{yy}(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Οι αναλυτικές εκφράσεις για τα στοιχεία του τανυστή διαπερατότητας όταν το φερριτικό υλικό είναι κορεσμένο παρατίθενται στην υποενότητα §2.5.3.

2.4 Επιλογή Φερριτικού Υλικού

Έπειτα από εκτενή βιβλιογραφική αναζήτηση, διαπιστώθηκε ότι η πιο κατάλληλη κατηγορία φερριτών για το σκοπό της παρούσας Διατριβής είναι οι γρανάτες. Σε σύγκριση με τους εξαφερρίτες και τους φερρίτες με δομή σπινέλιου, οι γρανάτες έχουν το μικρότερο πλάτος σιδηρομαγνητικού συντονισμού ΔH (άρα εμφανίζουν τις χαμηλότερες ενεργειακές απώλειες) και σχετικά χαμηλή τιμή μαγνήτισης κόρου $4\pi M_s$, γεγονός που συνεπάγεται ότι μπορούν να φθάσουν στη μαγνήτιση κόρου με την εφαρμογή ενός σχετικά ασθενούς μαγνητικού πεδίου. Η τυπική τιμή του πλάτους σιδηρομαγνητικού συντονισμού για τους γρανάτες είναι περίπου 100 Oe, ενώ για τους εξαγωνικούς φερρίτες και τους φερρίτες με δομή σπινέλιου το ΔH

Πίνακας 2.2: Διηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες εμπορικά διαθέσιμων φερριτών.

Είδος Φερρίτη	Εμπορική Ονομασία	Χημική Σύνθεση	Μαγνητικές Ιδιότητες			Διηλεκτρικές Ιδιότητες	
			$4\pi M_s$ (G)	ΔH (Oe)	g	ϵ_r	$\tan\delta_e$
Γρανάτης	Y101 ^[*]	Καθαρό YIG	1820	18	2.02	15	$2 \cdot 10^{-4}$
Γρανάτης	Y14 ^[*]	Y-Gd	1100	95	2.02	15.4	$2 \cdot 10^{-4}$
Γρανάτης	G350 ^[**]	Y-Al-Gd	350	≤ 45	2.01	14	$\leq 2 \cdot 10^{-4}$
Σπινέλιος	N32 ^[*]	Ni	3200	200	2.3	13.7	$5 \cdot 10^{-4}$
Σπινέλιος	TT1-2500 ^[**]	Mg	2500	≤ 624	2.03	12.9	$5 \cdot 10^{-4}$

* Temex [56]

** Skyworks [57]

Y-Gd: yttrium-gadolinium, Y-Al-Gd:yttrium-aluminum-gadolinium, Ni: nickel, Mg: magnesium.

κυμαίνεται από 100 έως 500 Oe. Οι μικρότερες τιμές πλάτους σιδηρομαγνητικού συντονισμού συναντώνται μόνο σε υψηλής καθαρότητας μονοκρυσταλλούς (single-crystal) φερρίτες, ωστόσο το κόστος παρασκευής τους είναι πολύ υψηλό. Επιπλέον, στα πλεονεκτήματά τους συγκαταλέγεται ότι έχουν χαμηλό συνεκτικό πεδίο και συνεπώς μπορούν να μαγνητίζονται και να απομαγνητίζονται εύκολα. Στον Πίνακα 2.2 παρατίθενται οι διηλεκτρικές και οι μαγνητικές ιδιότητες εμπορικά διαθέσιμων φερριτών [56], [57].

Ο πιο δημοφιλής φερρίτης με δομή γρανάτη σε μικροκυματικές εφαρμογές είναι ο γρανάτης υτρίου-σιδήρου $Y_3Fe_5O_{12}$ (yttrium iron garnet, YIG) [49], [58]. Το συγκεκριμένο μαγνητο-διηλεκτρικό υλικό επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί στις προτεινόμενες κεραίες της Διατριβής διότι έχει χαμηλό συνεκτικό πεδίο, χαμηλό πεδίο μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας, σχετικά χαμηλές απώλειες, διατηρεί τις μαγνητικές του ιδιότητες σε θερμοκρασία δωματίου ($T = 300$ K) και απομαγνητίζεται όταν το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο γίνει μηδέν.

2.5 Μοντελοποίηση Μαγνητικής Διαπερατότητας Φερριτών

Το μαγνητικό πεδίο πόλωσης επιτρέπει τη μετάβαση του φερριτικού υλικού μεταξύ δύο καταστάσεων μαγνήτισης: την αμαγνήτιστη κατάσταση ($H_a = 0$) και τη μαγνητισμένη κατάσταση ($H_a \neq 0$). Ανάλογα με την ένταση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου, οι πολωμένοι φερρίτες διακρίνονται σε μερικώς μαγνητισμένους και σε κορεσμένους. Το φερριτικό υλικό θεωρείται κορεσμένο όταν ισχύει $H_o > N \cdot 4\pi M_s$, όπου N είναι ο παράγοντας απομαγνήτισης κατά τη διεύθυνση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Στη μερικώς μαγνητισμένη κατάσταση, εφαρμόζονται ασθενέστερα μαγνητικά πεδία.

Η ακριβής μοντελοποίηση των ανισοτροπικών μαγνητο-διηλεκτρικών υλικών, όπως είναι οι φερρίτες, είναι μία απαιτητική διαδικασία στην οποία υπεισέρχονται πολλές και διαφορετικές παράμετροι. Η βασική παράμετρος που περιγράφει τη συμπεριφορά τέτοιου είδους υλικών, είτε χωρίς την επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου είτε με την εφαρμογή αυτού, είναι η

μαγνητική διαπερατότητα.

2.5.1 Αμαγνήτιστη Κατάσταση

Για τη μαθηματική μοντελοποίηση της μαγνητικής διαπερατότητας των φερριτών στην αμαγνήτιστη κατάσταση, η οποία είναι βαθμωτό μέγεθος, χρησιμοποιείται ευρέως από τους μηχανικούς κεραιών ο τύπος του Schloemann [59]:

$$\mu_{dem} = \frac{2}{3} \left[1 - \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^2 \right]^{1/2} + \frac{1}{3} \quad (2.10)$$

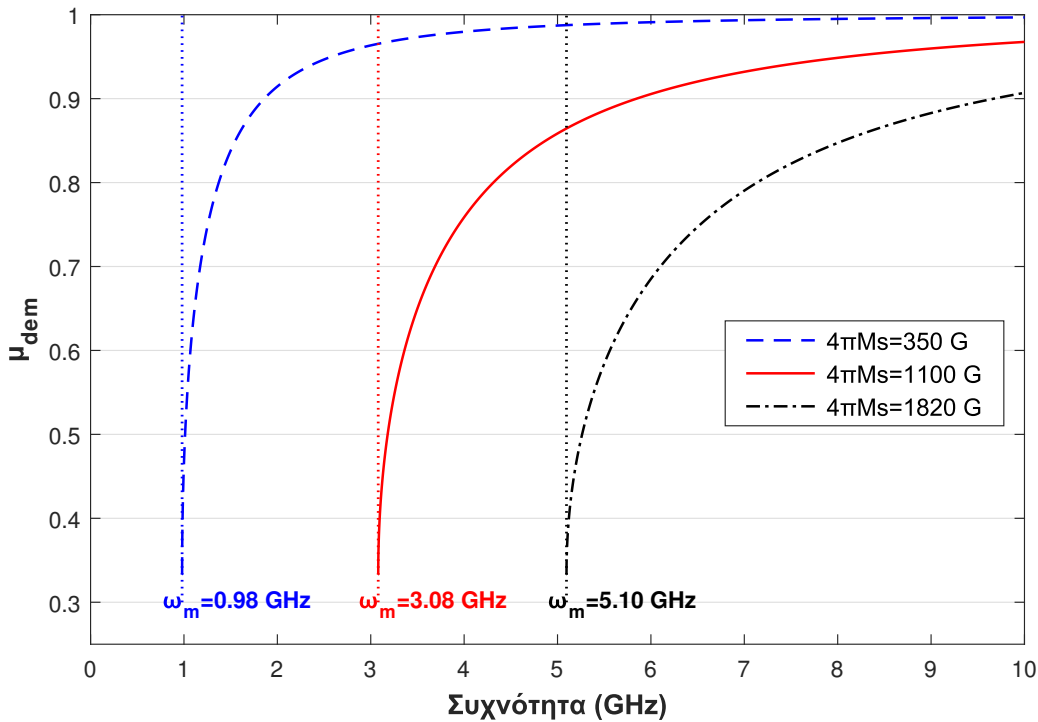
όπου ω είναι η συχνότητα λειτουργίας και $\omega_m = \gamma \cdot (4\pi M_s)$ είναι η γυροτροπική συχνότητα εκφρασμένες σε rad/s (SI μονάδες). Για την εξαγωγή της παραπάνω σχέσης, ο Schloemann θεώρησε ότι οι πολυκρυσταλλικοί φερριτές αποτελούνται από μαγνητικές περιοχές οι οποίες είναι προσανατολισμένες σε δύο συγκεκριμένες κατευθύνσεις (πάνω και κάτω).

Η εξίσωση (2.10) περιγράφει με ακρίβεια τη συμπεριφορά των μη πολωμένων φερριτών μόνο για συχνότητες μεγαλύτερες από τη γυροτροπική συχνότητα ($\omega \geq \omega_m$), όπου η τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας είναι πραγματικός αριθμός. Για $\omega = \omega_m$, η τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας είναι ίση με $1/3$, ενώ όταν $\omega \gg \omega_m$ τείνει στη μονάδα. Το Σχήμα 2.3 απεικονίζει τη μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας συναρτήσει της συχνότητας για γρανάτες που έχουν διαφορετική μαγνήτιση κόρου $4\pi M_s$. Όπως φαίνεται, η ελάχιστη αποδεκτή συχνότητα λειτουργίας μιας κεραιάς που θα ενσωματώσει στη δομή της τον εμπορικά διαθέσιμο γρανάτη Y101 (Πίνακας 2.2) είναι $f_m = 1/2\pi(\gamma \cdot 4\pi M_s) = 5.10$ GHz, ενώ στην περίπτωση χρήσης του γρανάτη G350 είναι $f_m = 0.98$ GHz.

Για συχνότητες κάτω από τη γυροτροπική συχνότητα ($\omega < \omega_m$), το φερριτικό υλικό εισέρχεται στην περιοχή Polder-Smit (low-field region) όπου οι απώλειες του υλικού είναι πολύ μεγάλες. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε σημαντική μείωση της απόδοσης της κεραιάς καθιστώντας την ταυτόχρονα μη λειτουργική. Σε αυτή την περιοχή συχνοτήτων, δεν υπάρχει κάποια προσεγγιστική έκφραση για τη μαγνητική διαπερατότητα των μη πολωμένων μαγνητοδιηλεκτρικών υλικών. Επιπρόσθετα, το φανταστικό μέρος που προκύπτει από τον τύπο του Schloemann δεν αντιπροσωπεύει τις απώλειες που παρουσιάζει το υλικό στην περιοχή Polder-Smit.

2.5.2 Μερικώς Μαγνητισμένη Κατάσταση

Λόγω της αυθαίρετης διαμόρφωσης των μαγνητικών περιοχών του υλικού στη μερικώς μαγνητισμένη κατάσταση, είναι πιο περίπλοκο να εκτιμηθεί το μαγνητικό πεδίο σε κάθε περιοχή και να μοντελοποιηθούν οι δυναμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους. Διάφορα θεωρητικά μοντέλα έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για τον ταυστή μαγνητική διαπερατότητας $\bar{\mu}$ στη μερικώς μαγνητισμένη κατάσταση, η μαθηματική περιγραφή του οποίου είναι διαφορετική



Σχήμα 2.3: Μαγνητική διαπερατότητα μ_{dem} συναρτήσει της συχνότητας για γρανάτες με διαφορετική μαγνήτιση κόρου.

σε σχέση με την αντίστοιχη του ταυυστή στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση. Τα αρχικά μοντέλα αναπτύχθηκαν από τους Rado [60], Green & Sandy [61] και Igarashi & Naito [62], [63]. Πρόκειται για εμπειρικά μοντέλα τα οποία παρέχουν εκφράσεις για τα στοιχεία του ταυυστή $\bar{\mu}$ βάσει πειραματικών αποτελεσμάτων. Το πρώτο μοντέλο πρόβλεψης για την περιγραφή του ταυυστή μαγνητικής διαπερατότητας στη μερικώς μαγνητισμένη κατάσταση προτάθηκε από τους Gelin & Berthou [64]. Η εγκυρότητα του μοντέλου αυτού είναι περιορισμένη διότι οι μηχανισμοί που ευθύνονται για τις υψηλές απώλειες στην περιοχή Polder-Smit δεν περιγράφονται σωστά και επιπλέον δε λαμβάνεται υπόψιν το φαινόμενο της υστέρησης. Σε επόμενη εργασία, οι Gelin et al. [65] παρουσίασαν μια βελτιωμένη έκδοση του προηγούμενου μοντέλου για την αμαγνητιστη κατάσταση. Προκειμένου να ξεπεραστούν οι περιορισμοί των δύο προηγούμενων θεωρητικών μοντέλων, οι Gelin & Queffelec [66] πρότειναν το μοντέλο γενικευμένης διαπερατότητας (generalized permeability tensor, GPT). Το μοντέλο αυτό είναι το μοναδικό που παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού των στοιχείων του ταυυστή της μαγνητικής διαπερατότητας σε οποιαδήποτε κατάσταση μαγνήτισης (αμαγνήτιστη, μερικώς μαγνητισμένη ή πλήρως μαγνητισμένη) με τη χρήση ενός μόνο τύπου, ενώ ταυτόχρονα περιγράφει με ακρίβεια τους μηχανισμούς απωλειών στην περιοχή Polder-Smit.

Η πλειοψηφία των εμπορικών υπολογιστικών πακέτων ηλεκτρομαγνητικής προσομοίωσης υποστηρίζει από προεπιλογή την προσομοίωση των ανισοτροπικών μαγνητο-διηλεκτρικών

υλικών μόνο στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση, όπου οι μαγνητικές ιδιότητες τους περιγράφονται από το γυροτροπικό μοντέλο διασποράς. Ωστόσο, μερικά από αυτά (όπως για παράδειγμα το υπολογιστικό πακέτο Computer Simulation Technology (CST)) επιτρέπουν στο χρήστη να ορίζει χειροκίνητα (manually) τον πλήρη τανυστή ανισοτροπικών υλικών. Με αυτό τον τρόπο, εισάγοντας στο υπολογιστικό πακέτο τον τανυστή $\bar{\mu}$ που υπολογίζεται από το μοντέλο GPT είναι εφικτή η προσομοίωση μικροκυματικών διατάξεων που χρησιμοποιούν φερριτές ακόμη και στη μερικώς μαγνητισμένη κατάσταση [67–69].

2.5.3 Πλήρως Μαγνητισμένη Κατάσταση

Ο τανυστής μαγνητικής διαπερατότητας των φερριτών στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση μπορεί να υπολογιστεί επιλύοντας την εξίσωση (2.6). Ας υποθέσουμε ότι το στατικό μαγνητικό πεδίο H_α εφαρμόζεται κατά τη διεύθυνση του άξονα z . Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (2.4) και (2.5) στην εξίσωση (2.6) και γραμμικοποιώντας την, καταλήγουμε στην ακόλουθη γραμμική σχέση μεταξύ της μαγνήτισης και της έντασης του μαγνητικού πεδίου:

$$\vec{M} = \bar{\chi} \vec{H} = \begin{pmatrix} \chi_{xx} & \chi_{xy} & 0 \\ \chi_{yx} & \chi_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

όπου $\bar{\chi}$ είναι ο τανυστής μαγνητικής επιδεκτικότητας.

Με χρήση της σχέσης $B = \mu_o(\vec{M} + \vec{H}) = \bar{\mu} \vec{H}$, προκύπτει ότι [52], [70, 71]:

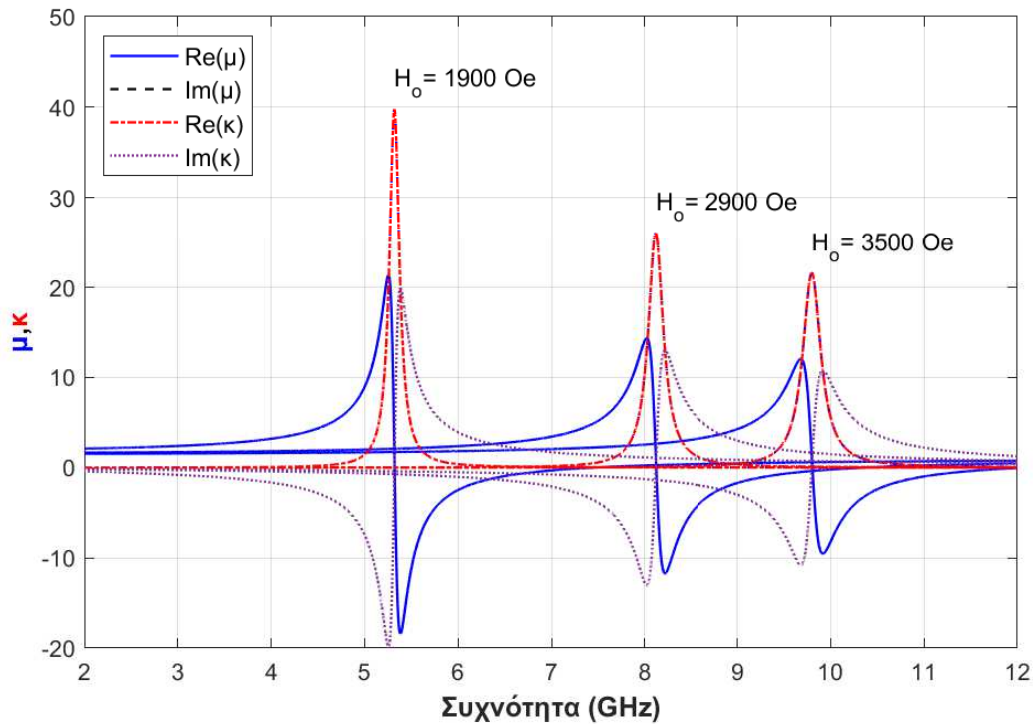
$$\bar{\mu} = \mu_o(\bar{I} + \bar{\chi}) = \mu_o \begin{pmatrix} 1 + \chi_{xx} & \chi_{xy} & 0 \\ \chi_{yx} & 1 + \chi_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \mu_o \begin{pmatrix} \mu & j\kappa & 0 \\ -j\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

όπου \bar{I} είναι ο μοναδιαίος πίνακας. Ο τανυστής μαγνητικής διαπερατότητας όπως περιγράφεται από τη σχέση (2.12) ισχύει μόνο για φερριτικά υλικά τα οποία βρίσκονται στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση (ή αλλιώς γυροτροπικά υλικά) και είναι γνωστός ως τανυστής Polder. Τα στοιχεία του τανυστή είναι μιγαδικοί αριθμοί, και οι παράμετροι μ και κ δίδονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

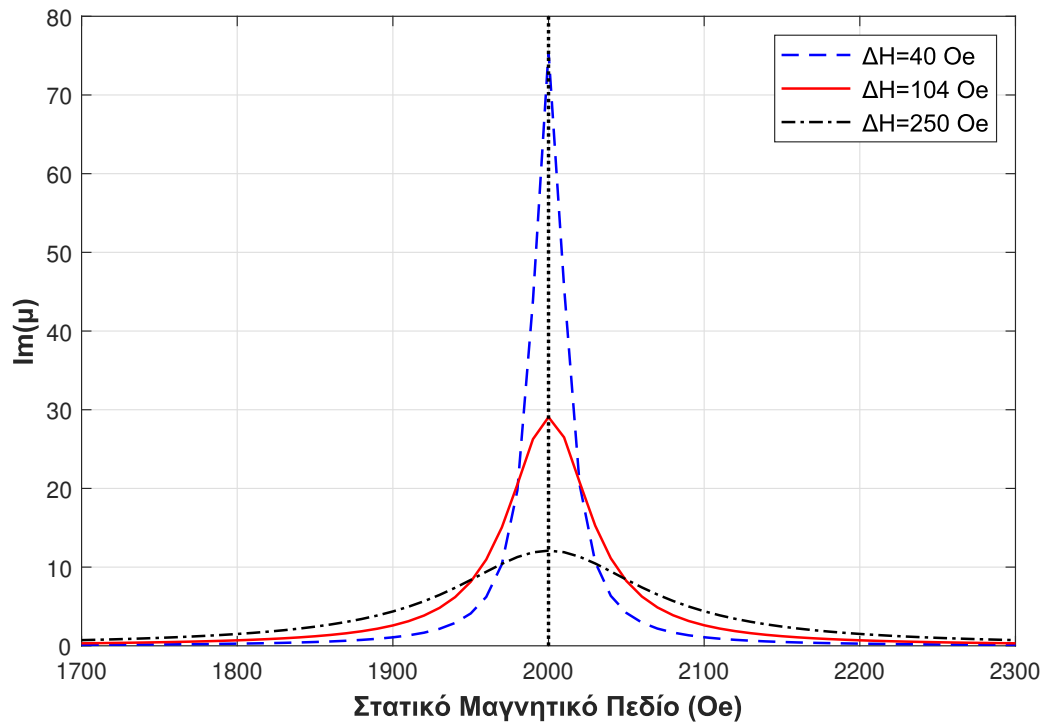
$$\mu = \mu' - j\mu'' = 1 + \frac{(\omega_o + j\omega\alpha) \cdot \omega_m}{(\omega_o + j\omega\alpha)^2 - \omega^2} \quad (2.13)$$

$$\kappa = \kappa' - j\kappa'' = \frac{\omega\omega_m}{(\omega_o + j\omega\alpha)^2 - \omega^2} \quad (2.14)$$

Η συχνοτική διασπορά των μ και κ για διάφορες τιμές μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό ενός φερριτικού δείγματος με $4\pi M_s = 1820$ G και $\Delta H = 18$ Oe απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4. Ανάλογα με την ένταση του H_o , ο σιδηρομαγνητικός συντονισμός (FMR) μετατοπίζεται



Σχήμα 2.4: Πραγματικό και φανταστικό μέρος των μ και κ για διάφορες τιμές μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό φερριτικού δείγματος με μαγνήτιση κόρου $4\pi M_s = 1820$ G και πλάτος σιδηρομαγνητικού συντονισμού $\Delta H = 18$ Oe.



Σχήμα 2.5: Φανταστικό μέρος του μ για διάφορες τιμές ΔH .

σε χαμηλότερες ή υψηλότερες συχνότητες. Οι μαγνητικές απώλειες του υλικού στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση, οι οποίες εκφράζονται μέσω της παραμέτρου ΔH , διαφέρουν από τις αντίστοιχες απώλειες του υλικού στην αμαγνήτιστη και στη μερικώς μαγνητισμένη κατάσταση. Οι μέγιστες απώλειες εμφανίζονται κοντά στο σιδηρομαγνητικό συντονισμό ($\omega = \omega_o$) [72]. Για μονοκρυσταλλικούς φερριτές η καμπύλη σιδηρομαγνητικής απορρόφησης είναι πολύ στενή (μικρές τιμές ΔH), ενώ για πολυκρυσταλλικούς φερριτές παρατηρείται μια διαπλάτυνση του εύρους της γραμμής συντονισμού (πολύ μεγαλύτερες τιμές ΔH), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5, λόγω της συνεισφοράς παραγόντων όπως είναι το πορώδες και η ανισοτροπία [73, 74].

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για ιδανικά (απείρων διαστάσεων) φερριτικά δείγματα ισχύει $H_\alpha = H_o$. Στην περίπτωση που το δείγμα έχει πεπερασμένες διαστάσεις, λόγω των οριακών συνθηκών στην επιφάνεια του υλικού, στο εσωτερικό του δημιουργείται ένα πεδίο απομαγνήτισης $H_d = N \cdot (4\pi M_s)$, το οποίο αντιτίθεται στο εφαρμοζόμενο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο H_α και επομένως ισχύει $H_o \neq H_\alpha$. Το πεδίο στο εσωτερικό του υλικού δίδεται από τη σχέση:

$$H_o = H_\alpha - H_d = H_\alpha - N \cdot (4\pi M_s) \quad (2.15)$$

Οι συντελεστές απομαγνήτισης $N = N_x, N_y, N_z$, εξαρτώνται από το σχήμα του φερριτικού δείγματος και την κατεύθυνση του H_α , και πρέπει πάντοτε να ικανοποιούν τη συνθήκη $N_x + N_y + N_z = 1$. Για δείγματα με απλό σχήμα (για παράδειγμα σφαίρα, λεπτή ράβδος, λεπτή πλάκα) οι συντελεστές απομαγνήτισης μπορούν να προσδιοριστούν εύκολα, ενώ για δείγματα αυθαίρετου σχήματος ο υπολογισμός τους είναι πιο πολύπλοκος. Λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της ανισοτροπίας σχήματος, η συχνότητα γυρομαγνητικού συντονισμού (ω_r) ενός φερριτικού δείγματος πεπερασμένων διαστάσεων διαφοροποιείται από τη συχνότητα Larmor ω_o και δίνεται από την εξίσωση του Kittel [53]:

$$\omega_r = \sqrt{(\gamma \cdot H_o + N_x \cdot \omega_m) \cdot (\gamma \cdot H_o + N_y \cdot \omega_m)} \quad (2.16)$$

Εφόσον ισχύει $\omega_o = \gamma H_o = \gamma(H_\alpha - N_z 4\pi M_s)$ και $\omega_m = \gamma \cdot (4\pi M_s)$, η εξίσωση (2.16) μπορεί να γραφεί με όρους του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου H_α και της μαγνήτισης κόρου $4\pi M_s$ ως εξής:

$$\omega_r = \sqrt{(\gamma \cdot H_\alpha + (N_x - N_z) \cdot \omega_m) \cdot (\gamma \cdot H_\alpha + (N_y - N_z) \cdot \omega_m)} \quad (2.17)$$

Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζεται η επίδραση του σχήματος στη συχνότητα γυρομαγνητικού συντονισμού $f_r = \omega_r/2\pi$ ενός πολωμένου ως προς τον άξονα z φερριτικού δείγματος YIG. Μόνο στην ειδική περίπτωση που το δείγμα έχει σφαιρικό σχήμα, η ω_r είναι ίση με τη ω_o (συχνότητα Larmor φερριτικού δείγματος απείρων διαστάσεων). Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις παρατηρείται μετατόπιση της ω_r , και συνεπώς τα στοιχεία του ταυιστή μαγνητικής διαπερατότητας τα οποία δίδονται από τις εξισώσεις (2.13) και (2.14) πρέπει

Πίνακας 2.3: Συχνότητα γυρομαγνητικού συντονισμού φερριτικού δείγματος YIG με μαγνήτιση κόρου $4\pi M_s = 1820$ G όταν το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο ισούται με $H_\alpha = 2600$ Oe.

Σχήμα Φερριτικού Δείγματος	f_r (GHz)
Δοκίμιο απείρων διαστάσεων	7.30
Λεπτή πλάκα ($N_x = N_z = 0, N_y = 1$)	9.50
Λεπτή ράβδος ($N_x = N_y = 1/2, N_z = 0$)	9.80
Κύλινδρος διαμέτρου 9.5 mm ($N_x = N_y = 0.15, N_z = 0.7$)	4.47
Σφαίρα ($N_x = N_y = N_z = 1/3$)	7.30

να υπολογιστούν ξανά λαμβάνοντας υπόψη τους συντελεστές απομαγνήτισης. Θέτοντας $H_\alpha = H_o + N \cdot (4\pi M_s)$ και $h_{RF} = h_{RF_{internal}} + N \cdot M_{RF}$, ο τροποποιημένος τανυστής μαγνητικής διαπερατότητας προκύπτει επιλύοντας την εξίσωση L-L-G (2.6).

Συμπερασματικά, τα στοιχεία του τανυστή μαγνητικής διαπερατότητας $\bar{\mu}$ στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση εξαρτώνται από την ένταση και την κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου εξωτερικού μαγνητικού πεδίου H_α , το γεωμετρικό σχήμα του δείγματος και τις μαγνητικές ιδιότητες του υλικού ($4\pi M_s, \Delta H$).

Κεφάλαιο 3

Θέματα Μοντελοποίησης, Προσομοίωσης και Μετρήσεων Αναδιαρθρώσιμων Κεραιών με Μαγνητο-Διηλεκτρικά Υλικά

Σε αυτό το Κεφάλαιο, αρχικά παρουσιάζονται τα θεμελιώδη μεγέθη που σχετίζονται με τις κεραιές αναφέροντας τους ορισμούς και την ορολογία που θα χρησιμοποιηθούν στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής. Στη συνέχεια, περιγράφονται αναλυτικά τα στάδια που απαιτούνται για τη σχεδίαση, τη μοντελοποίηση και την προσομοίωση αναδιαρθρώσιμων κεραιών με μαγνητο-διηλεκτρικά υλικά έτσι ώστε να βελτιωθεί η ακρίβεια των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Τέλος, αναλύεται η διαδικασία μετρήσεων που ακολουθείται προκειμένου να ελεγχθεί πειραματικά η δυνατότητα αναδιαρθρωσιμότητας των προτεινόμενων κεραιών και να επιβεβαιωθεί η αξιοπιστία της προτεινόμενης μεθοδολογίας μοντελοποίησης και προσομοίωσης των κεραιών.

3.1 Παράμετροι Κεραιών: Ορισμοί, Ορολογία

Σύμφωνα με το πρότυπο του Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) περί των ορισμών και των όρων για τις κεραιές (IEEE Std. 145–1983), η κεραία ορίζεται ως “ένα μέσο εκπομπής ή λήψης ραδιοκυμάτων” [75]. Με άλλα λόγια, η κεραία αποτελεί τη μεταβατική διάταξη ανάμεσα στον ελεύθερο χώρο και μία διάταξη κυματοδότησης. Η διάταξη κυματοδότησης ή η γραμμή μεταφοράς, η οποία μπορεί να είναι μια ομοαξονική γραμμή ή ένας κυματοδηγός, χρησιμοποιείται για τη μεταφορά ηλεκτρομαγνητικής (H/M) ενέργειας από την πηγή εκπομπής στην κεραία, ή από την κεραία στο δέκτη. Στην πρώτη περίπτωση η κεραία

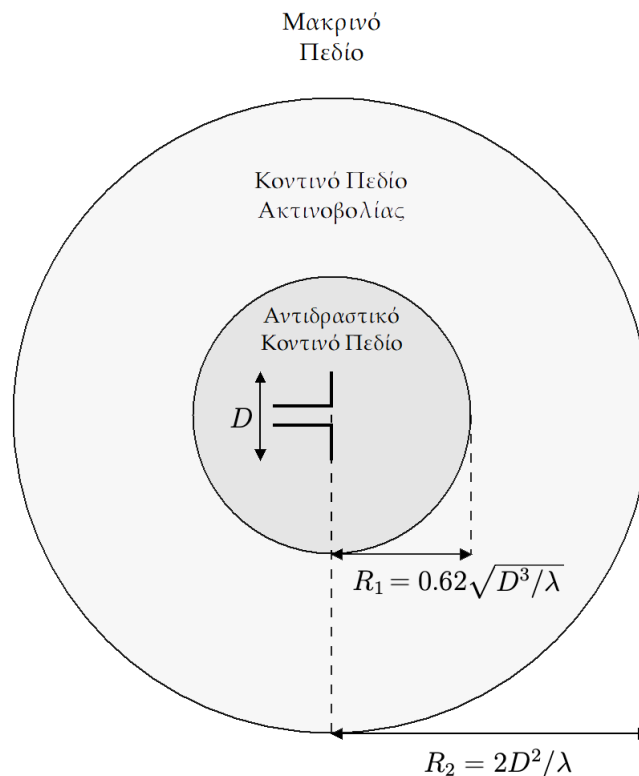
λειτουργεί ως κεραία εκπομπής, ενώ στη δεύτερη περίπτωση ως κεραία λήψης.

Για την περιγραφή της λειτουργίας μιας κεραίας είναι απαραίτητο να οριστούν διάφορες παράμετροι. Στην περίπτωση των αναδιαρθρώσιμων κεραίων με μαγνητο-διηλεκτρικά υλικά παρουσιάζουν ενδιαφέρον οι παράμετροι που σχετίζονται με το συντονισμό, την πόλωση και την απόδοση ακτινοβολίας της κεραίας. Στην παρούσα ενότητα παρατίθενται οι ορισμοί και η ορολογία των βασικών παραμέτρων των κεραίων, όπως το μακρινό πεδίο, το διάγραμμα ακτινοβολίας, το κέρδος, η πόλωση, η αντίσταση εισόδου και το εύρος ζώνης, που χρησιμοποιούνται στην παρούσα Διατριβή.

3.1.1 Περιοχές Κοντινού και Μακρινού Πεδίου

Ο χώρος που περιβάλλει μια κεραία χωρίζεται σε τρεις περιοχές [76]: (α) την περιοχή αντιδραστικού κοντινού πεδίου (reactive near-field), (β) την περιοχή κοντινού πεδίου ακτινοβολίας (radiating near-field) ή περιοχή Fresnel και (γ) την περιοχή μακρινού πεδίου (far-field region) ή περιοχή Fraunhofer, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1.

Η περιοχή αντιδραστικού κοντινού πεδίου ορίζεται ως το τμήμα της περιοχής του κοντινού πεδίου που περιβάλλει άμεσα την κεραία και όπου υπερισχύει το αντιδραστικό πεδίο. Για τις περισσότερες κεραίες, το εξωτερικό όριο αυτής της περιοχής συνήθως θεωρείται σε απόσταση $R < R_1 = 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$ από την επιφάνεια της κεραίας, όπου λ είναι το μήκος κύματος και D είναι η μεγαλύτερη διάσταση της κεραίας. Η περιοχή κοντινού πεδίου ακτινοβολίας ορίζεται



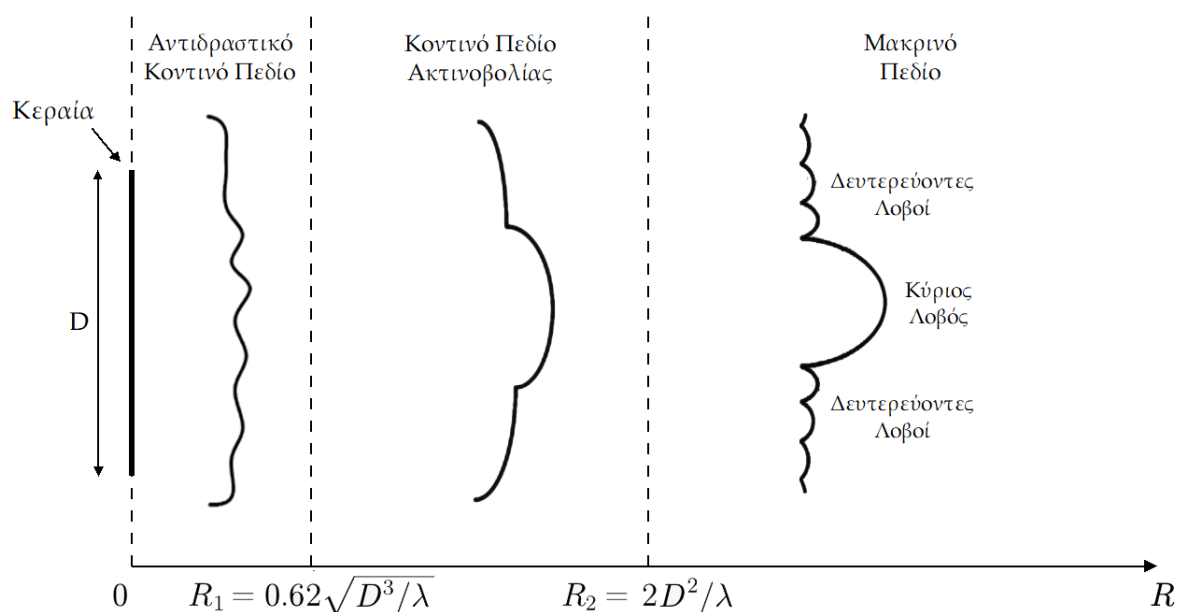
Σχήμα 3.1: Περιοχές πεδίου μιας κεραίας.

ως η περιοχή του πεδίου μιας κεραίας μεταξύ της περιοχής αντιδραστικού κοντινού πεδίου και της περιοχής μακρινού πεδίου, όπου υπερισχύουν τα πεδία ακτινοβολίας και όπου η γωνιακή κατανομή του πεδίου εξαρτάται από την απόσταση από την κεραία. Το εσωτερικό όριο της περιοχής αυτής είναι σε απόσταση $R \geq R_1 = 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$ και το εξωτερικό όριο σε απόσταση ίση με $R < R_2 = 2D^2/\lambda$ από την κεραία υπό την προϋπόθεση ότι ισχύει $D > \lambda$. Τέλος, η περιοχή μακρινού πεδίου ορίζεται ως η περιοχή του πεδίου μιας κεραίας όπου η γωνιακή κατανομή του πεδίου είναι ανεξάρτητη της απόστασης από την κεραία. Το εσωτερικό όριο θεωρείται ότι είναι σε ακτινική απόσταση $R = R_2 = 2D^2/\lambda$ και το εξωτερικό εκτείνεται στο άπειρο.

Στο Σχήμα 3.2 απεικονίζονται οι αλλαγές στην κατανομή του πεδίου καθώς μεταβάλλεται η απόσταση παρατήρησης από την περιοχή κοντινού πεδίου έως την περιοχή μακρινού πεδίου. Στην περιοχή αντιδραστικού κοντινού πεδίου το διάγραμμα είναι σχεδόν ομοιόμορφο και παρουσιάζει μικρές διακυμάνσεις. Στην περιοχή κοντινού πεδίου ακτινοβολίας αρχίζουν να εμφανίζονται οι λοβοί ακτινοβολίας, ενώ στην περιοχή μακρινού πεδίου, το διάγραμμα είναι πλέον καλά διαμορφωμένο, και συνήθως αποτελείται από μερικούς δευτερεύοντες λοβούς και από έναν, ή περισσότερους, κύριους λοβούς.

3.1.2 Διάγραμμα Ακτινοβολίας

Το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας κεραίας είναι η γραφική αναπαράσταση των ιδιοτήτων ακτινοβολίας της κεραίας συναρτήσει των χωρικών συντεταγμένων. Στις περισσότερες περιπτώσεις, καθορίζεται στην περιοχή μακρινού πεδίου και απεικονίζεται ως συνάρτηση των



Σχήμα 3.2: Τυπικές αλλαγές στην κατανομή του πεδίου από την περιοχή κοντινού πεδίου μέχρι την περιοχή μακρινού πεδίου.

συντεταγμένων κατεύθυνσης (γωνία ανύψωσης θ και γωνία αζιμούθιου ϕ , όπου $0 \leq \theta \leq \pi$ και $0 \leq \phi \leq 2\pi$). Στις ιδιότητες ακτινοβολίας περιλαμβάνονται η ένταση του πεδίου, η πυκνότητα ροής ισχύος, η ένταση ακτινοβολίας, η κατευθυντικότητα και η πόλωση. Το διάγραμμα το οποίο απεικονίζει το μέτρο της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (σε γραμμικές μονάδες) ως συνάρτηση των γωνιακών συντεταγμένων θ και ϕ ονομάζεται διάγραμμα πεδίου, ενώ η γραφική παράσταση του τετραγώνου του μέτρου του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει των γωνιακών συντεταγμένων αναφέρεται ως διάγραμμα ισχύος. Συχνά, τα διαγράμματα πεδίου ή ισχύος κανονικοποιούνται ως προς τη μέγιστη τιμή τους. Το διάγραμμα ισχύος συνήθως απεικονίζεται σε λογαριθμική κλίμακα (σε decibel, dB), για καλύτερη ευκρίνεια των τμημάτων του διαγράμματος που παρουσιάζουν πολύ χαμηλές τιμές.

Το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας κεραίας απεικονίζεται σε ένα τριδιάστατο γράφημα. Ωστόσο, στην πράξη καταγράφονται και παρουσιάζονται τομές του τριδιάστατου διαγράμματος στο επίπεδο xz (διδιάστατο διάγραμμα συναρτήσει της γωνίας θ για $\phi = 0^\circ$) και στο επίπεδο xy (αντίστοιχο διάγραμμα συναρτήσει της γωνίας ϕ για $\theta = 90^\circ$), καθώς παρέχουν τις περισσότερες από τις χρήσιμες και απαραίτητες πληροφορίες για την περιγραφή του τρόπου ακτινοβολίας μιας κεραίας.

Τα τμήματα του διαγράμματος ακτινοβολίας που οριοθετούνται από περιοχές σχετικά ασθενούς ή μηδενικής έντασης ακτινοβολίας ονομάζονται λοβοί ακτινοβολίας. Ταξινομούνται σε κύριους (major), δευτερεύοντες (minor), πλευρικούς (side) και οπίσθιους (back) λοβούς. Ο κύριος λοβός ορίζεται ως ο λοβός ακτινοβολίας που περιέχει την κατεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας της κεραίας. Οποιοσδήποτε άλλος λοβός χαρακτηρίζεται ως δευτερεύων λοβός. Ο λοβός ακτινοβολίας σε οποιαδήποτε άλλη κατεύθυνση εκτός από την επιθυμητή ονομάζεται πλευρικός λοβός, ενώ ο λοβός ακτινοβολίας του οποίου ο άξονας σχηματίζει γωνία 180° σε σχέση με τον κύριο λοβό της κεραίας χαρακτηρίζεται ως οπίσθιος λοβός. Ο αριθμός των λοβών του διαγράμματος ακτινοβολίας σχετίζεται με το είδος της κεραίας. Το Σχήμα 3.3α δείχνει ένα τριδιάστατο διάγραμμα πεδίου μιας κατευθυντικής κεραίας αποτελούμενο από έναν κύριο λοβό και μερικούς δευτερεύοντες λοβούς.

Οι δευτερεύοντες λοβοί ακτινοβολίας αντιπροσωπεύουν την ακτινοβολία σε ανεπιθύμητες κατευθύνσεις και επιδιώκεται η ελαχιστοποίησή τους. Το επίπεδο των πλευρικών λοβών εκφράζεται συνήθως ως ο λόγος της πυκνότητας ισχύος στον πλευρικό λοβό προς την αντίστοιχη στον κύριο λοβό. Ο λόγος αυτός ονομάζεται στάθμη πλευρικού λοβού (side lobe level, SLL) και εκφράζεται σε dB. Συνήθως, στάθμη πλευρικού λοβού -20 dB ή μεγαλύτερη (SSL ≥ -20 dB) δεν είναι επιθυμητή στις περισσότερες εφαρμογές.

Μια σημαντική παράμετρος που σχετίζεται με το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας κεραίας είναι το εύρος δέσμης ημίσειας ισχύος (Half-Power Beamwidth, HPBW), το οποίο ορίζεται ως η γωνία μεταξύ των δύο κατευθύνσεων εκατέρωθεν της κατεύθυνσης μέγιστης ακτινοβολίας στις οποίες η ένταση ακτινοβολίας ισούται με το μισό της μέγιστης τιμής (Σχήμα 3.3β).

3.1.3 Ένταση Ακτινοβολίας και Κατευθυντικότητα

Η ένταση ακτινοβολίας σε μία ορισμένη κατεύθυνση $U(\theta, \phi)$ ορίζεται ως η ισχύς που ακτινοβολείται από μια κεραία ανά μονάδα στερεάς γωνίας [76]. Πρόκειται για μια παράμετρο του μακρινού πεδίου, η οποία προκύπτει πολλαπλασιάζοντας την πυκνότητα ακτινοβολίας με το τετράγωνο της απόστασης και δίδεται από τη σχέση:

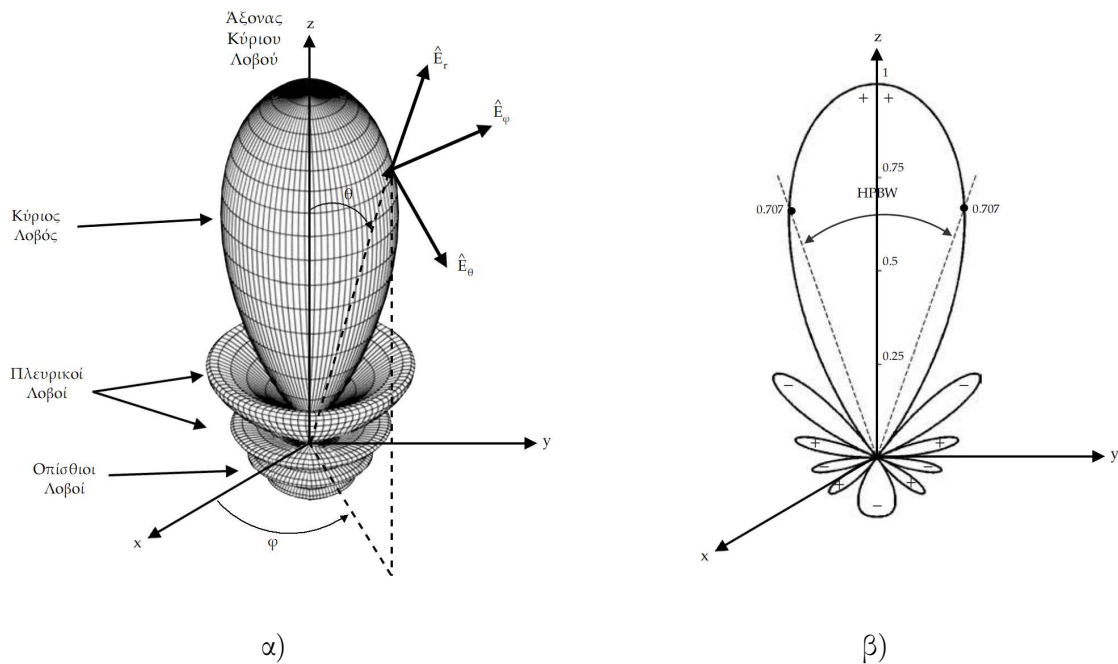
$$U(\theta, \phi) = r^2 W_{rad}(r, \theta, \phi) \quad (3.1)$$

όπου r είναι η απόσταση από την κεραία (σε m) και W_{rad} είναι η πυκνότητα ακτινοβολίας (σε W/m^2).

Η κατευθυντικότητα D μιας κεραίας ορίζεται ως ο λόγος της έντασης ακτινοβολίας σε μία δεδομένη κατεύθυνση προς τη μέση ένταση ακτινοβολίας σε όλες τις κατευθύνσεις. Η μέση ένταση ακτινοβολίας ισούται με τη συνολική ισχύ που ακτινοβολείται από την κεραία διαιρεμένη με 4π . Πιο απλά, η κατευθυντικότητα μιας ανισοτροπικής πηγής είναι ίση με το λόγο της έντασης ακτινοβολίας της σε μια δεδομένη κατεύθυνση, $U(\theta, \phi)$, προς την ένταση ακτινοβολίας μιας ισοτροπικής πηγής, U_o . Σε μαθηματική μορφή γράφεται ως εξής [76]:

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_o} = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \quad (3.2)$$

όπου P_{rad} είναι η ολική ακτινοβολουμένη ισχύς της κεραίας (σε W). Η κατευθυντικότητα είναι αδιάστατο μέγεθος και εκφράζεται σε dB. Αν η κατεύθυνση (θ, ϕ) δεν αναφέρεται,



Σχήμα 3.3: Τριδιάστατο διάγραμμα πεδίου κατευθυντικής κεραίας με μέγιστη ένταση ακτινοβολίας στην κατεύθυνση $\theta = 0^\circ$.

εννοείται η κατεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας.

3.1.4 Απόδοση Κεραίας

Η συνολική απόδοση, η_{total} , μιας κεραίας λαμβάνει υπόψη τις απώλειες που οφείλονται σε ανακλάσεις λόγω μη καλής προσαρμογής μεταξύ της γραμμής μεταφοράς και της κεραίας (απώλειες προσαρμογής), τις απώλειες αγωγιμότητας και τις διηλεκτρικές απώλειες. Δίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\eta_{total} = \eta_r \eta_{rad} \quad (3.3)$$

όπου $\eta_r = 1 - |\Gamma_{in}|^2$ είναι η απόδοση που εκφράζει τις απώλειες προσαρμογής στην είσοδο της κεραίας (Γ_{in} είναι ο μιγαδικός συντελεστής ανάκλασης στην είσοδο της κεραίας). Οι απώλειες αγωγιμότητας και οι διηλεκτρικές απώλειες μιας κεραίας είναι δύσκολο να προσδιοριστούν ξεχωριστά. Για το λόγο αυτό εκφράζονται μέσω της απόδοσης ακτινοβολίας η_{rad} , η οποία επιπλέον συσχετίζει το κέρδος με την κατευθυντικότητα μιας κεραίας (όπως περιγράφεται στην §3.1.5). Η συνολική απόδοση, η απόδοση λόγω ανακλάσεων και η απόδοση ακτινοβολίας είναι αδιάστατα μεγέθη.

Η απόδοση ακτινοβολίας είναι μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους των κεραίων και ορίζεται ως το πηλίκο της ολικής ακτινοβολουμένης ισχύος P_{rad} προς την ισχύ στην είσοδο της κεραίας P_{in} , ή ισοδύναμα, ως ο λόγος της ισχύος που αποδίδεται στην αντίσταση ακτινοβολίας R_{rad} προς την ισχύ που αποδίδεται στις αντιστάσεις ακτινοβολίας και απωλειών (R_{rad} και R_L αντίστοιχα):

$$\eta_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{in}} = \frac{P_{rad}}{P_{rad} + P_L} = \frac{R_{rad}}{R_{rad} + R_L} \quad (3.4)$$

3.1.5 Κέρδος

Μία ακόμη χρήσιμη παράμετρος που περιγράφει τη λειτουργία μιας κεραίας είναι το κέρδος (ή απολαβή). Το κέρδος G μια κεραίας σε μία δεδομένη κατεύθυνση ορίζεται ως ο λόγος της έντασης ακτινοβολίας σε μία δεδομένη κατεύθυνση, $U(\theta, \phi)$, προς την ένταση ακτινοβολίας που θα προέκυπτε εάν η κεραία ακτινοβολούσε ισοτροπικά την ισχύ που λαμβάνει. Εκφράζεται ως εξής [76]:

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (3.5)$$

όπου P_{in} είναι η ολική ισχύς εισόδου της κεραίας (σε W). Είναι αδιάστατο μέγεθος και συνήθως εκφράζεται σε dBi. Όταν δεν αναφέρεται συγκεκριμένη κατεύθυνση, το κέρδος ισχύος λαμβάνεται στην κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας.

Αντικαθιστώντας την (3.4) στην (3.5), προκύπτει ότι:

$$G(\theta, \phi) = \eta_{rad} \left(4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right) = \eta_{rad} D(\theta, \phi) \quad (3.6)$$

Συνεπώς, το κέρδος μιας κεραίας λαμβάνει υπόψιν τόσο την απόδοση της κεραίας όσο και τις κατευθυντικές της ικανότητες, σε αντίθεση με την κατευθυντικότητα η οποία περιγράφει μόνο τις κατευθυντικές ιδότητες της κεραίας. Επιπλέον, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η παράμετρος αυτή δεν περιλαμβάνει τις απώλειες προσαρμογής ή τις απώλειες πόλωσης.

3.1.6 Πόλωση

Η πόλωση μιας κεραίας σε μία δεδομένη κατεύθυνση ορίζεται ως η πόλωση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που ακτινοβολείται από την κεραία. Όταν δεν αναφέρεται συγκεκριμένη κατεύθυνση, εννοείται η κατεύθυνση μέγιστου κέρδους. Η πόλωση είναι η ιδιότητα των Η/Μ κυμάτων που περιγράφει τη διεύθυνση της ταλάντωσης του ηλεκτρικού πεδίου. Πρακτικά, η πόλωση ενός επίπεδου Η/Μ κύματος καθορίζεται από την καμπύλη που διαγράφει το άκρο του διανύσματος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ως συνάρτηση του χρόνου σε ένα επίπεδο κάθετο στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος.

Η στιγμιαία τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου \vec{E} ενός επίπεδου κύματος που διαδίδεται κατά τη θετική διεύθυνση του άξονα z γράφεται ως εξής:

$$\vec{E}(z, t) = E_x(z, t) \hat{i}_x + E_y(z, t) \hat{i}_y \quad (3.7)$$

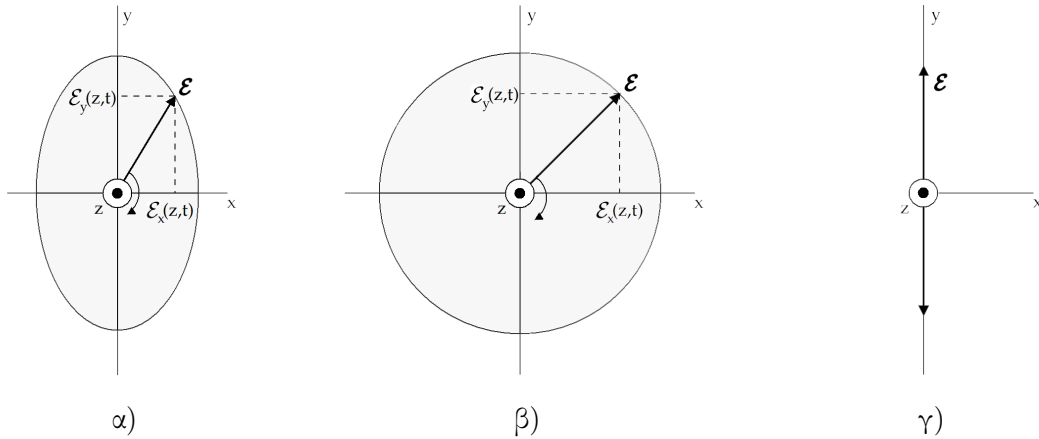
Οι στιγμιαίες τιμές των δύο συνιστωσών του ηλεκτρικού πεδίου, E_x και E_y , δίδονται από τις σχέσεις:

$$E_x(z, t) = \text{Re}\{E_{xo} e^{(j\omega t - kz + \phi_x)}\} = E_{xo} \cos(j\omega t - kz + \phi_x) \quad (3.8)$$

$$E_y(z, t) = \text{Re}\{E_{yo} e^{(j\omega t - kz + \phi_y)}\} = E_{yo} \cos(j\omega t - kz + \phi_y) \quad (3.9)$$

όπου E_{xo} , E_{yo} είναι τα μέγιστα πλάτη και ϕ_x , ϕ_y οι φάσεις των x και y συνιστωσών αντίστοιχα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι δύο συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου είναι κάθετες μεταξύ τους καθώς και στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

Η καμπύλη που διαγράφει το άκρο του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου εξαρτάται από τις τιμές των πλατών E_{xo} , E_{yo} (ή του λόγου τους E_{yo}/E_{xo}) και τη διαφορά φάσης $\Delta\phi = \phi_y - \phi_x$ μεταξύ των δύο συνιστωσών του πεδίου. Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζονται τα διάφορα είδη της πόλωσης (γραμμική, ελλειπτική, κυκλική) θεωρώντας ότι η διεύθυνση διάδοσης του κύματος είναι από τη σελίδα προς τον αναγνώστη (άξονας z). Η ελλειπτική και η κυκλική πόλωση, ανάλογα με τη φορά περιστροφής του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου, διακρίνονται σε δεξιόστροφη και αριστερόστροφη. Συγκεκριμένα, αν το άκρο του διανύσματος \vec{E} περιστρέφεται κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού η πόλωση χαρακτηρίζεται ως αριστερόστροφη, ενώ αν περιστρέφεται κατά την αντίθετη φορά ως



Σχήμα 3.4: Είδη πόλωσης: α) ελλειπτική, β) κυκλική, γ) γραμμική πόλωση.

δεξιόστροφη.

Ελλειπτική πόλωση

Η ελλειπτική πόλωση μπορεί να επιτευχθεί μόνο όταν τα πλάτη των κάθετων συνιστωσών δεν είναι ίσα και η διαφορά φάσης μεταξύ τους είναι περιττό πολλαπλάσιο του $\pi/2$ ή όταν η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο συνιστωσών δεν είναι πολλαπλάσιο του $\pi/2$ (ανεξάρτητα από τις τιμές των πλατών τους):

$$|\mathcal{E}_x| \neq |\mathcal{E}_y| \Rightarrow E_{xo} \neq E_{yo} \quad (3.10)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = \begin{cases} +(\frac{1}{2} + 2n)\pi, & \text{για αριστερόστροφη ελλειπτική πόλωση (ΑΕΠ)} \\ -(\frac{1}{2} + 2n)\pi, & \text{για δεξιόστροφη ελλειπτική πόλωση (ΔΕΠ)} \end{cases} \quad (3.11)$$

ή

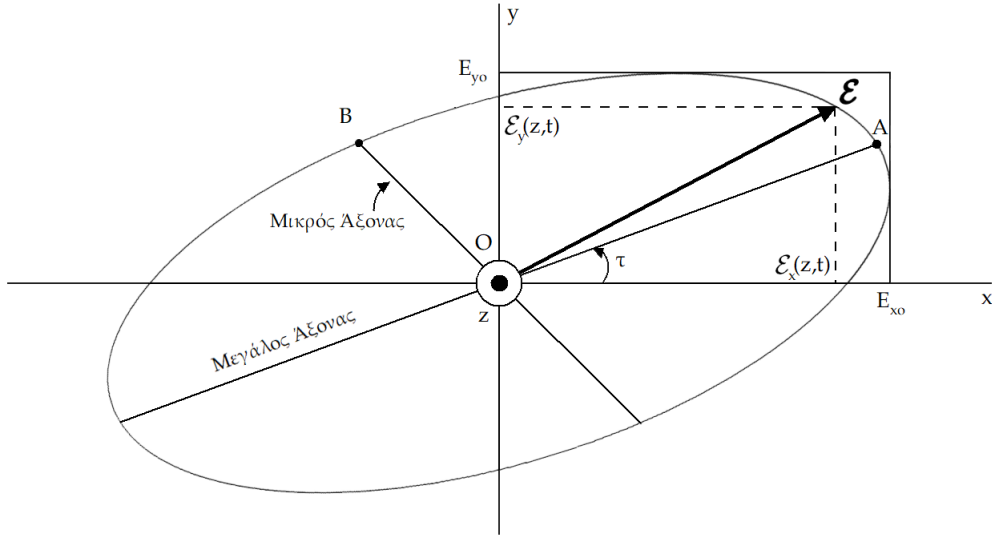
$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x \neq \pm \frac{n}{2}\pi = \begin{cases} > 0, & \text{για ΑΕΠ} \\ < 0, & \text{για ΔΕΠ} \end{cases} \quad (3.12)$$

όπου $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Στη συγκεκριμένη κατάσταση πόλωσης, οι στιγμιαίες τιμές των συνιστωσών του ικανοποιούν την εξίσωση:

$$\left(\frac{\mathcal{E}_x}{E_{xo}}\right)^2 + \left(\frac{\mathcal{E}_y}{E_{yo}}\right)^2 - 2\frac{\mathcal{E}_x}{E_{xo}}\frac{\mathcal{E}_y}{E_{yo}}\cos\phi = \sin^2\phi \quad (3.13)$$

η οποία είναι εξίσωση έλλειψης. Το άκρο του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου διαγράφει μία έλλειψη της οποίας ο μεγάλος άξονας συνήθως δε συμπίπτει με τον άξονα x (Σχήμα 3.5). Ο λόγος του μεγάλου άξονα προς τον μικρό άξονα της έλλειψης ονομάζεται αξονικός



Σχήμα 3.5: Έλλειψη της πόλωσης στη θέση $z = 0$ ως συνάρτηση του χρόνου.

λόγος (axial ratio, AR):

$$AR = \frac{OA}{OB} \quad (3.14)$$

Η κλίση της έλλειψης τ ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζει ο μεγάλος άξονας της έλλειψης με τον άξονα x και δίδεται από τη σχέση:

$$\tan(2\tau) = \frac{2E_{x0} E_{y0}}{E_{x0}^2 - E_{y0}^2} \cos\phi \quad (3.15)$$

Κυκλική πόλωση

Η κυκλική πόλωση είναι μία ειδική περίπτωση της ελλειπτικής πόλωσης, όπου τα πλάτη των δύο συνιστωσών του ηλεκτρικού πεδίου είναι ίσα και η διαφορά φάσης είναι περιττό πολλαπλάσιο του $\pi/2$:

$$|E_x| = |E_y| \Rightarrow E_{x0} = E_{y0} \quad (3.16)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = \pm \left(\frac{1}{2} + 2n\right) \pi, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (3.17)$$

Στην περίπτωση αυτή, η (3.13) παίρνει την εξής μορφή:

$$E_x^2 + E_y^2 = E_o^2 \quad (3.18)$$

Η (3.18) είναι εξίσωση κύκλου. Άρα, το άκρο του διανύσματος \vec{E} διαγράφει μια κυκλική τροχιά (Σχήμα 3.4β). Για $\phi = \left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi$ έχουμε αριστερόστροφη κυκλική πόλωση (ΑΚΠ), ενώ για $\phi = -\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi$ έχουμε δεξιόστροφη κυκλική πόλωση (ΔΚΠ).

Γραμμική πόλωση

Αν η διεύθυνση του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου είναι ίδια σε κάθε χρονική στιγμή, δηλαδή το πέρασ του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου ταλαντώνεται πάνω σε ευθεία γραμμή (Σχήμα 3.4γ), το κύμα λέμε ότι είναι γραμμικά πολωμένο. Η γραμμική περίπτωση είναι ειδική περίπτωση της ελλειπτικής πόλωσης και προκύπτει όταν η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο συνιστώσων είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του π :

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = n\pi, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (3.19)$$

3.1.7 Σύνθετη Αντίσταση Εισόδου και Συντονισμός

Η σύνθετη αντίσταση εισόδου Z_A ορίζεται ως η μιγαδική αντίσταση που παρουσιάζει μια κεραία στο σημείο τροφοδοσίας της ή ως ο λόγος της τάσης V προς το ρεύμα I στους ακροδέκτες εισόδου της [76]:

$$Z_A = R_A + jX_A = \frac{V}{I} \quad (3.20)$$

Το πραγματικό μέρος R_A (ωμική αντίσταση) της σύνθετης αντίστασης εισόδου αποτελείται από την αντίσταση ακτινοβολίας R_{rad} και την αντίσταση απωλειών R_l :

$$R_A = R_{rad} + R_l \quad (3.21)$$

Η αντίσταση απωλειών αντιπροσωπεύει τις απώλειες αγωγιμότητας και τις διηλεκτρικές απώλειες της κεραίας, ενώ η αντίσταση ακτινοβολίας ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ακτινοβολούμενης ισχύος προς το τετράγωνο της ενεργού (rms) έντασης ρεύματος στο σημείο τροφοδοσίας της κεραίας $R_{rad} = P_{rad}/I_{rms}^2$.

Το φανταστικό μέρος X_A της σύνθετης αντίστασης επιδιώκεται στην πράξη να είναι μηδέν (ή όσο το δυνατόν μικρό) καθώς αντιπροσωπεύει την άεργη ισχύ στο αντιδραστικό κοντινό πεδίο της κεραίας, η οποία είναι ανεπιθύμητη. Επιπλέον, όταν η σύνθετη αντίσταση εισόδου της κεραίας είναι ωμική ($Im(Z_A) = X_A = 0$) καθίσταται ευκολότερη η προσαρμογή της γραμμής μεταφοράς με την κεραία. Όταν το φανταστικό μέρος της αντίστασης εισόδου μηδενίζεται λέμε ότι η κεραία βρίσκεται σε συντονισμό. Η συχνότητα ω_0 για την οποία $X_A = 0$ ονομάζεται συχνότητα συντονισμού της κεραίας.

3.1.8 Συντελεστής Ανάκλασης και Απώλεια Επιστροφής

Ο μιγαδικός συντελεστής ανάκλασης στην είσοδο μιας κεραίας, Γ_{in} , ορίζεται ως ο λόγος του πλάτους του ανακλώμενου κύματος V_{refl} προς το πλάτος του προσπίπτοντος κύματος V_A ή εκφράζεται συναρτήσει της σύνθετης αντίστασης εισόδου της κεραίας Z_A και της χαρακτηριστικής αντίστασης της γραμμής μεταφοράς Z_0 ως εξής:

$$\Gamma_{in} = \frac{V_{refl}}{V_A} = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \quad (3.22)$$

Ουσιαστικά εκφράζει την προσαρμογή της σύνθετης αντίστασης στην είσοδο της κεραίας με τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής τροφοδοσίας. Σε περίπτωση τέλει προσαρμογής ($Z_A = Z_o$), όλη η ισχύς του προσπίπτοντος κύματος αποδίδεται στην κεραία (δεν υπάρχουν καθόλου ανακλάσεις) και ο συντελεστής ανάκλασης ισούται με μηδέν ($\Gamma_{in} = 0$).

Εναλλακτικά, αντί για τον συντελεστή ανάκλασης χρησιμοποιείται ο όρος απώλεια επιστροφής (Return Loss, RL). Ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος του προσπίπτοντος κύματος P_{in} προς την ισχύ του ανακλώμενου κύματος P_{refl} και λαμβάνοντας υπόψη την (3.22) προκύπτει:

$$RL = \frac{P_{in}}{P_{refl}} = \frac{V_{in}^2}{V_{refl}^2} = \frac{1}{|\Gamma|^2} \quad (3.23)$$

Η απώλεια επιστροφής εκφράζεται σε (dB) ως εξής:

$$RL = 10 \log \frac{1}{|\Gamma|^2} = -10 \log |\Gamma|^2 = -20 \log |\Gamma| \quad (3.24)$$

3.1.9 Εύρος Ζώνης

Το εύρος ζώνης (bandwidth, BW) μιας κεραίας ορίζεται ως η περιοχή συχνοτήτων, εκατέρωθεν μιας κεντρικής συχνότητας, εντός της οποίας κάποιο χαρακτηριστικό της κεραίας ικανοποιεί μία συγκεκριμένη προδιαγραφή η οποία καθορίζεται από την εκάστοτε εφαρμογή. Επειδή τα χαρακτηριστικά (όπως είναι η σύνθετη αντίσταση εισόδου, το διάγραμμα ακτινοβολίας, η απολαβή, η πόλωση, κτλ) μιας κεραίας δεν μεταβάλλονται απαραίτητα με τον ίδιο τρόπο συναρτήσει της συχνότητας, δεν υπάρχει μονοσήμαντος ορισμός του εύρους ζώνης. Συνήθως, η παράμετρος της κεραίας ως προς την οποία ορίζεται το εύρος ζώνης είναι η σύνθετη αντίσταση εισόδου. Πρακτικά, προσδιορίζεται η περιοχή συχνοτήτων στην οποία η κεραία είναι προσαρμοσμένη στη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής τροφοδοσίας (εύρος ζώνης προσαρμογής).

Για ευρυζωνικές κεραίες, το εύρος ζώνης εκφράζεται συνήθως ως ο λόγος των ακραίων συχνοτήτων ($BW = f_h/f_l$, όπου f_l είναι η χαμηλότερη συχνότητα και f_h είναι η υψηλότερη συχνότητα στις οποίες η λειτουργία της κεραίας είναι ικανοποιητική). Στην περίπτωση των κεραίων στενής ζώνης, το εύρος ζώνης εκφράζεται ως ποσοστό επί τοις εκατό της κεντρικής συχνότητας. Ονομάζεται κλασματικό εύρος ζώνης (fractional bandwidth, FBW) και ισούται με:

$$FBW(\%) = \frac{\Delta f}{f_c} \cdot 100 = \frac{f_h - f_l}{f_c} \cdot 100 = 2 \frac{f_h - f_l}{f_h + f_l} \cdot 100 \quad (3.25)$$

όπου $\Delta f = f_h - f_l$ είναι η διαφορά των ακραίων συχνοτήτων και $f_c = (f_h + f_l)/2$ είναι η κεντρική συχνότητα που συνήθως είναι η συχνότητα συντονισμού της κεραίας.

Στα πλαίσια της Διατριβής, το εύρος ζώνης των προτεινόμενων κεραίων υπολογίζεται ως η διαφορά της χαμηλότερης από την υψηλότερη συχνότητα ($BW = f_h - f_l$) όπου το μέτρο

του συντελεστή ανάκλασης έχει τιμή μικρότερη ή ίση των -10 dB ($|\Gamma_{in}| \leq -10$ dB), με εξαίρεση ορισμένες περιπτώσεις που λαμβάνεται το όριο των -6 dB .

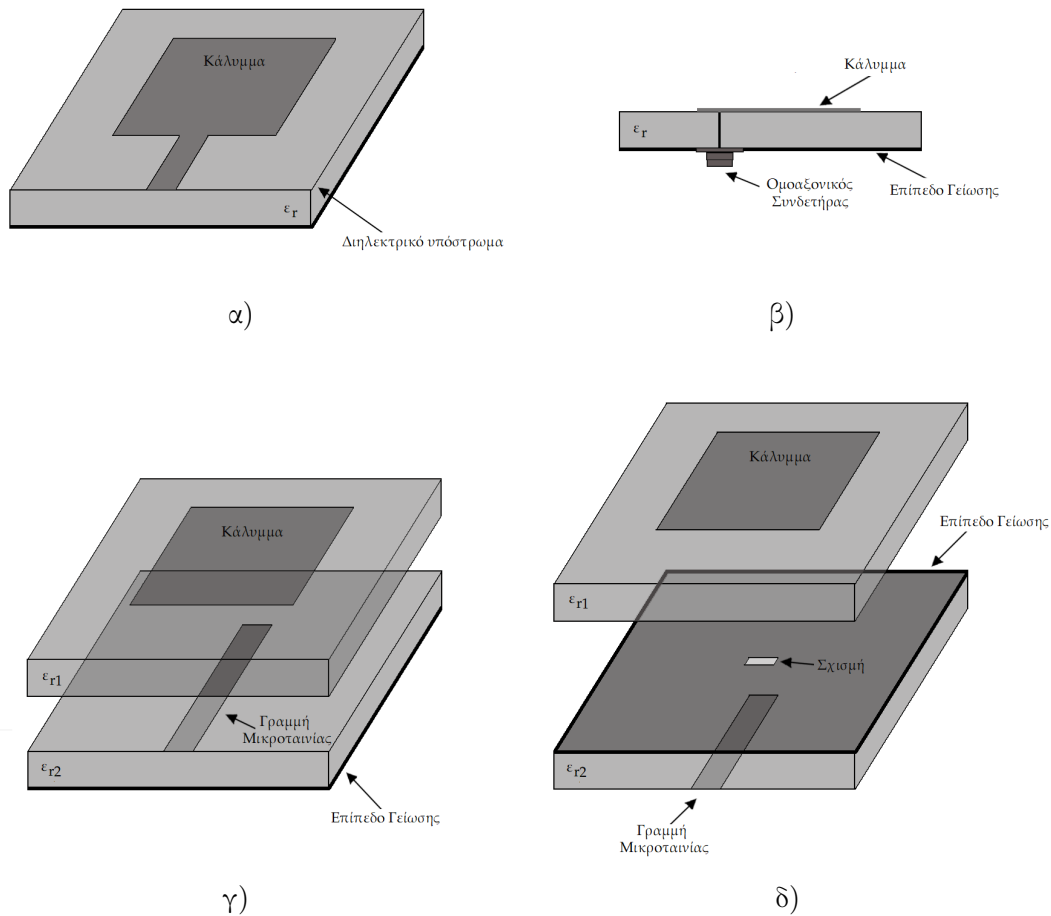
3.2 Κεραίες Μικροταινιακού Καλύμματος

Οι κεραίες μικροταινιακού καλύμματος χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα ασύρματων επικοινωνιών. Πρόκειται για κεραίες χαμηλού προφίλ, οι οποίες κατασκευάζονται εύκολα και με χαμηλό κόστος χρησιμοποιώντας την τεχνολογία τυπωμένων κυκλωμάτων και παρουσιάζουν μεγάλη ευελιξία όσον αφορά τη συχνότητα συντονισμού, την πόλωση, το διάγραμμα ακτινοβολίας και τη σύνθετη αντίσταση εισόδου. Επιπλέον, λόγω της επίπεδης δομής τους είναι κατάλληλες για την ενσωμάτωση διατάξεων διακοπτικής λειτουργίας ή υλικών των οποίων η ηλεκτρική επιτρεπτότητα ή μαγνητική διαπερατότητα μπορεί να μεταβληθεί με την εφαρμογή εξωτερικού ηλεκτρικού ή μαγνητικού πεδίου (tunable materials) με σκοπό την ανάπτυξη αναδιαρθρώσιμων κεραιοσυστημάτων.

Η κεραία μικροταινιακού καλύμματος αποτελείται από μία λεπτή αγωγίμη ταινία (κάλυμμα), πάχους $t < \lambda_0$ (όπου λ_0 το μήκος κύματος στον ελεύθερο χώρο), που είναι τοποθετημένη σε ύψος $h \ll \lambda_0$ (συνήθως $0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0$) πάνω από ένα αγωγίμο επίπεδο γείωσης. Το κάλυμμα και το επίπεδο γείωσης χωρίζονται από ένα στρώμα διηλεκτρικού υλικού, το λεγόμενο υπόστρωμα. Το μικροταινιακό ακτινοβολούν κάλυμμα σχεδιάζεται με κατάλληλο τρόπο ώστε η κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας να είναι κάθετη προς την επιφάνειά του. Μπορεί να έχει οποιαδήποτε μορφή, ωστόσο η ορθογωνική, η τετραγωνική και η κυκλική μορφή είναι οι συνηθέστερες λόγω της ευκολίας ανάλυσης και κατασκευής καθώς και των ελκυστικών χαρακτηριστικών ακτινοβολίας τους.

Η τροφοδοσία μιας κεραίας μικροταινιακού καλύμματος μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους. Οι τέσσερις συνηθέστεροι τρόποι τροφοδοσίας είναι η μικροταινιακή γραμμή, ο ομοαξονικός καθετήρας, η σύζευξη μέσω γεινίασης και η σύζευξη μέσω ανοίγματος. Η μικροταινιακή γραμμή είναι μια αγωγίμη ταινία, συνήθως πολύ μικρότερου πλάτους σε σύγκριση με το πλάτος του αγωγίμου καλύμματος, η οποία χαράσσεται στο ίδιο επίπεδο με το αγωγίμο κάλυμμα (Σχήμα 3.6α). Είναι εύκολη στην υλοποίηση και σχετικά απλή η μοντελοποίησή της. Προκειμένου να επιτευχθεί προσαρμογή της σύνθετης αντίστασης εισόδου της κεραίας με τη χαρακτηριστική αντίσταση των 50Ω της γραμμής τροφοδοσίας, χρειάζεται η μικροταινιακή γραμμή που τροφοδοτεί την κεραία να εισέλθει μέσα στο αγωγίμο κάλυμμα (ένθετη τροφοδοσία) όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.7β ή εναλλακτικά να χρησιμοποιηθεί ένας μετασχηματιστής $\lambda/4$ σε συνδυασμό με τη μικροταινιακή γραμμή (Σχήμα 3.7α). Σημαντικό μειονέκτημα της τροφοδοσίας μέσω μικροταινιακής είναι ότι η αύξηση του πάχους του υποστρώματος οδηγεί σε αύξηση των επιφανειακών κυμάτων και της ανεπιθύμητης ακτινοβολίας από τη γραμμή τροφοδοσίας, με συνέπεια το εύρος ζώνης της κεραίας να μειώνεται.

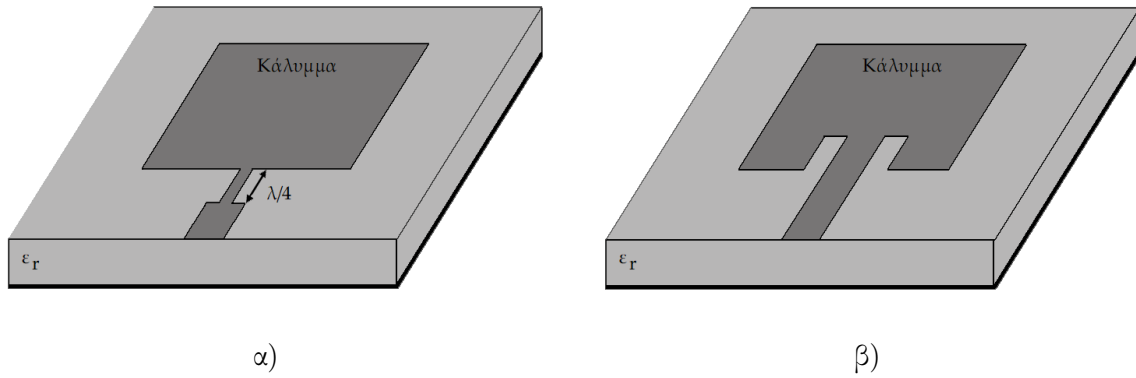
Η ομοαξονική τροφοδοσία χρησιμοποιείται ευρύτατα για την τροφοδοσία των κεραίων



Σχήμα 3.6: Συνηθέστεροι τρόποι τροφοδοσίας κεραίας μικροταινιακού καλύμματος.

μικροταινιακού καλύμματος. Ο εσωτερικός αγωγός του ομοαξονικού συνδετήρα συνδέεται με το ακτινοβολούν κάλυμμα, ενώ ο εξωτερικός αγωγός συνδέεται με το επίπεδο γείωσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6β. Η ομοαξονική τροφοδοσία είναι εύκολη στην κατασκευή και η προσαρμογή επιτυγχάνεται τοποθετώντας τον συνδετήρα στην κατάλληλη θέση. Επιπλέον, η ανεπιθύμητη ακτινοβολία από το δίκτυο τροφοδοσίας είναι χαμηλή. Τα μειονεκτήματα αυτής της τεχνικής είναι το στενό εύρος ζώνης και το γεγονός ότι η μοντελοποίησή της είναι δυσκολότερη ειδικά για υποστρώματα μεγαλύτερου πάχους ($h > 0.02\lambda_0$).

Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές όπου το σύστημα τροφοδοσίας δεν είναι σε επαφή με το ακτινοβολούν κάλυμμα, όπως η σύζευξη μέσω ανοίγματος και η σύζευξη γειννίασης (ή άμεση σύζευξη). Στη σύζευξη μέσω ανοίγματος, χρησιμοποιούνται δύο υποστρώματα τα οποία χωρίζονται από ένα επίπεδο γείωσης. Η μικροταινιακή γραμμή τροφοδοσίας τοποθετείται στην κάτω πλευρά του κάτω υποστρώματος και η σύζευξη μεταξύ αυτής και του αγωγίμου καλύμματος, το οποίο βρίσκεται στο άνω υπόστρωμα, επιτυγχάνεται μέσω ενός ανοίγματος στο επίπεδο γείωσης (Σχήμα 3.6δ). Το επίπεδο γείωσης απομονώνει την τροφοδοσία από το ακτινοβολούν κάλυμμα με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιείται η επίδραση της ανεπιθύμητης παρασιτικής ακτινοβολίας στο διάγραμμα ακτινοβολίας και την καθαρότητα της πόλωσης. Η προσαρμογή επιτυγχάνεται ρυθμίζοντας κατάλληλα το πλάτος της γραμμής



Σχήμα 3.7: α) Χρήση μικροταινιακής γραμμής και μετασχηματιστή $\lambda/4$, β) Ένθετη τροφοδοσία.

τροφοδοσίας και το μήκος του ανοίγματος. Ωστόσο, η συγκεκριμένη τεχνική τροφοδοσίας παρουσιάζει τη μεγαλύτερη δυσκολία κατασκευής και περιορίζει το εύρος ζώνης της κεραίας.

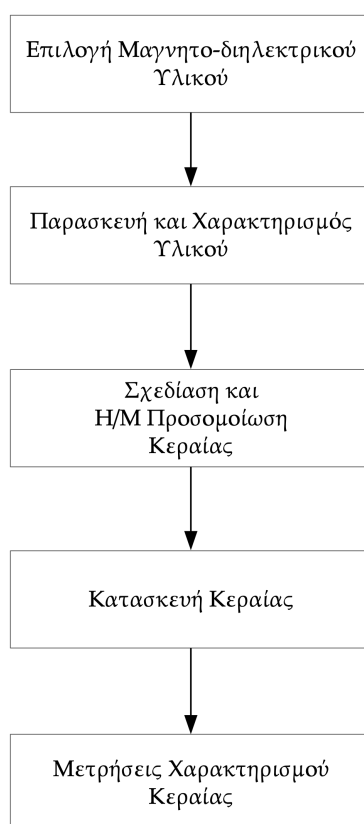
Συγκριτικά με τις προαναφερθείσες τεχνικές τροφοδοσίας, η σύζευξη γειννίαςσης είναι η τεχνική με την οποία επιτυγχάνεται το μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Επιπλέον, είναι σχετικά απλή η μοντελοποίησή της και παρουσιάζει χαμηλή παρασιτική ακτινοβολία. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6γ, η μικροταινιακή γραμμή τροφοδοσίας τοποθετείται ανάμεσα στα δύο υποστρώματα και το επίπεδο γείωσης βρίσκεται στην κάτω πλευρά του κάτω υποστρώματος. Η μεταφορά ενέργειας μεταξύ της γραμμής τροφοδοσίας και του ακτινοβολούντος καλύμματος στο άνω υπόστρωμα γίνεται επαγωγικά. Οι παράμετροι που καθορίζουν την προσαρμογή είναι το μήκος της γραμμής τροφοδοσίας και ο λόγος του πλάτους προς το μήκος του αγωγίμου καλύμματος (width-to-line ratio of patch). Η κατασκευή της είναι δύσκολη, διότι απαιτείται ακριβή ευθυγράμμιση των υποστρωμάτων.

3.3 Ανάπτυξη Αναδιάρθρωσιμων Κεραιών με Μαγνητο-Διηλεκτρικά Υλικά

Οι αναδιάρθρωσιμες κεραίες που σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν στα πλαίσια της Διατριβής ανήκουν στην κατηγορία των κεραιών μικροταινιακού καλύμματος για τους λόγους που προαναφέρθηκαν. Ανάλογα με τον τρόπο ενσωμάτωσης του μαγνητο-διηλεκτρικού υλικού στη δομή της κεραίας, ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες: α) τις κεραίες μικροταινιακού καλύμματος στις οποίες μέρος του συμβατικού διηλεκτρικού υποστρώματος αντικαθίσταται από δείγμα μαγνητο-διηλεκτρικού υλικού συγκεκριμένου σχήματος και διαστάσεων, και β) τις μικροταινιακές κεραίες που είναι τυπωμένες πάνω σε σύνθετο υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας-μαγνητοδιηλεκτρικού υλικού. Όσον αφορά την επιλογή του τρόπου τροφοδοσίας των κεραιών που ανήκουν στην πρώτη κατηγορία, καθοριστικό ρόλο παίζουν η σχεδιαστική ευελεξία που παρέχει η εκάστοτε τεχνική όσον αφορά το μέγεθος και τη θέση τοποθέτησης

του υλικού στο διηλεκτρικό υπόστρωμα της κεραίας, αλλά και οι πρακτικές δυσκολίες που σχετίζονται με τον τρόπο πόλωσης του υλικού. Στην περίπτωση διέγερσης της κεραίας με ένθετη τροφοδοσία ή με ομοαξονικό συνδετήρα, το μαγνητο-διηλεκτρικό υλικό δεν μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιοδήποτε σημείο του υπόστρωματος κάτω από το αγωγίμο κάλυμμα. Αυτό συμβαίνει λόγω της ύπαρξης σχισμών στο ακτινοβολούν κάλυμμα ή της παρουσίας του εσωτερικού αγωγού του συνδετήρα στο υπόστρωμα της κεραίας αντίστοιχα. Επιπλέον, στην ομοαξονική τροφοδοσία το γεγονός ότι ο εξωτερικός αγωγός του συνδετήρα προεξέχει από το επίπεδο γείωσης της κεραίας εμποδίζει την τοποθέτηση του μόνιμου μαγνήτη ή του ηλεκτρομαγνήτη που θα χρησιμοποιηθεί για την πόλωση του μαγνητο-διηλεκτρικού υλικού στην κατάλληλη θέση. Σε αντίθεση με τις παραπάνω τεχνικές, η τροφοδοσία της κεραίας με σύζευξη γειννίας παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία στη θέση τοποθέτησης του υλικού στο υπόστρωμα και επιπλέον δεν τίθενται πρακτικοί περιορισμοί στον τρόπο εφαρμογής του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Στη δεύτερη κατηγορία κεραιών, επιλέγεται η χρήση της ένθετης τροφοδοσίας.

Τα βασικά βήματα που ακολουθήθηκαν για την ανάπτυξη των προτεινόμενων κεραιών παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.8. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την επιλογή του υλικού που θα ενσωματωθεί στη δομή της κεραίας με σκοπό την επίτευξη αναδιάρθρωσιμότητας.



Σχήμα 3.8: Βασικά στάδια για την ανάπτυξη αναδιάρθρωσιμων κεραιών με τη χρήση μαγνητο-διηλεκτρικών υλικών.

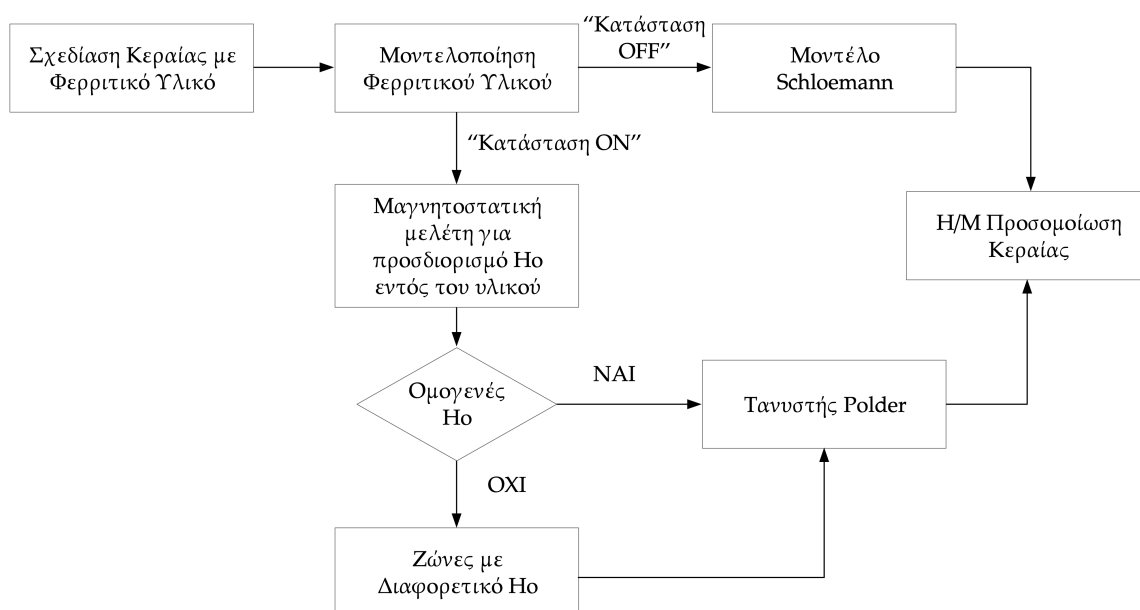
Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, οι φερρίτες θεωρούνται κατάλληλοι για εφαρμογές στις μικροκυματικές συχνότητες λόγω της μονωτικής συμπεριφοράς τους και των μαγνητικών ιδιοτήτων που παρουσιάζουν υπό την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Ακολουθεί η παρασκευή του φερριτικού υλικού με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά και ο προσδιορισμός των διηλεκτρικών και των μαγνητικών ιδιοτήτων του με τη βοήθεια κατάλληλων τεχνικών χαρακτηρισμού. Το στάδιο αυτό παραλείπεται στην περίπτωση που το υλικό που θα ενσωματωθεί στη δομή της κεραίας είναι εμπορικά διαθέσιμο. Στη συνέχεια, σχεδιάζεται η κεραία λαμβάνοντας υπόψη κατασκευαστικές λεπτομέρειες οι οποίες σχετίζονται με το πάχος επιμετάλλωσης, την τεχνική τροφοδοσίας και την ενσωμάτωση του υλικού. Πραγματοποιείται παραμετρική μελέτη της γεωμετρίας με στόχο τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης και ακολουθεί η μελέτη των χαρακτηριστικών της κεραίας μέσω ηλεκτρομαγνητικών προσομοιώσεων. Τέλος, η προτεινόμενη κεραία κατασκευάζεται και πραγματοποιούνται μετρήσεις χαρακτηρισμού της ακολουθώντας τη μεθοδολογία μετρήσεων που περιγράφεται στην ενότητα §3.5, προκειμένου να ελεγχθεί πειραματικά η δυνατότητα αναδιαρθρωσιμότητάς της.

3.4 Προτεινόμενη Μεθοδολογία Σχεδίασης και Προσομοίωσης Αναδιαρθρώσιμων Κεραίων με Μαγνητο-Διηλεκτρικά Υλικά

Για τη μελέτη των κεραίων με μαγνητο-διηλεκτρικά υλικά μέσω προσομοιώσεων είναι σημαντικό να προσδιοριστούν οι παράγοντες που πιθανόν επηρεάζουν την ακρίβεια των αριθμητικών αποτελεσμάτων και οδηγούν σε απόκλιση μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων. Ένα μεγάλο ποσοστό αβεβαιότητας προκαλείται από τη μοντελοποίηση των υλικών στις δύο διακριτές καταστάσεις λειτουργίας της κεραίας: 1) την “κατάσταση OFF” (απουσία μαγνητικού πεδίου πόλωσης) και 2) την “κατάσταση ON” (το μαγνητο-διηλεκτρικό υλικό βρίσκεται σε κατάσταση μαγνητικού κόρου). Η ακριβής μοντελοποίηση των ανισοτροπικών μαγνητικών υλικών βασίζεται στη μαθηματική περιγραφή της μαγνητικής διαπερατότητας.

Η σχεδίαση και η ηλεκτρομαγνητική (H/M) προσομοίωση αναδιαρθρώσιμων κεραίων που έχουν ενσωματωμένα φερριτικά υλικά στη δομή τους είναι μια διαδικασία που αποτελείται από πολλά στάδια (Σχήμα 3.9). Αρχικά, προσδιορίζεται το συχνотικό εύρος λειτουργίας της κεραίας και το φερριτικό υλικό που θα ενσωματωθεί στη δομή της προτεινόμενης κεραίας. Έπειτα ακολουθεί η μοντελοποίηση του υλικού, όπου είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά μοντέλα συχνотικής διασποράς για τη μαγνητική διαπερατότητα του υλικού στην αμαγνήτιστη κατάσταση (είναι βαθμωτό μέγεθος) και την πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση (είναι τανυστικό μέγεθος). Στην “κατάσταση OFF”, συνήθως χρησιμοποιείται ένα μοντέλο διασποράς που ορίζεται από το χρήστη καθώς η πλειοψηφία των υπολογιστικών

πακέτων H/M προσομοίωσης δεν περιλαμβάνουν κάποιο μοντέλο που να προσομοιώνει τη συγκεκριμένη κατάσταση. Η μαγνητική διαπερατότητα υπολογίζεται συναρτήσει της συχνότητας με τη βοήθεια του τύπου του Schloemann (2.10) και στη συνέχεια οι τιμές αυτές εισάγονται με τη μορφή λίστας στον H/M επιλύτη του υπολογιστικού πακέτου H/M προσομοίωσης. Στην “κατάσταση ON”, χρησιμοποιείται το γυροτροπικό μοντέλο το οποίο περιγράφει την ανισοτροπική συμπεριφορά του υλικού υπό την επίδραση ομογενούς στατικού μαγνητικού πεδίου. Για τον υπολογισμό του τανυστή μαγνητικής διαπερατότητας, χρειάζεται να οριστούν στον H/M επιλύτη οι μαγνητικές ιδιότητες του υλικού (μαγνήτιση κόρου, πλάτος σιδηρομαγνητικού συντονισμού, παράγοντας Lande) καθώς και η τιμή και η διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του υλικού H_o . Η αξιοπιστία των αριθμητικών αποτελεσμάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τιμή του H_o που ορίζεται στο λογισμικό H/M προσομοίωσης (θα πρέπει να έχει την κατάλληλη τιμή ώστε το υλικό να είναι κορεσμένο). Η κατανομή του στατικού μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του υλικού εξαρτάται από το σχήμα του δείγματος και μπορεί να προσδιοριστεί μέσω μαγνητοστατικών υπολογισμών. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη το φαινόμενο της απομαγνήτισης λόγω των πεπερασμένων διαστάσεων του δείγματος, είναι απαραίτητο το υπολογιστικό πακέτο που θα χρησιμοποιηθεί να περιλαμβάνει μαγνητοστατικό επιλύτη και H/M επιλύτη. Αν το H_o είναι ομογενές, όπως θεωρείται στα περισσότερα λογισμικά H/M προσομοίωσης, τότε ο τανυστής Polder χρησιμοποιείται για τη μαγνητική διαπερατότητα του υλικού. Διαφορετικά, το φερριτικό δείγμα πρέπει να χωριστεί σε ζώνες, όπου το μαγνητικό πεδίο σε κάθε ζώνη υπολογίζεται μέσω μαγνητοστατικών υπολογισμών. Έπειτα, υπολογίζεται ο τανυστής



Σχήμα 3.9: Σχηματικό διάγραμμα με τα βασικά στάδια που απαιτούνται για τη σχεδίαση και την προσομοίωση αναδιάρθρωσιμων κεραιών με μαγνητο-διηλεκτρικά υλικά.

Polder. Τέλος, πραγματοποιείται η ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση της προτεινόμενης κεραίας.

Στην παρούσα Διατριβή, η σχεδίαση και η ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση όλων των προτεινόμενων κεραίων πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας την προτεινόμενη μεθοδολογία που περιγράφηκε παραπάνω. Όσον αφορά τον προσδιορισμό της κατανομής του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του υλικού χρησιμοποιήθηκε ο μαγνητοστατικός επιλύτης του CST EM Studio, ενώ η ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση της κεραίας πραγματοποιήθηκε στον χρονο-μεταβατικό επιλύτη (transient solver) του CST Microwave (MW) Studio, ο οποίος βασίζεται στην τεχνική πεπερασμένης ολοκλήρωσης (Finite Integration Technique, FIT).

3.5 Μετρήσεις Αναδιαρθρώσιμων Κεραίων με Μαγνητο-Διηλεκτρικά Υλικά

Προκειμένου να ελεγχθεί πειραματικά η δυνατότητα αναδιαρθρωσιμότητας των προτεινόμενων κεραίων και να αξιολογηθεί η αξιοπιστία της προτεινόμενης μεθοδολογίας για τη σχεδίαση και την προσομοίωση των αναδιαρθρώσιμων κεραίων με μαγνητο-διηλεκτρικά υλικά που περιγράφηκε στην υποενότητα §3.3, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των εργαστηριακών πρωτότυπων των κεραίων στο μακρινό πεδίο στις δύο διακριτές καταστάσεις λειτουργίας τους (την αμαγνήτιστη κατάσταση και την πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση). Δύο σημαντικά θέματα τα οποία προκύπτουν κατά τη διαδικασία των μετρήσεων στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση είναι ο τρόπος με τον οποίο θα πολωθεί μαγνητικά το μαγνητο-διηλεκτρικό υλικό καθώς και η δυνατότητα μεταβολής του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου με ελεγχόμενο τρόπο.

Στην ενότητα αυτή, αρχικά γίνεται εκτενής αναφορά στα παραπάνω ανοιχτά θέματα και παρουσιάζονται οι προτεινόμενες λύσεις που εφαρμόζονται στην παρούσα Διατριβή. Στη συνέχεια, περιγράφεται η διάταξη των μετρήσεων και ο εργαστηριακός εξοπλισμός της. Αναλύεται η μεθοδολογία που αναπτύσσεται για την ακριβή και αξιόπιστη μέτρηση των χαρακτηριστικών εμπέδησης εισόδου και ακτινοβολίας των αναδιαρθρώσιμων κεραίων με μαγνητο-διηλεκτρικά υλικά. Τέλος, περιγράφονται αναλυτικά οι διαδικασίες που ακολουθούνται για τις μετρήσεις χαρακτηρισμού των προτεινόμενων κεραίων οι οποίες περιλαμβάνουν μέτρηση του συντελεστή ανάκλασης, των διαγραμμάτων ακτινοβολίας, της απολαβής, της πόλωσης και της απόδοσης ακτινοβολίας.

3.5.1 Πόλωση Μαγνητο-Διηλεκτρικού Υλικού

Για την πόλωση του μαγνητο-διηλεκτρικού υλικού το οποίο ενσωματώνεται στο υπόστρωμα της εκάστοτε προτεινόμενης κεραίας, είτε σε μορφή συμπαγή (bulk) είτε υπό μορφή σωματιδίων, απαιτείται η εφαρμογή ενός εξωτερικού στατικού μαγνητικού πεδίου. Η διεύθυνση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου καθορίζει τη διεύθυνση μαγνήτισης του

μαγνητο-διηλεκτρικού υλικού, ενώ η ένταση του πεδίου καθορίζει τον σιδηρομαγνητικό συντονισμό του υλικού. Το γεγονός ότι το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του δείγματος H_o διαφέρει από το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο H_a κατά τον παράγοντα $H_d = N \cdot 4\pi M_s$, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, καθιστά αναγκαία την εφαρμογή κατάλληλου εξωτερικού μαγνητικού πεδίου ώστε το μαγνητο-διηλεκτρικό υλικό να είναι κορεσμένο ($H_o > N \cdot 4\pi M_s$). Συγκεκριμένα, στην περίπτωση του κυλινδρικού ή ορθογωνικού δείγματος YIG που ενσωματώθηκε σε ορισμένες από τις προτεινόμενες κεραίες το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο έπρεπε να είναι σχετικά ισχυρό ($H_a > 4 \text{ kG}$) προκειμένου το δείγμα να φθάσει σε κατάσταση μαγνητικού κόρου.

Πρακτικά, το απαιτούμενο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο μπορεί να δημιουργηθεί με τη χρήση ηλεκτρομαγνήτη ή μόνιμων μαγνητών. Στην περίπτωση του ηλεκτρομαγνήτη, ο οποίος αποτελείται από ένα πηνίο στο εσωτερικό του οποίου έχει τοποθετηθεί ένας πυρήνας από μαλακό μαγνητικό υλικό, το μαγνητικό πεδίο παράγεται όταν το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου του ηλεκτρομαγνήτη μπορεί να μεταβληθεί με εύκολο τρόπο μεταβάλλοντας την ένταση του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο και εξαρτάται από το υλικό του πυρήνα καθώς και τον αριθμό των σπειρών ανά μονάδα μήκους του πηνίου. Στις περιπτώσεις που απαιτείται ισχυρό μαγνητικό πεδίο, όπως στην παρούσα διατριβή, το υλικό του πυρήνα πρέπει να έχει υψηλή μαγνητική διαπερατότητα και επιπλέον ο αριθμός των σπειρών του πηνίου να είναι μεγάλος, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση του μεγέθους και του βάρους του ηλεκτρομαγνήτη.

Εναλλακτικά, για την πόλωση του μαγνητο-διηλεκτρικού υλικού μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνιμοι μαγνήτες οι οποίοι έχουν μικρότερο μέγεθος και βάρος σε σχέση με τους ηλεκτρομαγνήτες. Το βασικό χαρακτηριστικό των μόνιμων μαγνητών είναι ότι παραμένουν μαγνητισμένοι ακόμα και μετά την απομάχρυνση του εξωτερικού πεδίου που χρησιμοποιήθηκε για τη μαγνήτισή τους. Είναι κατασκευασμένοι από κάποιο σκληρό μαγνητικό υλικό, συνήθως από κράμα σπανίων γαιών νεοδυμίου-σιδήρου-βορίου (Neodymium Iron Boron, NdFeB) ή σαμαρίου-κοβαλτίου (samarium-cobalt, Sm-Co), το οποίο έχει υψηλή παραμένουσα μαγνήτιση M_r , υψηλό συνεχτικό πεδίο H_c και υψηλό ενεργειακό γινόμενο BH_{max} (εκφράζει την μαγνητική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο υλικό). Οι μαγνήτες NdFeB είναι οι πιο ισχυροί και ευρέως χρησιμοποιούμενοι μόνιμοι μαγνήτες. Το κύριο πλεονέκτημά τους, σε σχέση με τους μαγνήτες Sm-Co, είναι το χαμηλό κόστος κατασκευής. Επιπλέον, έχουν μικρό μέγεθος, μικρό βάρος και σχετικά χαμηλή θερμοκρασία Curie ($T_c \sim 320^\circ \text{C}$).

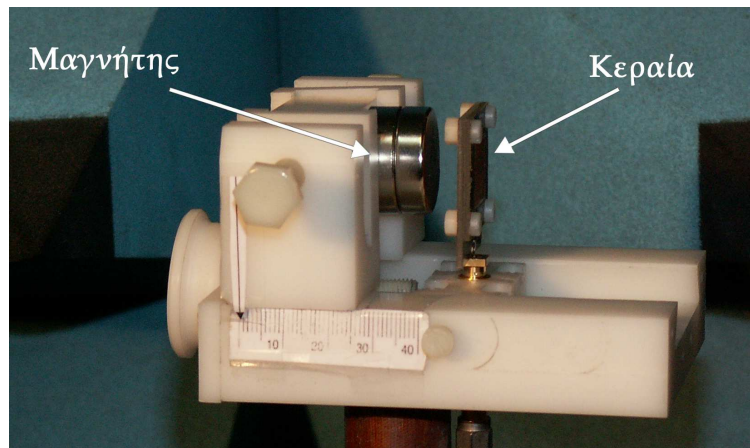
Στα πλαίσια της παρούσας Διατριβής, για τη μαγνήτιση των δειγμάτων που ενσωματώθηκαν στις προτεινόμενες κεραίες χρησιμοποιήθηκαν εμπορικά διαθέσιμοι μόνιμοι μαγνήτες NdFeB από την εταιρεία Supermagnete [77]. Το πλήθος των μόνιμων μαγνητών καθορίστηκε από την ένταση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου που απαιτείται ώστε το δείγμα να φθάσει σε κατάσταση μαγνητικού κόρου. Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν μόνιμοι μαγνήτες ίδιου σχήματος (κυλινδρικοί ή ορθογωνικοί) και ίδιων ή διαφορετικών διαστάσεων οι οποίοι τοποθετήθηκαν ο ένας πάνω στον άλλο σχηματίζοντας

μία στοίβα μόνιμων μαγνητών. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο τρόπος τοποθέτησης των μόνιμων μαγνητών παίζει σημαντικό ρόλο στην ομοιογένεια του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του δείγματος. Για την επίτευξη καλύτερης ομοιογένειας, οι μόνιμοι μαγνήτες πρέπει να τοποθετούνται εκατέρωθεν του μαγνητο-διηλεκτρικού υλικού. Ωστόσο, λόγω της αγωγίμης συμπεριφοράς του κράματος NdFeB, επιλέχθηκε να τοποθετηθούν κάτω από το επίπεδο γείωσης της κεραίας (μονόπλευρη στοίβαξη), και όχι εκατέρωθεν του εργαστηριακού πρωτοτύπου της κεραίας, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η επίδρασή τους στα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της κεραίας.

3.5.2 Διάταξη Στήριξης για Μετρήσεις υπό Παρουσία Μεταβαλλόμενου Μαγνητικού Πεδίου

Προκειμένου να μελετηθούν τα χαρακτηριστικά εμπέδησης εισόδου και ακτινοβολίας των προτεινόμενων κεραίων υπό την επίδραση μεταβαλλόμενου εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, κατασκευάστηκε μια διάταξη στήριξης από πολυακετάλη (Acetal Plastic) στην οποία τοποθετήθηκαν το εργαστηριακό πρωτότυπο της εκάστοτε προτεινόμενης κεραίας και οι μόνιμοι μαγνήτες που χρησιμοποιήθηκαν για την πόλωση του φερριτικού υλικού. Η πολυακετάλη επιλέχθηκε ως υλικό κατασκευής της ειδικής διάταξης διότι είναι ένα άκαμπτο, ανθεκτικό, εύκολα επεξεργάσιμο και σχετικά ηλεκτρομαγνητικά “άορατο” υλικό ($\epsilon_r = 3.9$ και $\tan\delta_e = 0.0055$), οπότε δεν αναμένεται να επηρεάσει την ακρίβεια των μετρήσεων. Η διάταξη στήριξης που κατασκευάστηκε παρέχει τη δυνατότητα μεταβολής της έντασης του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου με ελεγχόμενο τρόπο, ρυθμίζοντας κατάλληλα την απόσταση μεταξύ της κεραίας και της στοίβας των μόνιμων μαγνητών. Συγκεκριμένα, όσο μειώνεται η απόσταση κεραίας-μαγνητών τόσο αυξάνεται η ένταση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου και αντίστροφα. Το ισχυρότερο μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται όταν οι μαγνήτες είναι σε επαφή με το επίπεδο γείωσης της κεραίας. Σε κάθε περίπτωση, η ένταση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου προσδιορίζεται με τη βοήθεια του μαγνητόμετρου χειρός (hand-held Gauss-Meter) της εταιρείας Lakeshore Cryotronics (Μοντέλο 410) [78]. Ο εγκάρσιος αισθητήρας (transverse Hall probe) του μαγνητόμετρου τοποθετείται σε επαφή με το επίπεδο γείωσης της κεραίας ακριβώς πίσω από το μαγνητο-διηλεκτρικό υλικό και μετράται με ακρίβεια η z -συνιστώσα του πεδίου σε Gauss. Εκτός από την τιμή του μαγνητικού πεδίου, το μαγνητόμετρο παρέχει επίσης πληροφορίες για την πολικότητα του πεδίου (θετικό ή αρνητικό πρόσημο στην ένδειξη του μαγνητόμετρου).

Στα πλαίσια της παρούσας Διατριβής κατασκευάστηκε η ειδική διάταξη στήριξης που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.10. Οι μόνιμοι μαγνήτες τοποθετούνται πίσω από το επίπεδο γείωσης της κεραίας και κάθετα στην επιφάνεια του υποστρώματος ώστε το μαγνητικό πεδίο να εφαρμόζεται κατά τη θετική διεύθυνση του άξονα z . Ανάλογα με την επιθυμητή τιμή της έντασης του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, οι μαγνήτες τοποθετούνται σε συγκεκριμένη απόσταση από το εργαστηριακό πρωτότυπο της κεραίας με τη βοήθεια του



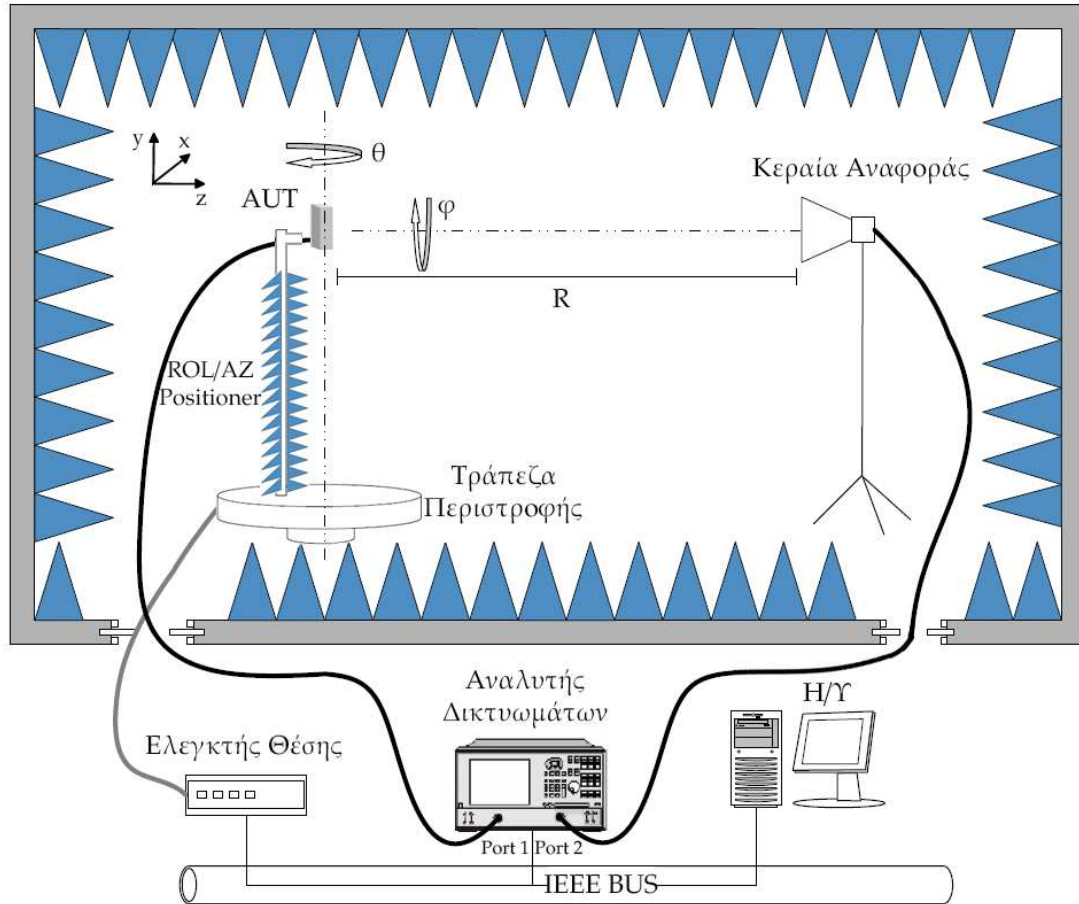
Σχήμα 3.10: Διάταξη στήριξης για μετρήσεις κεραιών υπό την επίδραση μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.

κοχλία μετατόπισης. Μια πλήρη περιστροφή του κοχλία αντιστοιχεί σε μετατόπιση της στοίβας των μαγνητών κατά 1 mm.

3.5.3 Περιβάλλον και Εξοπλισμός Μετρήσεων

Οι μετρήσεις των προτεινόμενων κεραιών πραγματοποιήθηκαν στον πλήρως ανηχικό θάλαμο (Fully Anechoic Chamber, FAC) του Ινστιτούτου Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του ΕΚΕΦΕ “Δημόκριτος” (ΙΠΤ/Δ) με τη χρήση κατάλληλου μετρητικού εξοπλισμού. Ο ανηχικός θάλαμος του ΙΠΤ/Δ είναι ένας ορθογώνιος παραλληλεπίπεδος θάλαμος, μήκους 10 m, πλάτους 5 m και ύψους 5 m, με ηλεκτρομαγνητική θωράκιση μεγαλύτερη από 80 dB. Το εσωτερικό του θαλάμου (τοίχοι, οροφή και δάπεδο) είναι επενδυμένο με πυραμιδοειδείς αφρώδες υλικό (πολυουρεθάνη) εμποτισμένο με σκόνη άνθρακα, το οποίο απορροφά την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία περιορίζοντας την ανάκλαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Έτσι, δημιουργείται εντός του θαλάμου ένα περιβάλλον διάδοσης που προσεγγίζει τις συνθήκες του ελεύθερου χώρου και εξασφαλίζει την ακρίβεια και αξιοπιστία των μετρήσεων των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.

Ο εργαστηριακός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των μετρήσεων περιλαμβάνει τον δίθυρο διανυσματικό αναλύτη δικτυωμάτων (Vector Network Analyzer, VNA) Agilent E8358A (300 kHz - 9 GHz) ο οποίος χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των μιγαδικών παραμέτρων σκέδασης (scattering parameters ή S-parameters), μία κεραία αναφοράς (probe antenna) και τη διάταξη πάνω στην οποία τοποθετείται η κεραία υπό μέτρηση (Antenna Under Test, AUT). Η διάταξη αυτή (roll-over-azimuth (ROL/AZ) positioner system) συνδέεται μέσω οπτικής ίνας με έναν ελεγκτή θέσης (positioning controller) ο οποίος βρίσκεται εξωτερικά του ανηχικού θαλάμου, και επιτρέπει την αυτόματη περιστροφή της AUT γύρω από τον οριζόντιο και τον κατακόρυφο άξονα (άξονας των γωνιών ϕ και θ αντίστοιχα) με ελεγχόμενο τρόπο. Στο Σχήμα 3.11 απεικονίζονται η διάταξη των μετρήσεων στον ανηχικό θάλαμο του ΙΠΤ/Δ καθώς και το σύστημα συντεταγμένων των

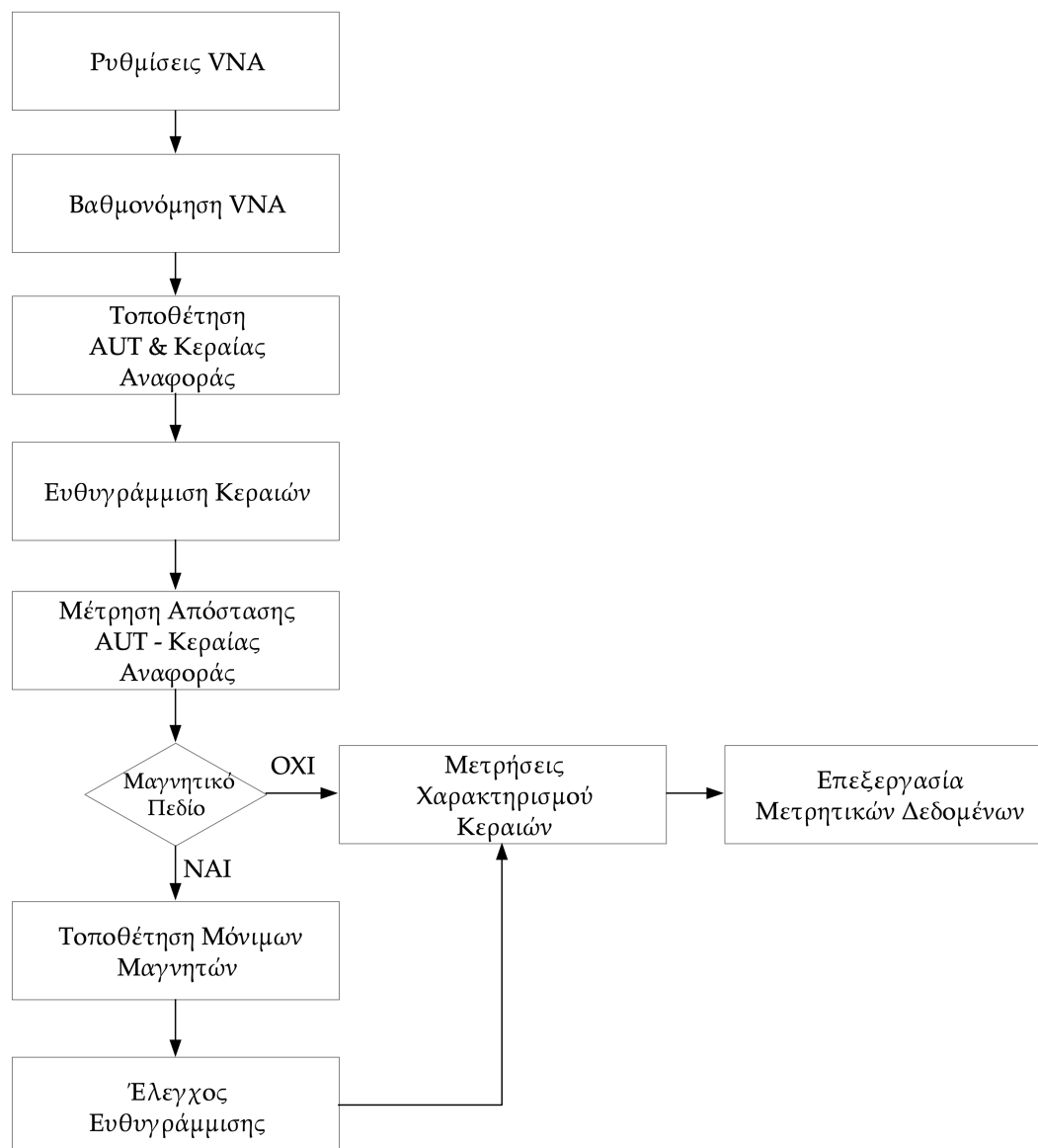


Σχήμα 3.11: Διάταξη μετρήσεων στον ανηχικό θάλαμο.

μετρήσεων. Στη μία πλευρά του θαλάμου είναι τοποθετημένη η διάταξη πάνω στην οποία τοποθετείται η AUT, ενώ στην άλλη πλευρά του θαλάμου τοποθετείται σε ένα τρίποδο μια γραμμικά πολωμένη κεραία αναφοράς (χοάνη) η παρουσία της οποίας είναι αναγκαία για τη διεξαγωγή των μετρήσεων διαγραμμάτων ακτινοβολίας, πόλωσης, απόδοσης ακτινοβολίας και κέρδους. Στην περίπτωση των μετρήσεων στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση, η AUT αποτελείται από το εργαστηριακό πρωτότυπο της αναδιαρθρώσιμης κεραίας με το φερριτικό υλικό και τους μόνιμους μαγνήτες που χρησιμοποιούνται για την πόλωσή του. Ανάλογα με το είδος της μέτρησης χαρακτηρισμού της κεραίας η διάταξη των μετρήσεων μπορεί να τροποποιηθεί.

3.5.4 Μεθοδολογία Μετρήσεων

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την πραγματοποίηση των μετρήσεων στον ανηχικό θάλαμο παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.12. Αρχικά, εφαρμόζονται οι απαραίτητες ρυθμίσεις στον διανυσματικό αναλυτή όπως το είδος της σάρωσης (sweep type), το εύρος συχνοτήτων της σάρωσης (frequency start - frequency stop), ο αριθμός των σημείων (number of points) σε κάθε σάρωση, η ισχύς εισόδου στην AUT και το εύρος ζώνης της ενδιαμέσης συχνότητας



Σχήμα 3.12: Σχηματικό διάγραμμα της διαδικασίας μέτρησης των προτεινόμενων αναδιάρθρωσιμων κεραίων στον ανηχικό θάλαμο.

(Intermediate Frequency (IF) Bandwidth). Οι ρυθμίσεις που παρατίθενται στον Πίνακα 3.1 χρησιμοποιήθηκαν τόσο κατά τη βαθμονόμηση του VNA όσο και κατά τη μέτρηση των προτεινόμενων αναδιάρθρωσιμων κεραίων. Το εύρος συχνοτήτων ρυθμίστηκε έτσι ώστε να περιλαμβάνει τη ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας των αναδιάρθρωσιμων κεραίων στην αμαγνήτιστη και στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση. Παρά το γεγονός ότι η λειτουργία του averaging αυξάνει το συνολικό χρόνο της μέτρησης, ενεργοποιήθηκε προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια μετρήσεων.

Έπειτα, ακολουθεί η βαθμονόμηση (calibration) του διανυσματικού αναλυτή δικτυωμάτων η οποία είναι απαραίτητη προκειμένου να αφαιρεθούν τα συστηματικά σφάλματα που επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων. Πρόκειται για επαναλαμβανόμενα και

προβλέψιμα σφάλματα που οφείλονται στη μη ιδανική συμπεριφορά του αναλυτή δικτυωμάτων καθώς και των εξαρτημάτων που παρεμβάλλονται μεταξύ των θυρών του αναλυτή και της AUT (ομοαξονικά καλώδια, προσαρμογείς καλωδίων), όπως είναι οι απώλειες των καλωδίων και η μη σωστή προσαρμογή των θυρών του VNA και της AUT (impedance mismatch). Επιλέγεται ο τύπος βαθμονόμησης που θα χρησιμοποιηθεί και έπειτα τα πρότυπα βαθμονόμησης (calibration standards) συνδέονται με συγκεκριμένη σειρά στο επίπεδο στο οποίο θα γίνει η βαθμονόμηση, το λεγόμενο επίπεδο αναφοράς (reference plane). Προκειμένου να προσδιοριστούν με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια οι μιγαδικές παράμετροι σκέδασης, πραγματοποιήθηκε πλήρης δίθυρη βαθμονόμηση (full 2-port calibration) του VNA στα άκρα των δύο ομοαξονικών καλωδίων χαμηλών απωλειών και χαρακτηριστικής αντίστασης 50 Ω, στα οποία πρόκειται να συνδεθούν η κεραία εκπομπής και η κεραία λήψης (AUT, probe antenna) χρησιμοποιώντας τα πρότυπα βαθμονόμησης που περιλαμβάνονται στα κιτ βαθμονόμησης 3.5mm 85033D/E και Type N 85032F (standard mechanical calibration kits). Τα πρότυπα βαθμονόμησης Short, Open, load, Thru συνδέονται στα άκρα των ομοαξονικών καλωδίων που είναι συνδεδεμένα στις θύρες του VNA ακολουθώντας τα βήματα που παρέχονται από το λογισμικό του VNA Agilent E8358A κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης. Τα δεδομένα που προκύπτουν από τη βαθμονόμηση χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων.

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας της βαθμονόμησης, η AUT και η γραμμικά πολωμένη κεραία αναφοράς τοποθετούνται εντός του ανηχικού θαλάμου και συνδέονται στις θύρες του VNA μέσω των ομοαξονικών καλωδίων. Το εργαστηριακό πρωτότυπο της αναδιαρθρώσιμης κεραίας με το φερριτικό υλικό τοποθετείται στην ειδική διάταξη στήριξης ανεξάρτητα από το αν οι μετρήσεις θα πραγματοποιηθούν στην αμαγνήτιστη κατάσταση ή στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση. Αυτό συμβαίνει προκειμένου η διάταξη υπό μέτρηση να είναι πανομοιότυπη στις δύο καταστάσεις λειτουργίας (με μόνη διαφορά την προσθήκη των μόνιμων μαγνητών στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση) και για να συμπεριληφθεί τυχόν επίδραση του υλικού της διάταξης στα αποτελέσματα των μετρήσεων και στις δύο καταστάσεις λειτουργίας.

Η σωστή ευθυγράμμιση της AUT ως προς τους δύο άξονες περιστροφής (άξονας των γωνιών θ και των γωνιών ϕ) καθώς και η ευθυγράμμιση της με την κεραία αναφοράς διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια των μετρήσεων χαρακτηρισμού της κεραίας. Η διαδικασία ευθυγράμμισης πραγματοποιείται με τη χρήση κατάλληλης διάταξης δέσμης laser, ακολουθώντας τα εξής βήματα: (1) Αρχικά, ρυθμίζεται η αρχή του τοπικού συστήματος συντεταγμένων της AUT έτσι ώστε να συμπίπτει με τον άξονα περιστροφής της τράπεζας περιστροφής (άξονας των γωνιών θ , αζιμούθιο). (2) Έπειτα, ελέγχεται η περιστροφή της AUT γύρω από τον άξονα των γωνιών ϕ , προκειμένου το επίπεδο μέτρησης να είναι πάντα παράλληλο στο οριζόντιο επίπεδο. (3) Ακολουθεί η προσαρμογή του ύψους της κεραίας αναφοράς ώστε η αρχή του τοπικού συστήματος συντεταγμένων της AUT (συμπίπτει με το κέντρο του αγωγίμου καλύμματος της προτεινόμενης κεραίας) και του αντίστοιχου

Πίνακας 3.1: Οι ρυθμίσεις του διανυσματικού αναλυτή δικτυωμάτων κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης και μέτρησης των κεραίων.

Ρυθμίσεις VNA Agilent E8358A	
Sweep Type	Linear Frequency
Frequency Start	4 GHz
Frequency Stop	6 GHz
Number of Points	1601
IF Bandwidth	5 kHz
Averaging	On
Power	+5 dBm

συστήματος της κεραίας αναφοράς να βρίσκονται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο. (4) Στη συνέχεια, ο άξονας της AUT (άξονας των γωνιών ϕ) προσαρμόζεται έτσι ώστε να συμπίπτει με τον άξονα της κεραίας αναφοράς για $\theta = 0^\circ$. Επίσης, προσδιορίζεται η απόσταση R μεταξύ των δύο κεραίων με τη βοήθεια ενός κατάλληλου οργάνου μέτρησης απόστασης που χρησιμοποιεί τεχνολογία laser με ακρίβεια ± 1 mm.

Ακολουθούν οι μέτρησεις χαρακτηρισμού (συντελεστής ανάκλασης, διαγράμματα ακτινοβολίας, κέρδος, πόλωση, απόδοση ακτινοβολίας) των προτεινόμενων αναδιαρθρώσιμων κεραίων με μαγνητο-διηλεκτρικά υλικά στην αμαγνήτιστη κατάσταση και στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση για διάφορες τιμές του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου βάσει των διαδικασιών που περιγράφονται στα πρότυπα [79] και αναλύονται στις υποενότητες §3.5.5- §3.5.7. Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων υπό την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, οι μόνιμοι μαγνήτες τοποθετούνται στην ειδική διάταξη στήριξης σε συγκεκριμένη απόσταση από το εργαστηριακό πρωτότυπο της εκάστοτε κεραίας. Η ένταση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου προσδιορίζεται με τη βοήθεια του μαγνητόμετρου χειρός Lakeshore 410 στο κέντρο του επιπέδου γείωσης της κεραίας. Μετά την τοποθέτηση των μόνιμων μαγνητών στη διάταξη στήριξης ή κάθε φορά που μεταβάλλεται η απόσταση μεταξύ της προτεινόμενης κεραίας και των μόνιμων μαγνητών, απαιτείται επανάληψη της διαδικασίας ευθυγράμμισης. Η διαδικασία λήψης και καταγραφής των δεδομένων των μετρήσεων μέσα στον ανηχικό θάλαμο ελέγχεται με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού (Agilent VEE) το οποίο είναι εγκατεστημένο σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή που βρίσκεται εξωτερικά του θαλάμου (ο ελεγκτής θέσης, ο διανυσματικός αναλυτής δικτυωμάτων και ο υπολογιστής συνδέονται μέσω ενός τυπικού IEEE διαύλου, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.11). Οι μιγαδικές παραμέτροι σκέδασης, S_{11} , S_{22} , S_{12} , S_{21} , καταγράφονται από τον VNA σε κάθε θέση μέτρησης και στο επιθυμητό εύρος συχνοτήτων 4 – 6 GHz. Έπειτα τα μετρητικά δεδομένα μεταφέρονται στον υπολογιστή για τη μετεπεξεργασία τους (post-processing). Ανάλογα με το είδος μέτρησης χαρακτηρισμού της κεραίας, η διαδικασία των μετρήσεων μπορεί να είναι αρκετά χρονοβόρα.

3.5.5 Διαγράμματα Ακτινοβολίας

Θεωρώντας ότι το περιβάλλον διάδοσης εντός του ανηχικού θαλάμου προσεγγίζει τις συνθήκες ελεύθερου χώρου, και ότι η απόσταση R μεταξύ των δύο κεραίων (Σχήμα 3.11) ικανοποιεί το όριο μακρινού πεδίου, τότε ισχύει η σχέση του Friis [79]:

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (3.26)$$

όπου P_r και P_t είναι η ισχύς στην είσοδο της κεραίας λήψης και της κεραίας εκπομπής αντίστοιχα, G_t είναι το κέρδος της κεραίας εκπομπής, G_r είναι το κέρδος της κεραίας λήψης και λ είναι το μήκος κύματος.

Η διαδικασία για την εξαγωγή των διδιάστατων διαγραμμάτων ακτινοβολίας σε κάθε επιθυμητή συχνότητα είναι η εξής: Αρχικά, η κεραία υπό μέτρηση περιστρέφεται αυτόματα γύρω από τον άξονα των γωνιών ϕ με συγκεκριμένο βήμα το οποίο καθορίζεται από τον αριθμό των απαιτούμενων τομών. Για τη δεδομένη τομή στο επίπεδο ϕ , η τράπεζα περιστροφής περιστρέφεται σε όλο το εύρος των γωνιών θ (0° - 360° με βήμα 5°) και καταγράφονται οι παράμετροι σκέδασης S_{11} , S_{21} , S_{12} και S_{22} με τη βοήθεια του διανυσματικού αναλυτή δικτυωμάτων. Έπειτα, υπολογίζεται το κέρδος της κεραίας υπό μέτρηση με τη βοήθεια της σχέσης [80]:

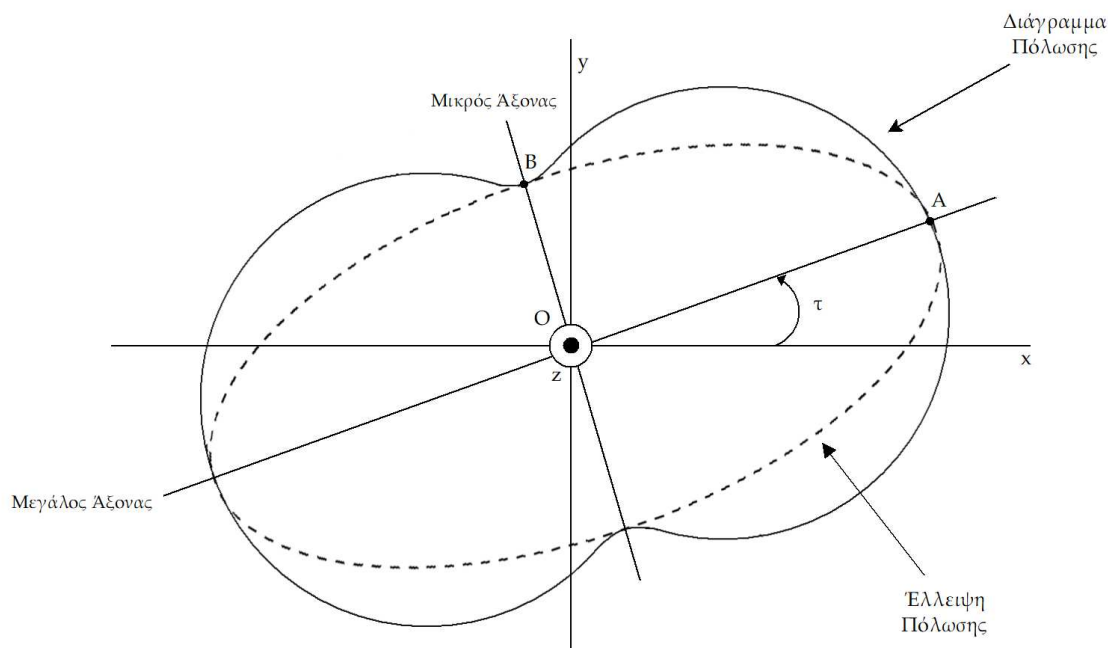
$$G_t = \frac{|S_{21}|^2}{(1 - |S_{11}|^2)(1 - |S_{22}|^2)} \frac{1}{G_r} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 \quad (3.27)$$

η οποία προκύπτει μέσω κατάλληλης αριθμητικής ανάλυσης. Σε κάθε θέση πραγματοποιούνται δύο σειρές μετρήσεων, μεταβάλλοντας κατάλληλα τον προσανατολισμό της κεραίας αναφοράς ώστε η διεύθυνση της πόλωσης να συμπίπτει με τους άξονες x και y του τοπικού συστήματος συντεταγμένων της AUT (Σχήμα 3.11). Το ολικό κέρδος της κεραίας υπό μέτρηση προκύπτει από το άθροισμα των δύο συνιστωσών του κέρδους (G_θ , G_ϕ).

3.5.6 Μετρήσεις Πόλωσης

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην παρούσα Διατριβή για τη μέτρηση της πόλωσης των προτεινόμενων κεραίων είναι η μέθοδος διαγράμματος πόλωσης (polarization-pattern method) και η μέθοδος πλάτους και φάσης (phase-amplitude method). Ανάλογα με τις παραμέτρους πόλωσης (αξονικός λόγος, φορά περιστροφής) που χρειάζεται να προσδιοριστούν σε κάθε περίπτωση, επιλέγεται η κατάλληλη μέθοδος. Σε όλες τις περιπτώσεις μελετάται η πόλωση της εκάστοτε AUT στην κατεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας (boresight).

Η μέθοδος διαγράμματος πόλωσης επιτρέπει τον προσδιορισμό του αξονικού λόγου AR και της γωνίας κλίσης τ , και βασίζεται στη μέτρηση της λαμβανόμενης ισχύος της κεραίας αναφοράς καθώς αυτή περιστρέφεται σε επίπεδο κάθετο στην κατεύθυνση του προσπίπτοντος πεδίου. Η γραφική παράσταση της λαμβανόμενης ισχύος συναρτήσει της γωνίας περιστροφής ονομάζεται διάγραμμα πόλωσης και εφάπτεται στα άκρα του μεγάλου και του μικρού άξονα



Σχήμα 3.13: Διάγραμμα πόλωσης.

της έλλειψης που διαγράφει το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου (Σχήμα 3.13). Με τη βοήθεια του διαγράμματος πόλωσης, είναι δυνατόν να προσδιοριστεί τόσο ο αξονικός λόγος πόλωσης που ορίζεται ως ο λόγος του μεγάλου προς τον μικρό ημιάξονα της έλλειψης, $AR = \frac{OA}{OB}$, όσο και η κλίση της έλλειψης η οποία αναπαριστά τη γωνία που σχηματίζει ο μεγάλος ημιάξονας της έλλειψης με τη διεύθυνση αναφοράς. Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων πόλωσης με τη χρήση της μεθόδου διαγράμματος πόλωσης, η διάταξη των μετρήσεων (Σχήμα 3.11) διαφοροποιείται ως εξής: η γραμμικά πολωμένη κεραία αναφοράς (κεραία λήψης) τοποθετείται στο ROL/AZ positioner και συνδέεται στη θύρα-1 του VNA, ενώ η AUT (κεραία εκπομπής) τοποθετείται στην απέναντι πλευρά του θαλάμου πάνω στο τρίποδο και συνδέεται στη θύρα-2 του VNA. Ο αξονικός λόγος και η γωνία κλίσης προσδιορίζονται με τη βοήθεια των μετρήσεων του συντελεστή μετάδοσης S_{12} .

Στις περιπτώσεις που χρειάζεται να προσδιοριστεί η φορά περιστροφής του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου χρησιμοποιείται η μέθοδος πλάτους και φάσης. Η συγκεκριμένη μέθοδος, σε αντίθεση με την πρώτη μέθοδο, παρέχει τη δυνατότητα πλήρους προσδιορισμού της πόλωσης (αξονικός λόγος, γωνία κλίσης και φορά περιστροφής). Η διαδικασία των μετρήσεων περιλαμβάνει την αυτόματη περιστροφή της AUT γύρω από τον άξονα των γωνιών ϕ (0° - 180° με βήμα 10°) και την αυτόματη περιστροφή της τράπεζας περιστροφής σε όλο το εύρος των γωνιών θ (0° - 360° με βήμα 5°). Πραγματοποιούνται δύο σειρές μετρήσεων τοποθετώντας την κεραία αναφοράς σε κατακόρυφη και σε οριζόντια πόλωση. Σε κάθε θέση μέτρησης και για κάθε επιθυμητή συχνότητα καταγράφεται το μέτρο και η φάση της παραμέτρου S_{12} . Η διάταξη των μετρήσεων είναι αυτή που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.11. Έπειτα, με τη βοήθεια των σχέσεων που παρατίθενται παρακάτω προσδιορίζονται τόσο ο

αξονικός λόγος όσο και η φορά περιστροφής.

Ο αξονικός λόγος ορίζεται ως:

$$AR = |r| \quad (3.28)$$

Πρόκειται για θετική ποσότητα που παίρνει τιμές μεταξύ $1 \leq AR \leq \infty$. Ισοδύναμα, εκφράζεται σε λογαριθμικές μονάδες (dB) μέσω της σχέσης:

$$AR(dB) = 20 \log|r| \quad (3.29)$$

Θεωρητικά, όταν ο αξονικός λόγος ισούται με τη μονάδα (ή 0 dB) η πόλωση της κεραίας είναι κυκλική, ενώ όταν τείνει στο άπειρο είναι γραμμική. Πρακτικά, θεωρούμε ότι η πόλωση είναι γραμμική για τιμές αξονικού λόγου $AR > 20$ dB, κυκλική για $AR \leq 3$ dB και ελλειπτική στις υπόλοιπες περιπτώσεις. Ανάλογα με τη φορά περιστροφής του ηλεκτρικού πεδίου, η ελλειπτική και η κυκλική πόλωση διακρίνονται σε δεξιόστροφη και αριστερόστροφη. Η ποσότητα r παρέχει τη δυνατότητα προσδιορισμού της φοράς περιστροφής και δίνεται από τη σχέση:

$$r = \frac{\vec{E}_R + \vec{E}_L}{\vec{E}_R - \vec{E}_L} \quad (3.30)$$

όπου E_R και E_L είναι οι συνιστώσες δεξιόστροφης και αριστερόστροφης κυκλικής πόλωσης αντίστοιχα, οι οποίες μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει των συνιστωσών E_θ και E_ϕ ως εξής:

$$\vec{E}_R = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_\theta(\theta, \phi) + jE_\phi(\theta, \phi))e^{-j\phi} \quad (3.31)$$

$$\vec{E}_L = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_\theta(\theta, \phi) - jE_\phi(\theta, \phi))e^{j\phi} \quad (3.32)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι θετικές τιμές του προσημασμένου αξονικού λόγου ($r > 0$) αντιστοιχούν σε δεξιόστροφη πόλωση και αρνητικές τιμές ($r < 0$) σε αριστερόστροφη πόλωση.

3.5.7 Απόδοση Ακτινοβολίας

Για την υπολογισμό της απόδοσης ακτινοβολίας η_{rad} χρησιμοποιείται η μέθοδος της τριδιάστατης ολοκλήρωσης του διαγράμματος ακτινοβολίας (3-D pattern integration method, PIM). Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στον ορισμό της απόδοσης ακτινοβολίας (3.4) και απαιτεί τον προσδιορισμό του πηλίκου της συνολικής ακτινοβολούμενης ισχύος (P_{rad}) προς την ισχύ στην είσοδο της κεραίας (P_{in}).

Η συνολική ακτινοβολούμενη ισχύς P_{rad} μιας κεραίας ορίζεται ως:

$$P_{rad} = \iint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi \quad (3.33)$$

όπου U είναι η ένταση ακτινοβολίας και $d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi$ είναι η στοιχειώδης στερεά γωνία.

Λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση (3.5), που συνδέει το κέρδος μιας κεραίας με την ένταση ακτινοβολίας και την ισχύ στην είσοδό της, η (3.33) γίνεται:

$$P_{rad} = \frac{P_{in}}{4\pi} \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} G(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi \quad (3.34)$$

Η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί προσεγγιστικά ως:

$$P_{rad} = \frac{P_{in}}{4\pi} \Delta\theta \Delta\phi \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N G(\theta_i, \phi_j) \sin\theta_i \quad (3.35)$$

όπου $\Delta\theta = \pi/N$, $\Delta\phi = 2\pi/M$ είναι το βήμα μέτρησης των γωνιών θ_i και ϕ_j αντίστοιχα και M , N είναι ο αριθμός των δειγμάτων μέτρησης σε κάθε κατεύθυνση.

Αντικαθιστώντας την (3.35) στην (3.6), η απόδοση ακτινοβολίας δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_{rad} = \Delta\theta \Delta\phi \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N G(\theta_i, \phi_j) \sin\theta_i \quad (3.36)$$

Ο υπολογισμός της η_{rad} βασίζεται στη μέτρηση του τριδιάστατου διαγράμματος ακτινοβολίας κέρδους η οποία είναι μία ιδιαίτερα χρονοβόρα διαδικασία ($\sim 4 - 5$ ώρες). Αρχικά, καταγράφονται οι παράμετροι σκέδασης S_{11} , S_{21} , S_{12} και S_{22} σε κάθε σημείο του τριδιάστατου χώρου (θ, ϕ) και σε κάθε επιθυμητή συχνότητα με τη βοήθεια του VNA. Σε κάθε θέση μέτρησης, πραγματοποιούνται δύο σειρές μετρήσεων, τοποθετώντας την κεραία αναφοράς σε οριζόντια πόλωση και σε κατακόρυφη πόλωση. Έπειτα, υπολογίζεται το κέρδος της AUT (3.27) σε κάθε σημείο του τριδιάστατου χώρου (θ, ϕ) . Τέλος, έχοντας προσδιορίσει το ολικό κέρδος της κεραίας υπό μέτρηση, εκτιμάται η απόδοση ακτινοβολίας με τη βοήθεια της σχέσης (3.36).

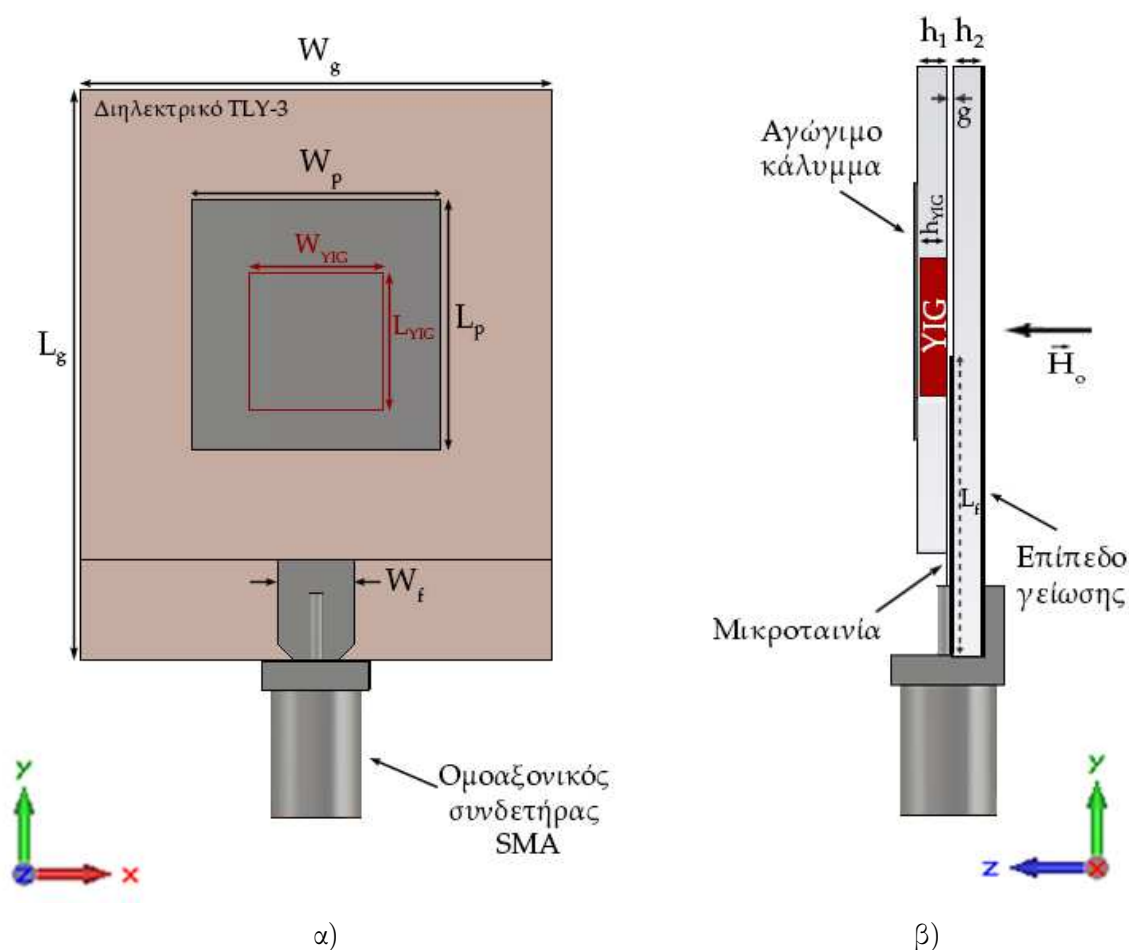
Κεφάλαιο 4

Αναδιαρθρώσιμη Κεραία με Ενσωματωμένο Μαγνητο-Διηλεκτρικό Υλικό

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζεται η σχεδίαση και προσομοίωση μιας αναδιαρθρώσιμης κεραίας μικροταινιακού καλύμματος με τροφοδοσία σύζευξης μέσω γειννίασης και ενσωματωμένο μαγνητο-διηλεκτρικό υλικό στο ανώτερο υπόστρωμά της ακολουθώντας τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στη συνέχεια, η προτεινόμενη κεραία κατασκευάζεται και πραγματοποιούνται μετρήσεις χαρακτηρισμού στις δύο διακριτές καταστάσεις λειτουργίας της, την “κατάσταση OFF” και την “κατάσταση ON”, προκειμένου να ελεγχθεί πειραματικά η δυνατότητα μεταβολής της συχνότητας συντονισμού και της πόλωσης της κεραίας. Επίσης, παρουσιάζεται μια συγκριτική μελέτη μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων, επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία της προτεινόμενης μεθοδολογίας σχεδίασης και ηλεκτρομαγνητικής μοντελοποίησης.

4.1 Σχεδίαση Κεραίας και H/M Μοντελοποίηση

Η προτεινόμενη κεραία μικροταινιακού καλύμματος είναι απλή, συμπαγής και έχει χαμηλό κόστος κατασκευής. Αποτελείται από δύο Taconic TLY-3 υποστρώματα (με σχετική διηλεκτρική επιτρεπτότητα $\epsilon_r = 2.33$, εφαιπτομένη απωλειών $\tan\delta_e = 0.0009$ και επίστρωση χαλκού (Cu) πάχους 0.018 mm και στις δύο όψεις [81]) τα οποία είναι τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο. Στο ανώτερο υπόστρωμα τυπώνεται το τετραγωνικό αγωγίμο κάλυμμα, ενώ στην πάνω πλευρά του κατώτερου υποστρώματος χαράσσεται η μικροταινιακή γραμμή μεταφοράς χαρακτηριστικής αντίστασης 50 Ω και στην κάτω πλευρά του βρίσκεται το επίπεδο γείωσης. Η μεταφορά ενέργειας γίνεται επαγωγικά από τη γραμμή στο ακτινοβολούν κάλυμμα του ανώτερου υποστρώματος. Μέρος του ανώτερου συμβατικού διηλεκτρικού υποστρώματος αντικαθίσταται από ένα σχεδόν τετραγωνικό δείγμα γρανάτη YIG που διατίθεται



Σχήμα 4.1: α) Εμπρόσθια και β) Πλάγια όψη της προτεινόμενης αναδιαρθρώσιμης κεραίας μικροταινιακού καλύμματος με σύζευξη γειτνίασης και ενσωματωμένο μαγνητο-διηλεκτρικό υλικό YIG στο ανώτερο υπόστρωμα.

από την εταιρεία Temex (Y101), με τις εξής διηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες: $\epsilon_r = 15$, $\tan\delta_e = 0.0002$, $4\pi M_s = 1820$ G και $\Delta H = 18$ Oe [56]. Ο συγκεκριμένος γρανάτης επιλέγεται για τους εξής λόγους: 1) έχει χαμηλές απώλειες (η τιμή του ΔH είναι μικρή) και 2) βάσει της μαγνήτισης κορεσμού του εξασφαλίζεται η αποδοτική λειτουργία της κεραίας στην “κατάσταση OFF” (το κατώφλι λειτουργίας της κεραίας στην αμαγνήτιστη κατάσταση για το Y101 ορίζεται στα 5.13 GHz). Η γεωμετρία της προτεινόμενης κεραίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1. Η τροφοδοσία με σύζευξη μέσω γειτνίασης προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στη θέση τοποθέτησης του φερριτικού δείγματος εντός του διηλεκτρικού υποστρώματος και στον τρόπο εφαρμογής του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου συγκριτικά με τις υπόλοιπες τεχνικές τροφοδοσίας (ομοαξονική τροφοδοσία, γραμμή μικροταινίας), όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Προκειμένου να εξαχθούν ρεαλιστικά αποτελέσματα για την εμπέδηση εισόδου της κεραίας, απαιτείται όσο το δυνατόν ακριβέστερη μοντελοποίηση του τρόπου διέγερσής της. Για το λόγο αυτό, ο ομοαξονικός συνδετήρας SMA (SubMiniature

Πίνακας 4.1: Τελικές τιμές των παραμέτρων της μικροταινιακής κεραίας με σύζευξη γειτνίασης και ενσωματωμένο μαγνητο-διηλεκτρικό υλικό. Όλες οι διαστάσεις είναι σε χιλιοστά (millimetre).

Διάσταση	Τιμή	Περιγραφή
h_1	1.524	πάχος ανώτερου υποστρώματος TLY-3
h_2	1.524	πάχος κατώτερου υποστρώματος TLY-3
h_{YIG}	1.40	πάχος φερριτικού δείγματος YIG
t	0.018	πάχος αγωγίμων στοιχείων
g	0.23	κενό μεταξύ των δύο υποστρωμάτων
W_p	14.84	πλάτος αγωγίμου καλύμματος
L_p	14.84	μήκος αγωγίμου καλύμματος
W_{YIG}	7.93	πλάτος φερριτικού δείγματος
L_{YIG}	8.16	μήκος φερριτικού δείγματος
W_g	28.00	πλάτος επιπέδου γείωσης
L_g	40.00	μήκος επιπέδου γείωσης
W_f	4.60	πλάτος μικροταινιακής γραμμής τροφοδοσίας
L_f	15.00	μήκος μικροταινιακής γραμμής τροφοδοσίας

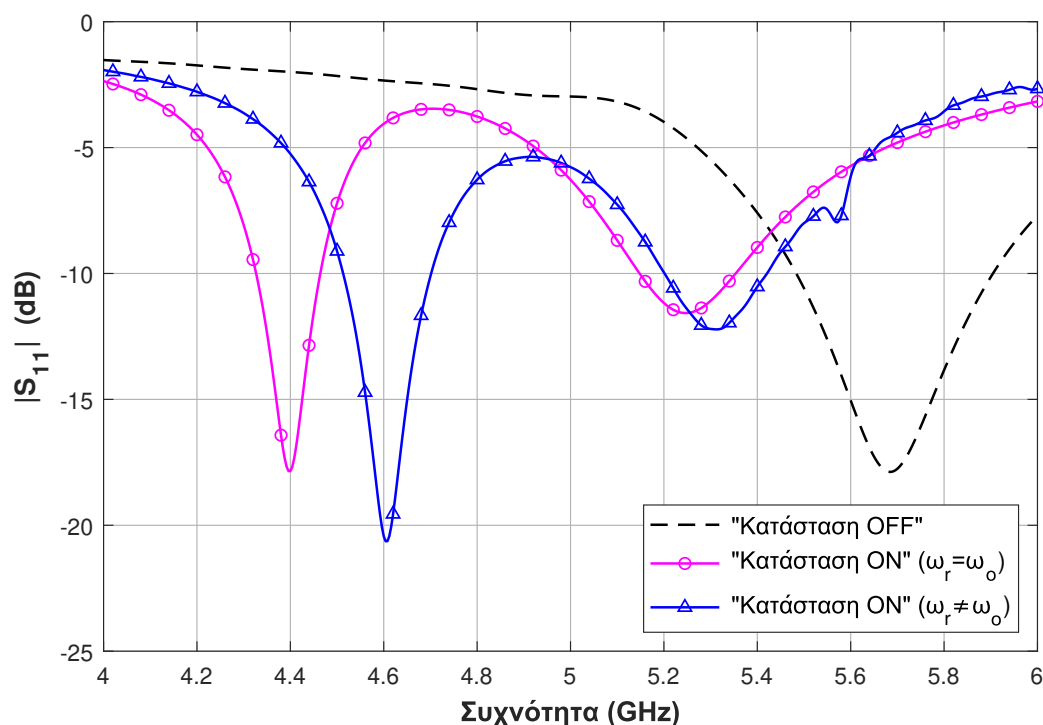
version A) κυλινδρικής διατομής που τροφοδοτεί την μικροταινιακή γραμμή μεταφοράς της κεραίας συμπεριλαμβάνεται επίσης στο H/M μοντέλο.

Ακολουθεί η μοντελοποίηση του φερριτικού υλικού στην αμαγνήτιστη κατάσταση χρησιμοποιώντας το κατάλληλο μοντέλο διασποράς, όπως περιγράφηκε στην ενότητα §3.4. Έπειτα, πραγματοποιείται παραμετρική μελέτη της γεωμετρίας της κεραίας σε σχέση με το μέγεθος και τη θέση του φερριτικού δείγματος, και το μήκος της μικροταινιακής γραμμής έτσι ώστε η κεραία να παρουσιάζει συντονισμό στα 5.5 GHz (“κατάσταση OFF”). Προτού προχωρήσουμε στη μελέτη των χαρακτηριστικών της προτεινόμενης κεραίας υπό την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου μέσω προσομοιώσεων, η κεραία κατασκευάστηκε και μετρήθηκε στον ανηχωτικό θάλαμο για να επιβεβαιωθεί η συμπεριφορά της στην αμαγνήτιστη κατάσταση. Διαπιστώθηκε ότι οι τελικές τιμές των παραμέτρων σχεδίασης διαφέρουν από αυτές που προέκυψαν από την παραμετρική μελέτη της γεωμετρίας. Απώτερος στόχος αυτής της διαδικασίας είναι να ελαχιστοποιηθούν οι αποκλίσεις μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων. Αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας κατασκευής του εργαστηριακού πρωτότυπου της κεραίας παρουσιάζεται σε επόμενη ενότητα. Οι τελικές διαστάσεις της κεραίας παρατίθενται στον Πίνακα 4.1.

4.2 Αριθμητικά Αποτελέσματα

Στο Σχήμα 4.2 απεικονίζεται ο συντελεστής ανάκλασης S_{11} στην είσοδο της κεραίας μικροταινιακού καλύμματος με σύζευξη γειτνίασης και ενσωματωμένο μαγνητο-διηλεκτρικό

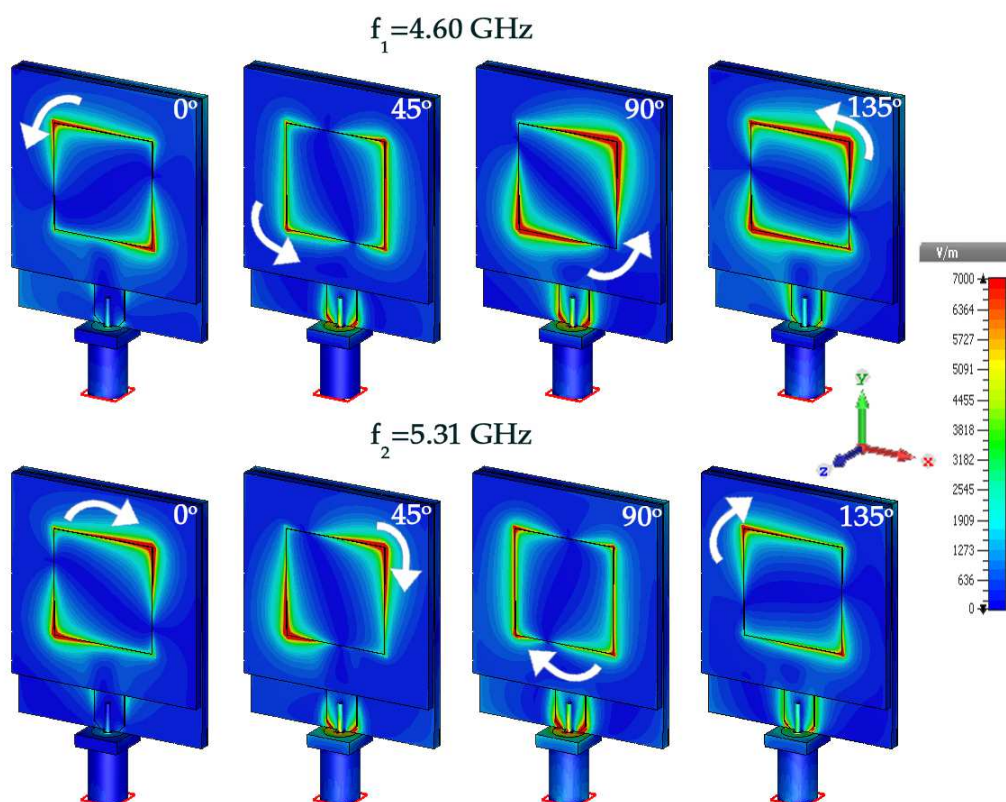
υλικό στις δύο διακριτές καταστάσεις λειτουργίας της (απουσία και παρουσία μαγνητικού πεδίου) όπως προέκυψε από την προσομοίωση του H/M μοντέλου. Στην “κατάσταση OFF” η κεραία συντονίζεται στα 5.68 GHz, ενώ με την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου $H_o = 1750$ Oe κατά τη διεύθυνση +z (κάθεται στην επιφάνεια της κεραίας) εμφανίζονται δύο συντονισμοί. Το υπολογιστικό πακέτο CST Microwave Studio θεωρεί ότι το δοκίμιο YIG είναι απείρων διαστάσεων και το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του ισούται με το εξωτερικό εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο. Στην πραγματικότητα, λόγω των πεπερασμένων διαστάσεων του δοκιμίου δημιουργείται ένα πεδίο απομαγνήτισης στο εσωτερικό του υλικού το οποίο αντιτίθεται στο εφαρμοζόμενο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο με αποτέλεσμα να μην ισχύει η παραπάνω θεώρηση. Για τη μελέτη της επίδρασης των διαστάσεων του φερριτικού δείγματος στην απόκριση συχνότητας της κεραίας, έγινε διόρθωση της τιμής του μαγνητικού πεδίου που θέτουμε στο υπολογιστικό πακέτο έτσι ώστε η συχνότητα γυρομαγνητικού συντονισμού που χρησιμοποιεί ο επιλύτης να συμπίπτει με την αντίστοιχη συχνότητα που προκύπτει από την εξίσωση του Kittel (2.16) και προσομοιώθηκαν δύο διαφορετικές περιπτώσεις στην “κατάσταση ON”. Στην πρώτη περίπτωση, πραγματοποιείται ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση πλήρους κύματος θεωρώντας ένα δείγμα YIG απείρων διαστάσεων ($\omega_r = \omega_o$) και εμφανίζονται συντονισμοί στις συχνότητες $f_1 = 4.4$ GHz και $f_2 = 5.25$ GHz, αντίστοιχα.



Σχήμα 4.2: Συντελεστής ανάκλασης S_{11} της κεραίας μικροταινιακού καλύμματος με σύζευξη γειτνίασης και ενσωματωμένο μαγνητο-διηλεκτρικό υλικό όπως προέκυψε από την προσομοίωση (“κατάσταση OFF” και “κατάσταση ON”). Απεικόνιση της επίδρασης των πεπερασμένων διαστάσεων του δείγματος στον συντελεστή ανάκλασης.

Στη δεύτερη περίπτωση, η προσομοίωση επαναλαμβάνεται λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο απομαγνήτισης το οποίο εμφανίζεται λόγω των πεπερασμένων διαστάσεων του δείγματος ($\omega_r \neq \omega_o$) και οι δύο συντονισμοί μετατοπίζονται σε υψηλότερες συχνότητες (Σχήμα 4.2). Επομένως, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη η επίδραση του σχήματος του φερριτικού δείγματος ώστε να βελτιωθεί η ακρίβεια των αριθμητικών αποτελεσμάτων και να περιοριστούν οι αποκλίσεις μεταξύ προσομοίωσης και μετρήσεων.

Επιπρόσθετα, η μετάβαση από την “κατάσταση OFF” στην “κατάσταση ON” οδηγεί σε μεταβολή της πόλωσης της κεραίας από γραμμική σε κυκλική. Αυτό υποδεικνύεται από την απεικόνιση του μέτρου του ηλεκτρικού πεδίου (E-field) σε διαφορετικές φάσεις (για παράδειγμα 0° , 45° , 90° , 135°) στην επιφάνεια της κεραίας στις δύο συχνότητες συντονισμού της στην “κατάσταση ON”. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.3, το ηλεκτρικό πεδίο περιστρέφεται κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού (παρατηρητής προς την κατεύθυνση διάδοσης) στη χαμηλότερη συχνότητα ($f_1 = 4.60$ GHz) και κατά την αντίθετη φορά στην υψηλότερη συχνότητα ($f_2 = 5.31$ GHz) υποδηλώνοντας δεξιόστροφη και αριστερόστροφη κυκλική πόλωση αντίστοιχα. Το γεγονός



Σχήμα 4.3: Ηλεκτρικό πεδίο (E-field) σε τέσσερις διαφορετικές φάσεις (0° , 45° , 90° , 135°) στην επιφάνεια του μικροταινιακού καλύμματος στις δύο συχνότητες συντονισμού της κεραίας για $H_o = 1750$ Oe. Τα βέλη λευκού χρώματος δείχνουν τη στροφή του ηλεκτρικού πεδίου.

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά λειτουργίας της κεραίας στην αμαγνήτιστη κατάσταση και στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση για εσωτερικό πεδίο $H_o = 1750$ Oe, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση του ηλεκτρομαγνητικού μοντέλου.

Κατάσταση Λειτουργίας	f_{res}^* (GHz)	f_{res}^{**} (GHz)	AR (dB)	Στροφή Πόλωσης	η_{rad}	Κέρδος (dB)
OFF	5.68	-	40	Γραμμική	99%	6.7
ON	4.40	4.60	4.25	Δεξιόστροφη	97%	6.4
	5.25	5.31	2.63	Αριστερόστροφη	98%	6.6

* Συχνότητα συντονισμού της κεραίας για φερριτικό δείγμα απείρων διαστάσεων.

** Συχνότητα συντονισμού της κεραίας λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της ανισοτροπίας σχήματος.

ότι η μετάβαση από την “κατάσταση OFF” στην “κατάσταση ON” οδηγεί στη δημιουργία μη επικαλυπτόμενων ζωνών συχνοτήτων λειτουργίας καθώς και σε μεταβολή της πόλωσης της κεραίας οφείλεται στην αλληλεπίδραση των πεδίων εντός της κοιλότητας της κεραίας με το πολωμένο φερριτικό δείγμα.

Παρόλο που το μέγεθος του φερριτικού δείγματος είναι μικρό συγκριτικά με τις διαστάσεις του καλύμματος, είναι εφικτή η δυνατότητα ελέγχου της συχνότητας συντονισμού και της πόλωσης της κεραίας. Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι η απόδοση ακτινοβολίας και το κέρδος της κεραίας στην κατεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας μεταβάλλονται ελάχιστα με την εφαρμογή του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου (Πίνακας 4.2). Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της κεραίας που παρατίθενται στον Πίνακα 4.2 και αφορούν την “κατάσταση ON” αντιστοιχούν στη δεύτερη περίπτωση μελέτης (στην οποία οι συχνότητες συντονισμού της κεραίας προσδιορίστηκαν λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της ανισοτροπίας σχήματος).

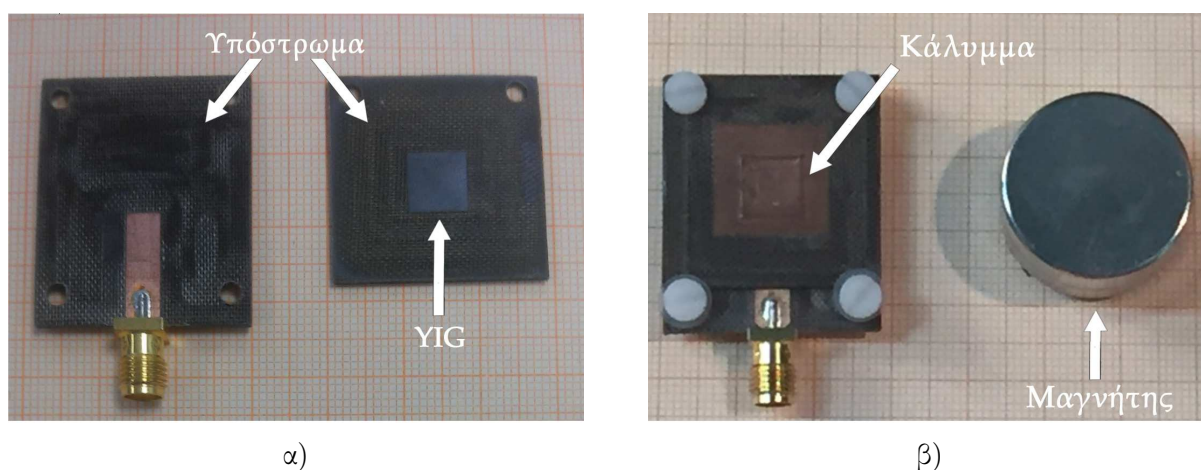
4.3 Υλοποίηση Εργαστηριακού Πρωτοτύπου

Το εργαστηριακό πρωτότυπο της κεραίας υλοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ασύρματων Επικοινωνιών του Ινστιτούτου Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του ΕΚΕΦΕ “Δημόκριτος”. Η προτεινόμενη κεραία κατασκευάστηκε με τη βοήθεια ενός ειδικού εκτυπωτή τυπωμένων κυκλωμάτων (Printed Circuit Board - PCB plotter) της εταιρίας LPKF Laser & Electronics που παρέχει τη δυνατότητα υλοποίησης τυπωμένων κεραίων με μεγάλη ακρίβεια και ταυτόχρονα γρήγορα (Σχήμα 4.4). Επιπρόσθετα, ο συγκεκριμένος εκτυπωτής τυπωμένων κυκλωμάτων έχει τη δυνατότητα να δημιουργεί εσοχές μεγάλης ακρίβειας στο υπόστρωμα επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την ενσωμάτωση κομματιών από μαγνητο-διηλεκτρικό υλικό στο εργαστηριακό πρωτότυπο της κεραίας.

Στο Σχήμα 4.5 απεικονίζεται το ανώτερο και το κατώτερο υπόστρωμα του εργαστηριακού πρωτοτύπου, τα οποία ενώνονται για να σχηματιστεί η τελική κεραία. Ο ομοαξονικός συνδετήρας SMA συγκολλήθηκε στο άκρο της μικροταινιοακής γραμμής τροφοδοσίας για τις μετρήσεις των χαρακτηριστικών εμπέδησης εισόδου και ακτινοβολίας της κεραίας. Για την ένωση των δύο υποστρωμάτων χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις βίδες από πλαστικό.



Σχήμα 4.4: Ειδικός εκτυπωτής τυπωμένων κυκλωμάτων (αριστερά) και η κεφαλή χάραξης (δεξιά) που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των τυπωμένων αναδιαρθρώσιμων μικροταινιακών κεραίων με ενσωματωμένο μαγνητο-διηλεκτρικό υλικό.



Σχήμα 4.5: Εργαστηριακό πρωτότυπο της προτεινόμενης αναδιαρθρώσιμης κεραίας: α) τα δύο κατασκευαστικά τμήματα, β) η εμπρόσθια όψη της κεραίας και οι μόνιμοι μαγνήτες που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή στατικού μαγνητικού πεδίου.

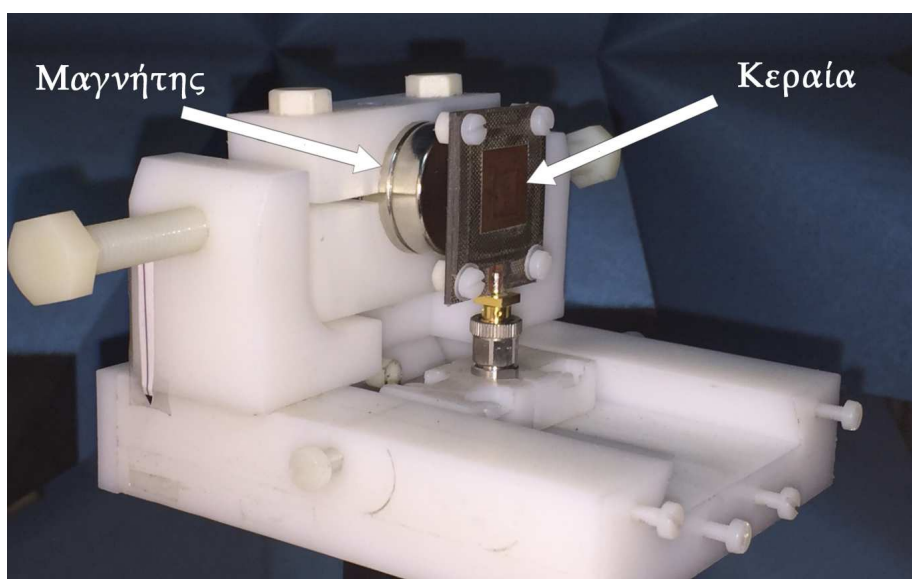
4.4 Συγκριτική Μελέτη Αριθμητικών και Πειραματικών Αποτελεσμάτων

Το εργαστηριακό πρωτότυπο της προτεινόμενης κεραίας κατασκευάστηκε και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του συντελεστή ανάκλασης S_{11} στην “κατάσταση OFF” και στην “κατάσταση ON” για διάφορες τιμές του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου στον ανηχικό θάλαμο του ΠΠΤ/Δ. Μια στοιβιά μόνιμων μαγνητών νεοδυμίου (NdFeB) κυλινδρικού σχήματος με διάμετρο 25 mm και ύψος 7 mm, τοποθετήθηκαν κάτω από το επίπεδο γείωσης και κάθετα στην επιφάνεια του υποστρώματος της κεραίας έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί

η επίδρασή τους στα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της κεραίας. Το στατικό μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τους μαγνήτες που χρησιμοποιήθηκαν είναι αρκετά ισχυρό ώστε το δοκίμιο Y101 να είναι πλήρως μαγνητισμένο ($H_o > N_z \cdot 4\pi M_s$). Προκειμένου να μελετηθούν τα χαρακτηριστικά εμπέδησης εισόδου και ακτινοβολίας της κεραίας υπό την επίδραση μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, το εργαστηριακό πρωτότυπο της κεραίας και οι μόνιμοι μαγνήτες τοποθετήθηκαν στην ειδική διάταξη στήριξης που κατασκευάστηκε (Σχήμα 4.6).

Το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο H_α μπορεί να προσδιοριστεί μετρώντας την DC πυκνότητα μαγνητικής ροής στο κέντρο του επιπέδου γείωσης, B_{GND} , του εργαστηριακού πρωτοτύπου τοποθετώντας τη στοιβία μόνιμων μαγνητών σε συγκεκριμένη απόσταση από την κεραία. Πρέπει να σημειωθεί ότι στον αέρα, το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής B [G] είναι ίσο με το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου H [Oe] καθώς ισχύει $B_{GND} = \mu_o H_\alpha$ ($\mu_o = 1$ στο σύστημα μονάδων CGS). Χρησιμοποιώντας ένα μαγνητόμετρο χειρός πραγματοποιούνται μετρήσεις του B_{GND} όταν οι μαγνήτες είναι σε επαφή με το επίπεδο γείωσης της κεραίας (ισχυρότερο εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο) και όταν η απόσταση μεταξύ του επιπέδου γείωσης και των μαγνητών ($d_{AUT-magnets}$) είναι ίση με 2.2 mm, 2.3 mm και 2.5 mm. Η ποσότητα B_{GND} ισούται με 4.50 kG όταν $d_{AUT-magnets} = 0$ mm και με 4.12 kG, 4.20 kG, 4.28 kG όταν $d_{AUT-magnets} = 2.2$ mm, 2.3 mm και 2.5 mm αντίστοιχα.

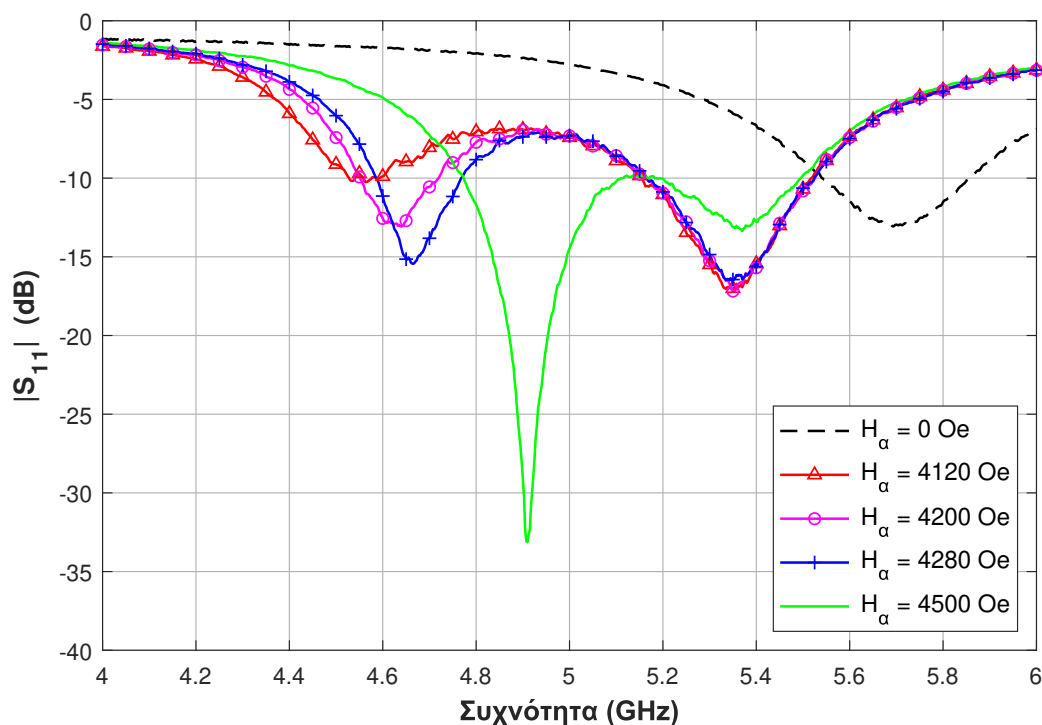
Στο σχήμα 4.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις του συντελεστή ανάκλασης στις δύο καταστάσεις λειτουργίας της κεραίας. Είναι προφανές ότι η ενσωμάτωση του μαγνητο-διηλεκτρικού υλικού στο υπόστρωμα της κεραίας σε συνδυασμό με την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου οδηγεί στη μετατόπιση της αρχικής συχνότητας συντονισμού και την ταυτόχρονη δημιουργία ενός δεύτερου συντονισμού. Συγκεκριμένα,



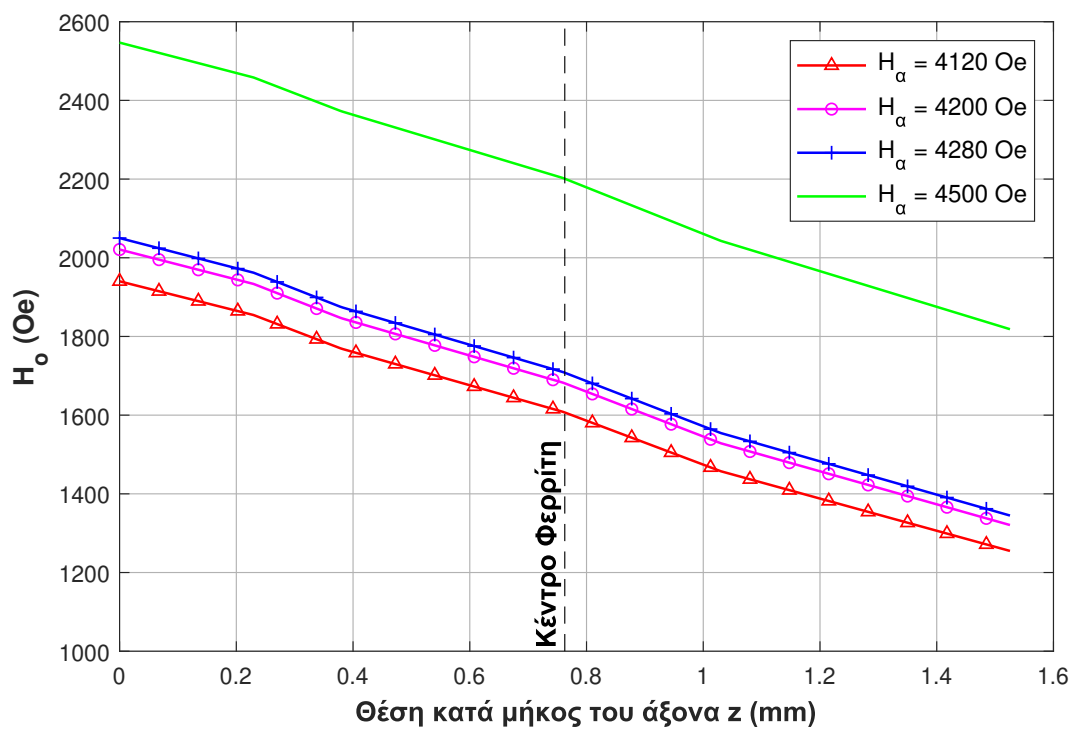
Σχήμα 4.6: Το εργαστηριακό πρωτότυπο της κεραίας και ο μαγνήτης κυλινδρικού σχήματος τοποθετημένα στην ειδική διάταξη στήριξης για την πραγματοποίηση μετρήσεων υπό την παρουσία μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.

στην “κατάσταση OFF” η κεραία συντονίζεται στα 5.69 GHz, ενώ στην “κατάσταση ON” ο πρώτος συντονισμός εμφανίζεται στην περιοχή συχνοτήτων 4.5-4.7 GHz και ο δεύτερος παραμένει σταθερός στα 5.35 GHz. Η αύξηση του μαγνητικού πεδίου προκαλεί μετατόπιση του πρώτου συντονισμού σε υψηλότερες συχνότητες.

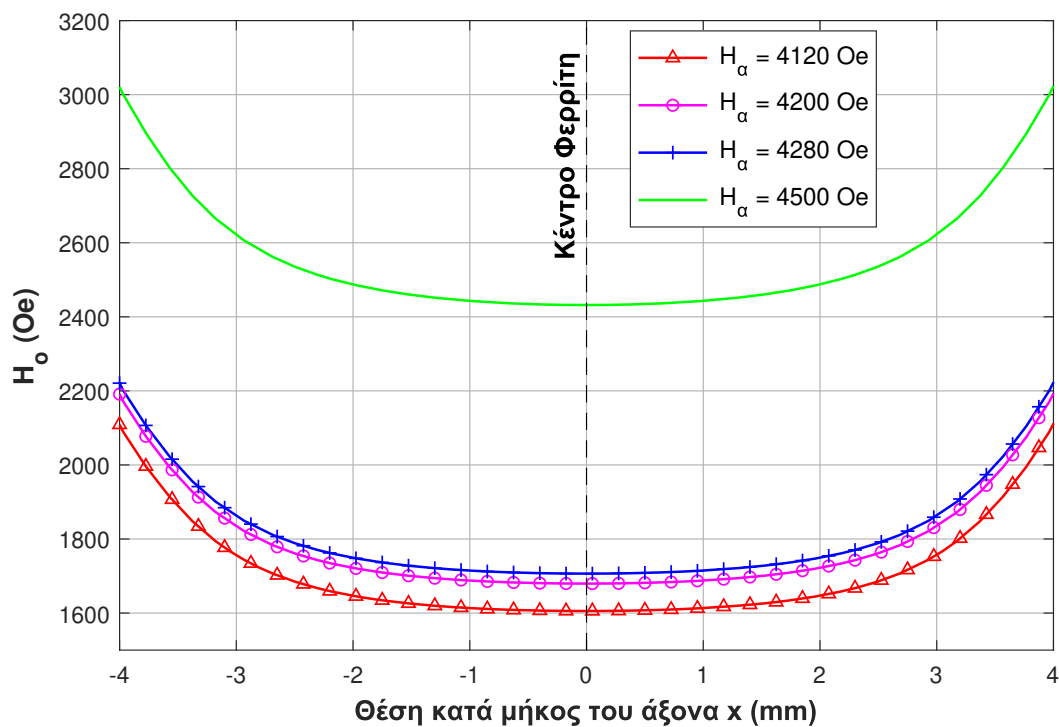
Για τη συγκριτική μελέτη μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την προσομοίωση του H/M μοντέλου και τις μετρήσεις του εργαστηριακού πρωτοτύπου, είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του φερριτικού δείγματος, H_o , και στη συνέχεια να οριστεί στο γυροτροπικό μοντέλο στον χρονο-μεταβατικό επιλύτη του CST Microwave Studio. Το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του δείγματος μπορεί να προσδιοριστεί με τη βοήθεια του μαγνητοστατικού επιλύτη του CST EM Studio. Η προτεινόμενη προσέγγιση (η οποία βασίζεται στην εργασία [82]) είναι η εξής: 1) Σχεδίαση της προτεινόμενης κεραίας και των μόνιμων μαγνητών στο μαγνητοστατικό μοντέλο, 2) Εισαγωγή όλων των δεδομένων που απαιτούνται για τη μαγνητοστατική ανάλυση, όπως είναι τα φυσικά χαρακτηριστικά των μόνιμων μαγνητών που χρησιμοποιούνται για την πόλωση του φερριτικού υλικού και τα δεδομένα του βρόχου υστέρησης B-H (πυκνότητα μαγνητικής ροής συναρτήσει του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου H_a) του φερριτικού δείγματος Y101 ο οποίος καταγράφηκε στο Εργαστήριο Υπεραγωγών και Μαγνητικών Οξειδίων του Ινστιτούτου Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας του ΕΚΕΦΕ “Δημόκριτος” (INN/Δ), με χρήση της διάταξης Superconducting Quantum Interference Device (SQUID) της εταιρείας Quantum



Σχήμα 4.7: Επίδραση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου H_a στον συντελεστή ανάκλασης S_{11} της προτεινόμενης αναδιάρθρωσιμης κεραίας, όπως προέκυψε από τις μετρήσεις.

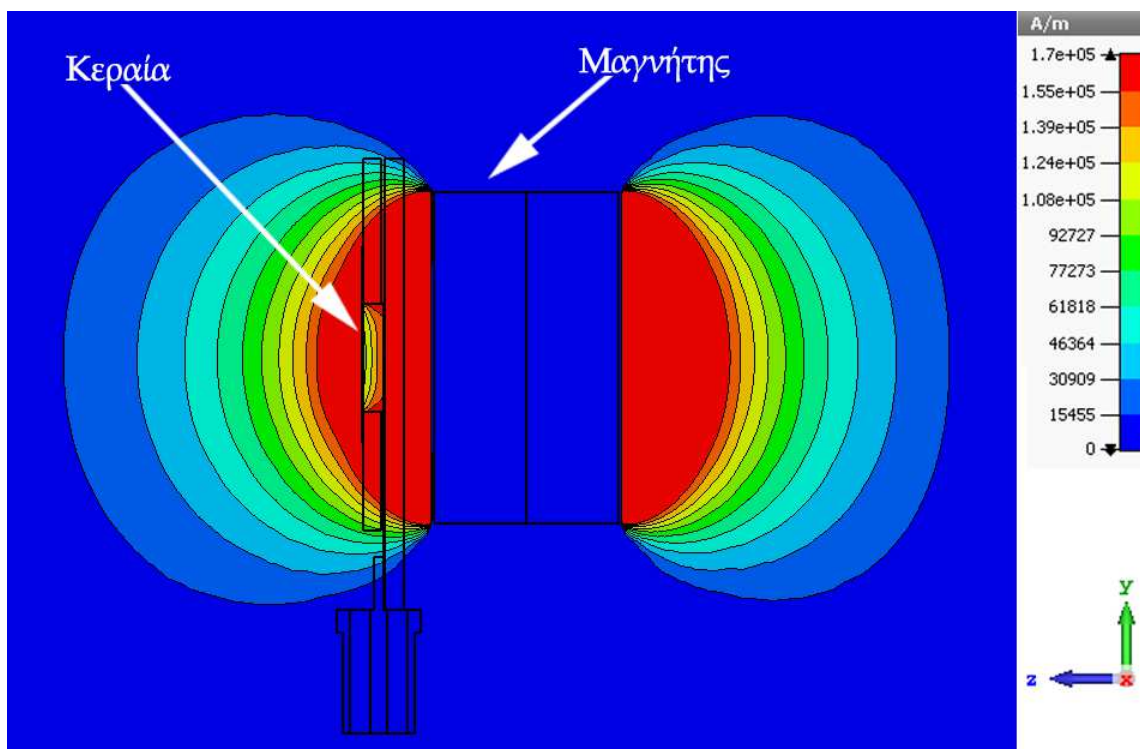


α)

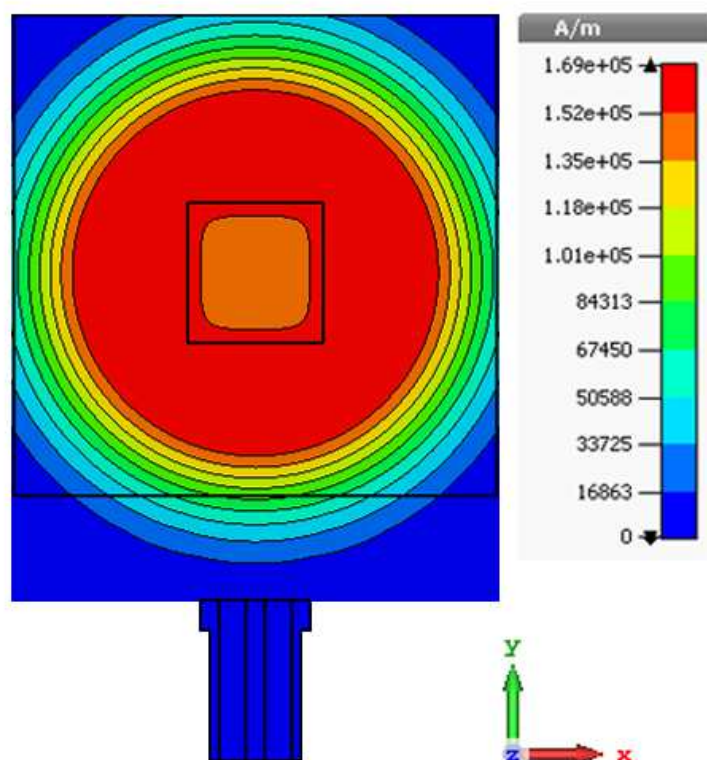


β)

Σχήμα 4.8: Προσδιορισμός του μαγνητικού πεδίου H_0 στο εσωτερικό του φερριτικού δείγματος Y101 κατά μήκος του α) άξονα z και β) άξονα x για διάφορες τιμές εξωτερικού μαγνητικού πεδίου H_α .



α)



β)

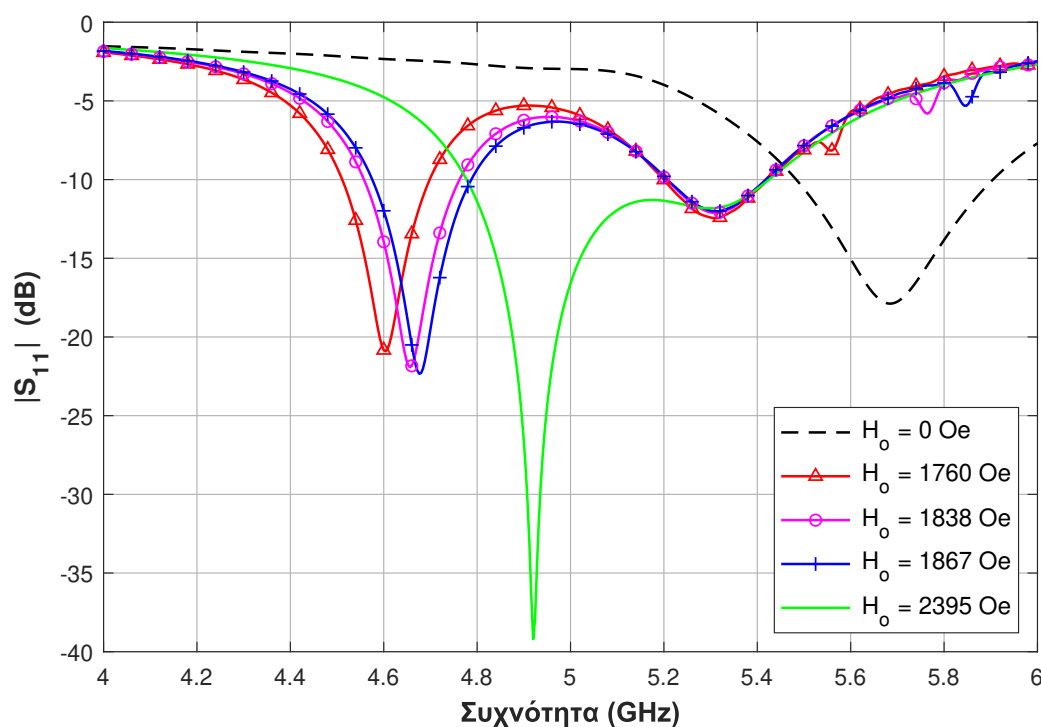
Σχήμα 4.9: Κατανομή μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του φερριτικού δείγματος YIG στο α) επίπεδο yz και β) επίπεδο xy .

Πίνακας 4.3: Μαγνητική επαγωγή στο επίπεδο γείωσης, B_{GND} , του εργαστηριακού πρωτοτύπου της κεραίας και το αντίστοιχο μέσο πεδίο πόλωσης στο εσωτερικό του YIG, $H_{o_{aver}}$.

Απόσταση μαγνήτη-κεραίας	B_{GND} (kG)	$H_{o_{aver}}$ (Oe)
0 mm	4.50	2395
2.2 mm	4.28	1867
2.3 mm	4.20	1838
2.5 mm	4.12	1760

Design (MPMS), και 3) Μαγνητοστατική ανάλυση.

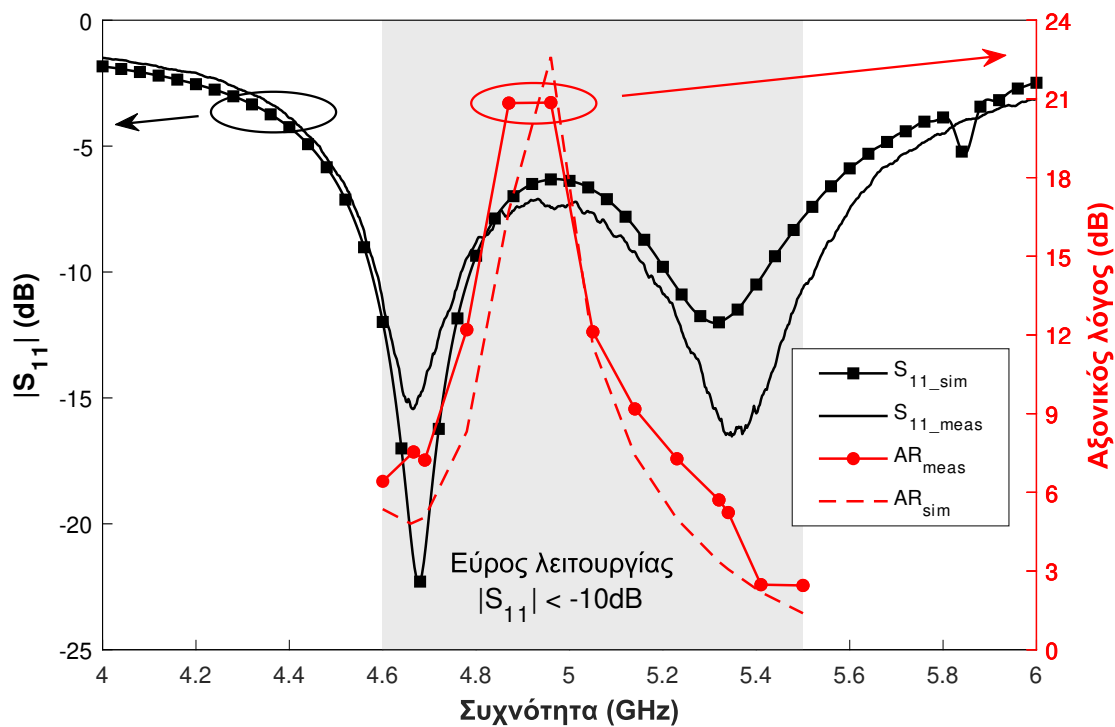
Το Σχήμα 4.8 δείχνει τις μεταβολές της συνιστώσας H_z του μαγνητικού πεδίου (H-field) στο κέντρο του φερριτικού δείγματος Y101 κατά μήκος του άξονα x και άξονα z , όπως προέκυψαν από τη μαγνητοστατική ανάλυση, για διάφορες τιμές του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου H_α . Η διδιάστατη απεικόνιση της κατανομής του H-field στα επίπεδα yz και xy φαίνεται στο Σχήμα 4.9. Είναι προφανές ότι το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του δείγματος μεταβάλλεται σημαντικά κατά μήκος του άξονα z , σε αντίθεση με το επίπεδο xy όπου είναι σχεδόν σταθερό. Λόγω του λεπτού πάχους του φερριτικού δείγματος ($h_{yig} \ll x_{yig} = 8$ mm,



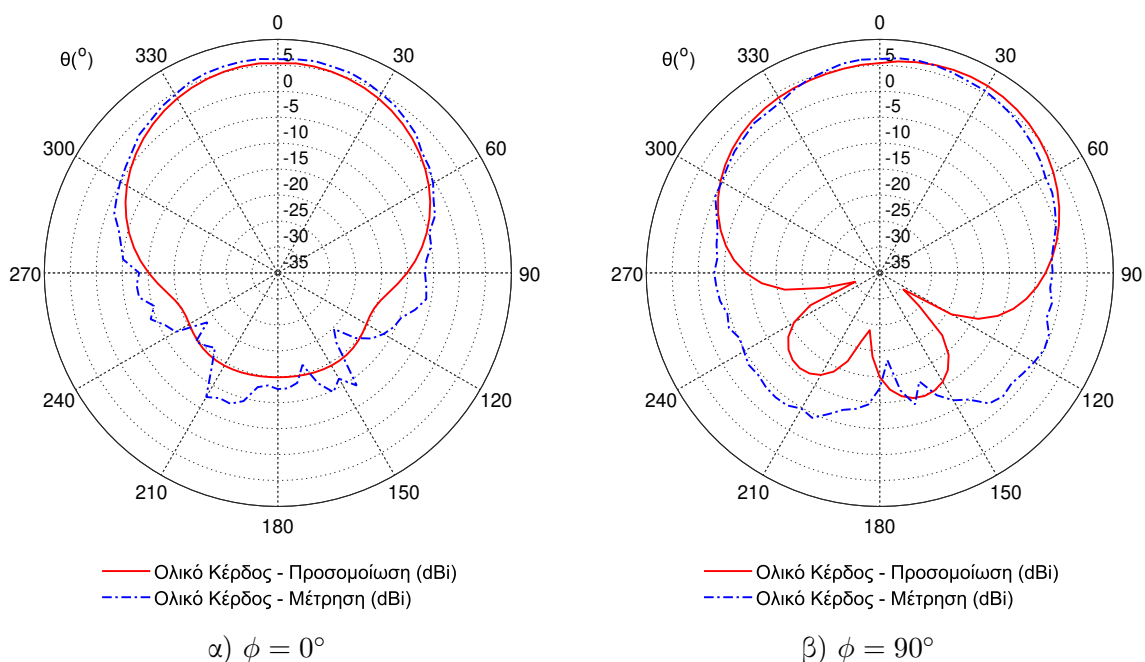
Σχήμα 4.10: Επίδραση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου H_α στο μέτρο του συντελεστή ανάκλασης $|S_{11}|$ της προτεινόμενης αναδιάρθρωσιμης κεραίας, όπως προέκυψε από την προσομοίωση του H/M μοντέλου.

όπου x_{yig} είναι η διάσταση του δείγματος YIG κατά μήκος του άξονα x), υπολογίστηκε ο μέσος όρος των τιμών του μαγνητικού πεδίου μέσα στο δείγμα αντί να χωριστεί το φερριτικό δείγμα σε διαφορετικές ζώνες (όπως αναφέρεται στην προτεινόμενη διαδικασία H/M μοντελοποίησης στο Σχήμα 3.9).

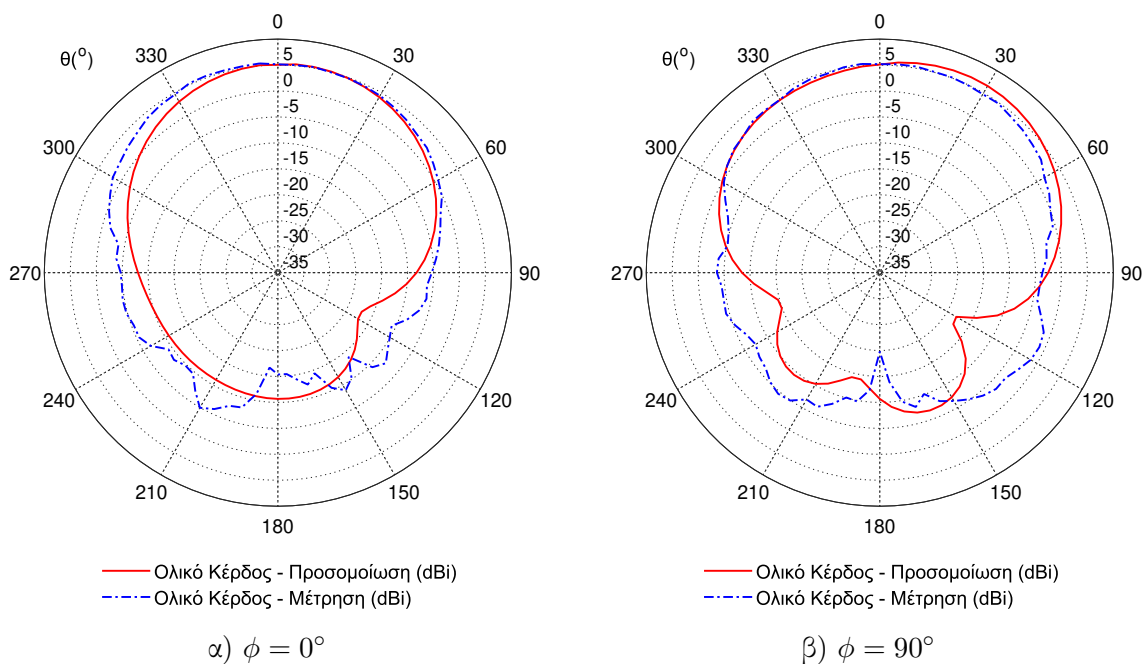
Στη συνέχεια, πραγματοποιείται ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση της κεραίας χρησιμοποιώντας τις μέσες τιμές του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του φερριτικού δείγματος, H_{oaver} , που προέκυψαν σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία (Πίνακας 4.3). Όπως αναμενόταν, η εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου κάθετα στην επιφάνεια της κεραίας, οδηγεί στην εμφάνιση δύο ζωνών λειτουργίας (Σχήμα 4.10). Από τη σύγκριση των διαγραμμάτων των Σχημάτων 4.7 και 4.10, προκύπτει καλή συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων προσομοίωσης και μέτρησης. Μεταβάλλοντας το πεδίο πόλωσης, επιτυγχάνεται μεταβολή της συχνότητας συντονισμού της κεραίας. Επιπρόσθετα, μελετήθηκε αν η μετάβαση από την αμαγνήτιστη στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση οδηγεί σε μεταβολή της πόλωσης της προτεινόμενης κεραίας. Διαπιστώθηκε ότι η πόλωση από γραμμική (αμαγνήτιστη κατάσταση) γίνεται ελλειπτική στην κάτω ζώνη λειτουργίας και κυκλική στην άνω ζώνη (AR = 3 dB). Συγκεκριμένα, ο αξονικός λόγος κυμαίνεται από 1.39 dB έως 22.59 dB στο εύρος συχνοτήτων 4.6 – 5.5 GHz (Σχήμα 4.11). Οι μικρές αποκλίσεις που παρατηρούνται πιθανώς οφείλονται στη μη ακριβή ευθυγράμμιση της κεραίας κατά τη διάρκεια



Σχήμα 4.11: Αξονικός λόγος της προτεινόμενης κεραίας στο συχνοτικό εύρος λειτουργίας 4.6 – 5.5 GHz ($H_o = 1867$ Oe), όπως προέκυψε από την προσομοίωση του H/M μοντέλου και τις μετρήσεις.



Σχήμα 4.12: Διαγράμματα ακτινοβολίας της προτεινόμενης κεραίας στη συχνότητα συντονισμού $f_{res} = 5.68$ GHz στην αμαγνήτιστη κατάσταση στο α) επίπεδο xz ($\phi = 0^\circ$) και β) επίπεδο yz ($\phi = 90^\circ$), όπως προέκυψαν από την προσομοίωση του H/M μοντέλου και τις μετρήσεις.



Σχήμα 4.13: Διαγράμματα ακτινοβολίας της προτεινόμενης κεραίας στη συχνότητα $f = 5.50$ GHz στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση στο α) επίπεδο xz ($\phi = 0^\circ$) και β) επίπεδο yz ($\phi = 90^\circ$), όπως προέκυψε από την προσομοίωση του H/M μοντέλου και τις μετρήσεις.

των μετρήσεων.

Τα κανονικοποιημένα διαγράμματα ολικού κέρδους της προτεινόμενης κεραίας στα επίπεδα xz και yz στις δύο καταστάσεις λειτουργίας απεικονίζονται στα Σχήματα 4.12 και 4.13 αντίστοιχα. Η συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις και τις μετρήσεις είναι ικανοποιητική. Σύμφωνα με τις μετρήσεις, το μέγιστο κέρδος της κεραίας μειώνεται περίπου κατά 1 dB μεταξύ των δύο καταστάσεων λειτουργίας, υποδηλώνοντας μικρή υποβάθμιση της απόδοσης ακτινοβολίας της κεραίας στην “κατάσταση ON”. Οι διαφορές που παρατηρούνται στον οπίσθιο λοβό ακτινοβολίας (επίπεδο yz) ανάμεσα στα αριθμητικά και μετρητικά αποτελέσματα οφείλονται σε πιθανές ανακλάσεις στη διάταξη στήριξης της κεραίας και/ή την πιθανή ακτινοβολία από το καλώδιο τροφοδοσίας. Συμπερασματικά, η καλή συμφωνία που παρατηρήθηκε μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των μετρήσεων επιβεβαιώνει την αναδιρθρωσιμότητα της κεραίας με τη χρήση μαγνητο-διηλεκτρικών υλικών και την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου καθώς και την αξιοπιστία της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

4.5 Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάστηκε η σχεδίαση και υλοποίηση μιας αναδιρθώσιμης κεραίας με χρήση μαγνητο-διηλεκτρικού υλικού (συγκεκριμένα φερριτικού υλικού) για εφαρμογές ασύρματων δικτύων στη ζώνη συχνοτήτων 5 GHz. Ένα συμπαγές τετραγωνικό δοκίμιο YIG, το οποίο είναι εμπορικά διαθέσιμο από την εταιρεία Temex, ενσωματώθηκε στο ανώτερο διηλεκτρικό υπόστρωμα μιας κεραίας μικροταινιακού καλύμματος με τροφοδοσία σύζευξης γειννίας και μελετήθηκε η δυνατότητα μεταβολής της συχνότητας συντονισμού και της πόλωσής της με ελεγχόμενο τρόπο υπό την επίδραση μεταβαλλόμενου εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο μπορεί να θεωρηθεί ως ένας “μηχανισμός μεταγωγής” που επιτρέπει τη μετάβαση του φερριτικού υλικού μεταξύ δύο καταστάσεων μαγνήτισης και συνεπώς τη λειτουργία της κεραίας σε δύο διακριτές καταστάσεις, την “κατάσταση OFF” (το δοκίμιο YIG είναι αμαγνήτιστο) και την “κατάσταση ON” (το δοκίμιο βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού).

Λαμβάνοντας υπόψη τους κρίσιμους παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια των αριθμητικών αποτελεσμάτων, πραγματοποιήθηκαν H/M προσομοιώσεις της προτεινόμενης κεραίας ακολουθώντας τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3. Διαπιστώθηκε ότι η μετάβαση από την “κατάσταση OFF” στην “κατάσταση ON” οδηγεί στη δημιουργία δύο μη επικαλυπτόμενων ζωνών συχνοτήτων λειτουργίας καθώς και στη μεταβολή της πόλωσης της κεραίας από γραμμική σε ελλειπτική στην κάτω ζώνη λειτουργίας και από γραμμική σε κυκλική στην άνω ζώνη λειτουργίας της. Επιπλέον, η στροφή της πόλωσης είναι αντίθετη στις δύο ζώνες λειτουργίας της κεραίας. Στην περίπτωση εφαρμογής μαγνητικού πεδίου κατά τη θετική διεύθυνση του άξονα z (κάθεται στο επίπεδο της κεραίας), παρατηρήθηκε ότι η στροφή της πόλωσης είναι δεξιόστροφη στην κάτω ζώνη και αριστερόστροφη στην άνω ζώνη

λειτουργίας. Ένα ακόμα στοιχείο που προέκυψε από την παραπάνω μελέτη είναι η μείωση του κέρδους της κεραίας κατά περίπου 1 dB μεταξύ των δύο καταστάσεων λειτουργίας, γεγονός που υποδηλώνει υποβάθμιση της απόδοσης ακτινοβολίας της κεραίας στην “κατάσταση ON”.

Συνοψίζοντας, η επίτευξη αναδιαρθρωσιμότητας της προτεινόμενης κεραίας οφείλεται στην αλληλεπίδραση των πεδίων εντός της κοιλότητάς της με το πολωμένο φερριτικό δείγμα. Η καλή συμφωνία που παρατηρήθηκε μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των μετρήσεων επιβεβαιώνει την αξιοπιστία της προτεινόμενης μεθοδολογίας για τη σχεδίαση και ηλεκτρομαγνητική μοντελοποίηση αναδιαρθρώσιμων κεραιών που έχουν ενσωματωμένα στη δομή τους φερριτικά υλικά. Ωστόσο, θα πρέπει να γίνει αναφορά στις κατασκευαστικές δυσκολίες που παρουσιάζει η υλοποίηση της προτεινόμενης αναδιαρθρώσιμης κεραίας. Αυτές σχετίζονται, κατά κύριο λόγο, με τη δυσκολία ενσωμάτωσης με ακρίβεια του συμπαγούς φερριτικού δοκιμίου συγκεκριμένων διαστάσεων στο διηλεκτρικό υπόστρωμα της κεραίας.

Κεφάλαιο 5

Καταπίεση Αμοιβαίας Σύζευξης σε Συστήματα Πολλαπλών Κεραιών

Το Κεφάλαιο 5 εστιάζει στην ανάπτυξη μιας τεχνικής καταπίεσης της αμοιβαίας σύζευξης σε συστήματα πολλαπλών κεραιών η οποία βασίζεται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν τα μαγνητο-διηλεκτρικά υλικά υπό την επίδραση εξωτερικού στατικού μαγνητικού πεδίου. Παρά το γεγονός ότι η χρήση πολλαπλών κεραιών μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ποιότητα της ασύρματης ζεύξης και τη χωρητικότητα του συστήματος, η σχεδίαση και η πρακτική υλοποίηση ενός συστήματος πολλαπλών εισόδων - πολλαπλών εξόδων (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) παρουσιάζει αρκετές προκλήσεις. Λόγω των απαιτήσεων για όσο το δυνατόν συμπαγέστερα κινητά τερματικά, είναι αναπόφευκτη η τοποθέτηση των πολλαπλών κεραιών σε αρκετά μικρή απόσταση μεταξύ τους με αποτέλεσμα την εμφάνιση ισχυρής αμοιβαίας σύζευξης.

Το παρόν Κεφάλαιο δομείται ως εξής. Αρχικά, στην ενότητα §5.1 γίνεται αναφορά στις τεχνικές που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για την καταπίεση του ανεπιθύμητου φαινομένου της αμοιβαίας σύζευξης. Ακολουθεί η περιγραφή της προτεινόμενης τεχνικής η οποία βασίζεται στην ενσωμάτωση μαγνητο-διηλεκτρικών υλικών στο κοινό υπόστρωμα ενός συστήματος δύο κεραιών (§5.2). Στην ενότητα §5.3 περιγράφεται η κεραία μικροταινιακού καλύμματος που χρησιμοποιείται για τη σχεδίαση του προτεινόμενου συστήματος δύο κεραιών καθώς και παρατίθενται τα αριθμητικά και τα πειραματικά δεδομένα που αποδεικνύουν τη δυνατότητα αναδιαρθρωσιμότητάς της. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδίασης του προτεινόμενου συστήματος και μελετάται η δυνατότητα περιορισμού της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ των στοιχείων του για τις διάφορες καταστάσεις μαγνήτισης των δύο μαγνητο-διηλεκτρικών δειγμάτων. Προκειμένου να επιβεβαιωθεί πειραματικά η μείωση της αμοιβαίας σύζευξης όταν οι κεραίες είναι τοποθετημένες σε απόσταση μικρότερη από $\lambda/2$, το προτεινόμενο σύστημα κατασκευάστηκε και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των παραμέτρων σκέδασης (§5.4).

5.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση για τις Τεχνικές Καταπίεσης Αμοιβαίας Σύζευξης

Οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, βελτίωση της ποιότητας υπηρεσιών και της αξιοπιστίας της ασύρματης ζεύξης σε συνδυασμό με την ανάγκη για αποδοτικότερη αξιοποίηση του φάσματος συχνοτήτων οδήγησαν στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών. Μια πολλά υποσχόμενη λύση στις προαναφερθέντες απαιτήσεις αποτελεί η χρήση της τεχνολογίας MIMO. Τα συστήματα MIMO αποτελούνται από πολλαπλές κεραιές στον πομπό και στον δέκτη και παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τα κλασικά συστήματα Μονής Εισόδου - Μονής Εξόδου (Single Input - Single Output, SISO). Παρέχουν τη δυνατότητα αντιμετώπισης του φαινομένου των διαλείψεων πολλαπλών διαδρομών (multipath fading) καθώς συνδυάζοντας κατάλληλα τα λαμβανόμενα σήματα στον δέκτη είναι δυνατόν να επιτευχθεί σημαντική αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και της απόδοσης του συστήματος χωρίς να απαιτείται αύξηση του εύρους ζώνης συχνοτήτων [83]. Η αύξηση της χωρητικότητας του ασύρματου καναλιού είναι ανάλογη του αριθμού των κεραιών στον πομπό και στον δέκτη.

Η αμοιβαία σύζευξη είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο το οποίο εμφανίζεται όταν η απόσταση μεταξύ των στοιχείων είναι μικρότερη του ημίσεος μήκους κύματος ($d < \lambda/2$) [84]. Στις περισσότερες περιπτώσεις, θεωρείται ανεπιθύμητη καθώς οδηγεί σε αύξηση της συσχέτισης μεταξύ των σημάτων και υποβάθμιση της απόδοσης του συστήματος [85]. Επιπλέον, μπορεί να τροποποιήσει το διάγραμμα ακτινοβολίας, το κέρδος και τη χαρακτηριστική αντίσταση εισόδου των κεραιο-στοιχείων του συστήματος. Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες αυτό το φαινόμενο μπορεί να βελτιώσει τη χωρητικότητα του καναλιού [86]. Η επίτευξη ελάχιστης αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ των πολλαπλών στοιχείων του συστήματος ακόμα και όταν είναι τοποθετημένα σε αρκετά μικρή απόσταση μεταξύ τους αποτελεί μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις. Εκτός από την απόσταση μεταξύ των στοιχείων η οποία είναι η πιο κρίσιμη παράμετρος, άλλοι παράγοντες που σχετίζονται με την εμφάνιση αμοιβαίας σύζευξης είναι ο προσανατολισμός των κεραιών, η παρουσία σχεδαστών στο κοντινό πεδίο των στοιχείων του συστήματος καθώς και η τιμή της σχετικής διηλεκτρικής επιτρεπτότητας και του πάχους του υποστρώματος στην περίπτωση των κεραιών μικροταινιακού καλύμματος (συγκεκριμένα, υψηλές τιμές ϵ_r και h μπορεί να οδηγήσουν σε ισχυρότερη αμοιβαία σύζευξη) [84]. Η αμοιβαία σύζευξη πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη σχεδίαση και μοντελοποίηση του συστήματος πολλαπλών κεραιών. Επιπλέον, είναι σημαντικό να προσδιορίζεται η αιτία εμφάνισης της σύζευξης μεταξύ των στοιχείων του συστήματος προκειμένου να εφαρμόζεται η κατάλληλη τεχνική καταπίεσης αυτού του φαινομένου.

Η αμοιβαία σύζευξη μεταξύ των γειτονικών στοιχείων i και j μπορεί να προσδιοριστεί με τη βοήθεια της παραμέτρου σχεδασίας $S_{ji} = -20\log_{10}(|S_{ji}|)$ στη συχνότητα λειτουργίας

του συστήματος όταν το ένα στοιχείο διεγείρεται και το άλλο είναι τερματισμένο στη χαρακτηριστική αντίσταση των 50 Ω. Στην περίπτωση αμοιβαιότητας (reciprocity), όπου τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της κεραίας παραμένουν ίδια είτε η κεραία λειτουργεί ως πομπός είτε ως δέκτης, οι παράμετροι μετάδοσης S_{ij} και S_{ji} ταυτίζονται ($S_{ij} = S_{ji}$). Στην αντίθετη περίπτωση (μη-αμοιβαιότητα), όπου τα διαγράμματα εκπομπής και λήψης της κεραίας διαφοροποιούνται, ισχύει $S_{ij} \neq S_{ji}$.

Το γεγονός ότι οι γειτονικές κεραίες πρέπει να είναι όσο το δυνατόν αποσυζευγμένες μεταξύ τους οδήγησε στην εκτεταμένη μελέτη του ανεπιθύμητου φαινομένου της αμοιβαίας σύζευξης και των τρόπων αντιμετώπισής του. Οι τεχνικές καταπίεσης της αμοιβαίας σύζευξης που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία είναι αρκετές και περιλαμβάνουν την τοποθέτηση των κεραιών σε κατάλληλη απόσταση και με τον κατάλληλο προσανατολισμό, τη χρήση δομών ατελούς επιπέδου γείωσης, τη χρήση παρασιτικών στοιχείων, τη χρήση μεταλλικών καθώς και συνδυασμό αυτών των τεχνικών.

Μια αρχική προσέγγιση για την επίτευξη ελάχιστης αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ των γειτονικών στοιχείων αποτελεί η μελέτη όλων των πιθανών θέσεων στις οποίες μπορούν να τοποθετηθούν οι κεραίες σε ένα ασύρματο τερματικό έτσι ώστε να προσδιοριστεί η κατάλληλη απόσταση μεταξύ τους καθώς και η επιλογή του κατάλληλου προσανατολισμού των κεραιών. Στις εργασίες [87, 88], οι συγγραφείς έδειξαν ότι μπορεί να επιτευχθεί χαμηλή σύζευξη ($S_{ji} < -15$ dB) εντός της ζώνης συχνοτήτων ενδιαφέροντος τοποθετώντας τις κεραίες κάθετα μεταξύ τους.

Μια απλή τεχνική αποσύζευξης που χρησιμοποιείται αρκετά συχνά είναι το ατελές επίπεδο γείωσης (Defected Ground Structure, DGS). Η τεχνική αυτή βασίζεται στη δημιουργία ατελειών διαφόρων σχημάτων στο επίπεδο γείωσης ανάμεσα στα γειτονικά στοιχεία, οι οποίες μεταβάλλουν τη ρευματική κατανομή του επιπέδου γείωσης με συνέπεια τη μείωση της αμοιβαίας σύζευξης. Στην [89], οι συγγραφείς πρότειναν τη χάραξη δύο $\lambda/4$ ορθογώνιων εγκοπών (slots) στο επίπεδο γείωσης ανάμεσα σε δύο μονόπολα γεγονός που επέφερε μείωση της αμοιβαίας σύζευξης κατά 20.8 dB και προκάλεσε μικρή παραμόρφωση του διαγράμματος ακτινοβολίας. Εναλλακτικά, στις εργασίες [90], [91] προτείνεται η χάραξη ορθογώνιων ή μαιανδρικών σχισμών (slits) στο επίπεδο γείωσης. Συγκεκριμένα, στην [91] μελετήθηκε η καταπίεση της αμοιβαίας σύζευξης σε διαφορετικές τοπολογίες κεραιών (επίπεδες κεραίες ανεστραμμένης-F γεωμετρίας, μονόπολα, κεραίες μικροταινιακού καλύμματος) με τη χάραξη ορθογώνιων σχισμών. Σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν διαπιστώθηκε μείωση της σύζευξης μεγαλύτερη από 10 dB. Οι Mukhejee et al. [92] μελέτησαν επίσης τη χρήση δομών ατελούς γείωσης. Δύο κεραίες μικροταινιακού καλύμματος τοποθετήθηκαν σε υπόστρωμα με κοινό επίπεδο γείωσης και μια ατέλεια σε σχήμα ορθογώνιου διακεκομμένου δακτυλίου (split-ring DGS) χαραχτηκε ανάμεσα στις δύο κεραίες. Η δημιουργία της συγκεκριμένης ατέλειας οδήγησε σε μείωση της αμοιβαίας σύζευξης ίση με 13.54 dB εντός της ζώνης συχνοτήτων ενδιαφέροντος.

Μια άλλη τεχνική καταπίεσης αμοιβαίας σύζευξης που έχει προταθεί στη βιβλιογραφία

περιλαμβάνει τη χρήση παρασιτικών στοιχείων. Η βασική ιδέα αυτής της τεχνικής είναι η δημιουργία ενός μονοπατιού αντίθετης σύζευξης με στόχο την μείωση της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ των κεραιών. Λόγω της παρουσίας των παρασιτικών στοιχείων, εκτός από το αρχικό μονοπάτι σύζευξης, δημιουργείται ένα μονοπάτι διπλής σύζευξης ανάμεσα στο ένα κεραιοστοιχείο και τα παρασιτικά στοιχεία και ανάμεσα στα παρασιτικά στοιχεία και στο άλλο κεραιοστοιχείο προκαλώντας καταπίεση του ανεπιθύμητου φαινομένου της αμοιβαίας σύζευξης. Οι Li et al. [93] εφάρμοσαν σε κεραιές αποτελούμενες από μία, δύο ή τρεις συμμετρικές σχισμές την τεχνική της τοποθέτησης παρασιτικών μονόπολων και παρατήρησαν μείωση της αμοιβαίας σύζευξης στο εύρος 10–12 dB ανάλογα με τον αριθμό των στοιχείων. Στην [94], οι συγγραφείς πρότειναν τη χρήση παρασιτικών στοιχείων σε συνδυασμό με τη χρήση δύο ορθογωνικά πολωμένων κεραιών μικροταινιακού καλύμματος σχήματος 'H' για να επιτευχθεί η αποσύζευξη των κεραιών.

Επιπλέον, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η χρήση των μεταύλικών όπως είναι οι δομές ηλεκτρομαγνητικού διακένου (Electromagnetic Band Gap, EBG), οι συντονιστές μαιανδρικής γραμμής (Slotted Meander-Like Resonators, SMLRs), οι συντονιστές διακοπόμενου δακτυλίου (Split Ring Resonators, SRRs) και οι τεχνητοί μαγνητικοί αγωγοί (Artificial Magnetic Conductors, AMC). Πρόκειται για τεχνητές περιοδικές δομές οι οποίες έχουν την ικανότητα να ελέγχουν τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε συγκεκριμένη/ες περιοχή/ές συχνοτήτων και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την καταπίεση της αμοιβαίας σύζευξης. Οι Margaret et al. [95] πρότειναν την τοποθέτηση μιας δομής ηλεκτρομαγνητικού διακένου ανάμεσα σε δύο συμμετρικά μονόπολα προκειμένου να βελτιωθεί η απομόνωση μεταξύ των δύο κεραιών. Αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν στην εργασία [96], όπου οι συγγραφείς μελέτησαν τη χρήση δομών EBG και τη χρήση ενός συνδυασμού δομών EBG και DGS. Διαπίστωσαν ότι στη δεύτερη περίπτωση επιτυγχάνεται μεγαλύτερη μείωση της αμοιβαίας σύζευξης.

Ωστόσο, το γεγονός ότι η απόσταση μεταξύ των ακτινοβολούντων στοιχείων πρέπει να είναι μεγαλύτερη από $\lambda_0/3$ προκειμένου να είναι δυνατή η ενσωμάτωση δομών EBG ανάμεσά τους, τις καθιστά μη ελκυστικές σε ορισμένες περιπτώσεις. Στην εργασία [97], οι Rajo-Iglesias et al. πρότειναν την ενσωμάτωση επίπεδων δομών EBG ανάμεσα σε δύο υποστρώματα διηλεκτρικού για τον περιορισμό της αμοιβαίας σύζευξης. Με αυτό τον τρόπο, τα ακτινοβολούντα στοιχεία και οι δομές ηλεκτρομαγνητικού διακένου είναι τοποθετημένα σε διαφορετικό επίπεδο και δεν τίθενται περιορισμοί όσον αφορά την απόσταση μεταξύ των στοιχείων. Επιπρόσθετα, οι Farahani et al. [98] τοποθέτησαν μια δομή EBG ως υπέρστρωμα πάνω από τα ακτινοβολούντα στοιχεία μιας κεραιάς πολλαπλών στοιχείων και παρατήρησαν μείωση της αμοιβαίας σύζευξης κατά 10 dB. Αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσίασαν οι Exposito-Dominguez et al. [99] προτείνοντας άλλους τρόπους ενσωμάτωσης των δομών EBG. Εναλλακτικά, οι Alsath et al. [100] πρότειναν τη χρήση συντονιστή μαιανδρικής γραμμής ο οποίος λειτουργεί σαν φίλτρο απόρριψης ζώνης συχνοτήτων και έχει μικρότερο μέγεθος συγκριτικά με τις δομές ηλεκτρομαγνητικού διακένου. Δύο κεραιές μικροταινιακού

καλύμματος τυπώθηκαν πάνω σε υπόστρωμα σε απόσταση ίση με $\lambda_o/9$ ($\ll \lambda_o/3$, απαιτούμενη απόσταση στην περίπτωση χρήσης δομών EBG) και ανάμεσά τους τοποθετήθηκε μια δομή SMLR. Η ενσωμάτωση της συγκεκριμένης τεχνητής δομής είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της αμοιβαίας σύζευξης κατά 16 dB στη συχνότητα λειτουργίας.

Στην εργασία [101], οι συγγραφείς τοποθέτησαν μια περιοδική δομή αποτελούμενη από συντονιστές διακοπτόμενου δακτυλίου ανάμεσα σε δύο μονόπολα με απόσταση $\lambda_o/8$ μεταξύ τους. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, παρατηρήθηκε μείωση της σύζευξης σχεδόν 20 dB. Άλλα παραδείγματα χρήσης συντονιστών διακοπτόμενου δακτυλίου παρουσιάζονται στις [44], [102].

Τέλος, μια άλλη κατηγορία μεταλλικών που μελετήθηκε για την καταπίεση της αμοιβαίας σύζευξης είναι οι τεχνητοί μαγνητικοί αγωγοί. Οι Mouffok et al. [103] πρότειναν τη χρήση μιας διδιάστατης δομής AMC αποτελούμενης από 18x18 μοναδιαία κελιά τεσσάρων βραχιόνων σπειροειδούς σχήματος ώστε να επιτευχθεί μείωση της σύζευξης μεταξύ δύο κεραίων μικροταινιακού καλύμματος τοποθετημένων σε απόσταση $\lambda_o/3$. Η προτεινόμενη δομή μεταλλικού τυπώθηκε πάνω σε διηλεκτρικό υπόστρωμα και τοποθετήθηκε μαζί με ένα στρώμα αέρα κάτω από τις δύο κεραίες.

5.2 Προτεινόμενη Τεχνική με Χρήση Μαγνητο-Διηλεκτρικών Υλικών

Η προτεινόμενη τεχνική για τον έλεγχο του ανεπιθύμητου φαινομένου της αμοιβαίας σύζευξης που παρουσιάζεται σε αυτό το Κεφάλαιο βασίζεται στη χρήση ανισοτροπικών μαγνητο-διηλεκτρικών υλικών των οποίων η μαγνητική διαπερατότητα μεταβάλλεται με την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου (ευρέως γνωστά ως φερρίτες). Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, η ενσωμάτωση τέτοιου είδους υλικών σε κεραίες προσφέρει τη δυνατότητα μεταβολής της συχνότητας συντονισμού, της πόλωσης ή/και του διαγράμματος ακτινοβολίας τους με ελεγχόμενο τρόπο. Από την εκτενή ανασκόπηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας που σχετίζεται με την καταπίεση της αμοιβαίας σύζευξης (σύνοψη της οποίας παρουσιάζεται στην §5.1) διαπιστώθηκε ότι δεν υπάρχουν δημοσιευμένες εργασίες στις οποίες να μελετάται η μείωση του ανεπιθύμητου φαινομένου της αμοιβαίας σύζευξης με τη χρήση φερριτών.

Το σύστημα κεραίων που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε για την παρούσα μελέτη αποτελείται από δύο κεραίες μικροταινιακού καλύμματος με σύζευξη μέσω γειτνίασης οι οποίες τοποθετούνται πάνω σε κοινό υπόστρωμα σε απόσταση μικρότερη του ημίσεος μήκους κύματος. Μέρος του ανώτερου κοινού συμβατικού διηλεκτρικού υποστρώματος αντικαθίσταται από δύο κυλινδρικά δοκίμια φερριτικού υλικού, τα οποία τοποθετούνται κάτω από τα ακτινοβολούντα στοιχεία. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι ο γρανάτης υτρίου-σιδήρου (YIG) για τους λόγους που προαναφέρθηκαν στην ενότητα §2.4. Η βασική ιδέα

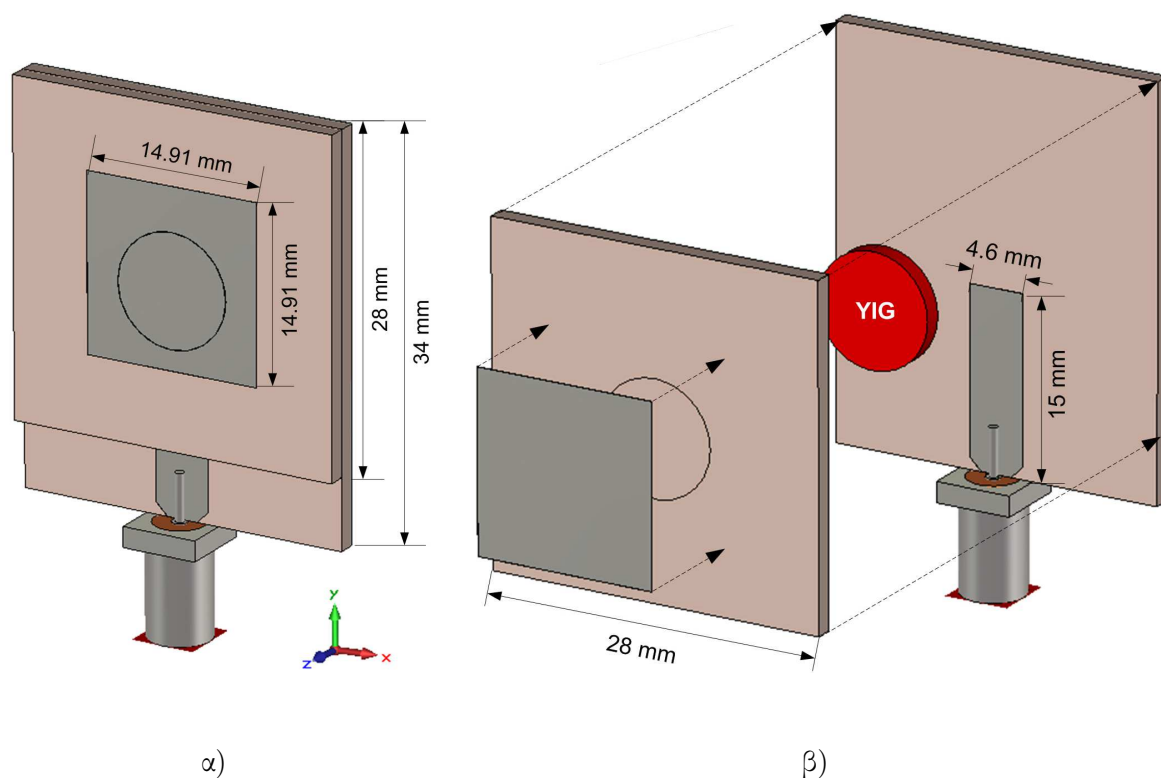
είναι να αξιοποιηθεί η δυνατότητα μεταβολής της πόλωσης που παρουσιάζει η κεραία μικροταινιακού καλύμματος με τροφοδοσία σύζευξης γειτνίασης και με ενσωματωμένο μαγνητο-διηλεκτρικό υλικό υπό την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου με στόχο τη μείωση της αμοιβαίας σύζευξης. Για τον λόγο αυτό, μελετώνται όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί που σχετίζονται με τις καταστάσεις μαγνήτισης των δύο φερριτικών δειγμάτων. Επιπρόσθετα, στην περίπτωση που τα δύο δοκίμια είναι μαγνητικά κορεσμένα εξετάζεται η επίδραση της φοράς του εφαρμοζόμενου εξωτερικού μαγνητικού πεδίου στην αμοιβαία σύζευξη μεταξύ των στοιχείων. Προτού προχωρήσουμε στην αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας σχεδίασης του συστήματος δύο κεραίων και την αξιολόγηση της προτεινόμενης τεχνικής, στην επόμενη ενότητα παρουσιάζονται τα αριθμητικά και τα πειραματικά αποτελέσματα που αφορούν το κεραιοστοιχείο του συστήματος, την τυπωμένη κεραία μικροταινιακού καλύμματος με τροφοδοσία σύζευξης γειτνίασης και ενσωματωμένο YIG.

5.3 Κεραία Μικροταινιακού Καλύμματος με Τροφοδοσία Σύζευξης Γειτνίασης και Μαγνητο-Διηλεκτρικό Υλικό

Η σχεδίαση του κεραιοστοιχείου που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη του προτεινόμενου συστήματος βασίστηκε στην αναδιαρθρώσιμη κεραία μικροταινιακού καλύμματος που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4. Οι κύριες διαφορές μεταξύ των δύο κεραίων είναι οι ιδιότητες του φερριτικού υλικού και το σχήμα του δοκιμίου που τοποθετείται στο ανώτερο υπόστρωμα της κεραίας. Στη συγκεκριμένη εκδοχή της κεραίας χρησιμοποιείται ένα κυλινδρικό δοκίμιο γρανάτη υτρίου-σιδήρου, διαμέτρου 9.5 mm, το οποίο παρασκευάστηκε στο Εργαστήριο Υπεραγωγών και Μαγνητικών Οξειδίων του INN/Δ, ενώ στην προηγούμενη κεραία (Σχήμα 4.1) χρησιμοποιήθηκε ένα σχεδόν τετραγωνικό δείγμα του εμπορικά διαθέσιμου γρανάτη Y101. Η γεωμετρία και οι ακριβείς διαστάσεις της κεραίας απεικονίζονται στο Σχήμα 5.1. Για λόγους απλότητας, η συγκεκριμένη κεραία θα αναφέρεται ως κεραία YIG-PCF (Yttrium Iron Garnet-Proximity Coupled Fed) στο υπόλοιπο της παρούσας Διατριβής.

5.3.1 Παρασκευή και Χαρακτηρισμός Δείγματος με Δομή Γρανάτη YIG

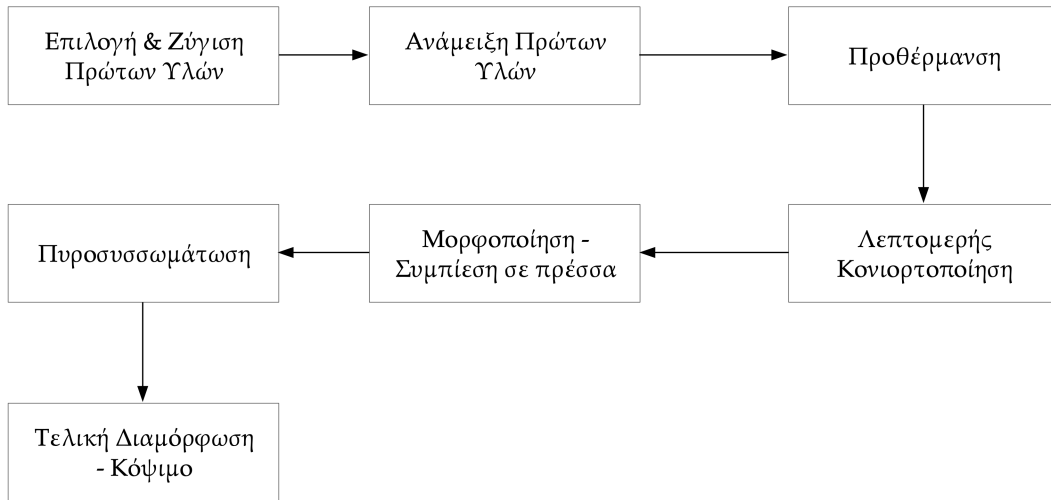
Ως μέθοδος παρασκευής του δείγματος με δομή γρανάτη ($Y_3Fe_5O_{12}$, YIG) επιλέχθηκε η συμβατική κεραμική μέθοδος, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για τη σύνθεση μεικτών μεταλλικών οξειδίων. Η διαδικασία παρασκευής του περιλαμβάνει τα στάδια που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.2: (1) Αρχικά γίνεται η επιλογή και η ακριβής ζύγιση των πρώτων υλών (οξείδια Y_2O_3 , Fe_2O_3). (2) Ακολουθεί η ανάμειξη των οξειδίων σε αχάτινο τριβείο και η μορφοποίηση της αναμειγμένης ποσότητας σε δισκίο διαμέτρου 2 cm. Για τη μορφοποίησή



Σχήμα 5.1: Τριδιάστατη όψη της κεραίας YIG-PCF α) εμπρόσθια όψη, β) ανάπτυγμα.

της χρησιμοποιείται υδραυλική πρέσα (ασκείται πίεση ίση με 5 MPa για χρόνο $t = 1$ min) και κατάλληλο κυλινδρικό καλούπι. (3) Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει την προθέρμανση του φερριτικού δισκίου. (4) Έπειτα, το προθερμασμένο δισκίο υφίσταται λεπτομερή κονιορτοποίηση σε αχάτινο τριβείο με στόχο την μείωση της κοκκομετρίας ($< 1 \mu\text{m}$). (5) Μετά τη λεπτομερή κονιορτοποίηση επαναλαμβάνεται το στάδιο της μορφοποίησης. (6) Το δισκίο τοποθετείται στον κλίβανο και πραγματοποιείται η διαδικασία της πυροσυσσωμάτωσης στους 1400°C για τον σχηματισμό της κρυσταλλικής δομής του YIG. Το δείγμα μετά το πέρας του σταδίου πυροσυσσωμάτωσης παρουσιάζει συρρίκνωση κατά περίπου 0.2 cm. (7) Το τελικό στάδιο περιλαμβάνει τη διαδικασία διαμόρφωσης του κεραμικού συμπαγούς δοκιμίου με στόχο την επίτευξη του επιθυμητού σχήματος και μεγέθους. Για τις ανάγκες της μελέτης της καταπίεσης της αμοιβαίας σύζευξης κεραιών παρασκευάστηκαν δύο κυλινδρικά δοκίμια, διαμέτρου 9.5 mm και πάχους $h_{\text{YIG}} = 1.5$ mm.

Ο δομικός χαρακτηρισμός του δείγματος YIG (σε μορφή σκόνης) πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια της μεθόδου περιθλασιμετρίας ακτίνων X (X Ray Diffraction, XRD) [104]. Για τη λήψη των διαγραμμάτων περίθλασης ακτίνων X (XRD patterns), τα οποία παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τις κρυσταλλικές φάσεις του δείγματος και τη μικροδομή των κρυσταλλινών, χρησιμοποιήθηκε το περιθλασίμετρο ακτίνων X Siemens D500 με ακτινοβολία CuK α ($\lambda = 1.5405 \text{\AA}$) και μονοχρωμάτωρα γραφίτη. Από την ανάλυση των δεδομένων περίθλασης με τη μέθοδο Rietveld [105], διαπιστώθηκε ότι το κυλινδρικό δοκίμιο υτρίου-σιδήρου που παρασκευάστηκε ήταν μονοφασικό με πολύ καλή κρυσταλλικότητα.

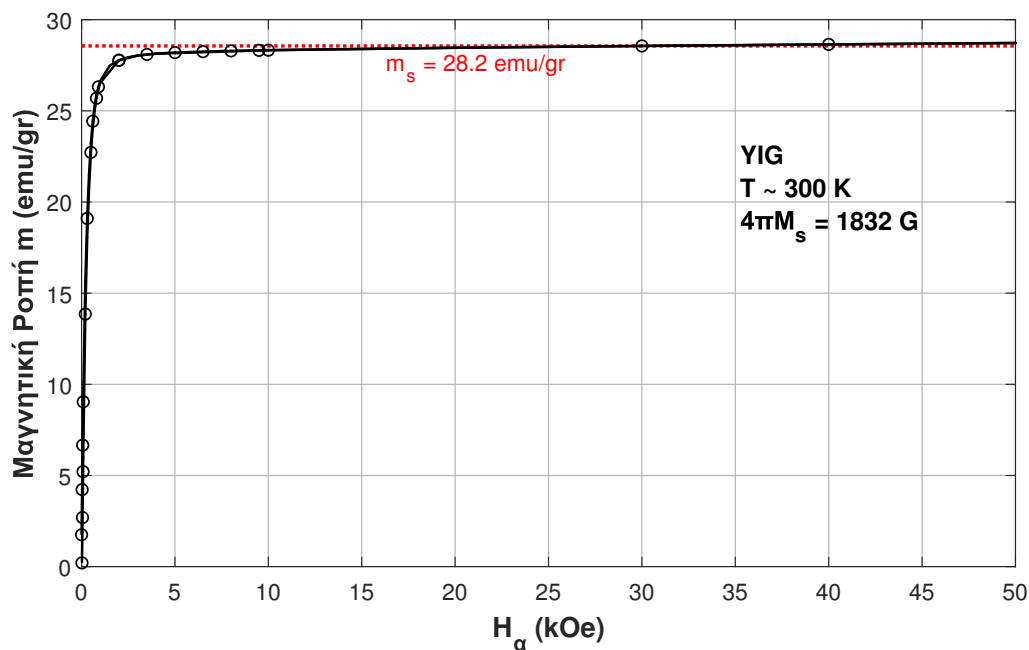


Σχήμα 5.2: Στάδια παρασκευής του δείγματος με δομή γρανάτη YIG.

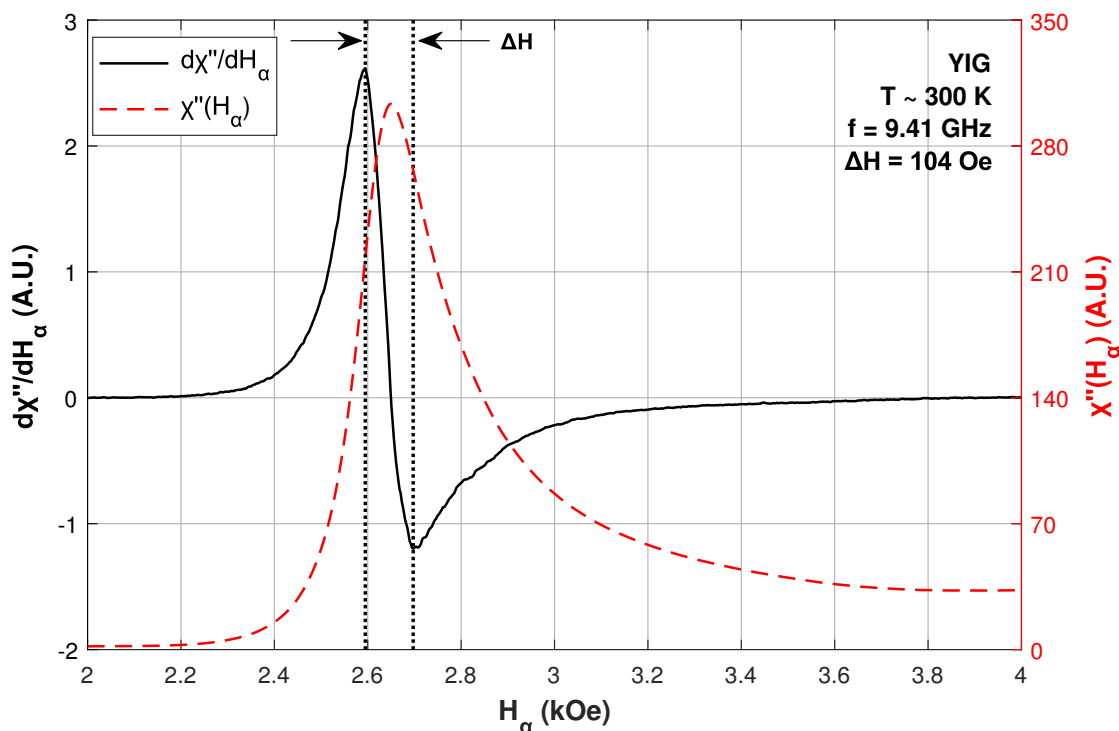
Οι μαγνητικές μετρήσεις του δείγματος (σε μορφή σκόνης) πραγματοποιήθηκαν μέσω του μαγνητόμετρου SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) της εταιρίας Quantum Design στο INN/Δ. Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζεται η μεταβολή της μαγνητικής ροπής $m(H_a)$ ανά γραμμάριο μάζας συναρτήσεως του εξωτερικού στατικού μαγνητικού πεδίου H_a για το δοκίμιο YIG στη θερμοκρασία δωματίου ($T = 300$ K). Η προέκταση του σχεδόν οριζόντιου τμήματος της καμπύλης $m(H_a)$, που περιγράφει τη συμπεριφορά σε μεγάλα πεδία, τέμνει τον κατακόρυφο άξονα της μαγνητικής ροπής m σε ένα σημείο το οποίο αντιστοιχεί στη μαγνητική ροπή στην κατάσταση κόρου m_s . Από τα πειραματικά αποτελέσματα των μετρήσεων εκτιμάται ότι $m_s = 12.7$ emu/gr ή $4\pi M_s = 1832$ G.

Στο Σχήμα 5.4 απεικονίζεται το φάσμα σιδηρομαγνητικού συντονισμού για το δείγμα YIG, το οποίο λήφθηκε με το φασματομέτρο ηλεκτρονικού παραμαγνητικού συντονισμού (electron paramagnetic resonance, EPR) Bruker ER 200D-SRC σε θερμοκρασία δωματίου ($T = 300$ K). Το φάσμα που προέκυψε από τις μετρήσεις δείχνει τη μεταβολή της παραγώγου ως προς το εξωτερικό στατικό μαγνητικό πεδίο, του φανταστικού μέρους, των διαγώνιων στοιχείων του τανυστή μαγνητικής επιδεκτικότητας. Το πλάτος σιδηρομαγνητικού συντονισμού ΔH προσδιορίζεται από το πλάτος της καμπύλης $\chi''(H_a)$ η οποία προκύπτει από την αριθμητική ολοκλήρωση του αρχικού φάσματος $d\chi''/dH_a$. Από τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει ότι $\Delta H = 104$ Oe.

Για τον προσδιορισμό της μιγαδικής διηλεκτρικής επιτρεπτότητας ($\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$) του δείγματος YIG χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος διάδοσης/ανάκλασης [106]. Το δείγμα υπό μελέτη τοποθετήθηκε στο εσωτερικό ενός κυματοδηγού ορθογωνικής διατομής και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των παραμέτρων σχέδασης S_{11} , S_{21} στο εύρος συχνοτήτων 8 – 15 GHz με τη βοήθεια ενός διανυσματικού αναλυτή δικτυωμάτων. Πριν τη διεξαγωγή



Σχήμα 5.3: Μεταβολή της μαγνητικής ροπής $m(H_a)$ ανά γραμμάριο μάζας συναρτήσει του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου H_a για το δείγμα YIG.



Σχήμα 5.4: Φάσμα FMR $d\chi''/dH_a$ (μαύρη συμπαγής γραμμή) και καμπύλη $\chi''(H_a)$ (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) για το δείγμα YIG.

των μετρήσεων, πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση του διανυσματικού αναλυτή δικτυωμάτων προκειμένου να αφαιρεθούν τα συστηματικά σφάλματα που επηρεάζουν την ακρίβεια των

Πίνακας 5.1: Διηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες του δείγματος YIG.

Διηλεκτρικές Ιδιότητες		Μαγνητικές Ιδιότητες	
ϵ_r	$\tan\delta$	$4\pi M_s$ (G)	ΔH (Oe)
16.5	0.001	1832	104

μετρήσεων. Ακολούθησε ο υπολογισμός του πραγματικού και του φανταστικού μέρους της διηλεκτρικής επιτρεπτότητας με τον αλγόριθμο Nicholson-Ross-Weir. Με αυτό τον τρόπο, προέκυψε ότι το φερριτικό δείγμα YIG έχει σχετική διηλεκτρική επιτρεπτότητα $\epsilon_r = 16.5$ και εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} = 0.001$). Στον Πίνακα 5.1 συνοψίζονται οι διηλεκτρικές και οι μαγνητικές ιδιότητες του δείγματος YIG που παρασκευάστηκε για τις ανάγκες της παρούσας Διατριβής.

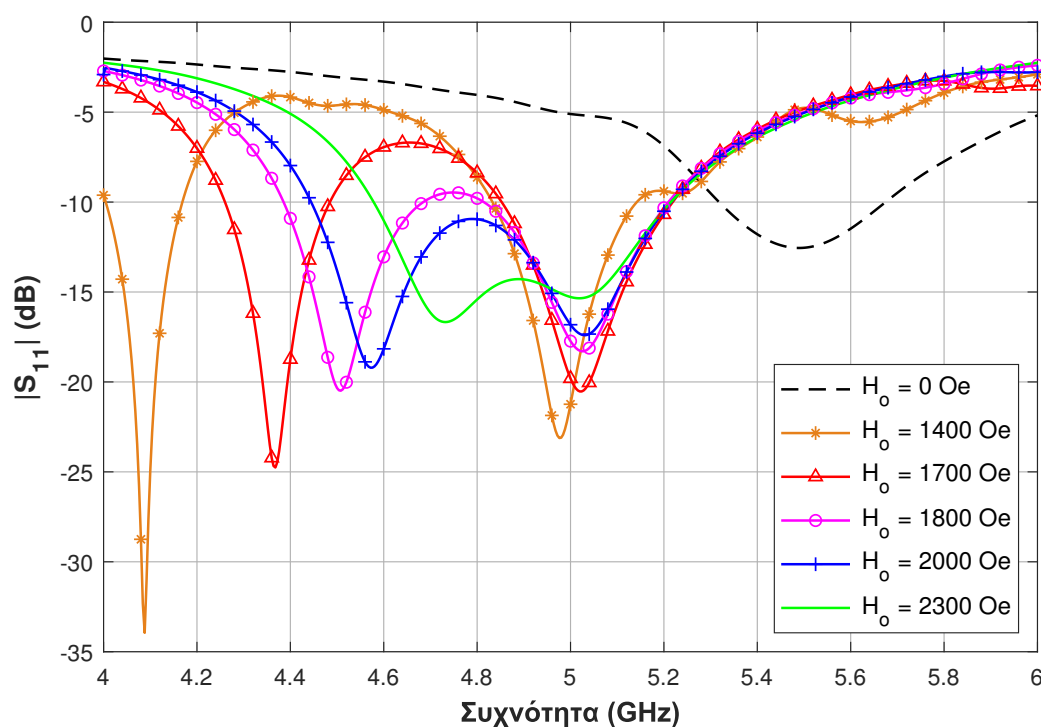
5.3.2 Αριθμητικά Αποτελέσματα της Κεραίας YIG-PCF

Η ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση της κεραίας YIG-PCF (Σχήμα 5.1) στις δύο καταστάσεις λειτουργίας της πραγματοποιήθηκε στον χρονο-μεταβατικό επιλύτη του CST MW Studio ακολουθώντας τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στην §3.4. Όσον αφορά τις ρυθμίσεις του επιλύτη για την προσομοίωση της κεραίας, εφαρμόστηκε λεπτομερής διακριτοποίηση της γραμμής μεταφοράς, του υποστρώματος και του επιπέδου γείωσης ώστε να βελτιωθεί η ακρίβεια των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό για το κατώφλι λειτουργίας της κεραίας στην “κατάσταση OFF”, η κεραία σχεδιάστηκε να λειτουργεί σε συχνότητα $f_{res} = 5.5$ GHz ($f_{res} > f_m = 1/2\pi(\gamma \cdot 4\pi M_s) = 5.13$ GHz). Όσον αφορά την “κατάσταση ON”, το στατικό μαγνητικό πεδίο εφαρμόστηκε κατά τη θετική διεύθυνση του άξονα z και οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη κορεσμού του δοκιμίου YIG ($H_o > N_z \cdot 4\pi M_s$). Ο παράγοντας απομαγνήτισης N_z υπολογίστηκε ότι ισούται με $N_z = 0.75$ με τη βοήθεια του μαγνητοστατικού επιλύτη του CST EM Studio, λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος και τις ιδιότητες του συγκεκριμένου δοκιμίου. Επομένως, το δοκίμιο YIG θεωρείται ότι είναι μαγνητικά κορεσμένο όταν $H_o > 1300$ Oe.

Με βάση τις παραπάνω παραδοχές, στο Σχήμα 5.5 απεικονίζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για τον συντελεστή ανάκλασης στην είσοδο της κεραίας YIG-PCF στην αμαγνήτιστη και στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση για διάφορες τιμές μαγνητικού πεδίου H_o . Είναι προφανές ότι η εφαρμογή μαγνητικού πεδίου έχει ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση της αρχικής συχνότητας συντονισμού της κεραίας ($f_{res} = 5.5$ GHz για $H_o = 0$ Oe) στην περιοχή των 5 GHz και την εμφάνιση ενός δεύτερου συντονισμού ο οποίος ανάλογα με την ένταση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου ($1400 \leq H_o \leq 2000$ Oe) κυμαίνεται στην περιοχή συχνοτήτων 4.2 – 4.8 GHz. Παρατηρείται ότι η εφαρμογή ισχυρότερου

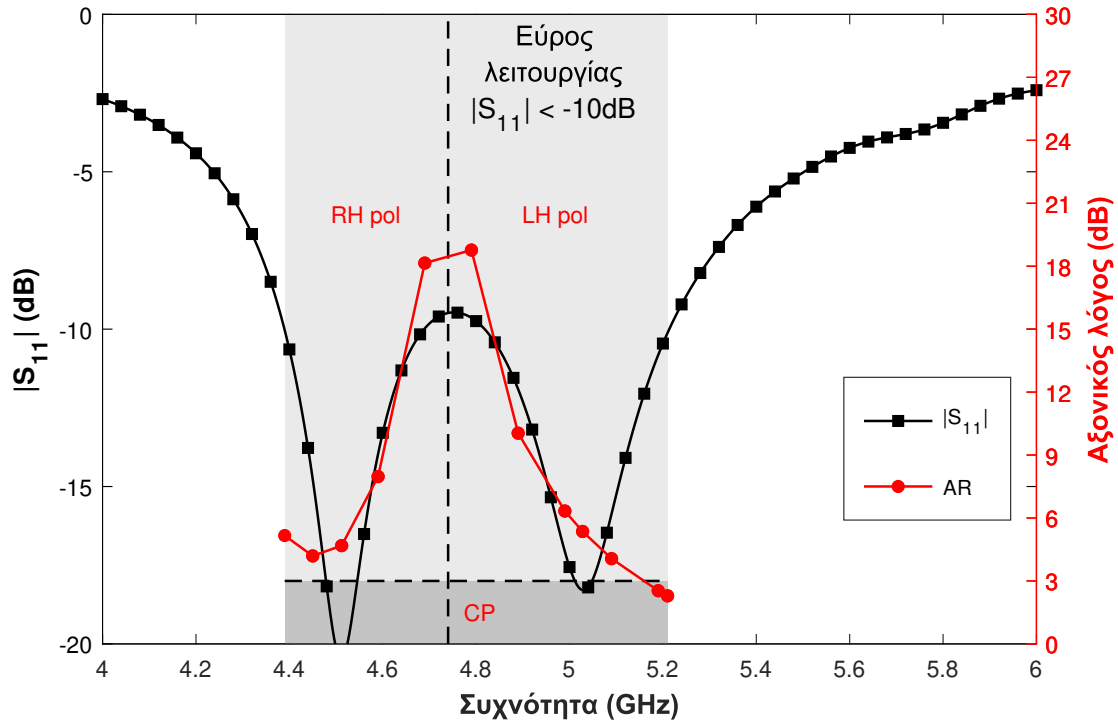
μαγνητικού πεδίου ($H_o > 2000$ Oe) επηρεάζει την απόκριση των δύο ζωνών λειτουργίας της κεραίας τείνοντας να επαναφέρει την κεραία σε λειτουργία ενός συντονισμού.

Επιπλέον, η μετάβαση από την αμαγνήτιστη στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση οδηγεί σε μεταβολή της πόλωσης της κεραίας YIG-PCF από γραμμική σε ελλειπτική ή κυκλική ανάλογα με την τιμή του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου και τη συχνότητα λειτουργίας της κεραίας. Έπειτα από προσομοιώσεις, διαπιστώθηκε ότι οι καλύτερες επιδόσεις όσον αφορά την πόλωση της κεραίας προκύπτουν όταν το πεδίο πόλωσης είναι ίσο με 1800 Oe. Στο Σχήμα 5.6 απεικονίζεται ο αξονικός λόγος της κεραίας στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση ($H_o = 1800$ Oe) για $\theta = 0^\circ$ (γωνία σκόπευσης), όπως προέκυψε από την προσομοίωση. Ο αξονικός λόγος κυμαίνεται από 2.3 dB μέχρι 18.7 dB στην περιοχή συχνοτήτων 4.4–5.2 GHz (όπου $|S_{11}| \leq -10$ dB). Κυκλική πόλωση ($AR \leq 3$ dB) παρατηρείται στην άνω ζώνη λειτουργίας, ενώ η πόλωση είναι ελλειπτική στην κάτω ζώνη (4.39–4.72 GHz). Επιπλέον, παρατηρείται ότι η στροφή της πόλωσης είναι αντίθετη στις δύο ζώνες λειτουργίας της κεραίας. Συγκεκριμένα, η στροφή της πόλωσης είναι δεξιόστροφη στην κάτω ζώνη και αντίστοιχα αριστερόστροφη στην άνω ζώνη λειτουργίας (Σχήμα 5.7). Αλλάζοντας την πολικότητα του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου (κατά την αρνητική διεύθυνση του άξονα z) εύκολα παρατηρείται εναλλαγή της στροφής πόλωσης μεταξύ των δύο ζωνών λειτουργίας της κεραίας. Η απεικόνιση του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια

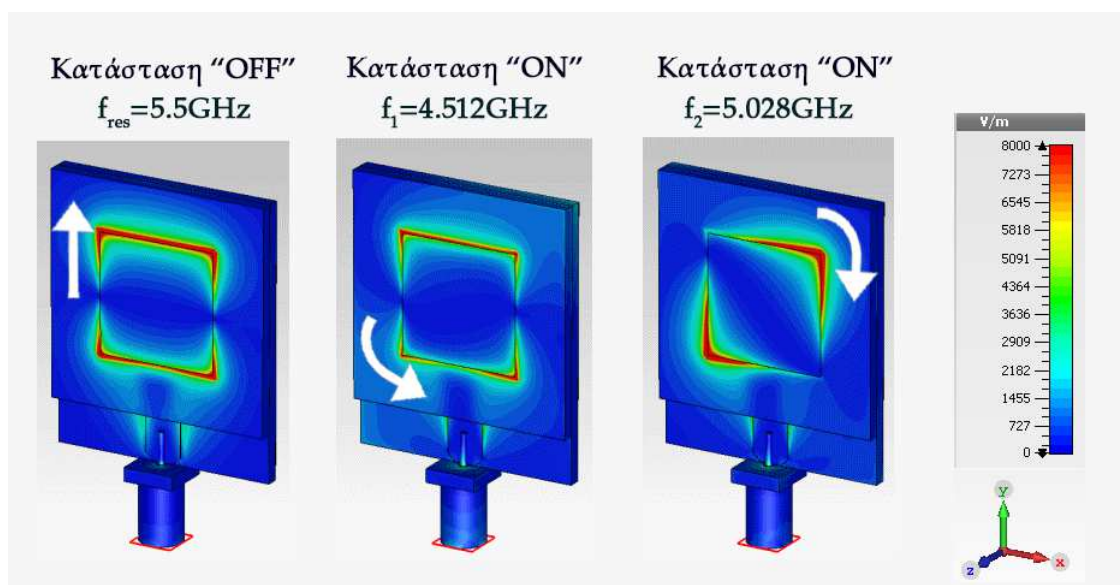


Σχήμα 5.5: Μέτρο του συντελεστή ανάκλασης στην είσοδο της κεραίας YIG-PCF στην αμαγνήτιστη κατάσταση και την πλήρως μαγνητισμένη για διάφορες τιμές H_o , όπως προέκυψε από την προσομοίωση του H/M μοντέλου.

της κεραίας στις δύο καταστάσεις λειτουργίας της (Σχήμα 5.7) επιδεικνύει τη δυνατότητα επίτευξης αναδιαρθρωσιμότητας της πόλωσης της κεραίας YIG-PCF.



Σχήμα 5.6: Μέτρο του συντελεστή ανάκλασης και αξονικός λόγος της κεραίας YIG-PCF για $H_o = 1800$ Oe, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση.

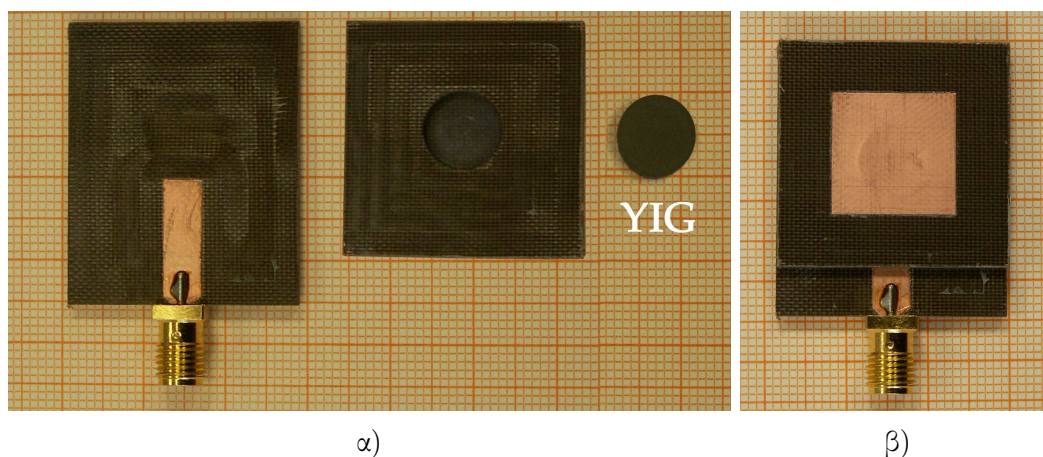


Σχήμα 5.7: Ηλεκτρικό πεδίο (E-field) στην επιφάνεια της κεραίας YIG-PCF στις συχνότητες συντονισμού στις δύο καταστάσεις λειτουργίας της.

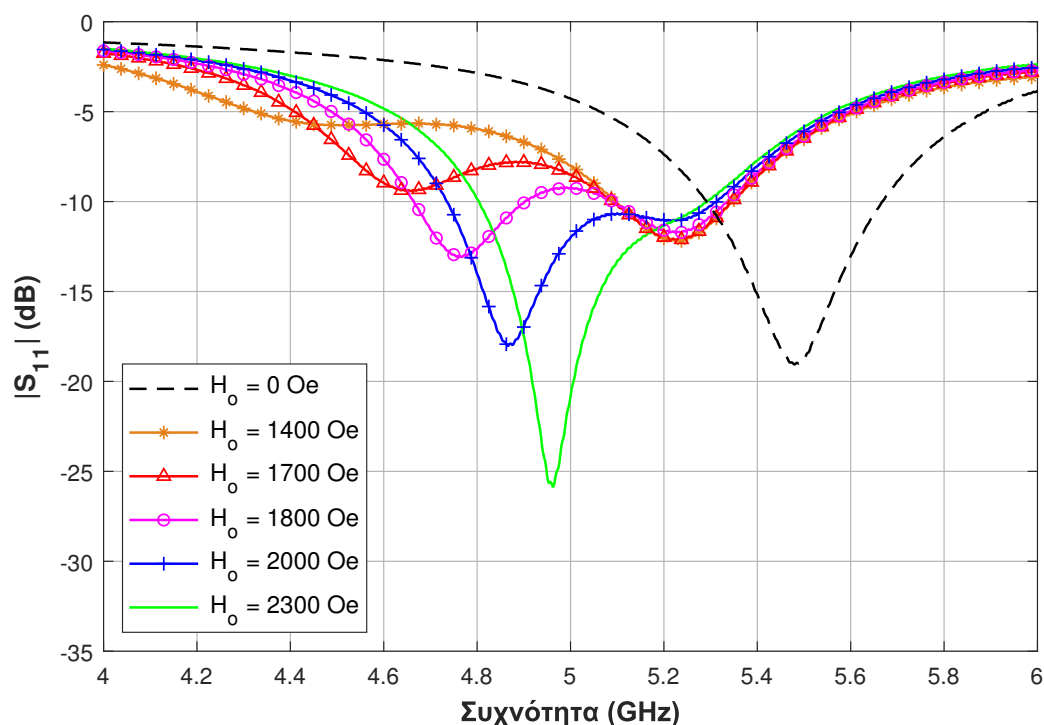
5.3.3 Αποτελέσματα Μετρήσεων της Κεραίας YIG-PCF

Η κεραία YIG-PCF κατασκευάστηκε και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του συντελεστή ανάκλασης και της πόλωσης στις δύο καταστάσεις λειτουργίας της προκειμένου να επιβεβαιωθεί πειραματικά η δυνατότητα αναδιαρθρωσιμότητας της συχνότητας και της πόλωσης της. Τα δύο κατασκευαστικά τμήματα του εργαστηριακού πρωτοτύπου τα οποία ενώνονται για να σχηματιστεί η τελική κεραία καθώς και το κυλινδρικό δοκίμιο YIG το οποίο τοποθετείται στην εσοχή που δημιουργήθηκε με τον PCB plotter φαίνονται στο Σχήμα 5.8α. Στο Σχήμα 5.8β απεικονίζεται η εμπρόσθια όψη του εργαστηριακού πρωτοτύπου της κεραίας.

Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων υπό παρουσία μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, το εργαστηριακό πρωτότυπο της κεραίας και μια στοίβα δύο μόνιμων μαγνητών κυλινδρικού σχήματος τοποθετήθηκαν στη διάταξη στήριξης που παρουσιάστηκε στην ενότητα §3.5.2 (Σχήμα 3.10). Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα για το μέτρο του συντελεστή ανάκλασης στην αμαγνήτιστη και στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση. Όπως αναμενόταν, η κεραία τείνει να συντονιστεί στη συχνότητα $f_{res} = 5.5$ GHz όταν το δοκίμιο YIG δεν είναι μαγνητισμένο. Με την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου κατάλληλης έντασης ώστε το υλικό να φθάσει σε κατάσταση κόρου εμφανίζονται δύο συντονισμοί. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτά με εκείνα του Σχήματος 5.5, παρατηρείται μικρή μετατόπιση των δύο συντονισμών σε υψηλότερες συχνότητες (περίπου 3.5% σε σχέση με το αριθμητικό μοντέλο) καθώς και διαφορά στο βάθος των συντονισμών. Ανάλογα με την ένταση του πεδίου πόλωσης, ο κατώτερος συντονισμός κυμαίνεται στην περιοχή συχνοτήτων 4.4 – 5.0 GHz, και ο ανώτερος παραμένει σχεδόν σταθερός στην συχνότητα 5.2 GHz. Οι αποκλίσεις μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων οφείλονται στη μη καλή ομοιογένεια του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου λόγω της μονόπλευρης στοίβαξης των μόνιμων μαγνητών (κάτω από το επίπεδο γείωσης της κεραίας). Αντίθετα, στο υπολογιστικό πακέτο που χρησιμοποιείται για την H/M προσομοίωση της κεραίας το πεδίο στο εσωτερικό του



Σχήμα 5.8: Εργαστηριακό πρωτότυπο της κεραίας YIG-PCF: α) τα δύο κατασκευαστικά τμήματα και το κυλινδρικό δείγμα YIG, β) η εμπρόσθια όψη.



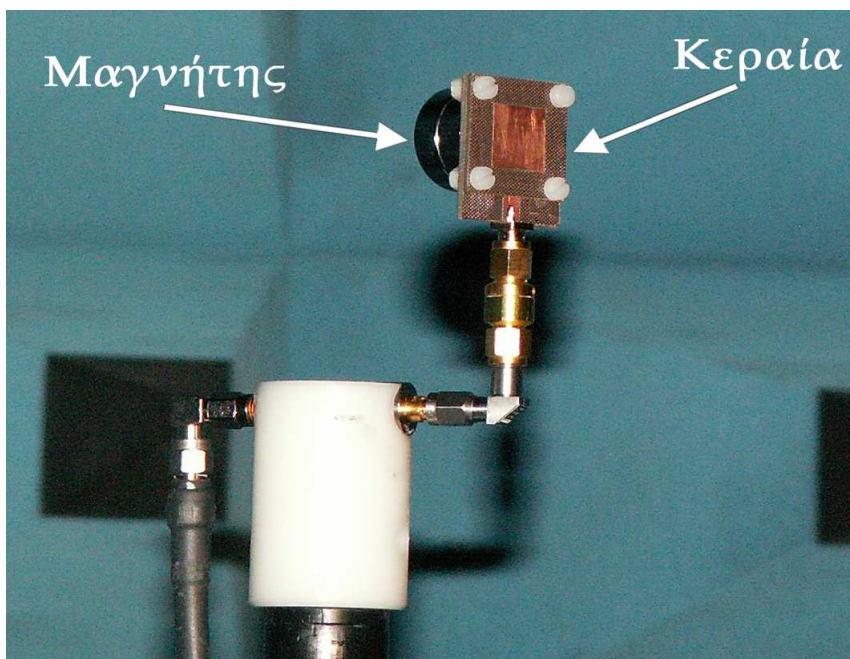
Σχήμα 5.9: Πειραματικός συντελεστής ανάκλασης στην είσοδο της κεραίας YIG-PCF στις δύο καταστάσεις λειτουργίας της.

υλικού θεωρείται ότι είναι ομογενές.

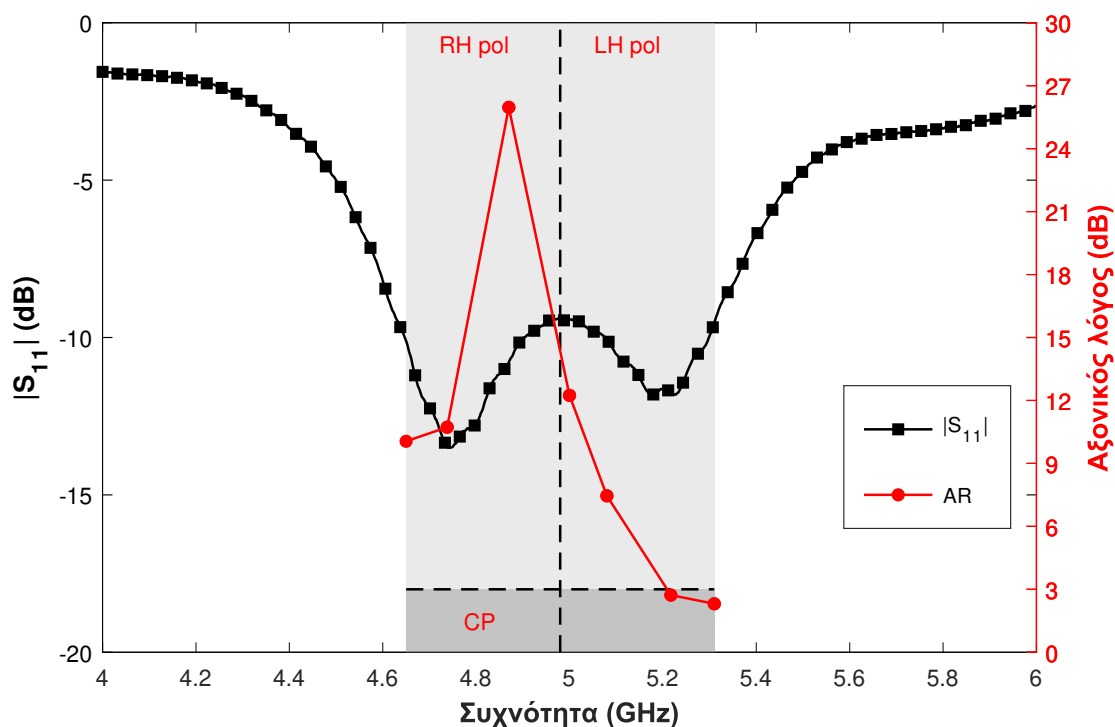
Με τη βοήθεια των αριθμητικών αποτελεσμάτων διαπιστώθηκε ότι η επίτευξη κυκλικής πόλωσης είναι εφικτή όταν το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του φερριτικού υλικού είναι 1800 Oe. Για την παραγωγή μαγνητικού πεδίου τέτοιας έντασης, ένας μαγνήτης κυλινδρικού σχήματος με διάμετρο 25 mm τοποθετήθηκε σε επαφή με το επίπεδο γείωσης της κεραίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.10. Προκειμένου να προσδιοριστεί ο αξονικός λόγος και η φορά περιστροφής του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου του εκπεμπόμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος χρησιμοποιείται η μέθοδος πλάτους και φάσης για τις μετρήσεις πόλωσης της κεραίας. Τα μετρητικά αποτελέσματα για τον αξονικό λόγο της κεραίας YIG-PCF στην “κατάσταση ON” ($H_0 = 1800$ Oe) παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.11. Διαπιστώνεται ότι η πόλωση της κεραίας γίνεται ελλειπτική στην κάτω ζώνη και κυκλική στην άνω ζώνη λειτουργίας ($AR \approx 3$ dB στη συχνότητα 5.22 GHz και $AR = 2.3$ dB στη συχνότητα 5.3 GHz). Η απόκλιση που παρατηρείται ανάμεσα στα αριθμητικά και τα μετρητικά αποτελέσματα (Σχήματα 5.6 και 5.11 αντίστοιχα) οφείλεται πιθανώς στη μη ακριβή ευθύγραμμιση των κεραίων κατά τη διάρκεια των μετρήσεων καθώς και στην επίδραση του υλικού της διάταξης στήριξης που χρησιμοποιήθηκε. Επιπρόσθετα, έπειτα από την επεξεργασία των μετρητικών δεδομένων για το μέτρο και τη φάση των συνιστώσων E_{θ} και E_{ϕ} του ηλεκτρικού πεδίου επιβεβαιώθηκε ότι η στροφή της πόλωσης είναι αντίθετη στις δύο ζώνες λειτουργίας.

Το κανονικοποιημένο διαγράμμα κέρδους της κεραίας YIG-PCF στο επίπεδο xz στην

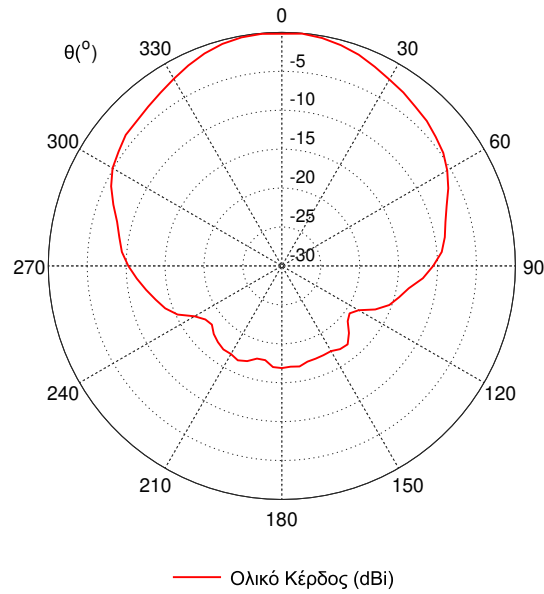
αμαγνήτιστη κατάσταση στη συχνότητα συντονισμού $f_{res} = 5.481$ GHz παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.12. Αντίστοιχα, στα Σχήματα 5.13α και 5.13β απεικονίζονται τα κανονικοποιημένα



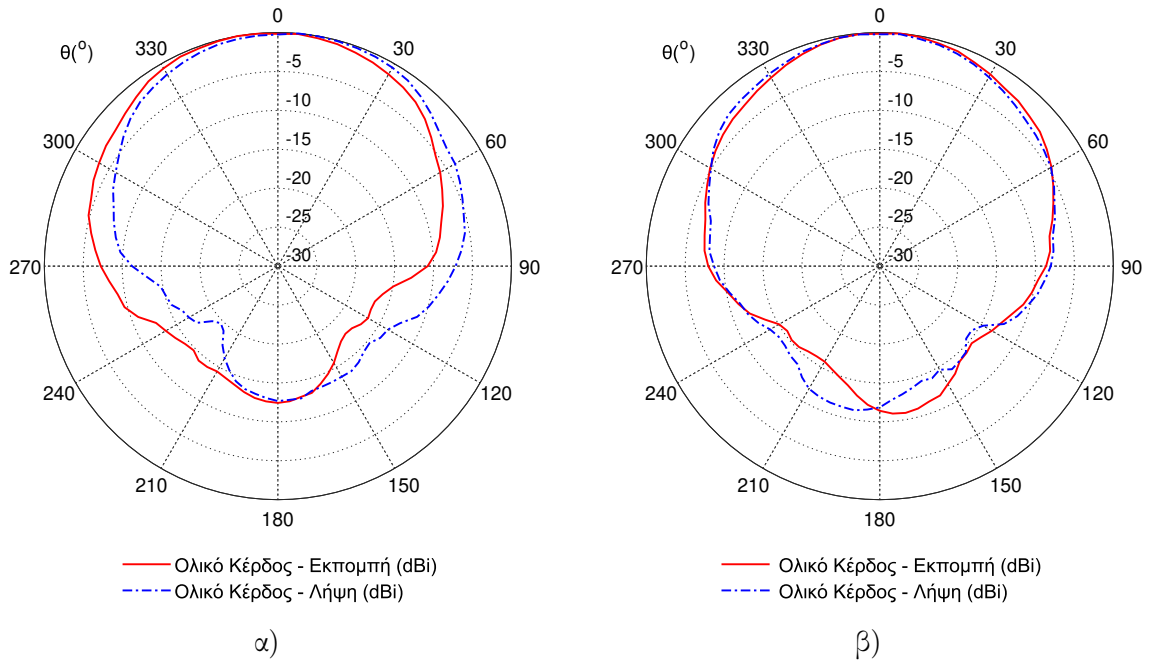
Σχήμα 5.10: Το εργαστηριακό πρωτότυπο της κεραίας YIG-PCF και ο μόνιμος μαγνήτης για την παραγωγή μαγνητικού πεδίου 1800 Oe στο εσωτερικό του δοκιμίου τοποθετημένα εντός του ανηχικού θαλάμου.



Σχήμα 5.11: Μέτρο του συντελεστή ανάκλασης και αξονικός λόγος της κεραίας YIG-PCF για $H_o = 1800$ Oe, όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις.

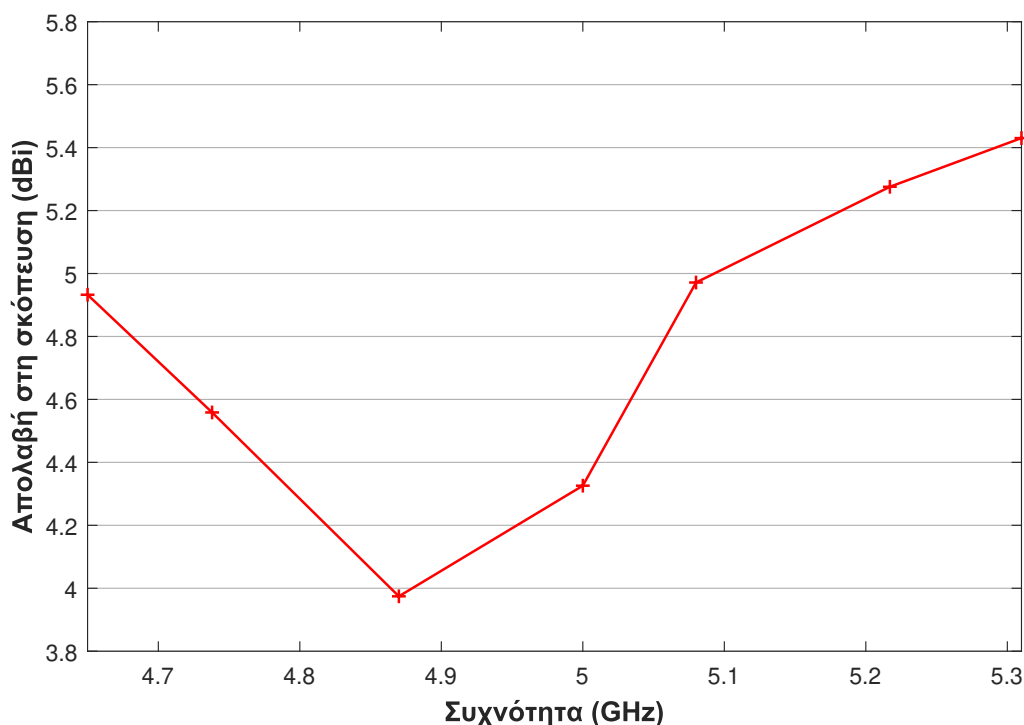


Σχήμα 5.12: Κανονικοποιημένο διαγράμμα ακτινοβολίας της κεραίας YIG-PCF στο επίπεδο yz στην αμαγνήτιστη κατάσταση ($f_{res} = 5.5$ GHz).



Σχήμα 5.13: Κανονικοποιημένο διαγράμμα ακτινοβολίας εκπομπής της κεραίας YIG-PCF στο επίπεδο xz ($\phi = 0^\circ$) για $H_0 = 1800$ Oe στη συχνότητα α) $f_1 = 4.738$ GHz και β) $f_2 = 5.217$ GHz.

διαγράμματα κέρδους στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση ($H_0 = 1800$ Oe) στις συχνότητες συντονισμού $f_1 = 4.738$ GHz και $f_2 = 5.217$ GHz. Συγκρίνοντας τα διαγράμματα στις δύο καταστάσεις λειτουργίας διαπιστώνεται ότι η μορφή τους παραμένει σχεδόν



Σχήμα 5.14: Απολαβή εκπομπής της κεραίας YIG-PCF στην κατεύθυνση σκόπευσης ($\theta = 0^\circ$) στην “κατάσταση ON”.

ίδια. Ωστόσο, τα διαγράμματα εκπομπής και λήψης της κεραίας στην “κατάσταση ON” διαφοροποιούνται. Αυτή η μη-αμοιβαιότητα της κεραίας YIG-PCF, η οποία παρατηρείται και στις δύο συχνότητες συντονισμού, οφείλεται στην παρουσία του μαγνητισμένου δοκιμίου στο υπόστρωμα της.

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της απολαβής της κεραίας στην κατεύθυνση σκόπευσης ($\theta = 0^\circ$) στο λειτουργικό εύρος ζώνης 4.65 – 5.31 GHz ($|S_{11}| \leq -10$ dB) με χρήση της μεθόδου τριών κεραιών (three-antenna method) [79]. Στην “κατάσταση ON” ($H_o = 1800$ Oe), η απολαβή εκπομπής κυμαίνεται από 4.0 dBi μέχρι 5.4 dBi (Σχήμα 5.14). Το μέγιστο επιτεύξιμο κέρδος παρατηρείται στη ανώτερη συχνότητα του λειτουργικού εύρους ζώνης (5.35 GHz).

5.4 Σύστημα Δύο Κεραιών με Τροφοδοσία Σύζευξης Γειτνίασης και Μαγνητο-Διηλεκτρικά Υλικά

Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται η σχεδίαση και η απόκριση ενός συστήματος δύο τυπωμένων κεραιών YIG-PCF οι οποίες είναι τοποθετημένες σε απόσταση μικρότερη του ημίσεος μήκους κύματος. Στόχος είναι να μελετηθεί η καταπίεση της αμοιβαίας σύζευξης

μεταξύ των κεραιών του συστήματος, αξιοποιώντας τη δυνατότητα αναδιαρθρωσιμότητας πόλωσης του κάθε κεραιοστοιχείου.

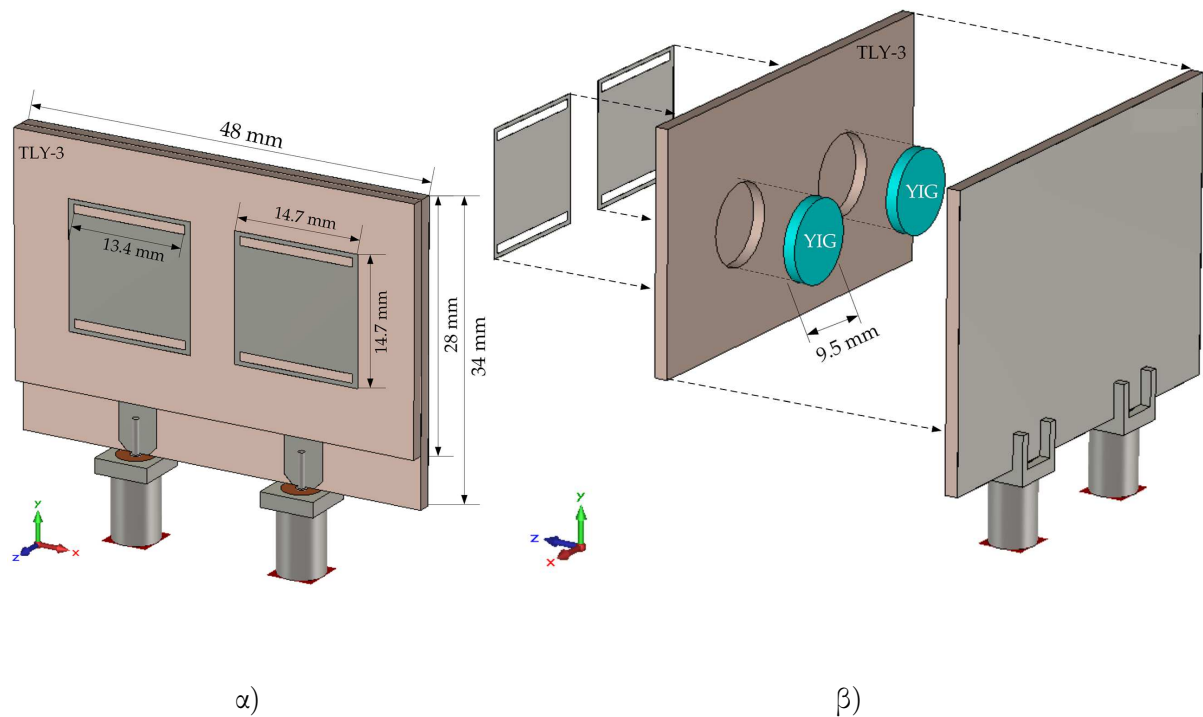
5.4.1 Σχεδίαση Προτεινόμενου Συστήματος

Το προτεινόμενο σύστημα αποτελείται από δύο κεραίες μικροταινιακού καλύμματος με τροφοδοσία σύζευξης γειτνίασης τοποθετημένες πάνω σε κοινό διηλεκτρικό υπόστρωμα Taconic TLY-3 και σε απόσταση d μεταξύ τους (από κέντρο σε κέντρο). Δύο κυλινδρικά δοκίμια YIG διαμέτρου 9.5 mm, των οποίων οι διηλεκτρικές και οι μαγνητικές ιδιότητες παρατίθενται στον Πίνακα 5.1, ενσωματώνονται στο ανώτερο κοινό υπόστρωμα. Οι διαστάσεις του κατώτερου υποστρώματος επιλέχθηκαν να μην ξεπερνούν τα 3.5 mm x 5 mm, λόγω της απαίτησης για όσο το δυνατόν συμπαγέστερα κινητά τερματικά. Αρχικά, έγινε προσαρμογή των διαστάσεων της αρχικής κεραίας που παρουσιάστηκε στην ενότητα §5.3 (Σχήμα 5.1), έτσι ώστε το προτεινόμενο σύστημα να συντονίζει στη συχνότητα 5.5 GHz στην “κατάσταση OFF”. Επιπλέον, μέσω προσομοιώσεων μελετήθηκε η συμπεριφορά του συστήματος πολλαπλών στοιχείων μεταβάλλοντας την απόσταση d . Η μείωση της απόστασης μεταξύ των δύο κεραιών οδηγεί σε μεταβολή της επιφανειακής ρευματικής κατανομής στα στοιχεία του συστήματος των δύο κεραιών και αύξηση της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ τους. Με βάση τα προκαταρκτικά αποτελέσματα της μελέτης, προσδιορίστηκε ότι η ελάχιστη δυνατή απόσταση στην οποία μπορούν να τοποθετηθούν τα στοιχεία είναι $\lambda/3$.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν αρχικές προσομοιώσεις του συστήματος στην “κατάσταση ON” για διάφορες τιμές εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Από τα προκαταρκτικά αριθμητικά αποτελέσματα, διαπιστώθηκε ότι δεν υπάρχει κοινή περιοχή λειτουργίας για τις δύο καταστάσεις “OFF” και “ON”. Η χάραξη δύο συμμετρικών ορθογωνικών σχισμών διαστάσεων 13.4 mm x 1 mm κοντά στις άκρες του κάθε αγωγίμου καλύμματος, οδήγησε στη μετατόπιση του λειτουργικού εύρους ζώνης ($|S_{11}| \leq -6$ dB) του κεραιοσυστήματος στην αμαγνήτιστη κατάσταση σε χαμηλότερες συχνότητες με αποτέλεσμα τη δημιουργία κοινής περιοχής λειτουργίας με την μαγνητισμένη κατάσταση. Η τελική γεωμετρία του συστήματος δύο κεραιών YIG-PCF απεικονίζεται στο Σχήμα 5.15. Οι συνολικές διαστάσεις του κεραιοσυστήματος είναι 48 mm x 34 mm.

5.4.2 Αριθμητικά Αποτελέσματα

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στον χρονο-μεταβατικό επιλύτη του CST MW Studio σε υπολογιστή με επεξεργαστή Intel i7 Core @ 3.60 GHz και εγκατεστημένη μνήμη 16 GB (RAM). Ο χρόνος που απαιτήθηκε για την προσομοίωση του H/M μοντέλου στην “κατάσταση OFF” ήταν μόλις 15 λεπτά, ενώ ο υπολογιστικός χρόνος αυξήθηκε αισθητά (1 ώρα και 38 λεπτά) στην “κατάσταση ON”. Τα αριθμητικά αποτελέσματα προέκυψαν διεγείροντας το ένα στοιχείο του συστήματος και τερματίζοντας το άλλο στη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής τροφοδοσίας (50 Ω).



Σχήμα 5.15: Γεωμετρία του προτεινόμενου συστήματος αποτελούμενο από δύο κεραίες μικροταινιακού καλύμματος με σχισμές και ενσωματωμένα δοκίμια YIG α) εμπρόσθια όψη, β) ανάπτυγμα οπίσθιας όψης.

Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η πόλωση της κεραίας YIG-PCF (στοιχείο του συστήματος) μπορεί να αλλάξει από γραμμική σε κυκλική με την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου κατά τη διεύθυνση του άξονα z , μελετήθηκαν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί που σχετίζονται με την κατάσταση μαγνήτισης των δύο κυλινδρικών δοκιμών YIG με στόχο τη μείωση της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ των στοιχείων. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν οι εξής καταστάσεις: (1) τα δύο δοκίμια είναι αμαγνήτιστα (“κατάσταση OFF”-“κατάσταση OFF”), (2) το ένα δοκίμιο είναι αμαγνήτιστο και το δεύτερο είναι μαγνητικά κορεσμένο (“κατάσταση OFF”-“κατάσταση ON”), (3) τα δύο δοκίμια είναι μαγνητικά κορεσμένα (“κατάσταση ON”-“κατάσταση ON”). Το εκάστοτε κυλινδρικό δοκίμιο YIG διαμέτρου 9.5 mm θεωρείται ότι βρίσκεται σε κατάσταση κόρου όταν ισχύει $H_o > 1300$ Oe (ενότητα §5.3). Επιπρόσθετα, στην τελευταία περίπτωση μελετήθηκε η επίδραση της φοράς του εφαρμοζόμενου εξωτερικού μαγνητικού πεδίου στην αμοιβαία σύζευξη μεταξύ των στοιχείων. Στις υπό μελέτη περιπτώσεις, μαγνητικό πεδίο ίδιας ή αντίθετης πολικότητας εφαρμόστηκε στα δύο δοκίμια YIG. Όλοι οι παραπάνω συνδυασμοί μελετήθηκαν για διάφορες τιμές μαγνητικού πεδίου H_o στο εύρος 1600 – 2100 Oe. Οι καλύτερες επιδόσεις όσον αφορά την αμοιβαία σύζευξη προέκυψαν όταν το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό των δύο δειγμάτων είναι ίσο με 1600 Oe. Στο Σχήμα 5.16 απεικονίζονται οι παράμετροι σκέδασης S_{11} και S_{21} που προέκυψαν από την προσομοίωση του H/M μοντέλου του κεραιοσυστήματος για τις καταστάσεις “OFF”-“OFF”, “ON”-“OFF”, “ON(+)-“ON(+)” και “ON(+)-“ON(-)”.

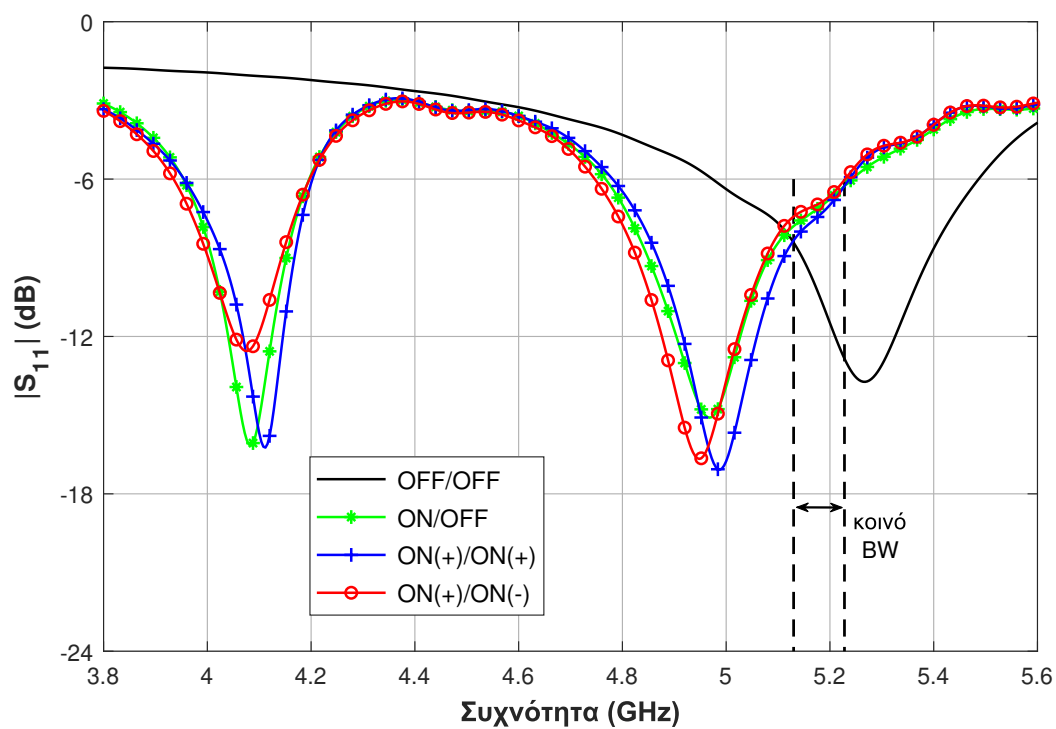
Τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις παραμέτρους σκέδασης S_{22} και S_{12} είναι σχεδόν ίδια με εκείνα για τις παραμέτρους S_{11} και S_{21} μόνο στις περιπτώσεις “OFF”-“OFF” και “ON”-“ON”. Αντίθετα, στην κατάσταση “ON”-“OFF” δε συμβαίνει κάτι τέτοιο διότι το ένα δοκίμιο είναι πολωμένο και το άλλο αμαγνήτιστο.

Στην αμαγνήτιστη κατάσταση λειτουργίας (“OFF”-“OFF”), το σύστημα δύο κεραιών YIG-PCF συντονίζεται στη συχνότητα $f_{res} = 5.27$ GHz, ενώ στις υπόλοιπες καταστάσεις (“ON”-“OFF”, “ON”-“ON”) εμφανίζονται δύο συντονισμοί (Σχήμα 5.16α). Το κοινό εύρος ζώνης προσαρμογής ($|S_{11}| \leq -6$ dB) για όλες τις καταστάσεις μαγνήτισης είναι 4.97 – 5.23 GHz. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό για τη συχνότητα λειτουργίας της κεραίας στην αμαγνήτιστη κατάσταση ($f_{oper} \leq 5.18$ GHz) που αναφέρθηκε στην Ενότητα §5.3, το εύρος ζώνης της κοινής περιοχής λειτουργίας περιορίζεται (5.13 – 5.23 GHz).

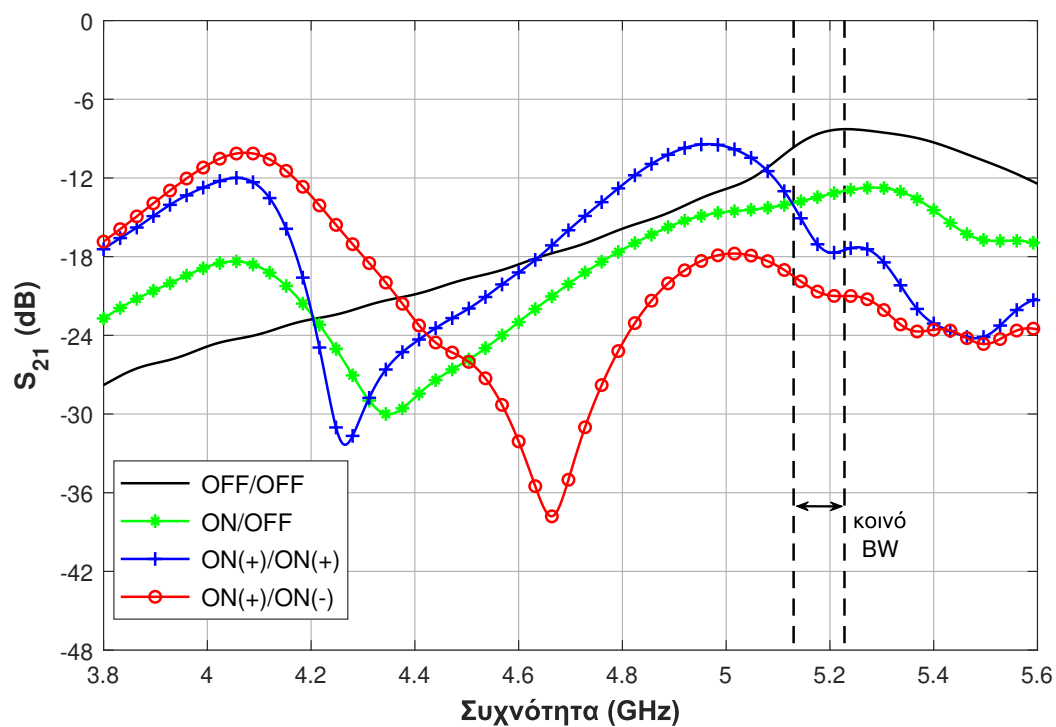
Σε όλες τις περιπτώσεις, η αμοιβαία σύζευξη μεταξύ των στοιχείων του προτεινόμενου συστήματος περιγράφεται μέσω του συντελεστή μετάδοσης S_{21} στην κεντρική συχνότητα $f_{center} = 5.18$ GHz της κοινής περιοχής λειτουργίας, όταν το ένα στοιχείο διεγείρεται και το άλλο είναι τερματισμένο στη χαρακτηριστική αντίσταση των 50 Ω (Σχήμα 5.16β). Στον Πίνακα 5.2 συνοψίζονται τα αποτελέσματα για τον συντελεστή μετάδοσης S_{21} και την πόλωση (είδος και φορά περιστροφής) του κάθε κεραιοστοιχείου. Στην αμαγνήτιστη κατάσταση η αμοιβαία σύζευξη είναι ισχυρή ($S_{21} = -8.6$ dB), ενώ χαμηλή σύζευξη επιτυγχάνεται με την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου. Ανάλογα με την κατάσταση μαγνήτισης των δοκιμών YIG, παρατηρήθηκε μείωση της αμοιβαίας σύζευξης στο εύρος 4.8–11.9 dB. Η μεγαλύτερη μείωση επιτυγχάνεται στην περίπτωση εφαρμογής μαγνητικού πεδίου αντίθετης πολικότητας στα δύο δοκίμια. Συγκεκριμένα, όταν εφαρμόζεται μαγνητικό πεδίο κατά τη θετική διεύθυνση του άξονα z στο ένα δοκίμιο και κατά την αρνητική διεύθυνση του άξονα z στο δεύτερο δοκίμιο η αμοιβαία σύζευξη μειώνεται από -8.6 dB σε -20.7 dB.

Η πόλωση του κάθε στοιχείου προσδιορίστηκε μέσω προσομοιώσεων από το μέτρο του ηλεκτρικού πεδίου σε διαφορετικές φάσεις στην επιφάνεια του προτεινόμενου συστήματος στην $f_{center} = 5.18$ GHz. Στην κατάσταση “OFF”-“OFF” τα δύο στοιχεία του συστήματος είναι γραμμικά πολωμένα (Σχήμα 5.17). Στην κατάσταση “ON(+)”-“ON(-)” το ηλεκτρικό πεδίο περιστρέφεται κατά την αντίθετη φορά των δεικτών του ρολογιού στο πρώτο ενεργό στοιχείο και κατά τη φορά των δεικτών του �ολογιού στο δεύτερο στοιχείο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.18, γεγονός που υποδηλώνει αριστερόστροφη κυκλική πόλωση (ΑΚΠ) και δεξιόστροφη κυκλική πόλωση (ΔΚΠ) αντίστοιχα. Συμπερασματικά, η διαφορετική στροφή κυκλικής πόλωσης που εμφανίζει το κάθε κεραιοστοιχείο λόγω της ενσωμάτωσης των φερριτικών δοκιμών στο υπόστρωμα του συστήματος και της εφαρμογής πεδίου πόλωσης αντίθετης πολικότητας οδηγεί στη διατάραξη της επιφανειακής ρευματικής κατανομής προκαλώντας μείωση της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ τους. Αντίθετα, όταν τα δύο στοιχεία είναι γραμμικά πολωμένα η διαρροή ρεύματος από το ένα στοιχείο στο άλλο είναι εμφανής.

Επιπρόσθετα, μελετήθηκε η απόδοση ακτινοβολίας του προτεινόμενου συστήματος. Καλύτερη απόδοση ακτινοβολίας, $\eta_{rad} = 0.97$, παρατηρείται στην κατάσταση “OFF”-

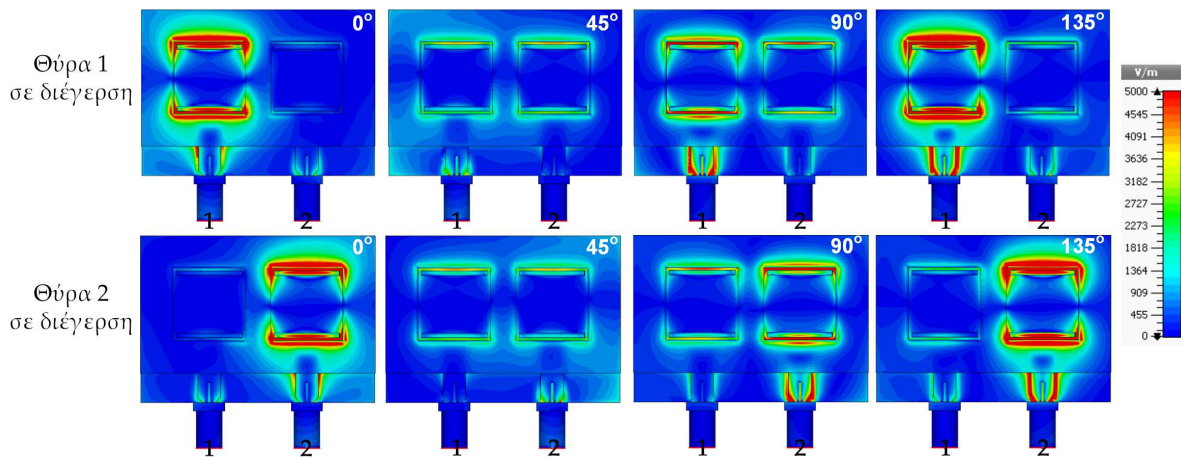


α)

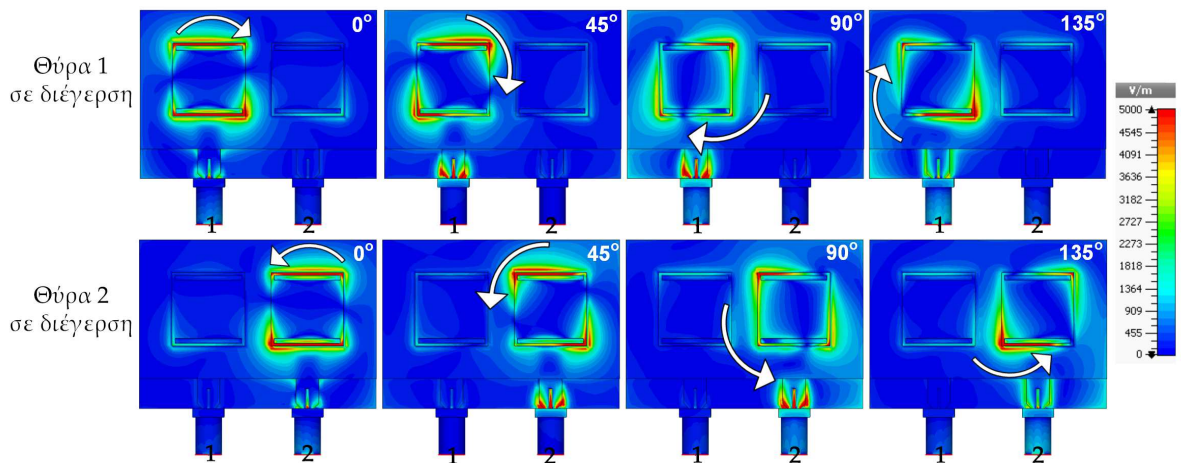


β)

Σχήμα 5.16: α) Συντελεστής ανάκλασης του πρώτου κεραιοστοιχείου, β) Συντελεστής μετάδοσης (αμοιβαία σύζευξη) μεταξύ των θυρών των στοιχείων για τις διάφορες καταστάσεις μαγνήτισης των δοκιμίων YIG (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 5.17: Απεικόνιση του μέτρου του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του προτεινόμενου συστήματος στην κατάσταση “OFF”-“OFF” όταν η θύρα 1 διεγείρεται και η θύρα 2 είναι τερματισμένη (επάνω), και όταν η θύρα 2 διεγείρεται και η θύρα 1 είναι τερματισμένη (κάτω).



Σχήμα 5.18: Απεικόνιση του μέτρου του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του προτεινόμενου συστήματος στην κατάσταση “ON(+)-“ON(-)” όταν η θύρα 1 διεγείρεται και η θύρα 2 είναι τερματισμένη (επάνω), και όταν η θύρα 2 διεγείρεται ενώ η θύρα 1 είναι τερματισμένη (κάτω). Τα βέλη λευκού χρώματος δείχνουν την στροφή του ηλεκτρικού πεδίου.

“OFF”. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις, διαπιστώνεται μείωση της απόδοσης ακτινοβολίας η οποία οφείλεται στις μαγνητικές απώλειες των πολωμένων φερριτικών υλικών. Ανάλογα με την κατάσταση μαγνήτισης των δοκιμίων, η απόδοση ακτινοβολίας κυμαίνεται από 0.7 έως 0.8. Στον Πίνακα 5.2 παρατίθενται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση και αφορούν την αμοιβαία σύζευξη και τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας του υπό μελέτη συστήματος.

Πίνακας 5.2: Αμοιβαία σύζευξη, πόλωση και απόδοση ακτινοβολίας του προτεινόμενου συστήματος στην κεντρική συχνότητα της κοινής περιοχής λειτουργίας ($f_{center} = 5.18$ GHz) για τις διάφορες καταστάσεις μαγνήτισης των δοκιμίων YIG (αποτελέσματα προσομοίωσης).

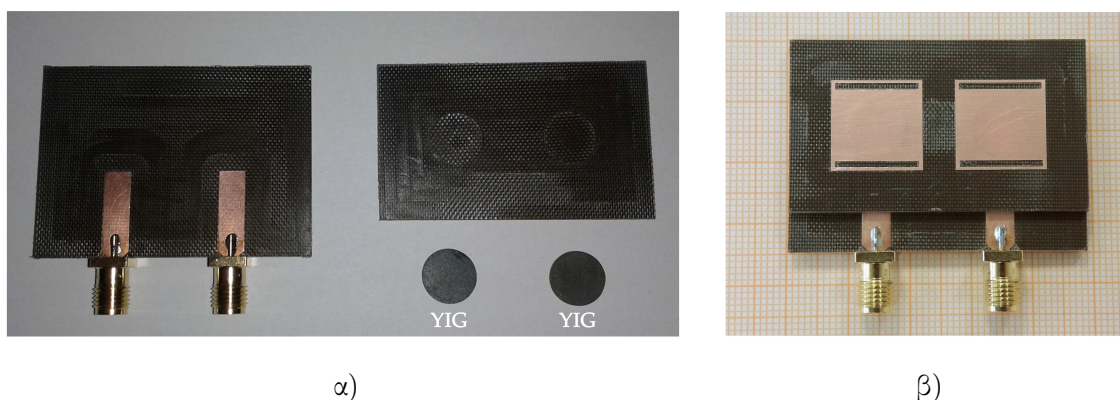
Μαγνητικό πεδίο (Oe)		Πόλωση		Απόδοση ακτινοβολίας		S_{21} (dB)
Στοιχείο 1	Στοιχείο 2	Στοιχείο 1	Στοιχείο 2	Στοιχείο 1	Στοιχείο 2	
0	0	Γραμμική	Γραμμική	0.97	0.97	-8.6
+1600	0	ΑΚΠ	Γραμμική	0.80	0.95	-13.4
+1600	+1600	ΑΚΠ	ΑΚΠ	0.76	0.68	-17.2
+1600	-1600	ΑΚΠ	ΔΚΠ	0.74	0.74	-20.7

5.4.3 Πειραματικά Αποτελέσματα

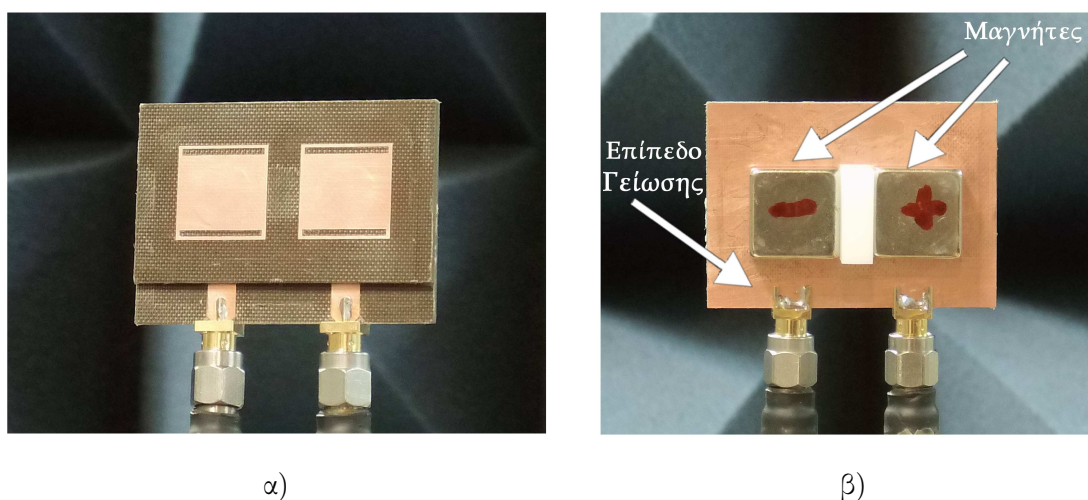
Προκειμένου να επιβεβαιωθεί πειραματικά η μείωση της αμοιβαίας σύζευξης, το σύστημα δύο κεραίων YIG-PCF κατασκευάστηκε (Σχήμα 5.19) και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των παραμέτρων σκέδασης S_{11} και S_{21} εντός του ανηχικού θαλάμου για τις καταστάσεις μαγνήτισης των δοκιμίων YIG που παρουσιάστηκαν στην υποενότητα §5.4.2. Δύο μόνιμοι μαγνήτες ορθογωνικής διατομής διαστάσεων, 15 mm x 15 mm x 8 mm, τοποθετήθηκαν ακριβώς πίσω από τα ενεργά στοιχεία και σε επαφή με το επίπεδο γείωσης με σκοπό την παραγωγή μαγνητικού πεδίου 1600 Oe στο εσωτερικό του κάθε δοκιμίου (Σχήμα 5.20). Επίσης, χρησιμοποιήθηκε ένας διαχωριστής από σχετικά ηλεκτρομαγνητικά “αόρατο” υλικό ώστε να διατηρούνται οι δύο μαγνήτες στην κατάλληλη απόσταση κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Αναλογα με την κατάσταση μαγνήτισης των δύο δοκιμίων, οι μαγνήτες τοποθετήθηκαν είτε προς την ίδια κατεύθυνση είτε σε αντίθετη κατεύθυνση.

Τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μέτρηση των παραμέτρων σκέδασης S_{11} και S_{21} στην περιοχή συχνοτήτων 4.4 – 5.8 GHz, παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.21. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτά με τα αποτελέσματα προσομοίωσης (Σχήμα 5.16), διαπιστώνεται ότι η κοινή περιοχή λειτουργίας μετατοπίζεται σε υψηλότερες συχνότητες (5.13 – 5.33 GHz) και το εύρος ζώνης αυξάνεται ($BW_{meas} = 200$ MHz). Οι μικρές αποκλίσεις που παρατηρούνται οφείλονται στη μη καλή ομοιογένεια του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου.

Οι τιμές του πειραματικού συντελεστή μετάδοσης στην κεντρική συχνότητα $f_{center} = 5.23$ GHz της κοινής περιοχής λειτουργίας συνοψίζονται στον Πίνακα 5.3. Μεγαλύτερη μείωση της αμοιβαίας σύζευξης επιτυγχάνεται όταν μαγνητικό πεδίο αντίθετης πολικότητας εφαρμόζεται στα δύο δοκίμια YIG ($S_{21} = -17.3$ dB). Η καλή συμφωνία που παρατηρείται ανάμεσα στα αριθμητικά και στα πειραματικά δεδομένα επιβεβαιώνει τη δυνατότητα περιορισμού της αμοιβαίας σύζευξης με τη χρήση μαγνητο-διηλεκτρικών υλικών.



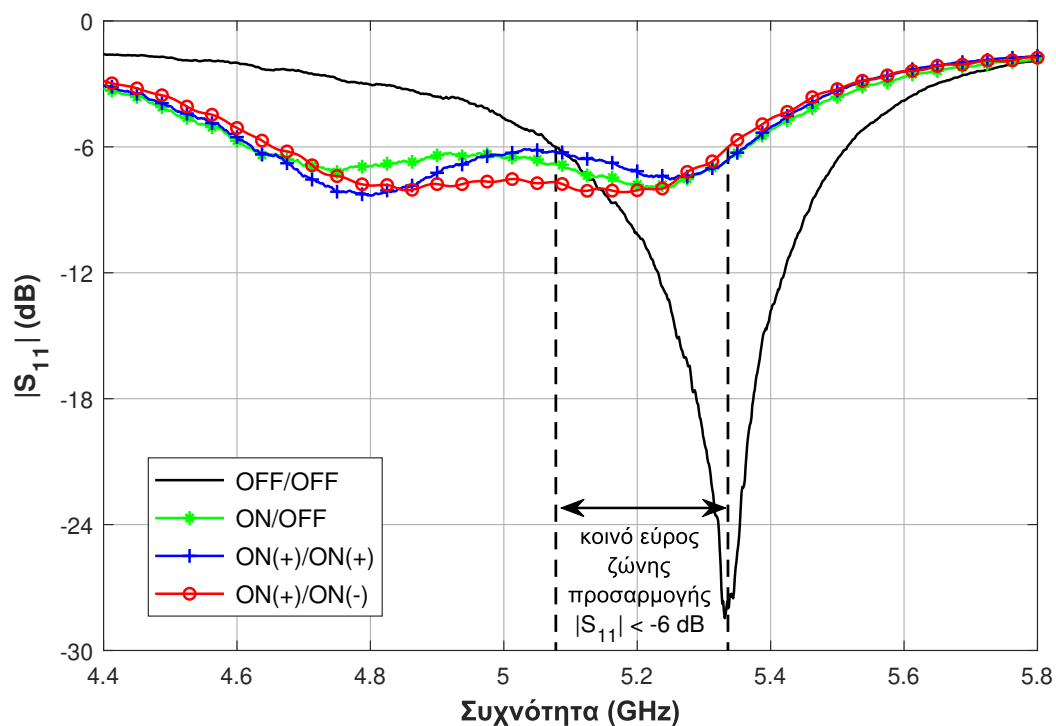
Σχήμα 5.19: Εργαστηριακό πρωτότυπο του συστήματος δύο κεραιών YIG-PCF: α) δομικά στοιχεία β) εμπρόσθια όψη.



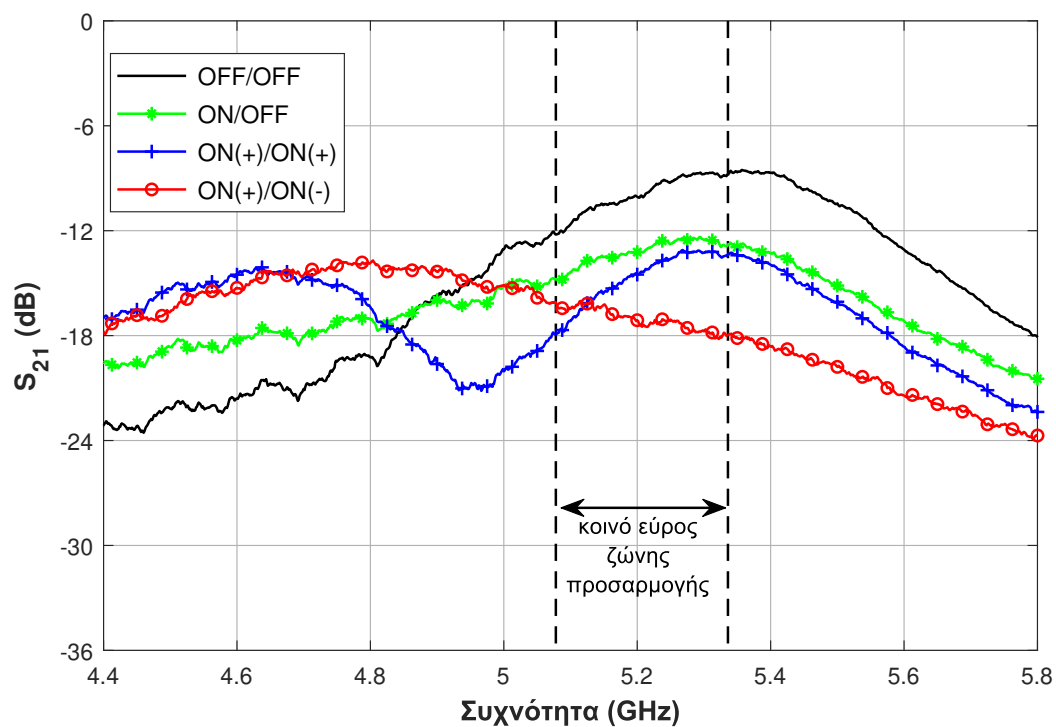
Σχήμα 5.20: Εργαστηριακό πρωτότυπο του συστήματος δύο κεραιών και μόνιμοι μαγνήτες εντός του ανηχικού θαλάμου α) εμπρόσθια όψη, β) οπίσθια όψη.

Πίνακας 5.3: Αμοιβαία σύζευξη του προτεινόμενου συστήματος στην κεντρική συχνότητα $f_{center} = 5.23$ GHz για τις διάφορες καταστάσεις μαγνήτισης των μαγνητο-διηλεκτρικών υλικών, όπως προέκυψε από τις μέτρησεις.

Μαγνητικό πεδίο (Oe)		S_{21} (dB)
Στοιχείο 1	Στοιχείο 2	
0	0	-9.3
+1600	0	-12.7
+1600	+1600	-13.8
+1600	-1600	-17.3



α)



β)

Σχήμα 5.21: α) Πειραματικός συντελεστής ανάκλασης του πρώτου κεραιοστοιχείου, β) Πειραματικός συντελεστής μετάδοσης (αμοιβαία σύζευξη) μεταξύ των στοιχείων για τις διάφορες καταστάσεις μαγνήτισης των δοκιμίων YIG.

5.5 Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάστηκε μια τεχνική καταπίεσης του ανεπιθύμητου φαινομένου της αμοιβαίας σύζευξης η οποία περιλαμβάνει τη χρήση μαγνητο-διηλεκτρικών υλικών. Το σύστημα κεραιών που σχεδιάστηκε, προσομοιώθηκε και κατασκευάστηκε για τις ανάγκες της μελέτης αυτής αποτελείται από δύο κεραιές μικροταινιακού καλύμματος με τροφοδοσία σύζευξης γειτνίασης και δύο κυλινδρικά δοκίμια YIG ενσωματωμένα στο ανώτερο διηλεκτρικό υπόστρωμα κάτω από τα ακτινοβολούντα στοιχεία. Τα στοιχεία τοποθετήθηκαν σε απόσταση $\lambda/3$ και μελετήθηκε η αμοιβαία σύζευξη για διάφορους συνδυασμούς καταστάσεων μαγνήτισης των δοκιμίων. Η βασική ιδέα είναι η αξιοποίηση της αναδιαρθρωσιμότητας πόλωσης που παρουσιάζει κάθε κεραιοστοιχείο υπό την παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Η προτεινόμενη τεχνική παρουσιάζει χαμηλή πολυπλοκότητα και κόστος και παρέχει καταπίεση της αμοιβαίας σύζευξης η οποία κυμαίνεται από 4 έως 10 dB, όπως αποδείχθηκε αριθμητικά και πειραματικά. Η επιτεύξιμη αποσύζευξη καθορίζεται από την κατάσταση μαγνήτισης των δοκιμίων και την πολικότητα του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Η μεγαλύτερη μείωση επιτυγχάνεται στην περίπτωση εφαρμογής μαγνητικού πεδίου αντίθετης πολικότητας στα δύο δοκίμια. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση εφαρμογής μαγνητικού πεδίου κατά τη θετική διεύθυνση του άξονα z στο ένα δοκίμιο και κατά την αρνητική διεύθυνση του άξονα z στο δεύτερο παρατηρείται μείωση της σύζευξης κατά περίπου 10 dB σε σχέση με την περίπτωση που τα δοκίμια είναι αμαγνήτιστα. Συμπερασματικά, η διαφορετική στροφή κυκλικής πόλωσης που εμφανίζει το κάθε στοιχείο οδηγεί στη διατάραξη της επιφανειακής ρευματικής κατανομής προκαλώντας μείωση της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ τους. Αντίθετα, όταν τα δύο στοιχεία είναι γραμμικά πολωμένα (αμαγνήτιστη κατάσταση) η διαρροή ρεύματος από το ένα στοιχείο στο άλλο είναι εμφανής.

Κεφάλαιο 6

Αναδιαρθρώσιμες Κεραίες σε Υπόστρωμα Πολυμερικής Μήτρας Μαγνητο-Διηλεκτρικού Υλικού

Το κεφάλαιο αυτό εστιάζει στην ανάλυση, σχεδίαση και κατασκευή αναδιαρθρώσιμων κεραιών μικροταινιακού καλύμματος τυπωμένων πάνω σε υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας μαγνητο-διηλεκτρικού υλικού. Αρχικά, γίνεται αναφορά στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας μαγνητο-διηλεκτρικού υλικού και παρουσιάζεται η μεθοδολογία για την παρασκευή σύνθετων υλικών αποτελούμενων από σωματίδια φερρίτη διεσπαρμένων σε πολυμερική μήτρα. Ο πρώτος στόχος είναι να παρασκευαστεί ένα σύνθετο υλικό το οποίο θα χρησιμοποιηθεί ως υπόστρωμα σε μια τυπωμένη κεραία μικροταινιακού καλύμματος, η οποία θα μπορεί να μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά της με ελεγχόμενο τρόπο υπό την επίδραση μεταβαλλόμενου εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Η προτεινόμενη μέθοδος ενσωμάτωσης του μαγνητο-διηλεκτρικού υλικού είναι απαλλαγμένη από τα κατασκευαστικά προβλήματα της αρχικής μεθόδου (ανακρίβεια στις διαστάσεις του δοκιμίου, στη δημιουργία εσοχής και στον τρόπο τοποθέτησής του στο υπόστρωμα) στην οποία τμήμα του συμβατικού διηλεκτρικού υποστρώματος αντικαθίσταται από ένα μαγνητο-διηλεκτρικό δοκίμιο σε συμπαγή μορφή (Κεφάλαιο 4).

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η σχεδίαση και κατασκευή μιας κεραίας μικροταινιακού καλύμματος με ένθετη τροφοδοσία πάνω σε υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας φερρίτη με κατά βάρος αναλογία 40/60 w/w%. Προκειμένου να διαπιστωθεί η δυνατότητα μεταβολής της συχνότητας συντονισμού και της πόλωσής της, πραγματοποιούνται μετρήσεις στις δύο καταστάσεις λειτουργίας της κεραίας (αμαγνήτιστη και πλήρως μαγνητισμένη). Κατόπιν, μελετάται η επίδραση των διηλεκτρικών και των μαγνητικών ιδιοτήτων του υποστρώματος στην απόδοση ακτινοβολίας της κεραίας και παρασκευάζεται σύνθετο υλικό με βελτιωμένες διηλεκτρικές ιδιότητες. Στην τελευταία ενότητα του Κεφαλαίου, χρησιμοποιώντας το μοντέλο κοιλότητας αναλύεται η λειτουργία μιας κεραίας κυκλικού μικροταινιακού καλύμματος

πάνω σε υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας-φερρίτη στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση. Η μελέτη αυτή παρέχει το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την αρχική σχεδίαση καθώς και την βελτιστοποίησή της. Για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη θεωρητική ανάλυση, πραγματοποιείται προσομοίωση πλήρους κύματος της κεραίας πάνω στο υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας-φερρίτη με τις βελτιωμένες ιδιότητες καθώς και μετρήσεις του εργαστηριακού πρωτότυπου που κατασκευάστηκε.

6.1 Σύνθετα Υλικά Πολυμερικής Μήτρας Μαγνητο-Διηλεκτρικού Υλικού

Τα σύνθετα (composite) υλικά χρησιμοποιούνται έναντι των συμβατικών υλικών σε πληθώρα εφαρμογών λόγω των βελτιωμένων και μοναδικών ιδιοτήτων που παρουσιάζουν σε σχέση με εκείνες των επιμέρους συστατικών τους. Αποτελούνται από δύο ή περισσότερα συστατικά μέρη ή “φάσεις”: την πρωτεύουσα φάση που καλείται μήτρα (matrix), το συστατικό ενίσχυσης ή έγκλεισμα (filler) το οποίο είναι διεσπαρμένο υπό μορφή σωματιδίων ή ινών μέσα στη φάση της μήτρας και τη ζώνη αλληλεπίδρασης μεταξύ της μήτρας και του συστατικού ενίσχυσης η οποία αποτελεί την ενδιάμεση φάση. Η μήτρα είναι χαμηλής πυκνότητας και εξασφαλίζει τη συγκράτηση των διεσπαρμένων σωματιδίων, ενώ η ενσωμάτωση της δευτερεύουσας φάσης μέσα στη μήτρα προσδίδει τις βελτιωμένες ιδιότητες στο σύνθετο υλικό. Με προσεκτική επιλογή των επιμέρους συστατικών και της μεθόδου παρασκευής, είναι δυνατόν να αποκτηθούν οι επιθυμητές ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του σύνθετου υλικού που θα ικανοποιούν τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

Η παρούσα μελέτη εστιάζει σε σύνθετα υλικά αποτελούμενα από σωματίδια φερρίτη διεσπαρμένων σε πολυμερική μήτρα με στόχο τη χρήση τους ως υπόστρωμα στην ανάπτυξη τυπωμένων αναδιαρθρώσιμων κεραίων. Το βασικό χαρακτηριστικό αυτής της κατηγορίας υλικών είναι η δυνατότητα ελέγχου των μαγνητικών τους ιδιοτήτων με την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Το γεγονός ότι το μαγνητο-διηλεκτρικό υλικό είναι διεσπαρμένο σε όλο το υπόστρωμα επιτρέπει τη δυνατότητα αξιοποίησης των μοναδικών ιδιοτήτων του μόνο στην περιοχή στην οποία εφαρμόζεται το μαγνητικό πεδίο, παρέχοντας ευελιξία στη σχεδίαση αναδιαρθρώσιμων κεραίων. Στα πλεονεκτήματά τους συγκαταλέγονται επίσης η δυνατότητα ελέγχου της αναλογίας μεταξύ πολυμερικής μήτρας και φερρίτη, η ευκολότερη κατεργασία σε σύγκριση με τα συμπαγή κεραμικά υλικά, η κατασκευαστική ευκολία και το σχετικά χαμηλό κόστος παραγωγής. Ωστόσο, κατά τη διαδικασία παρασκευής τους πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στο μέγεθος των σωματιδίων, στη διασπορά των σωματιδίων μέσα στην πολυμερική μήτρα και στην ομοιογένεια του υλικού.

6.1.1 Προτεινόμενη Διαδικασία Παρασκευής

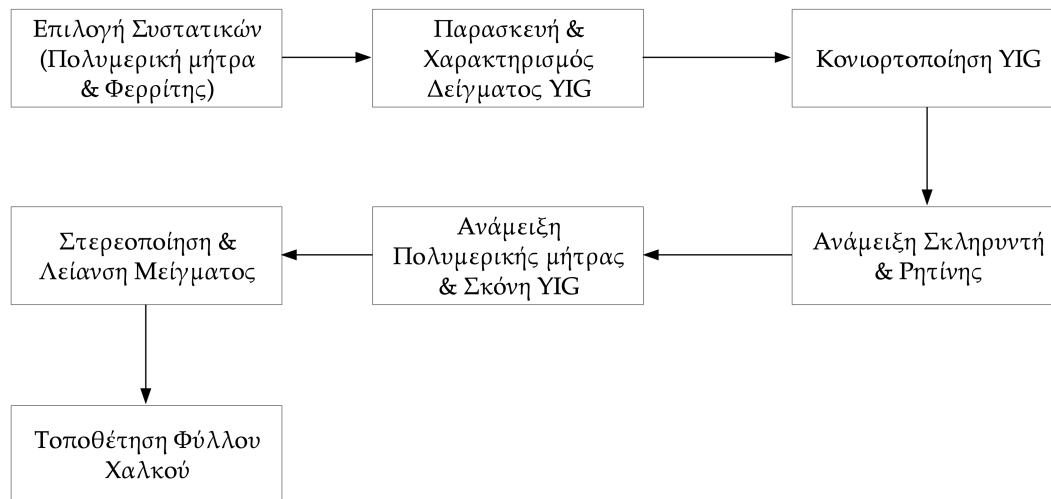
Τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας-φερρίτη, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της Διατριβής, παρασκευάστηκαν στο INN/Δ. Η διαδικασία παρασκευής τους περιλαμβάνει τα εξής στάδια (Σχήμα 6.1): (1) Αρχικά, γίνεται επιλογή των επιμέρους συστατικών. Ως πολυμερική μήτρα χρησιμοποιήθηκε η εποξική ρητίνη (epoxy resin) και ως συστατικό ενίσχυσης επιλέχθηκε ο φερρίτης με δομή γρανάτη YIG για τους λόγους που έχουν αναφερθεί παραπάνω. (2) Ακολουθεί η παρασκευή και ο χαρακτηρισμός του δείγματος YIG, όπως περιγράφηκε στην ενότητα §5.3.1. Στην περίπτωση χρήσης εμπορικά διαθέσιμου φερρίτη, αυτό το στάδιο παραλείπεται. (3) Έπειτα, το φερριτικό δείγμα υφίσταται κονιορτοποίηση. (4) Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει την ανάμειξη των δύο μερών του πολυμερικού συστήματος (ρητίνης και σκληρυντή) στις αναλογίες που προτείνονται από τον κατασκευαστή. Η ανάμειξη των δύο μερών απαιτεί καλή ανάδευση για 2 λεπτά ώστε να αποφευχθεί η εισαγωγή φυσαλλίδων στη ρητίνη. (5) Στη συνέχεια, γίνεται ανάμειξη της πολυμερικής μήτρας με την κεραμική σκόνη YIG, μέχρι να επιτευχθεί ομοιογένεια. (6) Το μείγμα πολυμερούς-κεραμικής σκόνης χύνεται σε τετραγωνικό καλούπι και παραμένει σε αυτό για τουλάχιστον 12 ώρες. Μετά τη στερεοποίηση του μίγματος, αφαιρείται από το καλούπι και ακολουθεί η λείανση των δύο επιφανειών του. (7) Το τελευταίο στάδιο περιλαμβάνει την επικόλληση φύλλου χαλκού (Cu) πάχους 0.08 mm στη μια πλευρά του στερεοποιημένου δείγματος.

6.2 Αρχική Κεραία Μικροταινιακού Καλύμματος σε Υπόστρωμα Πολυμερικής Μήτρας-Φερρίτη

6.2.1 Παρασκευή και Χαρακτηρισμός Σύνθετου Δείγματος YIG/Epoxy

Ένα σύνθετο δείγμα πολυμερικής μήτρας μέσα στην οποία βρίσκονται διεσπαρμένα σωματίδια YIG παρασκευάστηκε σύμφωνα με τη διαδικασία που απεικονίζεται στο Σχήμα 6.1. Συγκεκριμένα, για την παρασκευή του σύνθετου δείγματος χρησιμοποιήθηκε το πολυμερικό σύστημα ρητίνης/σκληρυντή EpoFix που διατίθεται από την εταιρεία Struers διότι εμφανίζει χαμηλή θερμοκρασία σκλήρυνσης στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, χαμηλό ιξώδες, διαύγεια, υψηλή χημική αντίσταση και καλές μηχανικές ιδιότητες. Το ομοιογενές σύνθετο μείγμα με κατά βάρος αναλογία 60% YIG/40% εποξική ρητίνη, το οποίο παρασκευάστηκε θα αναφέρεται ως YIG-Epoxy composite 1 στο υπόλοιπο της Διατριβής. Οι τελικές διαστάσεις του στερεοποιημένου μίγματος μετά τη λείανση των επιφανειών του είναι 47 mm x 47 mm x 1.82 mm.

Ο δομικός χαρακτηρισμός του YIG-Epoxy composite 1 δείγματος έγινε με χρήση της

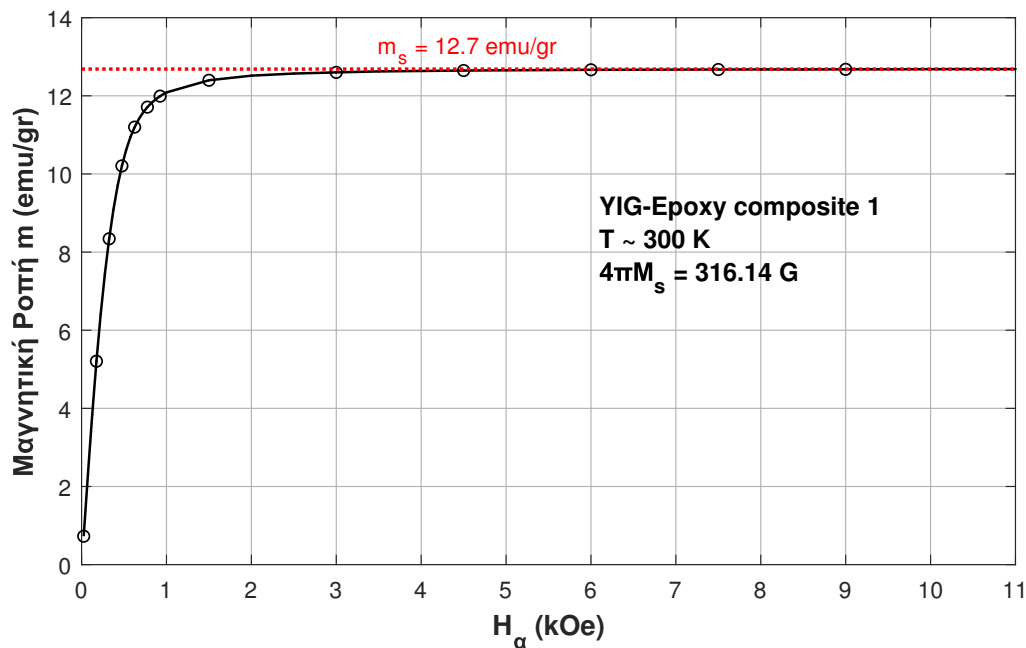


Σχήμα 6.1: Στάδια παρασκευής σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας-φερρίτη.

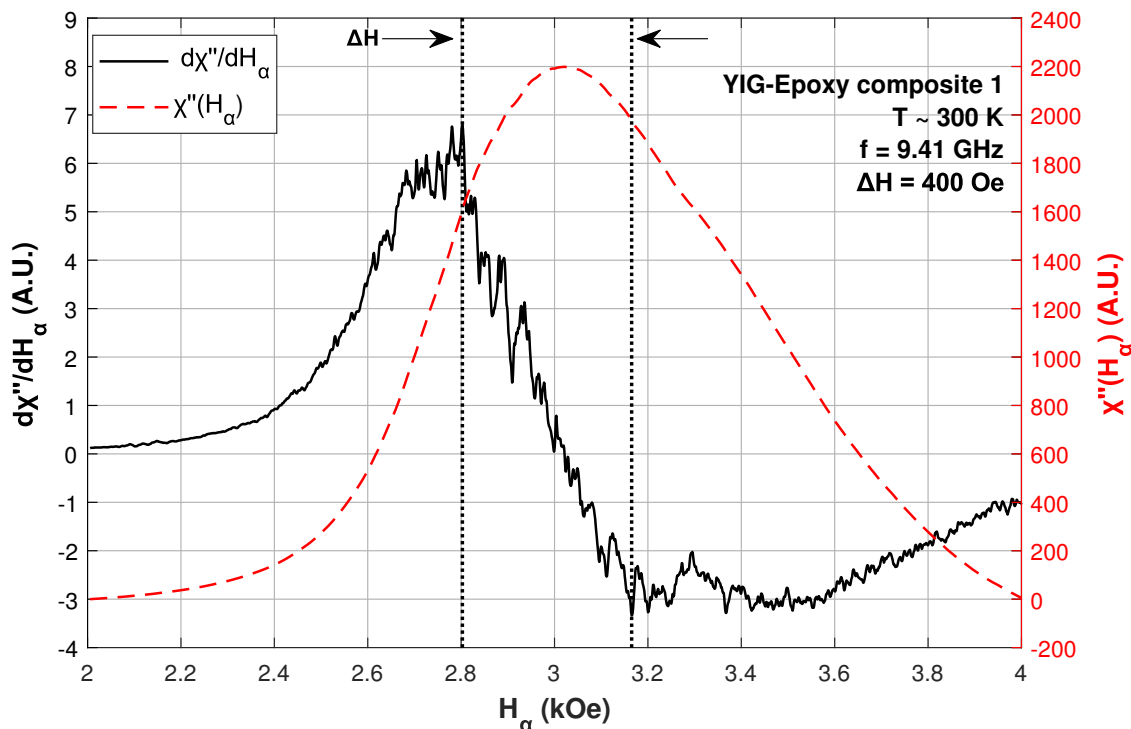
μεθόδου περιθλασιμετρίας ακτινών X. Από την ανάλυση των δεδομένων περίθλασης με τη μέθοδο Rietveld, διαπιστώθηκε ότι η κρυσταλλικότητα της σκόνης YIG δεν αλλοιώθηκε έπειτα από την ανάμειξη με την εποξική ρητίνη. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις της μαγνήτισης συναρτήσεως του DC μαγνητικού πεδίου H_α σε θερμοκρασία δωματίου, με τη βοήθεια του μαγνητόμετρου SQUID παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.2. Παρατηρείται ότι η μαγνήτιση κόρου του σύνθετου υλικού $4\pi M_s = 316.14$ G είναι αισθητά μικρότερη σε σύγκριση με τη μαγνήτιση κόρου του καθαρού YIG ($4\pi M_{s,YIG} = 1832$ G, Πίνακας 5.1).

Το Σχήμα 6.3 δείχνει το φάσμα σιδηρομαγνητικού συντονισμού για το YIG-Epoxy composite 1, το οποίο λήφθηκε με το EPR σε θερμοκρασία δωματίου. Το γεγονός ότι η τιμή του πλάτους σιδηρομαγνητικού συντονισμού του σύνθετου υλικού $\Delta H = 400$ Oe είναι πολύ μεγαλύτερη από το πλάτος σιδηρομαγνητικού συντονισμού του καθαρού YIG ($\Delta H_{YIG} = 104$ Oe, Πίνακας 5.1) οφείλεται στη διπολική αλληλεπίδραση των σωματιδίων YIG που είναι διεσπαρμένα στην εποξική ρητίνη ως αποτέλεσμα της μεταξύ τους ανάμειξης.

Η διαδικασία που ακολουθείται για την εκτίμηση των διηλεκτρικών ιδιοτήτων του YIG-Epoxy composite 1 είναι η εξής: (1) Εκτίμηση των τιμών της σχετικής διηλεκτρικής επιτρεπτότητας ϵ_r και της εφαπτομένης απωλειών $\tan\delta_e$ με βάση τιμές από τη βιβλιογραφία. (2) Σχεδίαση και προσομοίωση μιας κεραίας ορθογωνικού μικροταινιακού καλύμματος με ένθετη τροφοδοσία πάνω σε υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας-φερρίτη στην περιοχή των 5.5 GHz. (3) Κατασκευή του εργαστηριακού πρωτότυπου της κεραίας και μέτρηση του συντελεστή ανάκλασης S_{11} στην αμαγνήτιστη κατάσταση. (4) Σύγκριση των αριθμητικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων. (5) Λαμβάνοντας υπόψη τις αποκλίσεις μεταξύ προσομοίωσης και μετρήσεων, επαναλαμβάνονται οι παραμετρικές προσομοιώσεις (ως προς ϵ_r και $\tan\delta_e$) μέχρι να ταυτιστεί η καμπύλη του μέτρου του συντελεστή ανάκλασης που προέκυψε από την προσομοίωση με την αντίστοιχη των μετρήσεων. Με αυτό τον τρόπο,



Σχήμα 6.2: Μεταβολή της μαγνητικής ροπής $m(H_a)$ ανά γραμμάριο μάζας συναρτήσει του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου H_a για το YIG-Epoxy composite 1.



Σχήμα 6.3: Φάσμα FMR $d\chi''/dH_a$ (μαύρη συμπαγής γραμμή) και καμπύλη $\chi''(H_a)$ (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) για το YIG-Epoxy composite 1.

εκτιμήθηκε ότι η σχετική διηλεκτρική επιτρεπτότητα και η εφαπτομένη απωλειών του σύνθετου υλικού είναι $\epsilon_r = 3.65$ και $\tan\delta_e = 0.024$ αντίστοιχα. Οι αντίστοιχες τιμές για το

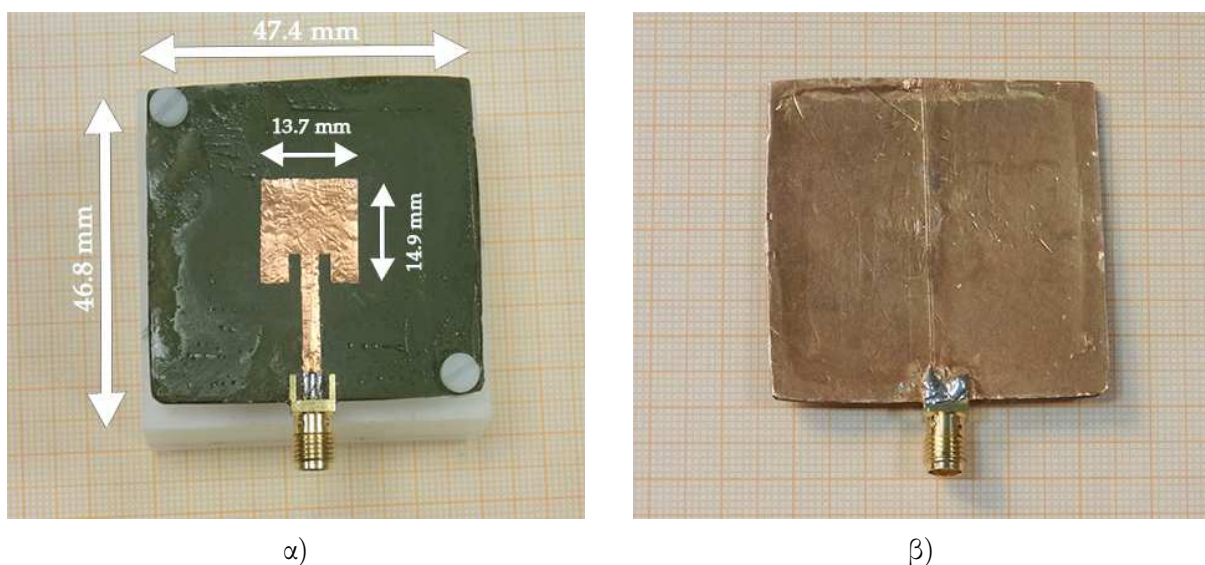
Πίνακας 6.1: Διηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες του δείγματος YIG-Epoxy composite 1.

Διηλεκτρικές Ιδιότητες		Μαγνητικές Ιδιότητες	
ϵ_r	$\tan\delta_e$	$4\pi M_s$ (G)	ΔH (Oe)
3.65	0.024	316.14	400

καθαρό YIG είναι $\epsilon_{r,YIG} = 16.5$ και $\tan\delta_{e,YIG} = 0.001$. Στον Πίνακα 6.1 συνοψίζονται οι διηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες του YIG-Epoxy composite 1.

6.2.2 Κατασκευή Εργαστηριακού Πρωτοτύπου

Το εργαστηριακό πρωτότυπο μιας κεραίας μικροταινιακού καλύμματος με ένθετη τροφοδοσία κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας φύλλο χαλκού πάχους 0.08 mm το οποίο κολλήθηκε στην πάνω πλευρά του υποστρώματος YIG-Epoxy composite 1. Οι διαστάσεις του αγώγιμου καλύμματος (13.7 mm x 14.9 mm) προσδιορίστηκαν μέσω προσομοιώσεων ώστε η προτεινόμενη κεραία να λειτουργεί στην ζώνη συχνοτήτων 5.5 GHz. Στο άκρο της μικροταινιακής γραμμής αντίστασης 50 Ω συγκολλήθηκε ομοαξονικός συνδετήρας SMA. Οι συνολικές διαστάσεις της κεραίας είναι 47.4 mm x 46.8 mm. Η εμπρόσθια και η οπίσθια όψη του εργαστηριακού πρωτοτύπου της κεραίας φαίνονται στο Σχήμα 6.4. Η συγκεκριμένη κεραία θα αναφέρεται ως κεραία YIG-Epoxy MSF (MicroStrip Fed) - 1 στο υπόλοιπο της Διατριβής.

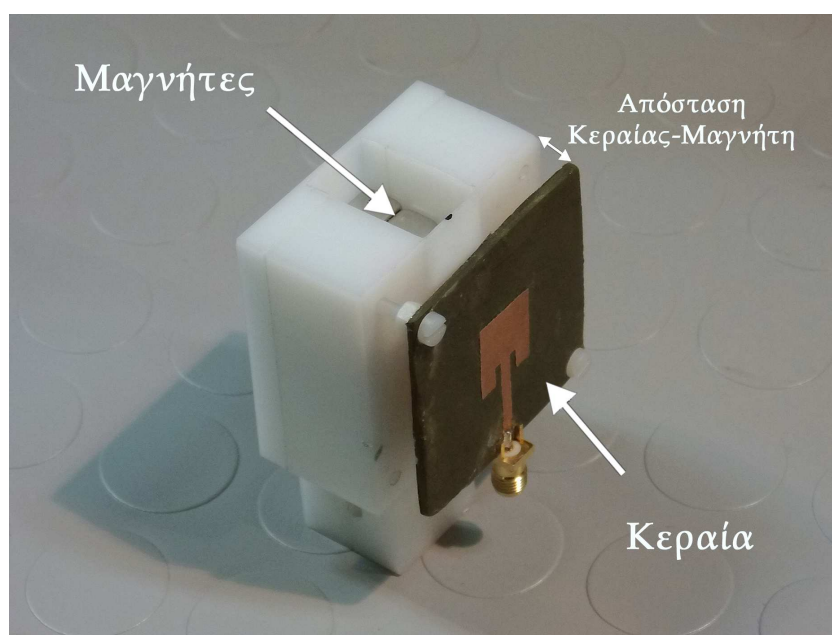


Σχήμα 6.4: Εργαστηριακό πρωτότυπο της κεραίας μικροταινιακού καλύμματος με ένθετη τροφοδοσία σε υπόστρωμα YIG-Epoxy composite 1: α) εμπρόσθια όψη, β) οπίσθια όψη.

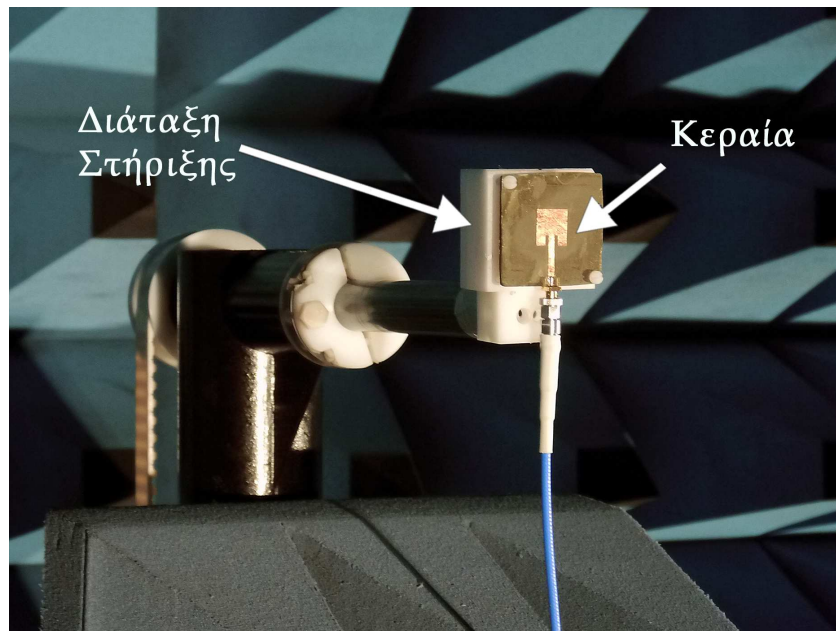
6.2.3 Πειραματικά Αποτελέσματα

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του μέτρου του συντελεστή ανάκλασης και της πόλωσης της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 στην αμαγνήτιστη και στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση στον ανηχικό θάλαμο του ΠΠΤ/Δ. Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων υπό την επίδραση μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου κατασκευάστηκε μια διάταξη στήριξης με διαφορετικό σχήμα και μέγεθος σε σχέση με εκείνη του Σχήματος 3.10. Η διάταξη αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 6.5 και παρουσιάζει μεγαλύτερη ευελιξία σε ό,τι αφορά την περιστροφή της κεραίας ως προς τους δύο άξονες θ και ϕ κατά τη διαδικασία των μετρήσεων. Μία στοιβία μόνιμων μαγνητών ορθογωνικής διατομής διαστάσεων 15 mm x 15 mm x 8 mm τοποθετείται κάτω από το επίπεδο γείωσης στο κέντρο του αγωγίμου καλύμματος της προτεινόμενης κεραίας, ώστε το παραγόμενο στατικό μαγνητικό πεδίο να είναι αρκετά ισχυρό και να ικανοποιείται η συνθήκη κορεσμού του υλικού ($H_0 > N_z \cdot 4\pi M_s$). Η απόσταση μεταξύ της κεραίας και της στοιβίας των μόνιμων μαγνητών μεταβάλλεται περιστρέφοντας κατάλληλα τις βίδες συγκράτησης, με αποτέλεσμα την ελεγχόμενη μεταβολή της έντασης του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου.

Η AUT (αποτελείται από την κεραία YIG-Epoxy MSF-1, τη στοιβία μόνιμων μαγνητών για την πόλωση του σύνθετου υποστρώματος και τη διάταξη στήριξης) τοποθετήθηκε εντός του ανηχικού θαλάμου (Σχήμα 6.6) και συνδέθηκε στη θύρα-1 του VNA με ομοαξονικό καλώδιο χαμηλών απωλειών και χαρακτηριστικής αντίστασης 50 Ω. Οι μετρήσεις του μέτρου του συντελεστή ανάκλασης πραγματοποιήθηκαν όταν η στοιβία μαγνητών τοποθετήθηκε σε απόσταση ίση με 6 mm, 7 mm και 8 mm από το επίπεδο γείωσης. Σε κάθε περίπτωση,



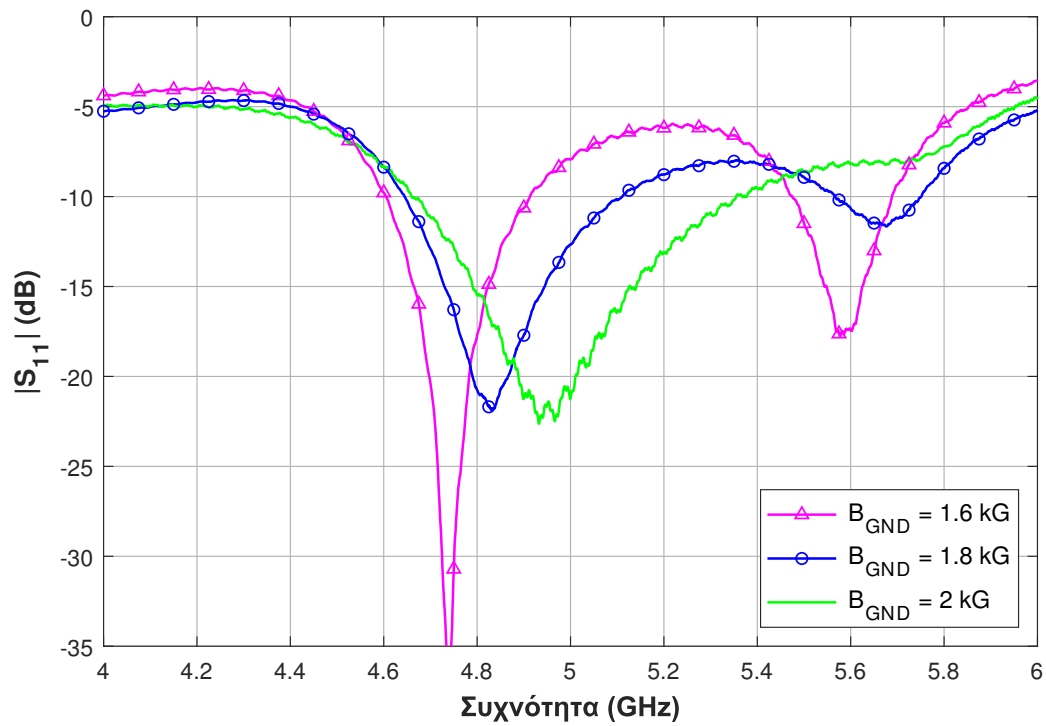
Σχήμα 6.5: Διάταξη στήριξης για μετρήσεις τυπωμένων κεραιών πάνω σε σύνθετο υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας-μαγνητοδιηλεκτρικού υλικού υπό την επίδραση μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.



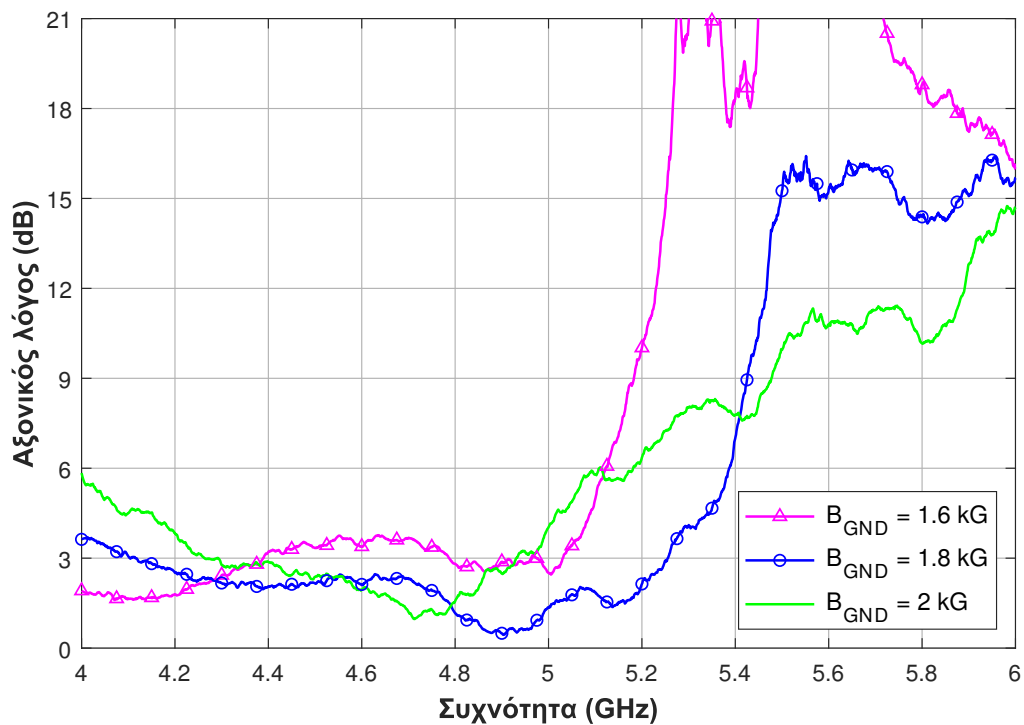
Σχήμα 6.6: Το εργαστηριακό πρωτότυπο της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 και στοίβα μόνιμων μαγνητών ορθογωνικού σχήματος τοποθετημένα εντός του ανηχικού θαλάμου.

η ένταση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου προσδιορίστηκε μετρώντας την DC πυκνότητα μαγνητικής ροής στο κέντρο του επιπέδου γείωσης B_{GND} με τη βοήθεια του μαγνητόμετρου χειρός. Με αυτό τον τρόπο προέκυψε ότι $B_{GND} = 1.6 \text{ kG}$, 1.8 kG και 2 kG όταν $d_{AUT-magnets} = 6 \text{ mm}$, 7 mm και 8 mm αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, μία γραμμικά πολωμένη κεραία αναφοράς συνδέθηκε στην άλλη θύρα του VNA και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της πόλωσης της υπό εξέταση κεραίας για διάφορες τιμές εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου ($B_{GND} = 1.6 \text{ kG}$, 1.8 kG , 2 kG). Συγκεκριμένα, μετρήθηκε η λαμβανόμενη ισχύς στην κεραία αναφοράς καθώς αυτή περιστρέφεται σε επίπεδο κάθετο προς την κατεύθυνση του προσπίπτοντος πεδίου σε τέσσερις διαφορετικές θέσεις (0° , 45° , 90° , 135°) και υπολογίστηκε ο αξονικός λόγος της πόλωσης. Αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας των μετρήσεων πόλωσης παρουσιάστηκε στην ενότητα §3.5.6.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις του συντελεστή ανάκλασης και της πόλωσης της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 στην περιοχή συχνοτήτων $4 - 6 \text{ GHz}$ παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.7 και 6.8. Στην “κατάσταση OFF” ($B_{GND} = 0 \text{ kG}$), η κεραία συντονίζεται στη συχνότητα 5.4 GHz και έχει γραμμική πόλωση ($AR = 23 \text{ dB}$). Με την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου εμφανίζονται δύο συντονισμοί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.7α. Ενδεικτικά, για $B_{GND} = 1.6 \text{ kG}$ η προτεινόμενη κεραία εμφανίζει συντονισμούς στις συχνότητες 4.74 kG και 5.59 kG . Καθώς αυξάνεται η ένταση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου ($1.6 \text{ kG} \leq B_{GND} \leq 2 \text{ kG}$), ο πρώτος συντονισμός μετατοπίζεται σε υψηλότερες συχνότητες και ταυτόχρονα αυξάνεται το εύρος ζώνης της κάτω ζώνης λειτουργίας, ενώ ο δεύτερος συντονισμός τείνει να εξαφανιστεί. Επιπρόσθετα, διαπιστώνεται ότι κατά τη μετάβαση του σύνθετου δείγματος πολυμερικής μήτρας-φερρίτη

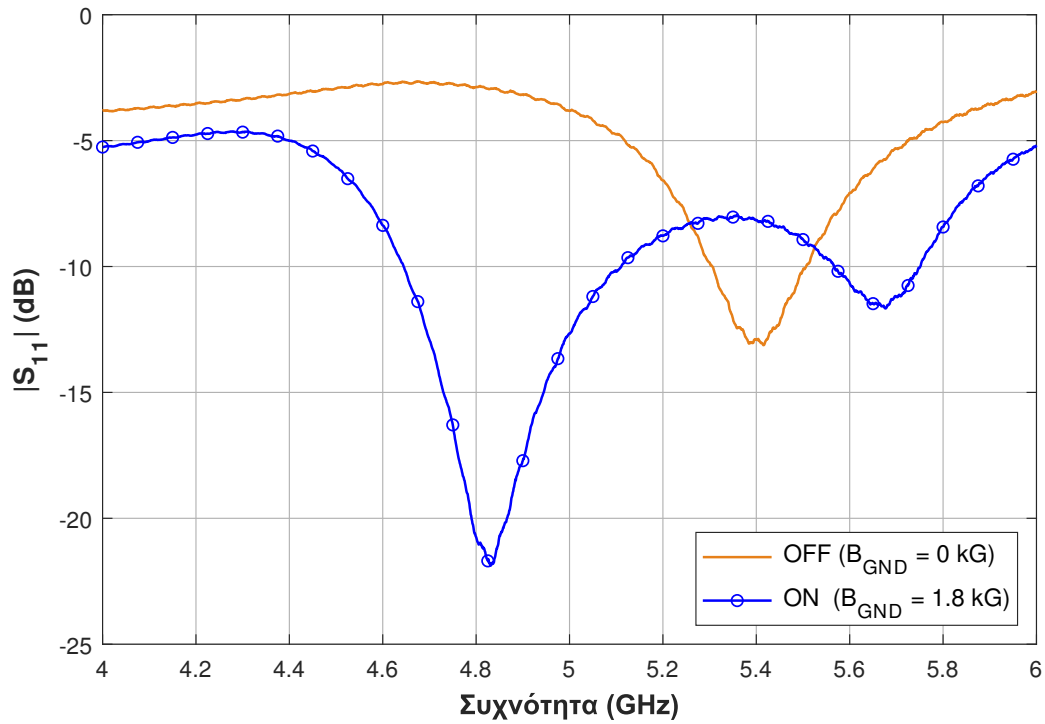


α)

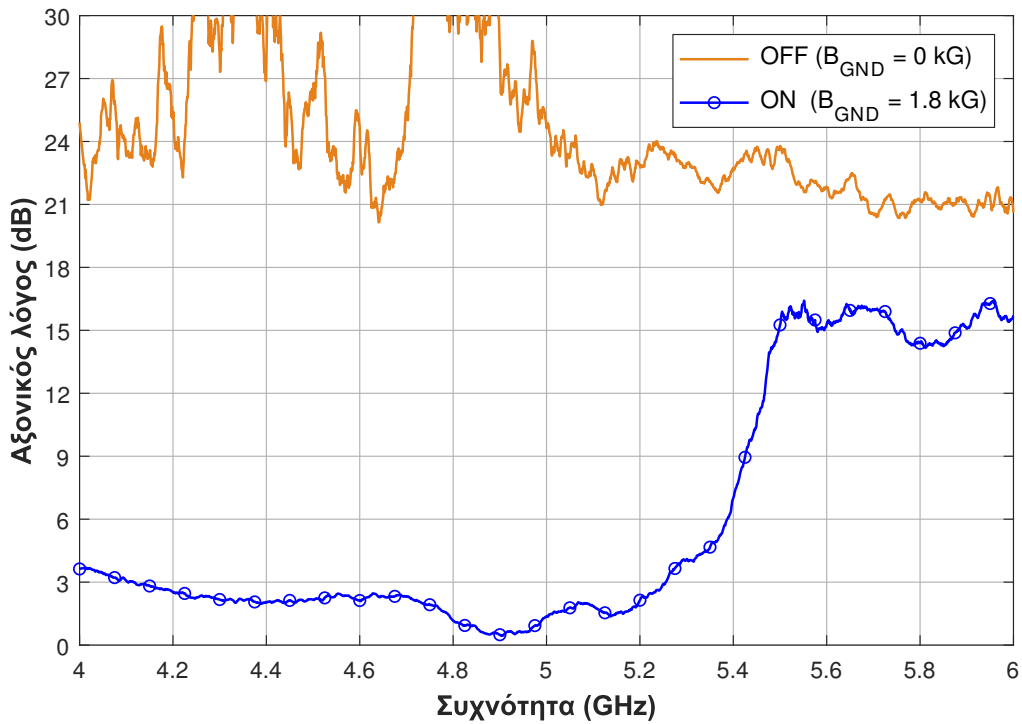


β)

Σχήμα 6.7: α) Μέτρο του συντελεστή ανάκλασης και β) αξονικός λόγος της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 για διάφορες τιμές του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου B_{GND} , όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις.



α)



β)

Σχήμα 6.8: α) Μέτρο του συντελεστή ανάκλασης και β) αξονικός λόγος της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 στις δύο καταστάσεις λειτουργίας της, όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις.

Πίνακας 6.2: Χαρακτηριστικά λειτουργίας της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 στην “κατάσταση OFF” και στην “κατάσταση ON” για διάφορες τιμές του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου (μετρήσεις).

DC Μαγνητικό Πεδίο (kG)	f_{res} (GHz)	AR (dB)	Πόλωση
0	5.4	23	Γραμμική
1.6	4.74	3.20	Κυκλική
1.8	4.83	0.98	Κυκλική
2.0	4.93	3.07	Κυκλική

από την “κατάσταση OFF” στην “κατάσταση ON” το λειτουργικό εύρος ζώνης της κεραίας ($|S_{11}| \leq -10$ dB) αυξάνεται αισθητά και γίνεται ίσο με 690 MHz ($B_{\text{GND}} = 2$ kG). Το αντίστοιχο εύρος ζώνης στην αμαγνήτιστη κατάσταση είναι μόλις 200 MHz (Σχήμα 6.8α).

Όσον αφορά την πόλωση της κεραίας, τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι ο αξονικός λόγος στην κατεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας μεταβάλλεται ανάλογα με την ένταση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου (Σχήμα 6.7β). Εφαρμόζοντας ισχυρότερο μαγνητικό πεδίο, ο αξονικός λόγος μειώνεται ($AR \leq 3$ dB) και η πόλωση της κεραίας γίνεται αμιγώς κυκλική. Οι καλύτερες επιδόσεις ($AR = 0.3$ dB στη συχνότητα 4.9 GHz) παρατηρήθηκαν για $B_{\text{GND}} = 1.8$ kG. Συγκεκριμένα, ο αξονικός λόγος κυμαίνεται από 0.3 dB έως 2.66 dB σε όλη την κάτω ζώνη λειτουργίας και η κεραία εμφανίζει κυκλική πόλωση. Επιπρόσθετα, η στροφή της πόλωσης είναι αριστερόστροφη. Σε αντίθεση, στην άνω ζώνη λειτουργίας η πόλωση είναι γραμμική. Οι τιμές του αξονικού λόγου στις δύο διακριτές καταστάσεις λειτουργίας της κεραίας παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 6.2. Είναι προφανές ότι με την εφαρμογή κατάλληλου μαγνητικού πεδίου επιτυγχάνεται μεταβολή της πόλωσης της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 από γραμμική σε κυκλική σε όλο το εύρος της κάτω ζώνης λειτουργίας (Σχήμα 6.8β).

6.2.4 Σύγκριση Αριθμητικών και Πειραματικών Αποτελεσμάτων

Για τη σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων προσομοίωσης και των μετρήσεων στην “κατάσταση ON”, είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του σύνθετου υποστρώματος με τη βοήθεια του μαγνητοστατικού επιλύτη του CST EM Studio. Με βάση τα μετρητικά αποτελέσματα, οι καλύτερες επιδόσεις όσον αφορά την πόλωση της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 παρατηρήθηκαν για $B_{\text{GND}} = 1.8$ kG. Ακολουθώντας την προτεινόμενη διαδικασία που περιγράφηκε στην §4.4 εκτιμήθηκε ότι το μαγνητικό πεδίο στην περιοχή του υποστρώματος κάτω από το αγωγίμο κάλυμμα είναι $H_o \approx 1300$ Oe. Έπειτα, ορίστηκε η τιμή αυτή στο γυροτροπικό μοντέλο στον χρονο-μεταβατικό επιλύτη και πραγματοποιήθηκαν H/M προσομοιώσεις κάνοντας την εξής προσέγγιση για την κατανομή του μαγνητικού πεδίου εντός του υποστρώματος: η περιοχή κάτω από το αγωγίμο κάλυμμα

θεωρήθηκε ότι είναι μαγνητισμένη, ενώ το υπόλοιπο μέρος του σύνθετου υποστρώματος θεωρήθηκε ότι είναι αμαγνήτιστο.

Τα αριθμητικά και τα μετρητικά αποτελέσματα για το μέτρο του συντελεστή ανάκλασης στην είσοδο της κεραίας και τον αξονικό λόγο πόλωσης στην “κατάσταση ON” παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.9. Αντίστοιχα, ο Πίνακας 6.3 συνοψίζει τις τιμές του αξονικού λόγου στις δύο διακριτές καταστάσεις λειτουργίας της κεραίας. Οι μικρές αποκλίσεις που παρατηρούνται μεταξύ των αποτελεσμάτων προσομοίωσης και των μετρήσεων οφείλονται κυρίως στην προσέγγιση προσομοίωσης που έγινε για την κατανομή του μαγνητικού πεδίου εντός του υποστρώματος YIG-Epoxy composite 1.

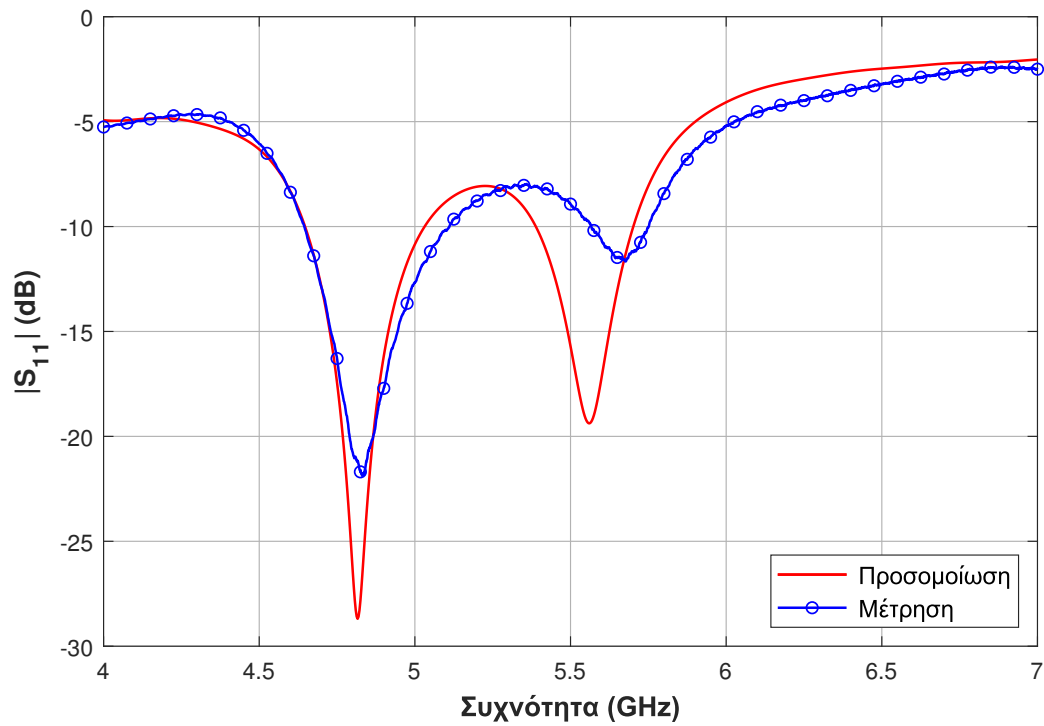
Επιπρόσθετα, τα συγκριτικά κανονικοποιημένα διαγράμματα κέρδους της προτεινόμενης κεραίας στα επίπεδα xz και yz στις δύο καταστάσεις λειτουργίας απεικονίζονται στα Σχήματα 6.10 και 6.11. Στην “κατάσταση OFF”, η συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων προσομοίωσης και μετρήσεων είναι καλή. Στην “κατάσταση ON” παρατηρούνται διαφορές, ωστόσο η κατεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας παραμένει ίδια.

6.3 Επίδραση Διηλεκτρικών και Μαγνητικών Απωλειών στις Επιδόσεις της Κεραίας

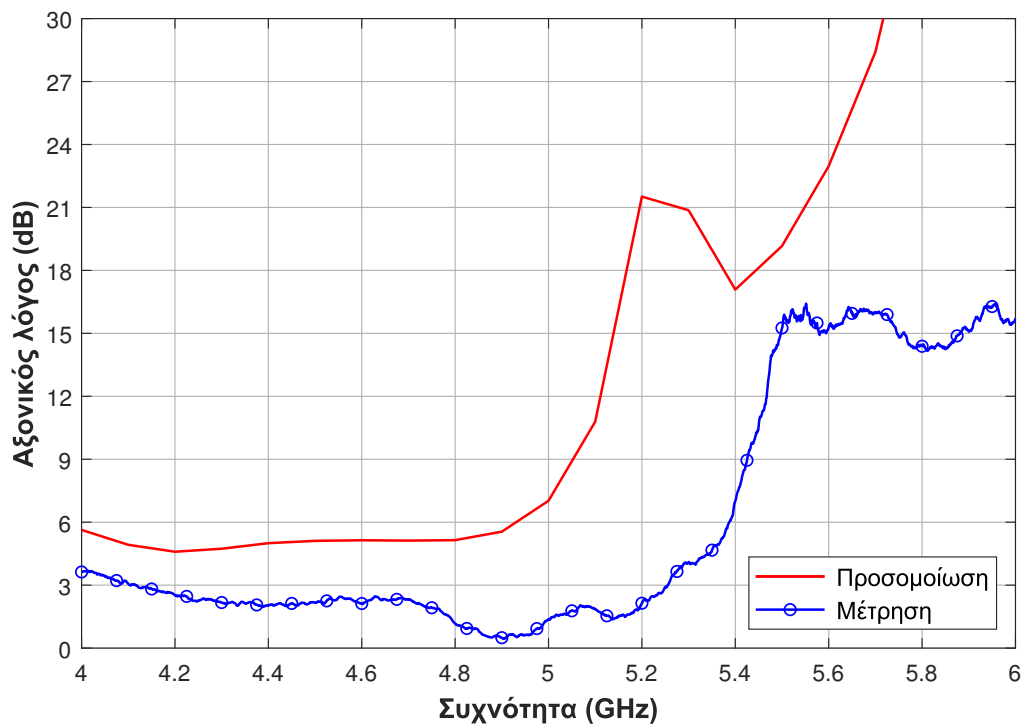
Παρά τα υποσχόμενα αποτελέσματα που σχετίζονται με την αναδιάρθρωσιμότητα πόλωσης της κεραίας μικροταινιακού καλύμματος με ένθετη τροφοδοσία που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, ένα ανοικτό ζήτημα είναι οι απώλειες του σύνθετου υλικού YIG-Epoxy που χρησιμοποιήθηκε ως υπόστρωμα της κεραίας. Με βάση τα αριθμητικά αποτελέσματα, η απόδοση ακτινοβολίας η_{rad} της κεραίας είναι περίπου 60% στην αμαγνήτιστη κατάσταση λειτουργίας (που θεωρείται ανεκτά αποδοτική) και μόλις 30% στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση. Είναι γνωστό ότι οι απώλειες των υλικών αντιπροσωπεύουν ένα ποσοστό ισχύος που καταναλίσκεται πάνω στα υλικά της κεραίας και δεν ακτινοβολείται. Η αύξηση των απωλειών συνεπάγεται μια λιγότερο αποδοτική κεραία. Στόχος αυτής της ενότητας είναι να μελετηθεί μέσω προσομοιώσεων η επίδραση των διηλεκτρικών και των μαγνητικών απωλειών του σύνθετου μαγνητο-διηλεκτρικού υποστρώματος στις επιδόσεις της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1. Η εφαπτόμενη απωλειών $\tan\delta_e$ εκφράζει τις διηλεκτρικές απώλειες του υλικού και το πλάτος σιδηρομαγνητικού συντονισμού ΔH αντιπροσωπεύει τις απώλειες που παρατηρούνται στον σιδηρομαγνητικό συντονισμό (μαγνητικές απώλειες) και σχετίζεται με τις ανομοιογένειες του υλικού όπως είναι το πορώδες.

6.3.1 Αμαγνήτιστη Κατάσταση Λειτουργίας

Η μελέτη της επίδρασης των διηλεκτρικών απωλειών στην “κατάσταση OFF” περιλαμβάνει προσομοιώσεις πλήρους κύματος της κεραίας για διάφορες τιμές της εφαπτομένης απωλειών. Στην πρώτη περίπτωση, η τιμή της εφαπτομένης απωλειών (0.0024) είναι

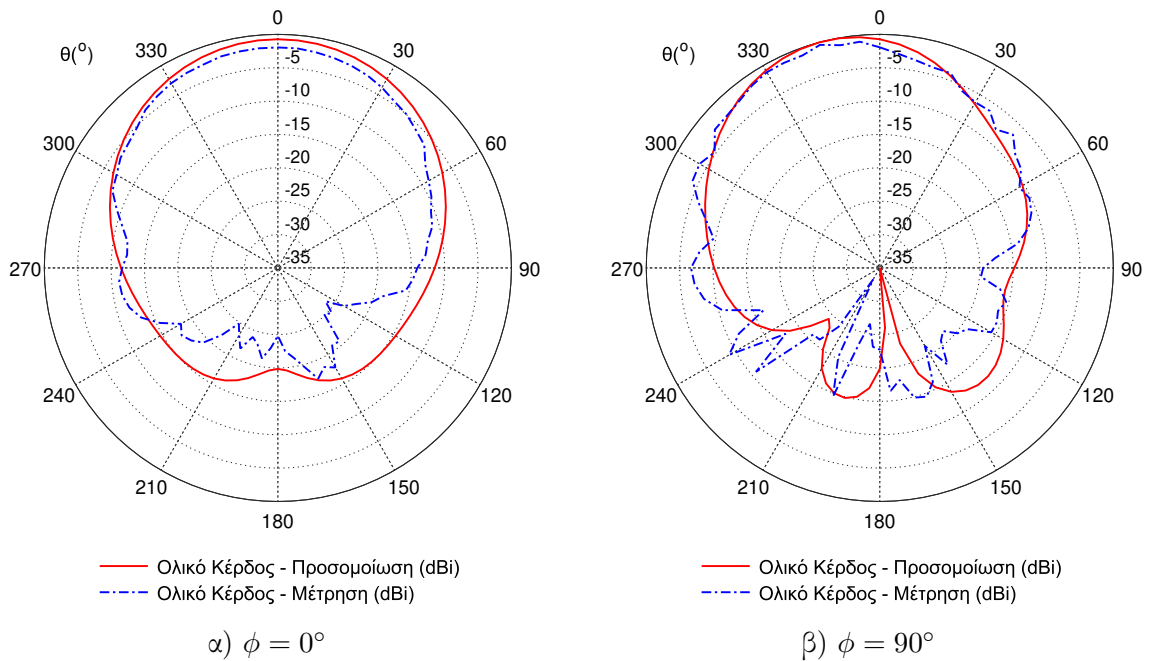


α)

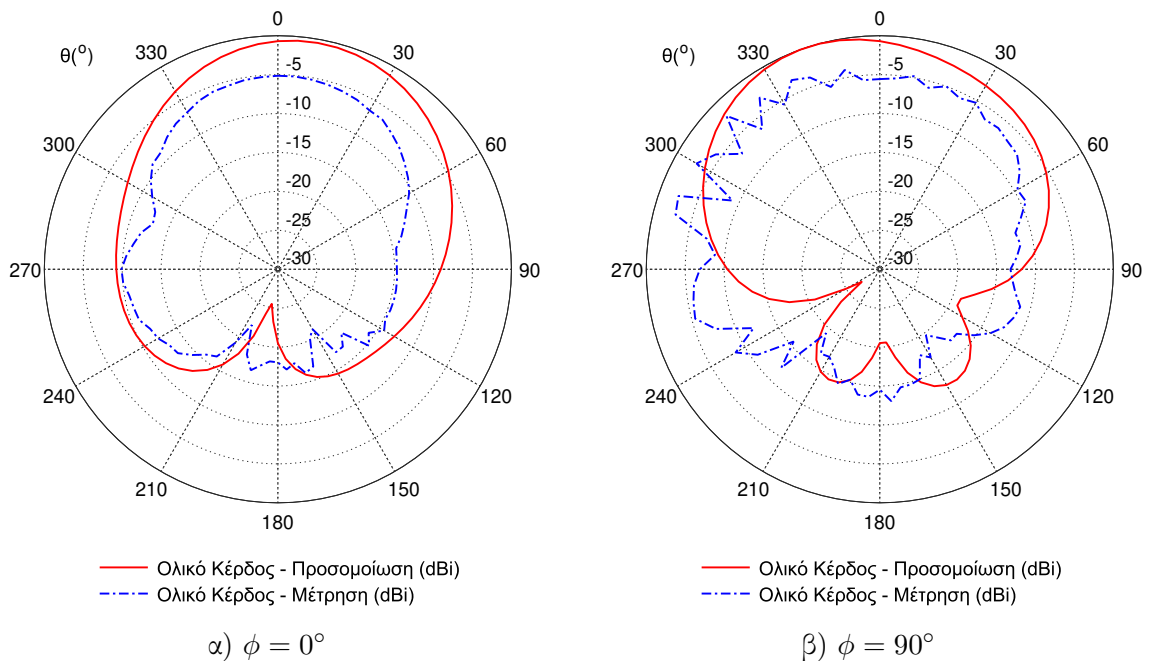


β)

Σχήμα 6.9: Συγκριτικά αποτελέσματα για α) το μέτρο του συντελεστή ανάκλασης και β) τον αξονικό λόγο της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 στην “κατάσταση ON” ($B_{GND} = 1.8$ kG).



Σχήμα 6.10: Συγκριτικά κανονικοποιημένα διάγραμματα ακτινοβολίας της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 στη συχνότητα συντονισμού f_{res} στην “κατάσταση OFF” στο α) xz -επίπεδο και β) yz -επίπεδο.



Σχήμα 6.11: Συγκριτικά κανονικοποιημένα διάγραμματα ακτινοβολίας της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 στη συχνότητα συντονισμού f_{res} στην “κατάσταση ON” στο α) xz -επίπεδο και β) yz -επίπεδο.

Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρήσεων για τον αξονικό λόγο πόλωσης της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 στις δύο καταστάσεις λειτουργίας.

DC Μαγνητικό Πεδίο (kG)	Μέτρηση		Προσομοίωση	
	f_{res} (GHz)	AR (dB)	f_{res} (GHz)	AR (dB)
0 (OFF)	5.4	23	5.4	40
1.6 (ON)	4.83	3.20	4.82	5.18

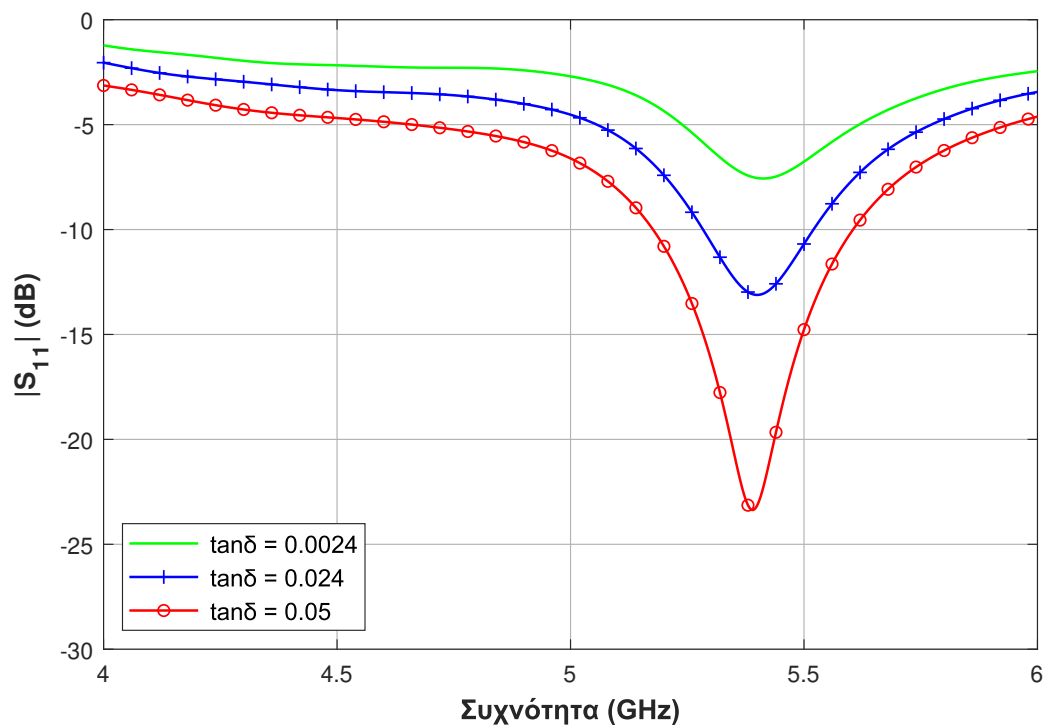
μία τάξη μεγέθους μικρότερη από την εκτιμώμενη τιμή της εφαπτομένης απωλειών του σύνθετου υλικού εποξικής ρητίνης-YIG και στη δεύτερη περίπτωση η τιμή του $\tan\delta_e$ ισούται με 0.05 ($>\tan\delta_{e,c1} = 0.024$). Ο Πίνακας 6.4 συνοψίζει τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις για την απόδοση ακτινοβολίας και την πόλωση της κεραίας καθώς μεταβάλλεται η τιμή της εφαπτομένης απωλειών. Διαπιστώνεται ότι η μείωση των διηλεκτρικών απωλειών βελτιώνει την απόδοση ακτινοβολίας της κεραίας και το αντίστροφο, όπως αναμενόταν. Η πόλωση της κεραίας είναι γραμμική και η συχνότητα συντονισμού παραμένει σταθερή ($f_{res} = 5.4$ GHz) σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Επιπρόσθετα, το Σχήμα 6.12 απεικονίζει την επίδραση του $\tan\delta_e$ στο μέτρο του συντελεστή ανάκλασης στην είσοδο της κεραίας. Παρατηρείται ότι η αύξηση της τιμής της εφαπτομένης απωλειών, οδηγεί σε καλύτερη προσαρμογή της κεραίας. Ωστόσο, αυτός ο τρόπος μείωσης των απωλειών προσαρμογής δεν είναι ενδεδειγμένος. Σωστή προσαρμογή της σύνθετης αντίστασης εισόδου της κεραίας με τη χαρακτηριστική αντίσταση των 50 Ω της γραμμής τροφοδοσίας επιτυγχάνεται ρυθμίζοντας κατάλληλα τις διαστάσεις των σχισμών στο αγωγίμο κάλυμμα (λόγω της ένθετης τροφοδοσίας).

6.3.2 Πλήρως Μαγνητισμένη Κατάσταση Λειτουργίας

Το επόμενο βήμα είναι η μελέτη των επιδόσεων της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 στην “κατάσταση ON”. Στατικό μαγνητικό πεδίο $H_0 = 1300$ Oe εφαρμόστηκε κατά τη θετική διεύθυνση του άξονα z και πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για διάφορες τιμές της εφαπτομένης απωλειών ($\tan\delta_e = 0.0024, 0.024, 0.05$). Η επίδραση των διηλεκτρικών απωλειών

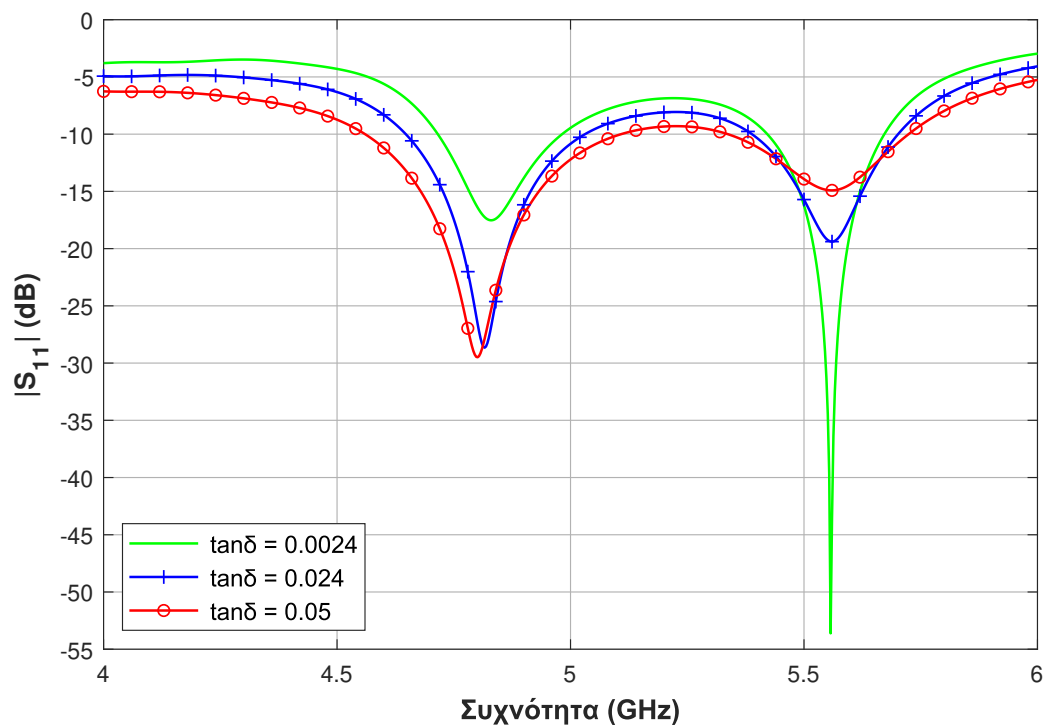
Πίνακας 6.4: Επίδραση της εφαπτομένης απωλειών του σύνθετου υλικού στα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 στην “κατάσταση OFF”.

$\tan\delta_e$	f_{res} (GHz)	η_{rad} (%)	Πόλωση
0.0024	5.3	90	Γραμμική
0.024	5.4	55	Γραμμική
0.05	5.39	38	Γραμμική



Σχήμα 6.12: Επίδραση των διηλεκτρικών απωλειών του σύνθετου υλικού στο μέτρο του συντελεστή ανάκλασης της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 στην “κατάσταση OFF”.

του YIG-Epoxy composite 1 στο μέτρο του συντελεστή ανάκλασης της προτεινόμενης κεραίας φαίνεται στο Σχήμα 6.13. Αν και οι τιμές της απόδοσης ακτινοβολίας της κεραίας σε σύγκριση με τις αντίστοιχες που προκύπτουν στην “κατάσταση OFF” είναι σημαντικά μειωμένες, το ποσοστό μείωσης μεταξύ των αποτελεσμάτων είναι μικρότερο στην “κατάσταση ON” (Πίνακας 6.5). Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι σε αυτήν την κατάσταση η υποβάθμιση της αποδόσης της κεραίας οφείλεται κυρίως στις μαγνητικές απώλειες. Ανάλογα με την τιμή του $\tan\delta_e$, η απόδοση ακτινοβολίας κυμαίνεται από 23% μέχρι 36%. Υποθέτοντας ότι η μεγάλη υποβάθμιση της η_{rad} οφείλεται στην υψηλή τιμή του πλάτους σιδηρομαγνητικού συντονισμού του σύνθετου υλικού εποξικής ρητίνης-φερρίτη ($\Delta H_1 = 400$ Oe) το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως υπόστρωμα της κεραίας, πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη της απόδοσης ακτινοβολίας και της πόλωσης της κεραίας για μεταβλητή τιμή του ΔH . Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατίθενται στον Πίνακα 6.6. Είναι προφανές ότι η μείωση της τιμής του ΔH οδηγεί σε βελτίωση της απόδοσης ακτινοβολίας της κεραίας. Όσον αφορά την πόλωση της κεραίας, παρατηρείται ότι είναι ελλειπτική προσεγγίζοντας την κυκλική (AR κυμαίνεται από 5.6 έως 5.8 dB στη χαμηλότερη συχνότητα συντονισμού της).



Σχήμα 6.13: Επίδραση των διηλεκτρικών απωλειών του σύνθετου υλικού στο μέτρο του συντελεστή ανάκλασης της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 στην “κατάσταση ON”.

Πίνακας 6.5: Επίδραση των διηλεκτρικών απωλειών του σύνθετου υλικού στα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 στην “κατάσταση ON”.

$\tan\delta_e$	f_{res} (GHz)	η_{rad} (%)	AR (dB)
0.0024	4.82	36	5.6
0.024	4.82	29	5.2
0.05	4.8	23	4.7

Πίνακας 6.6: Επίδραση του πλάτους σιδηρομαγνητικού συντονισμού του σύνθετου υλικού στα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 στην “κατάσταση ON” για $\tan\delta_e = 0.0024$.

ΔH	f_{res} (GHz)	η_{rad} (%)	AR (dB)
100	4.8	63	5.8
200	4.81	50	5.7
300	4.82	42	5.7
400	4.82	36	5.6

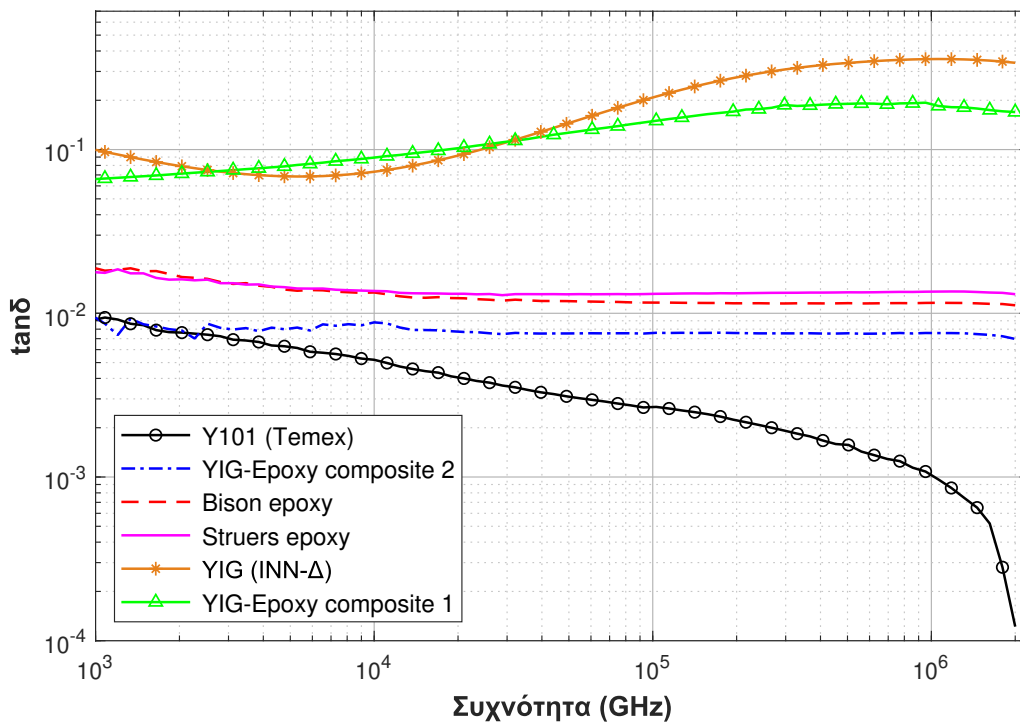
6.4 Σύνθετο Υλικό Πολυμερικής-Μήτρας Φερρίτη με Βελτιωμένες Ιδιότητες

Η παραμετρική μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην προηγούμενη ενότητα έδειξε ότι οι μηχανισμοί απωλειών που ευθύνονται για την υποβάθμιση της απόδοσης ακτινοβολίας της κεραίας στις δύο καταστάσεις λειτουργίας της είναι διαφορετικοί. Διαπιστώθηκε ότι η τιμή της εφαπτομένης απωλειών του υλικού του υποστρώματος της κεραίας επηρεάζει την απόδοση ακτινοβολίας στην “κατάσταση OFF”, ενώ, η αποδοτικότητα της κεραίας στην “κατάσταση ON” καθορίζεται κυρίως από την τιμή του πλάτους σιδηρομαγνητικού συντονισμού του υλικού. Είναι γνωστό ότι οι διηλεκτρικές και οι μαγνητικές ιδιότητες των δειγμάτων εξαρτώνται τόσο από τις πρώτες ύλες, όσο και από τις λεπτομέρειες της διαδικασίας παρασκευής, οπότε με κατάλληλη επιλογή των επιμέρους συστατικών είναι δυνατόν να αποκτηθούν οι επιθυμητές ιδιότητες του σύνθετου υλικού. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η μελέτη εφικτότητας παρασκευής ενός σύνθετου υλικού πολυμερικής μήτρας-φερρίτη με όσο το δυνατόν χαμηλές απώλειες. Απώτερος στόχος είναι η απόδοση ακτινοβολίας της κεραίας να διατηρείται σε αποδεκτά επίπεδα στις δύο καταστάσεις λειτουργίας της.

Πρακτικά, με την ανάμειξη εποξικής ρητίνης με χαμηλές διηλεκτρικές απώλειες και φερριτικού υλικού με χαμηλές διηλεκτρικές (μικρή τιμή $\tan\delta_e$) και μαγνητικές απώλειες (μικρή τιμή ΔH) είναι εφικτό να παρασκευαστεί ένα δείγμα πολυμερικής μήτρας-φερρίτη με τις επιθυμητές βελτιωμένες ιδιότητες. Η πλειοψηφία των εποξικών ρητινών που διατίθενται στο εμπόριο χαρακτηρίζονται από υψηλές διηλεκτρικές απώλειες ($\tan\delta_e$ της τάξης των 10^{-2}). Μετά από πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, ως πολυμερική μήτρα χρησιμοποιήθηκε μια εποξική κόλλα δύο μερών (αποτελείται από ρητίνη και σκληρυντή) της εταιρείας BISON. Η συγκεκριμένη εποξική κόλλα επιλέχθηκε διότι παρουσιάζει ελαφρώς μικρότερες διηλεκτρικές απώλειες σε σχέση με την αντίστοιχη εποξική κόλλα της εταιρείας Struers που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή του YIG-Epoxy composite 1 καθώς και λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας σκλήρυνσης, του χαμηλού ιξώδους, της χαμηλής συρρίκνωσης, της διαύγειας, της υψηλής χημικής αντοχής και των καλών μηχανικών της ιδιοτήτων. Ως φερριτικό έγκλεισμα, χρησιμοποιήθηκε ο εμπορικός γρανάτης Y101 της εταιρείας Temex, λόγω των χαμηλότερων απωλειών ($\tan\delta_e = 0.0002$, $\Delta H = 18$ Oe) σε σύγκριση με το δείγμα YIG που παρασκευάστηκε στο INN/Δ και χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή του αρχικού σύνθετου δείγματος. Έπειτα από την επιλογή των επιμέρους συστατικών, παρασκευάστηκε ένα ομοιογενές σύνθετο μείγμα με κατά βάρος αναλογία 60% Y101/40% εποξική ρητίνη Bison σύμφωνα με τη διαδικασία που απεικονίζεται στο Σχήμα 6.1. Το συγκεκριμένο δείγμα θα αναφέρεται ως YIG-Epoxy composite 2.

Το Σχήμα 6.14 απεικονίζει τη μεταβολή της εφαπτομένης απωλειών $\tan\delta_e$ των σύνθετων υλικών YIG-Epoxy composite 1, YIG-Epoxy composite 2 και των επιμέρους συστατικών

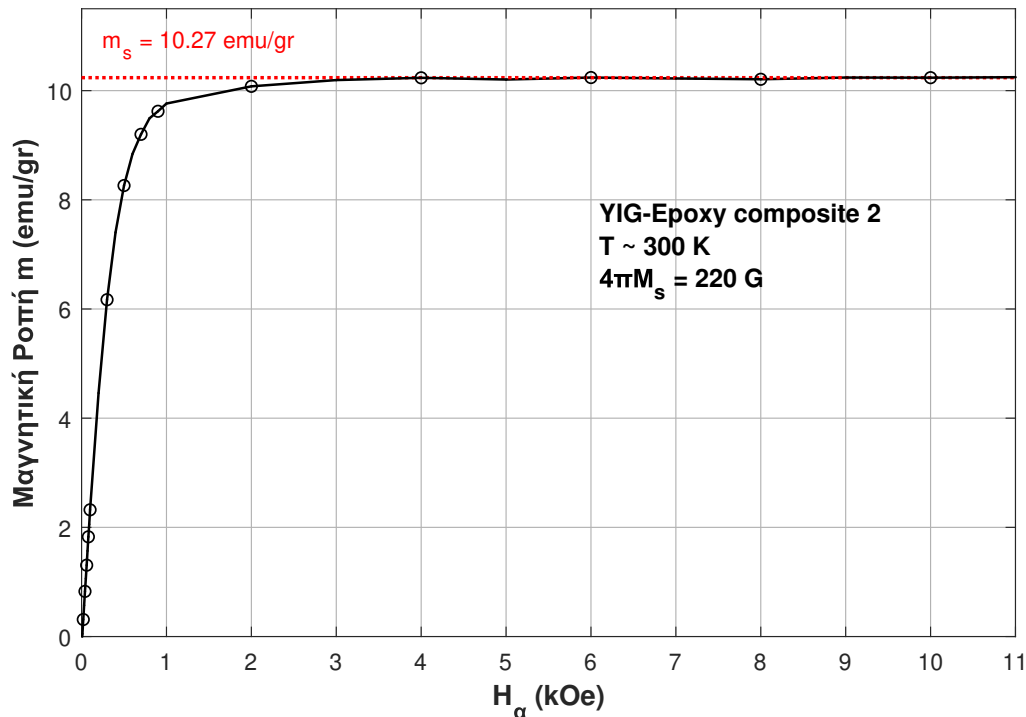
τους συναρτήσει της συχνότητας. Οι τιμές αυτές προέκυψαν από τις μετρήσεις του εκάστοτε δείγματος σε θερμοκρασία δωματίου στο συχνοτικό διάστημα 1 kHz - 2 MHz με τη χρήση ενός πυκνωτή παράλληλων πλακών της Agilent (μοντέλο E498A). Η διαδικασία είναι σχετικά απλή: το δείγμα τοποθετείται ανάμεσα στις παράλληλες πλάκες του πυκνωτή και η επαπτομένη απωλειών εκτιμάται με βάση την τιμή της χωρητικότητας που μετράει το όργανο, το εμβαδό της πλάκας και το πάχος του δείγματος. Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων, η τιμή της επαπτομένης απωλειών του YIG-Epoxy composite 2 είναι σχεδόν μία τάξη μεγέθους μικρότερη από την αντίστοιχη του αρχικού σύνθετου υλικού. Για τον προσδιορισμό των διηλεκτρικών ιδιοτήτων του YIG-Epoxy composite 2 στη ζώνη συχνοτήτων των 5.5 GHz (ζώνη λειτουργίας της κεραίας στην οποία θα χρησιμοποιηθεί ως υπόστρωμα), συνδυάστηκαν τα αποτελέσματα από τις μέτρησεις με τον πυκνωτή παράλληλων πλακών (Σχήμα 6.14) καθώς και τα δεδομένα που προέκυψαν από την H/M προσομοίωση και τις αντίστοιχες μετρήσεις του μέτρου του συντελεστή ανάκλασης στην είσοδο μιας κεραίας ορθογωνικού μικροταινιακού καλύμματος με ένθετη τροφοδοσία τυπωμένης σε υπόστρωμα YIG-Epoxy composite 2 στην περιοχή των 5.5 GHz (η ίδια διαδικασία όπως στην περίπτωση του YIG-Epoxy composite 1, §6.2.1). Με αυτό τον τρόπο, εκτιμήθηκε ότι η σχετική διηλεκτρική επιτρεπτότητα και η επαπτομένη απωλειών του YIG-Epoxy composite 2 είναι $\epsilon_{r,c2} = 3.67$ και $\tan\delta_{e,c2} = 0.015$ αντίστοιχα. Οι αντίστοιχες τιμές για το αρχικό σύνθετο



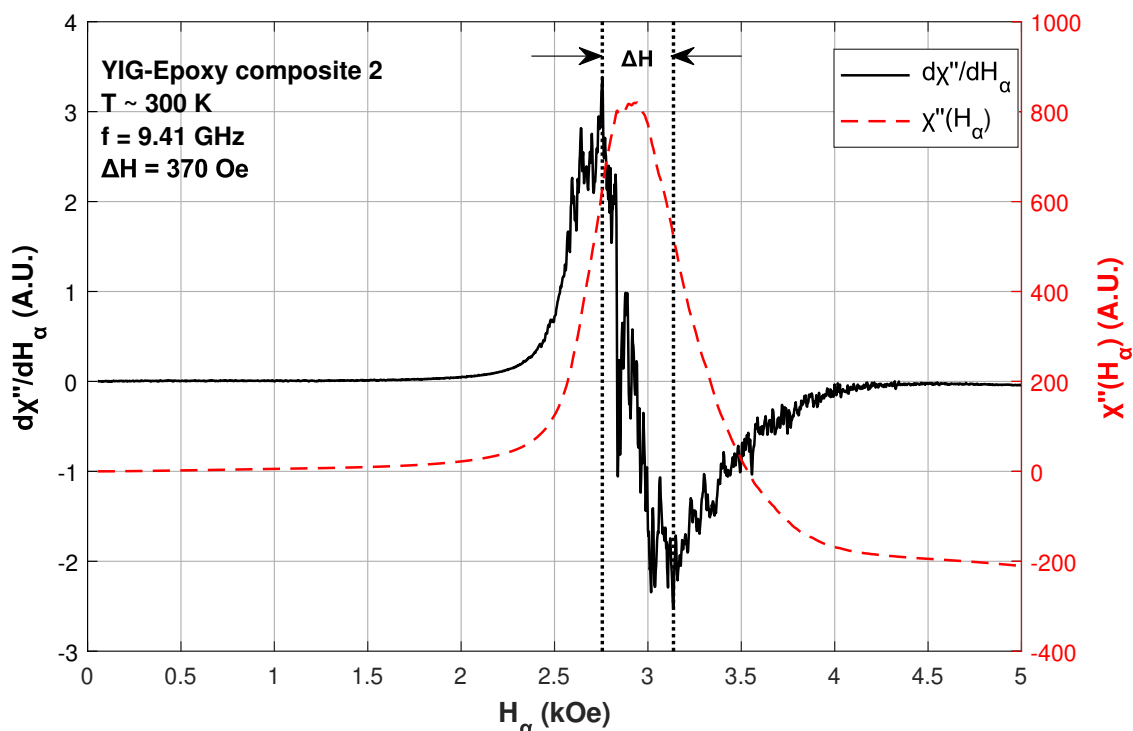
Σχήμα 6.14: Μεταβολή της επαπτομένης απωλειών $\tan\delta_e$ συναρτήσει της συχνότητας για τα σύνθετα υλικά YIG-Epoxy composite 1, YIG-Epoxy composite 2 και τα επιμέρους συστατικά τους.

δείγμα YIG-Epoxy composite 1 είναι $\varepsilon_{r,c1} = 3.65$ και $\tan\delta_{e,c1} = 0.024$.

Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκε δομικός και μαγνητικός χαρακτηρισμός του δείγματος YIG-Epoxy composite 2 με χρήση των τεχνικών που έχουν προαναφερθεί. Πρόέκυψε ότι η κρυσταλλικότητα της σκόνης Y101 δεν αλλοιώθηκε έπειτα από την ανάμειξη με την εποξική ρητίνη Bison, όπως παρατηρήθηκε και στην περίπτωση του YIG-Epoxy composite 1. Η μαγνήτιση κόρου του νέου σύνθετου δείγματος ($4\pi M_{s,c2} = 220$ G, Σχήμα 6.15) είναι μικρότερη από την αντίστοιχη του αρχικού δείγματος ($4\pi M_{s,c1} = 316.14$ G), γεγονός που υποδηλώνει ότι το υλικό φθάνει σε κατάσταση κόρου με την εφαρμογή ενός ασθενέστερου μαγνητικού πεδίου. Παρά το γεγονός ότι η σκόνη Y101 που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή του νέου σύνθετου δείγματος χαρακτηρίζεται από χαμηλές απώλειες ($\Delta H_{Y101} = 18$ Oe), η τιμή του πλάτους σιδηρομαγνητικού συντονισμού του YIG-Epoxy composite 2 ($\Delta H_{c2} = 370$ Oe, Σχήμα 6.16) δεν είναι ιδιαίτερα χαμηλή γεγονός που οφείλεται στη διπολική αλληλεπίδραση των σωματιδίων YIG που είναι διεσπαρμένα στην εποξική ρητίνη ως αποτέλεσμα της μεταξύ τους ανάμειξης. Οι μαγνητικές ιδιότητες των δύο σύνθετων υλικών εποξικής ρητίνης-φερρίτη (YIG-Epoxy composite 1 και YIG-Epoxy composite 2) καθώς και των φερριτικών εγκλεισμάτων τους παρατίθενται στον Πίνακα 6.7. Συμπερασματικά, το σύνθετο υλικό που παρασκευάστηκε παρουσιάζει μία τάξη μεγέθους μικρότερο $\tan\delta_e$ και ελαφρώς μικρότερο ΔH .



Σχήμα 6.15: Μεταβολή της μαγνητικής ροπής $m(H_a)$ ανά γραμμάριο μάζας συναρτήσει του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου H_a για το YIG-Epoxy composite 2.



Σχήμα 6.16: Φάσμα FMR $d\chi''/dH_a$ (μαύρη συμπαγής γραμμή) και καμπύλη $\chi''(H_a)$ (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) για το YIG-Epoxy composite 2.

Πίνακας 6.7: Μαγνητικές ιδιότητες των υλικών Y101 (Temex), YIG(INN/Δ), YIG-Epoxy composite 1 και YIG-Epoxy composite 2.

Υλικό	ΔH (Oe)	$4\pi Ms$ (G)
YIG (INN/Δ)	104	1832
Y101 (Temex)	18	1820
YIG-Epoxy composite 1	400	316.14
YIG-Epoxy composite 2	370	220

6.5 Ανάλυση Κεραίας Μικροταινιακού Καλύμματος σε Υπόστρωμα Πολυμερικής Μήτρας-Φερρίτη

Η παρούσα ενότητα εστιάζει στην ανάλυση μιας τυπωμένης κεραίας μικροταινιακού καλύμματος πάνω σε υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας-μαγνητοδιηλεκτρικού υλικού στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση χρησιμοποιώντας το μοντέλο κοιλότητας (cavity model). Η θεωρητική ανάλυση που παρουσιάζεται μας βοηθάει να κατανοήσουμε τις βασικές αρχές λειτουργίας μιας τέτοιας κεραίας που είναι απαραίτητες για τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης της. Επιπλέον, παρέχει τη δυνατότητα να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τις

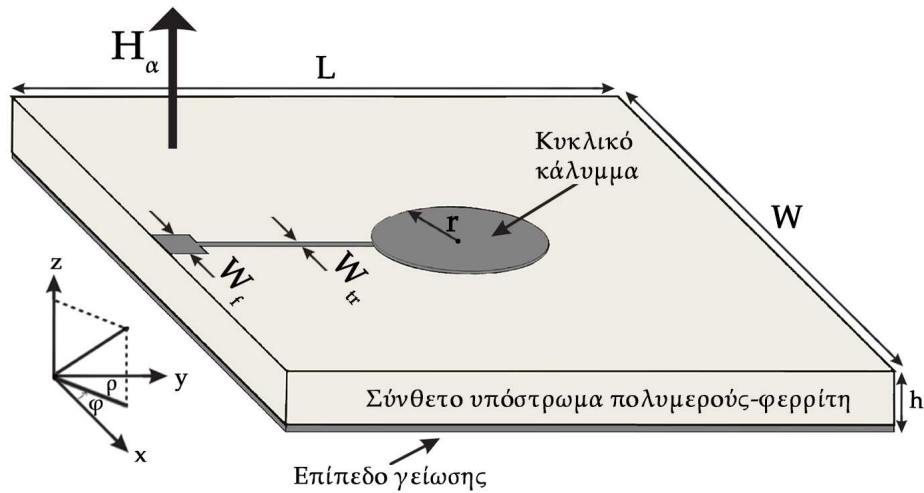
επιθυμητές ιδιότητες (διηλεκτρικές και μαγνητικές) του σύνθετου υλικού που θα ικανοποιούν τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής με αξιόπιστο και γρήγορο τρόπο, σε σύγκριση με την ανάλυση πλήρους κύματος που πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός εμπορικού λογισμικού H/M προσομοίωσης και είναι συνήθως χρονοβόρα (ενδεικτικά ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για την προσομοίωση των προτεινόμενων κεραιών της Διατριβής στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση είναι περίπου 1 ώρα και 30 λεπτά, χρησιμοποιώντας έναν υπολογιστή μέσων επιδόσεων υπολογιστικής ισχύος και μνήμης). Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στη βιβλιογραφία υπάρχουν δημοσιευμένες εργασίες στις οποίες οι συγγραφείς μελέτησαν θεωρητικά τη λειτουργία κεραιών μικροταινιακού καλύμματος τυπωμένων είτε σε υπόστρωμα φερρίτη [23, 24, 30], είτε σε διηλεκτρικό υπόστρωμα με ενσωματωμένο συμπαγές δείγμα φερρίτη σε σχήμα κυλίνδρου ή δακτυλίου [30] είτε σε πολυ-στρωματικό φερριτικό/διηλεκτρικό υπόστρωμα [26] καθώς και τη λειτουργία κεραιών διηλεκτρικού συντονιστή στις οποίες το διηλεκτρικό υλικό έχει αντικατασταθεί από φερριτικό υλικό [107] με εφαρμογή του μοντέλου κοιλότητας.

6.5.1 Θεωρητική Ανάλυση

Η γεωμετρία μιας κεραίας κυκλικού μικροταινιακού καλύμματος ακτίνας r τυπωμένης σε υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας-φερρίτη, η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 6.17, είναι πανομοιότυπη με εκείνη μιας κεραίας κυκλικού μικροταινιακού καλύμματος τυπωμένης σε υπόστρωμα φερρίτη. Η κύρια διαφορά μεταξύ τους είναι η σύνθεση του υποστρώματος: το υλικό που χρησιμοποιείται ως υπόστρωμα στην προτεινόμενη κεραία αποτελείται από n σωματίδια φερρίτη τα οποία βρίσκονται ομοιογενώς διεσπαρμένα σε μη μαγνητική μήτρα (σύνθετο υλικό με ενεργή σχετική διηλεκτρική επιτρεπτότητα $\epsilon_{r,eff}$ και ενεργή σχετική μαγνητική διαπερατότητα $\mu_{r,eff}$), σε αντίθεση με τη δεύτερη περίπτωση στην οποία το υλικό είναι εξ' ολοκλήρου φερρίτης. Ισχυρό στατικό μαγνητικό πεδίο H_α εφαρμόζεται κατά τη θετική διεύθυνση του άξονα z για την πόλωση του σύνθετου υλικού και η ενεργός μαγνητική διαπερατότητα του περιγράφεται από έναν ταυυστή $\bar{\mu}_{eff}$ τα στοιχεία του οποίου εξαρτώνται από τη συχνότητα και την ένταση του εφαρμοζόμενου πεδίου.

Ταυυστής Μαγνητικής Διαπερατότητας Σύνθετου Υλικού

Αρχικά, ας θεωρήσουμε ένα σωματίδιο φερρίτη πολωμένο κατά τον άξονα z και ένα αρμονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο μαγνητικό πεδίο RF $|\vec{h}_{RF}| \ll H_\alpha$ το οποίο εφαρμόζεται σε αυτό. Ο ταυυστής μαγνητικής διαπερατότητας του i -οστού σωματιδίου φερρίτη $\bar{\mu}_i$ του σύνθετου υλικού στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση προκύπτει επιλύοντας την εξίσωση (2.6) και δίδεται από την εξίσωση (2.12). Το μαγνητικό πεδίο $H_{o,i}$ μέσα στο i -οστό σωματίδιο φερρίτη διαφέρει από το εξωτερικό εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο κατά τον παράγοντα $N_{z,i} \cdot (4\pi M_s)$ (2.15) και η συχνότητα γυρομαγνητικού συντονισμού του κάθε φερριτικού σωματιδίου δίδεται από τη σχέση $\omega_{r,i} = \sqrt{(\gamma \cdot H_{o,i} + N_x \cdot \omega_m) \cdot (\gamma \cdot H_{o,i} + N_y \cdot \omega_m)}$ (εξίσω-



Σχήμα 6.17: Γεωμετρία κεραίας κυκλικού μικροταινιακού καλύμματος σε υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας με διεσπαρμένα σωματίδια φερρίτη.

ση Kittel, §2.5.3).

Υποθέτοντας τώρα ότι: (1) τα σωματίδια φερρίτη τα οποία είναι διεσπαρμένα μέσα στη μη μαγνητική μήτρα έχουν το ίδιο σχήμα και μέγεθος, (2) η απόσταση μεταξύ των σωματιδίων φερρίτη καθώς και το μέγεθος τους είναι πολύ μικρότερα από το μήκος κύματος λειτουργίας λ , (3) οι διασωματιδιακές αλληλεπιδράσεις είναι αμελητέες και (4) το μαγνητικό πεδίο πόλωσης H_a είναι το ίδιο για κάθε σωματίδιο, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας-φερρίτη αποκτά τις μαγνητικές ιδιότητες του μεμονωμένου σωματιδίου φερρίτη και συνεπώς η συχνότητα γυρομαγνητικού συντονισμού ω_r του σύνθετου υλικού είναι ίση με την $\omega_{r,i}$. Υπό αυτές τις συνθήκες, ο τανυστής μαγνητικής διαπερατότητας του σύνθετου υλικού στη πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση $\bar{\mu}_{eff}$ μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά ότι ταυτίζεται με τον τανυστή διαπερατότητας του μεμονωμένου σωματιδίου φερρίτη.

Συχνότητες Συντονισμού Κεραίας

Σύμφωνα με το μοντέλο κοιλότητας, η περιοχή ανάμεσα στο ακτινοβολούν κυκλικό κάλυμμα και το επίπεδο γείωσης αντιμετωπίζεται ως μια κυλινδρική κοιλότητα η οποία περιβάλλεται από τέλεια μαγνητικά αγωγίμα τοιχώματα κατά μήκος της περιφέρειας της ($\rho = r$) και από τέλεια ηλεκτρικά αγωγίμα τοιχώματα στο επάνω και στο κάτω μέρος. Αρχικά, προσδιορίζονται οι συνιστώσες του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου εντός της κοιλότητας. Εφόσον, το πάχος h του υποστρώματος πολυμερικής μήτρας-φερρίτη είναι πολύ μικρότερο του μήκους κύματος στον ελεύθερο χώρο ($h \ll \lambda_0$), οι μεταβολές του πεδίου κατά τη διεύθυνση z μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες και επομένως μόνο τρεις συνιστώσες πεδίου υπάρχουν εντός της κοιλότητας: η συνιστώσα z του ηλεκτρικού πεδίου E_z , η αζιμουθιακή συνιστώσα H_ϕ και η ακτινική συνιστώσα H_ρ του μαγνητικού πεδίου [108]. Με βάση τις εξισώσεις του Maxwell, οι συνιστώσες H_ρ , H_ϕ συναρτήσει της συνιστώσας E_z

καθώς και η κυματική εξίσωση για τη συνιστώσα E_z γράφονται ως εξής [23]:

$$H_\rho = \frac{jY}{k\mu} \left(\frac{\mu}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} + j\kappa \frac{\partial E_z}{\partial \rho} \right) \quad (6.1)$$

$$H_\phi = -\frac{jY}{k\mu} \left(\frac{-j\kappa}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} + \mu \frac{\partial E_z}{\partial \rho} \right) \quad (6.2)$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + k^2 E_z = 0 \quad (6.3)$$

όπου $Y = \frac{\epsilon_{r,eff}}{\mu_{eff}}$, $k^2 = \omega^2 \epsilon_{r,eff} \mu_{eff}$ είναι ο κυματάρηθος, $\mu_{eff} = \frac{(\mu^2 - \kappa^2)}{\mu}$ με τις παραμέτρους μ και κ να δίδονται από τις εξισώσεις (2.13)-(2.14) και $\epsilon_{r,eff}$ είναι η ενεργή σχετική διηλεκτρική επιτρεπτότητα του υποστρώματος πολυμερικής-μήτρας φερρίτη.

Η λύση της διαφορικής εξίσωσης (6.3) για το ηλεκτρικό πεδίο κάτω από το κυκλικό κάλυμμα είναι:

$$E_{zn} = A_n J_n(k\rho) e^{-jn\phi} \quad (6.4)$$

A_n είναι μια σταθερά, J_n είναι οι συναρτήσεις Bessel πρώτου είδους n -οστής τάξης και $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ όπου $n < 0$ αντιστοιχεί σε αριστερόστροφα κυκλική πόλωση (Left-Hand Circular Polarization, LHCP) και $n > 0$ αντιστοιχεί σε δεξιόστροφα κυκλική πόλωση (Right-Hand Circular Polarization, RHCP).

Στη συνέχεια, αντικαθιστώντας την (6.4) στην (6.2) προκύπτει:

$$H_{\phi n} = -jY A_n \left[J'_n(k\rho) - \frac{n\kappa}{k\rho\mu} J_n(k\rho) \right] e^{-jn\phi} \quad (6.5)$$

Τέλος, εφαρμόζοντας τη συνθήκη $H_{\phi n} = 0$ στο άκρο της περιφέρειας της κοιλότητας $\rho = r$ προκύπτει η χαρακτηριστική εξίσωση για τη συχνότητα συντονισμού του βασικού TM_{11} ρυθμού της κοιλότητας [23]:

$$J'_1(kr) - \frac{n}{kr} \frac{\kappa}{\mu} J_1(kr) = 0 \quad (6.6)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όλες οι ποσότητες στην εξίσωση (6.6) είναι μιδαγικές καθώς λαμβάνονται υπόψη οι διηλεκτρικές και οι μαγνητικές απώλειες.

Οι συχνότητες συντονισμού της κοιλότητας προκύπτουν από την επίλυση της χαρακτηριστικής εξίσωσης (6.6). Όταν η κοιλότητα δεν είναι μαγνητισμένη (απουσία μαγνητικού πεδίου), ισχύει $H_a = 4\pi M_s = 0$ και $\omega_o = \omega_m = 0$. Θέτοντας $\kappa = 0$ στην εξίσωση (6.6), προκύπτει ότι:

$$J'_1(kr) = 0 \text{ ή } kr = 1.8412 \quad (6.7)$$

και η κοιλότητα συντονίζει σε μια συχνότητα (όπως στην περίπτωση διηλεκτρικού υλικού). Στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση, για δεδομένη τιμή εσωτερικού μαγνητικού πεδίου H_o υπολογίζονται αρχικά οι παράμετροι μ , κ και k οι οποίες εξαρτώνται από τη συχνότητα.

Έπειτα, επιλύεται η χαρακτηριστική εξίσωση (το πραγματικό μέρος λαμβάνεται ίσο με μηδέν). Διαπιστώνεται ότι οι ρίζες της εξίσωσης είναι διαφορετικές για $n = 1$ και $n = -1$ ($n < 0$ αντιστοιχεί σε LHCP και $n > 0$ σε RHCP) και επομένως η κοιλότητα συντονίζει σε δύο διαφορετικές συχνότητες. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η εφαρμογή μαγνητικού πεδίου στην κοιλότητα οδηγεί στην εμφάνιση δύο συντονισμών με διαφορετική στροφή κυκλικής πόλωσης. Αυτό οφείλεται στον διαφορετικό μηχανισμό σύζευξης μεταξύ του πολωμένου σύνθετου υλικού πολυμερικής μήτρας-φερρίτη και των αριστερόστροφα και δεξιόστροφα κυκλικά πολωμένων κυμάτων, τα οποία διαδίδονται με διαφορετικές σταθερές διάδοσης $k_{RHCP} = \omega \sqrt{\epsilon_{eff} \cdot (\mu + \kappa)}$ και $k_{LHCP} = \omega \sqrt{\epsilon_{eff} \cdot (\mu - \kappa)}$, όπου $\mu_{RHCP} = \mu + \kappa$ και $\mu_{LHCP} = \mu - \kappa$. Συγκεκριμένα, για $\omega < \omega_o$ ισχύει $\mu_{RHCP} > 0$ ενώ για $\omega > \omega_o$ ισχύει $\mu_{RHCP} < 0$ υποδηλώνοντας δεξιόστροφη και αριστερόστροφη κυκλική πόλωση αντίστοιχα.

Μεταβάλλοντας την ένταση του μαγνητικού πεδίου πόλωσης, οι τιμές των παραμέτρων k , κ και μ αλλάζουν οδηγώντας σε διαφορετικές συχνότητες συντονισμού της κοιλότητας. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παραπάνω θεωρητική ανάλυση παρουσιάζονται στην ενότητα §6.5.3 και γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα προσομοίωσης του H/M μοντέλου της προτεινόμενης κεραίας. Επιπρόσθετα, αποδεικνύεται εύκολα ότι αν αντιστρέψουμε την κατεύθυνση του πεδίου πόλωσης, το πρόσημο της παραμέτρου κ αλλάζει και συνεπώς, η στροφή πόλωσης στις δύο συχνότητες συντονισμού αντιστρέφεται από αριστερόστροφη σε δεξιόστροφη κυκλική και αντίστροφα.

6.5.2 Σχεδίαση Κεραίας

Η κεραία σχεδιάστηκε να λειτουργεί στην περιοχή συχνοτήτων των 5 GHz. Αρχικά, υπολογίζεται η ακτίνα του κυκλικού καλύμματος με τη βοήθεια της συνθήκης συντονισμού για τον βασικό TM_{11} ρυθμό της κεραίας στην αμαγνήτιστη κατάσταση. Με χρήση της εξίσωσης (6.7), προκύπτει:

$$f_r = \frac{1.8412c}{2\pi r_{eff} \sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (6.8)$$

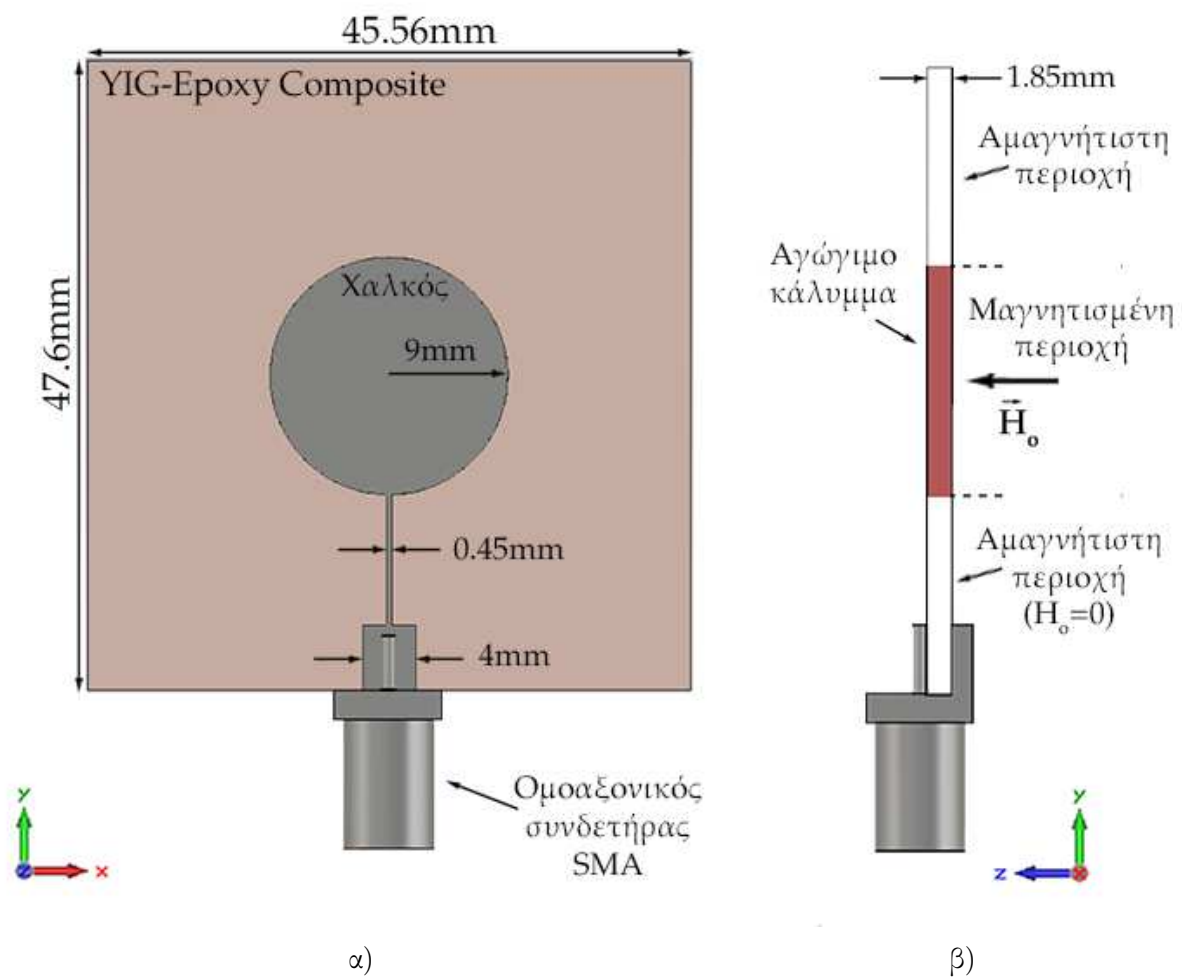
όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός στον ελεύθερο χώρο και μ_r είναι η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του υλικού του υποστρώματος στην αμαγνήτιστη κατάσταση η οποία δίνεται από την εξίσωση (2.10). Προκειμένου να ληφθεί υπόψη το φαινόμενο χροσσών το οποίο κάνει το κάλυμμα να δείχνει ηλεκτρικά μεγαλύτερο σε σχέση με τις φυσικές του διαστάσεις, η φυσική ακτίνα r του κυκλικού καλύμματος αντικαθίσταται από την ενεργό ακτίνα r_{eff} η οποία ορίζεται ως εξής [23]:

$$r_{eff} = r \left[1 + \frac{2h}{\pi r \epsilon_{eff}} \left(\ln \left(\frac{\pi r}{2h} \right) + 1.7726 \right) \right]^{1/2} \quad (6.9)$$

Κατόπιν, προσδιορίζονται οι συχνότητες συντονισμού της κεραίας μικροταινιακού καλύμματος πάνω στο υπόστρωμα YIG-Epoxy composite 2 στην πλήρως μαγνητισμένη

κατάσταση. Με βάση την ακτίνα του καλύμματος που προέκυψε με τη βοήθεια των εξισώσεων (6.8) και (6.9) και τις ιδιότητες του υλικού του υποστρώματος οι οποίες προσδιορίστηκαν στην §6.4, επιλύεται η εξίσωση (6.6) για $n = 1$ και $n = -1$ για διάφορες τιμές μαγνητικού πεδίου πόλωσης H_o . Έπειτα από μια αρχική εκτίμηση των συχνοτήτων συντονισμού της προτεινόμενης κεραίας με χρήση του μοντέλου κοιλότητας, ακολουθεί η σχεδίαση και Η/Μ προσομοίωση της στον χρονο-μεταβατικό επιλύτη. Κύριος στόχος είναι η επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη θεωρητική ανάλυση.

Στο Σχήμα 6.18 φαίνεται το μοντέλο Η/Μ προσομοίωσης και οι διαστάσεις της κεραίας. Ένα φύλλο χαλκού πάχους 0.08 mm χρησιμοποιείται για το κυκλικό κάλυμμα και για το επίπεδο γείωσης. Προκειμένου να επιτευχθεί προσαρμογή της σύνθετης αντίστασης εισόδου της κεραίας με τη χαρακτηριστική αντίσταση των 50 Ω της γραμμής τροφοδοσίας, χρησιμοποιήθηκε ένας μετασχηματιστής $\lambda/4$. Οι συνολικές διαστάσεις της κεραίας είναι 45.46 mm x 47.6 mm x 2 mm. Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για διάφορες τιμές εσωτερικού μαγνητικού πεδίου H_o θεωρώντας ότι η περιοχή κάτω από το κυκλικό κάλυμμα

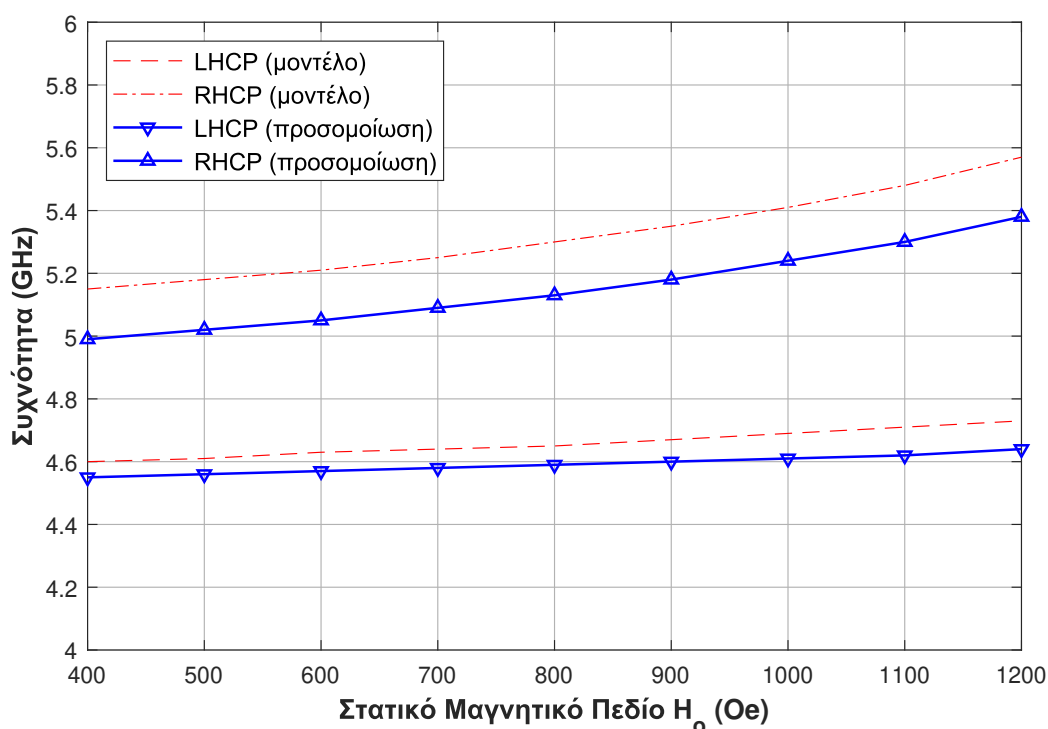


Σχήμα 6.18: Μοντέλο Η/Μ προσομοίωσης για κεραία κυκλικού μικροταινιακού καλύμματος τυπωμένης πάνω στο υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας-φερρίτη YIG-Epoxy composite 2 α) εμπρόσθια και β) πλάγια όψη.

είναι μαγνητισμένη και το υπόλοιπο μέρος του σύνθετου υποστρώματος είναι αμαγνήτιστο. Διαφορετικά μοντέλα διασποράς χρησιμοποιήθηκαν για τη μαγνητική διαπερατότητα του σύνθετου υλικού στις δύο περιοχές του υποστρώματος, όπως έχει αναφερθεί στην §3.4.

6.5.3 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Θεωρητικής Ανάλυσης και Προσομοίωσης

Το Σχήμα 6.19 απεικονίζει τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη θεωρητική ανάλυση (μοντέλο κοιλότητας) και την ανάλυση πλήρους κύματος για τις συχνότητες συντονισμού της κεραίας κυκλικού μικροταινιακού καλύμματος πάνω σε υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας-φερρίτη στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση ($H_o > 400$ Oe). Διαπιστώνεται καλή συμφωνία στις δύο συχνότητες συντονισμού. Οι μικρές αποκλίσεις που παρατηρούνται, λιγότερο από 2% στη χαμηλότερη συχνότητα συντονισμού και περίπου 3.5% στην υψηλότερη συχνότητα συντονισμού, οφείλονται στο γεγονός ότι η τεχνική τροφοδοσίας της κεραίας δεν συμπεριλήφθηκε στη θεωρητική ανάλυση. Όπως αναμενόταν, η μεταβολή της έντασης του πεδίου πόλωσης οδηγεί σε μεταβολή των συχνοτήτων συντονισμού της κεραίας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα πλήρους κυματικής ανάλυσης, επιτυγχάνεται μεταβολή της χαμηλότερης συχνότητας συντονισμού κατά 1.8% και της υψηλότερης κατά 7.4%.

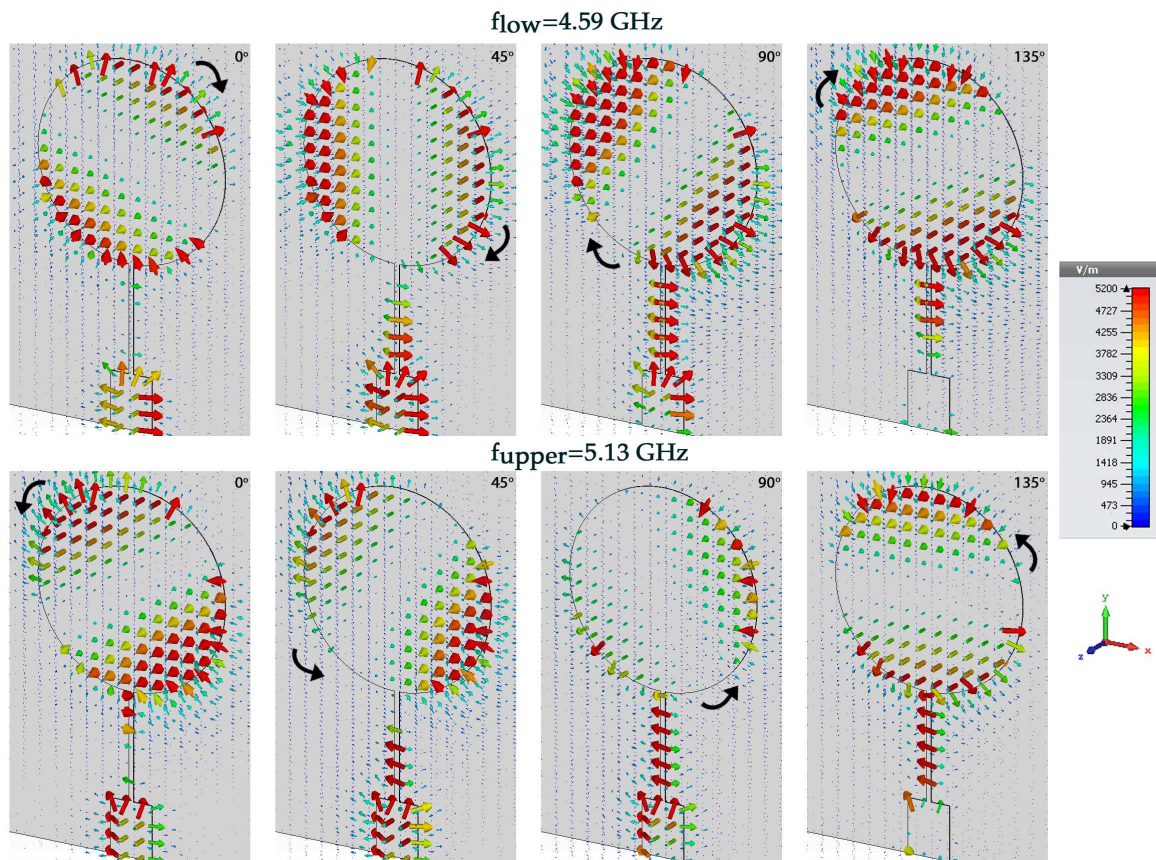


Σχήμα 6.19: Συγκριτικά αποτελέσματα για τις συχνότητες συντονισμού της κεραίας κυκλικού μικροταινιακού καλύμματος πάνω στο υπόστρωμα YIG-Epoxy composite 2 για διάφορες τιμές H_o (μοντέλο κοιλότητας και προσομοιώσεις).

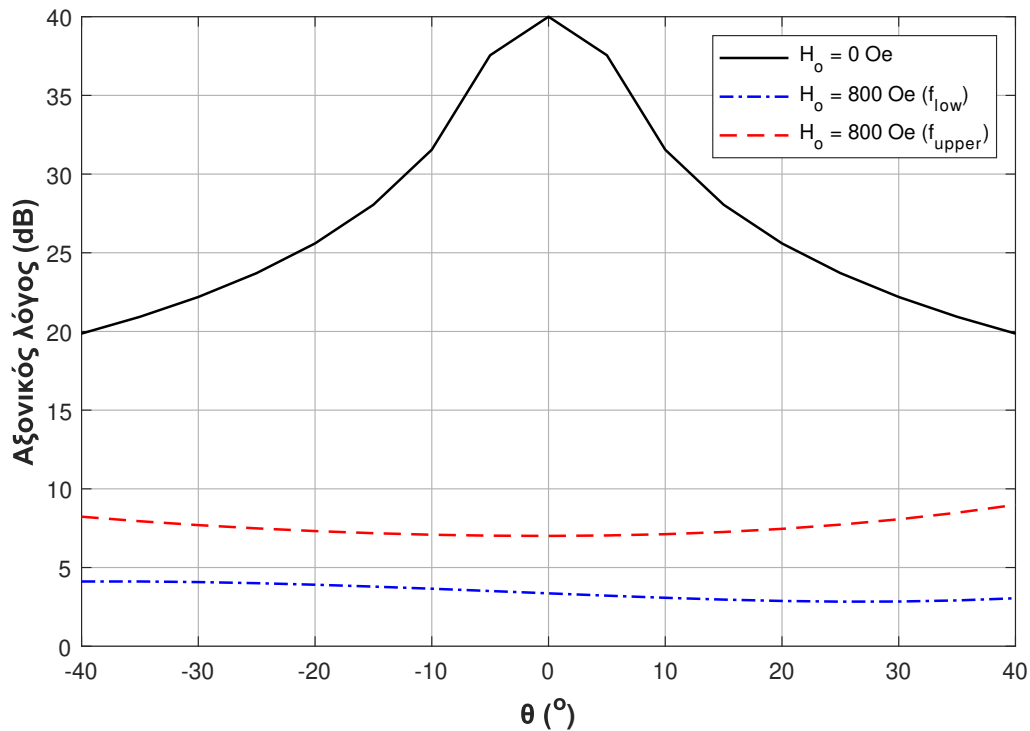
Πίνακας 6.8: Αξονικός λόγος και στροφή πόλωσης στις συχνότητες συντονισμού της κεραίας μικροταινιακού καλύμματος πάνω στο υπόστρωμα YIG-Epoxy composite 2 για διάφορες τιμές H_o , όπως προέκυψε από τις προσομοιώσεις.

H_o (Oe)	f_{low} (GHz)	AR (dB)	Στροφή Πόλωσης	f_{upper} (GHz)	AR (dB)	Στροφή Πόλωσης
770	4.58	3.53	LH	5.11	7.02	RH
800	4.59	3.29	LH	5.13	7.04	RH
860	4.59	3.20	LH	5.14	7.15	RH
900	4.60	2.86	LH	5.18	7.20	RH

Όσον αφορά την πόλωση της κεραίας, ο Πίνακας 6.8 παρουσιάζει τα αποτελέσματα προσομοίωσης για τον αξονικό λόγο και τη στροφή πόλωσης στις δύο συχνότητες συντονισμού της για διάφορες τιμές H_o . Ενδεικτικά, στο Σχήμα 6.20 απεικονίζεται η διανυσματική κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια της κεραίας στην χαμηλότερη συχνότητα συντονισμού f_{low} και στην υψηλότερη συχνότητα συντονισμού f_{upper} για μαγνητικό πεδίο H_o ίσο με 800 Oe, η οποία δείχνει την κατεύθυνση περιστροφής του. Είναι ευδιάκριτο ότι η στροφή της πόλωσης είναι αντίθετη στις δύο συχνότητες συντονισμού (αριστερόστροφη στην $f_{low} = 4.59$ GHz και δεξιόστροφη στην $f_{upper} = 5.13$ GHz), γεγονός που επιβεβαιώνει τη θεωρητική ανάλυση που έγινε χρησιμοποιώντας το μοντέλο κοιλότητας. Αντίστοιχα



Σχήμα 6.20: Διανυσματική κατανομή ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια της κεραίας στις συχνότητες συντονισμού f_{low} και f_{upper} ($H_o = 800$ Oe).



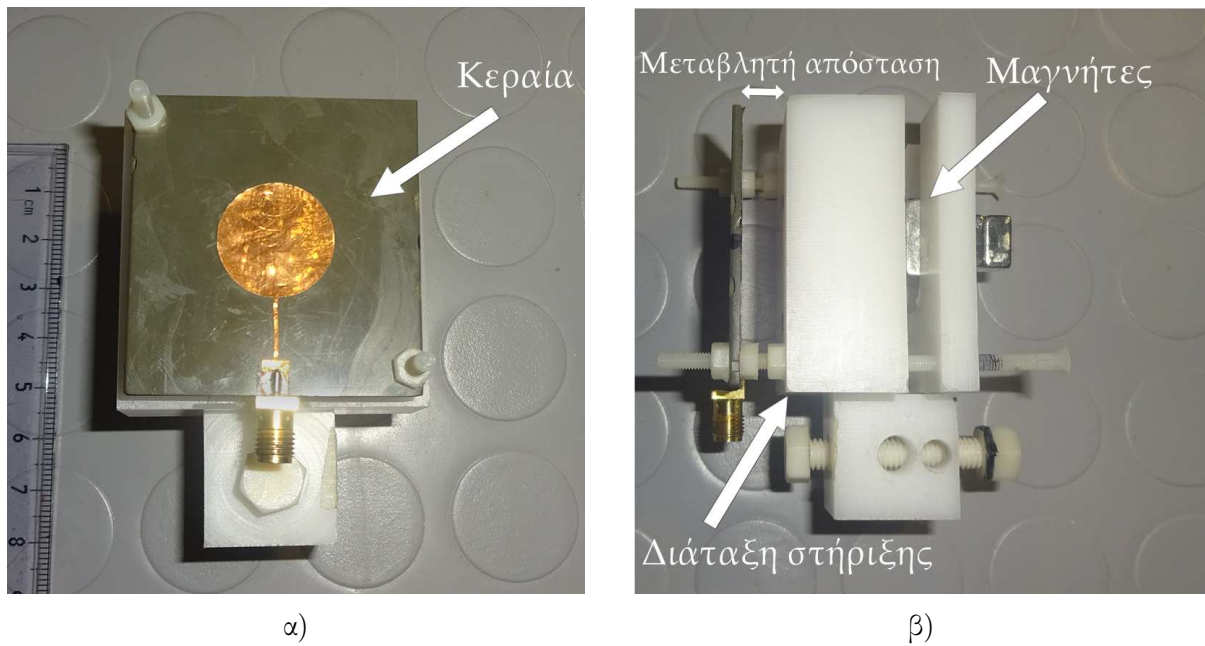
Σχήμα 6.21: Αξονικός λόγος της κεραίας μικροταινιακού καλύμματος στο υπόστρωμα YIG-Epoxy composite 2 στο επίπεδο xz στις δύο καταστάσεις λειτουργίας (προσομοιώσεις).

αποτελέσματα για την κατεύθυνση της περιστροφής του ηλεκτρικού πεδίου προέκυψαν και για τις υπόλοιπες τιμές του μαγνητικού πεδίου H_o .

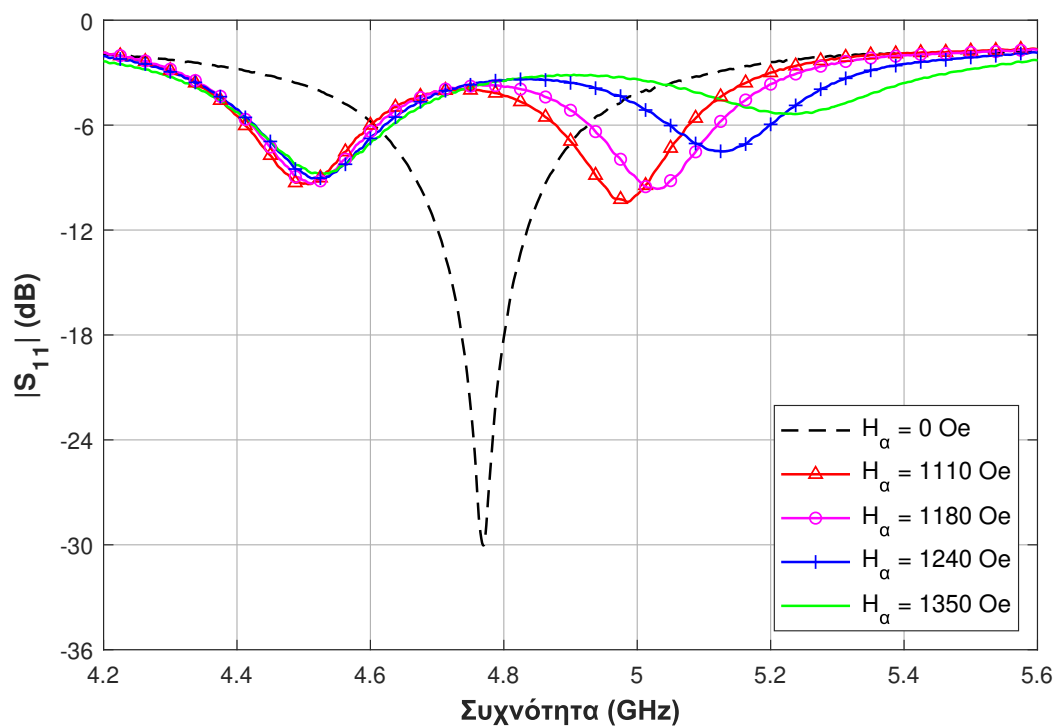
Τέλος, στο Σχήμα 6.21 απεικονίζεται η μεταβολή του αξονικού λόγου πόλωσης της κεραίας στο επίπεδο xz ($\phi = 0^\circ$) στην αμαγνήτιστη κατάσταση (στη συχνότητα συντονισμού f_{res}) και στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση για $H_o = 800$ Oe (στις συχνότητες συντονισμού f_{low} και f_{upper}), όπως προέκυψε από τις προσομοιώσεις. Διαπιστώνεται ότι η πόλωση της κεραίας από γραμμική στην αμαγνήτιστη κατάσταση ($AR = 40$ dB στην $f_{res} = 4.75$ GHz) γίνεται ελλειπτική ή κυκλική ανάλογα τη συχνότητα συντονισμού της κεραίας. Συγκεκριμένα, είναι σχεδόν κυκλική στην χαμηλότερη συχνότητα συντονισμού ($AR < 4.5$ dB) και ελλειπτική στην υψηλότερη συχνότητα ($AR < 9$ dB) σε όλο το εύρος δέσμης ημίσειας ισχύος της κεραίας ($\approx 80^\circ$).

6.5.4 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης και Μετρήσεων

Το εργαστηριακό πρωτότυπο της κεραίας κυκλικού μικροταινιακού καλύμματος με υπόστρωμα YIG-Epoxy composite 2 κατασκευάστηκε και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στην αμαγνήτιστη και στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση. Μία στοίβα μόνιμων μαγνητών διαστάσεων $15 \times 15 \times 8$ mm³ και $10 \times 10 \times 5$ mm³ τοποθετείται κάτω από το επίπεδο



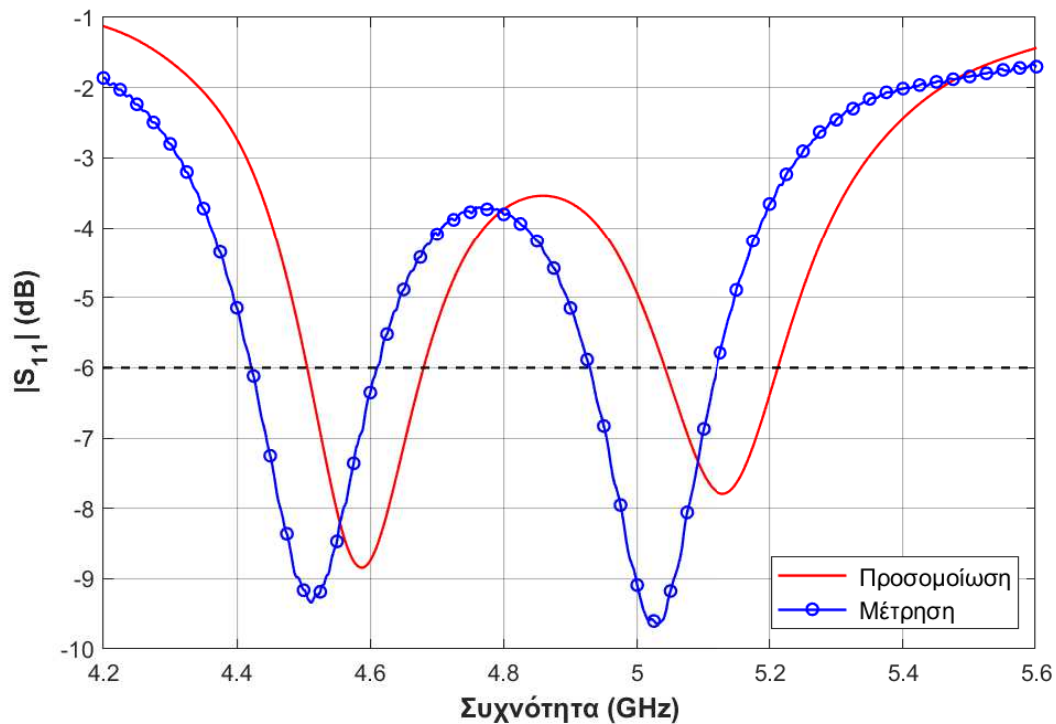
Σχήμα 6.22: Εργαστηριακό πρωτότυπο της κεραίας μικροταινιακού καλύμματος με υπόστρωμα YIG-Epoxy composite 2 και στοίβα μαγνητών τοποθετημένα στη διάταξη στήριξης για την πραγματοποίηση των μετρήσεων.



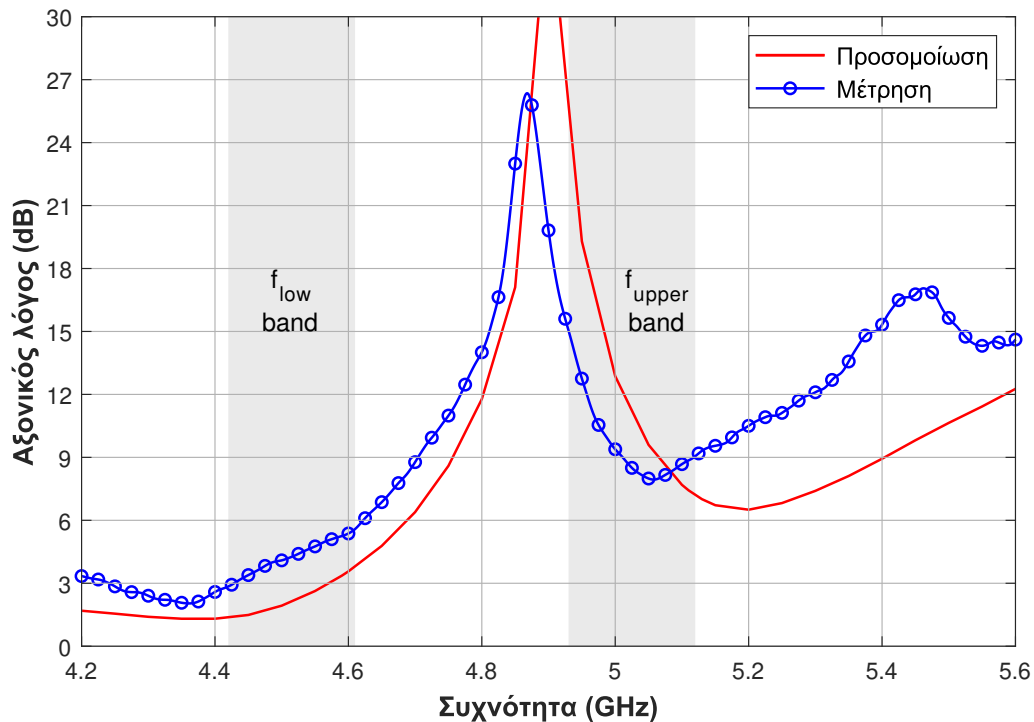
Σχήμα 6.23: Πειραματικός συντελεστής ανάκλασης στην είσοδο της κεραίας μικροταινιακού καλύμματος με υπόστρωμα YIG-Epoxy composite 2 συναρτήσεως του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου H_α .

γείωσης της κεραίας (Σχήμα 6.22). Το Σχήμα 6.23 απεικονίζει το μέτρο του πειραματικού συντελεστή ανάκλασης στην είσοδο της κεραίας στις δύο καταστάσεις λειτουργίας της. Όταν το υπόστρωμα YIG-Epoxy composite 2 είναι πολωμένο, η κεραία εμφανίζει δύο συχνότητες συντονισμού ($|S_{11}| < -6$ dB). Μεταβάλλοντας την ένταση του εφαρμοζόμενου πεδίου, ο κατώτερος συντονισμός παραμένει σχεδόν σταθερός ενώ ο ανώτερος μετατοπίζεται σε υψηλότερη περιοχή συχνοτήτων, όπως προβλέπει το μοντέλο κοιλότητας και η προσομοίωση πλήρους κύματος.

Επιπρόσθετα, το Σχήμα 6.24 παρουσιάζει τα συγκριτικά αποτελέσματα για το μέτρο του συντελεστή ανάκλασης για $H_a = 1180$ Oe (το αντίστοιχο μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του υλικού $H_o \approx 800$ Oe υπολογίστηκε μέσω μαγνητοστατικών υπολογισμών). Η συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων προσομοίωσης και μετρήσεων είναι ικανοποιητική, γεγονός που επιβεβαιώνει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της θεωρητικής ανάλυσης τα οποία προέκυψαν χρησιμοποιώντας την προσεγγιστική έκφραση για τον τανυστή μαγνητικής διαπερατότητας του σύνθετου υλικού στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση (ενότητα §6.5.1). Σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, διαπιστώνεται μικρή μετατόπιση των συχνοτήτων συντονισμού σε χαμηλότερες συχνότητες και αύξηση του εύρους ζώνης (όριο των -6 dB) των δύο ζωνών λειτουργίας ($BW_{low,meas} = 186$ MHz $>$ $BW_{low,sim} = 170$ MHz και $BW_{upper,meas} = 190$ MHz $>$ $BW_{upper,sim} = 165$ MHz). Οι αποκλίσεις αυτές αποδίδονται στη διαφορά μεταξύ της πραγματικής και της εκτιμώμενης



Σχήμα 6.24: Συγκριτικά αποτελέσματα για το μέτρο του συντελεστή ανάκλασης της κεραίας μικροταινιακού καλύμματος με υπόστρωμα YIG-Epoxy composite 2 ($H_o = 800$ Oe).

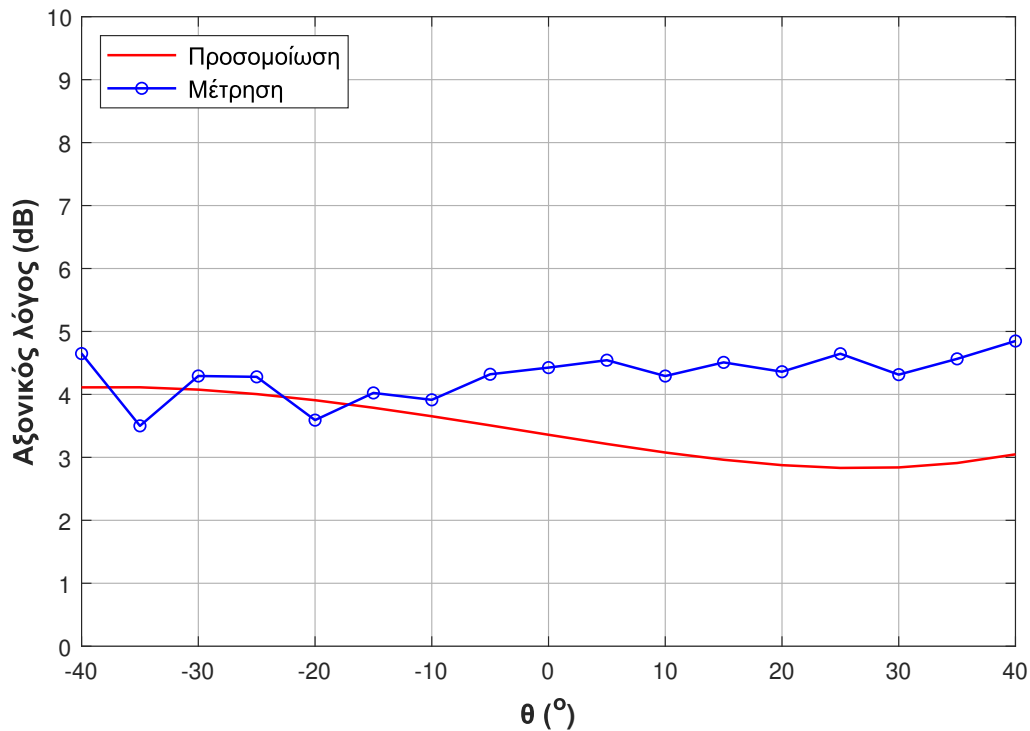


Σχήμα 6.25: Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αξονικό λόγο της κεραίας μικροταινιακού καλύμματος με υπόστρωμα YIG-Epoxy composite 2 στην κατεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας ($H_o = 800$ Oe).

τιμής του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του υποστρώματος YIG-Epoxy composite 2 καθώς και στην πρόσεγγιση που έγινε στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για την κατανομή του μαγνητικού πεδίου εντός του υποστρώματος.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις πόλωσης στην “κατάσταση OFF” και στην “κατάσταση ON” ($H_o \approx 800$ Oe) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πλάτους και φάσης. Σύμφωνα με τα μετρητικά αποτελέσματα, όταν το υπόστρωμα είναι αμαγνήτιστο η κεραία παρουσιάζει γραμμική πόλωση ($AR = 23$ dB στη συχνότητα συντονισμού $f_{res} = 4.77$ GHz). Με την εφαρμογή στατικού μαγνητικού πεδίου, η πόλωση της κεραίας αλλάζει από γραμμική σε ελλειπτική. Συγκεκριμένα, ο αξονικός λόγος κυμαίνεται από 2.89 dB έως 5.59 dB στην κάτω ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας (4.42 – 4.61 GHz) και από 7.94 dB έως 15.04 dB στην άνω ζώνη λειτουργίας (4.93 – 5.12 GHz). Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι η κεραία παρουσιάζει αμιγώς κυκλική πόλωση στην κάτω ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας ($AR < 3$ dB) (Σχήμα 6.25). Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του αξονικού λόγου στο επίπεδο xz ($\phi = 0^\circ$) στη χαμηλότερη συχνότητα λειτουργίας (Σχήμα 6.26). Επιβεβαιώνεται η σχεδόν κυκλική πόλωση της κεραίας ($AR_{meas} \sim 4.5$ dB) σε όλο το εύρος ημίσειας ισχύος (HPBW). Οι διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των μετρήσεων οφείλονται στους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Τέλος, από την επεξεργασία των μετρητικών δεδομένων για το μέτρο και τη φάση των



Σχήμα 6.26: Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αξονικό λόγο της κεραίας μικροταινιακού καλύμματος με υπόστρωμα YIG-Epoxy composite 2 στο επίπεδο xz στη χαμηλότερη συχνότητα λειτουργίας ($H_o = 800$ Oe).

συνιστώσων E_θ και E_ϕ του ηλεκτρικού πεδίου επαληθεύεται ότι η στροφή της πόλωσης είναι αριστερόστροφη στην κάτω ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας και δεξιόστροφη στην άνω ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας. Ο Πίνακας 6.9 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά λειτουργίας που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις και τις μετρήσεις της προτεινόμενης αναδιαιθρώσιμης κεραίας και στις δύο καταστάσεις λειτουργίας.

Πίνακας 6.9: Χαρακτηριστικά λειτουργίας της κεραίας μικροταινιακού καλύμματος με υπόστρωμα YIG-Epoxy composite 2 στις δύο καταστάσεις λειτουργίας (προσομοίωση και μετρήσεις).

	H_o (Oe)	f_{res} (GHz)	BW (MHz)	AR (dB)	Πόλωση
Μετρήσεις	0	4.77	272	23	Γραμμική
	800	4.51	186	4.20	Ελλειπτική (LH)
		5.03	190	8.36	Ελλειπτική (RH)
Προσομοιώσεις	0	4.75	270	40	Γραμμική
	800	4.59	170	3.29	Κυκλική (LH)
		5.13	165	7.04	Ελλειπτική (RH)

6.6 Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάστηκε μια μέθοδος ενσωμάτωσης του μαγνητο-διηλεκτρικού υλικού στο υπόστρωμα των κεραίων μικροταινιακού καλύμματος η οποία είναι απαλλαγμένη από τα κατασκευαστικά προβλήματα της αρχικής μεθόδου που εφαρμόστηκε στα προηγούμενα Κεφάλαια (αντικατάσταση μέρους του συμβατικού διηλεκτρικού υποστρώματος από δείγμα φερριτικού υλικού σε συμπαγή μορφή). Αρχικά, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μια τυπωμένη κεραία μικροταινιακού καλύμματος με ένθετη τροφοδοσία πάνω σε υπόστρωμα αποτελούμενο από σωματίδια φερρίτη τα οποία βρίσκονται ομοιογενώς διεσπαρμένα σε (μη μαγνητική) πολυμερική μήτρα και μελέτηθηκε η εφικτότητα μεταβολής των χαρακτηριστικών της με την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Αποδείχθηκε μέσω προσομοιώσεων και μετρήσεων ότι η μετάβαση από την “κατάσταση OFF” στην “κατάσταση ON” οδηγεί στην εμφάνιση δύο συχνοτήτων συντονισμού, οι οποίες μπορούν να μεταβάλλονται ελεγχόμενα με την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου διαφορετικής έντασης. Αντίστοιχη συμπεριφορά είχε διαπιστωθεί και στην πρώτη κατηγορία κεραίων (Κεφάλαια 4 και 5). Όσον αφορά την πόλωση της προτεινόμενης κεραίας, τα αποτελέσματα ήταν πολλά υποσχόμενα καθώς ήταν δυνατή η μεταβολή της πόλωσης από γραμμική σε αμιγώς κυκλική σε ολόκληρη την κάτω ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας της κεραίας με την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου. Ωστόσο, ένα σημαντικό στοιχείο που προέκυψε από την παραπάνω μελέτη και επισκίασε τα αποτελέσματα αναδιαρθρωσιμότητας πόλωσης, ήταν η χαμηλή αποδοτικότητα της κεραίας στις δύο καταστάσεις λειτουργίας της (περίπου 60% στην “κατάσταση OFF” και 30% στην “κατάσταση ON”). Για το λόγο αυτό, μελετήθηκε μέσω προσομοιώσεων η επίδραση των απωλειών του σύνθετου υλικού του υποστρώματος στην απόδοση ακτινοβολίας της κεραίας και διαπιστώθηκε ότι οι διηλεκτρικές απώλειες του υλικού ευθύνονται για την υποβάθμιση της απόδοσης ακτινοβολίας στην αμαγνήτιστη κατάσταση, ενώ, η αποδοτικότητα της κεραίας στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση καθορίζεται από τις μαγνητικές απώλειες που εκφράζονται από την τιμή του πλάτους σιδηρομαγνητικού συντονισμού του υλικού. Κάτοπιν, έγινε προσπάθεια παρασκευής σύνθετου υλικού πολυμερικής μήτρας-φερριτικού υλικού με βελτιωμένες ιδιότητες επιλέγοντας πρώτες ύλες (εποξική κόλλα και φερριτικό υλικό) με χαμηλότερες διηλεκτρικές και μαγνητικές απώλειες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες που είχαν χρησιμοποιηθεί για την παρασκευή του αρχικού υποστρώματος. Αποτέλεσμα ήταν η παρασκευή ενός σύνθετου υλικού με μία τάξης μεγέθους μικρότερο $\tan\delta_e$ και ελαφρώς μικρότερο ΔH . Παρά το γεγονός ότι η σκόνη φερρίτη που χρησιμοποιήθηκε έχει ιδιαίτερα χαμηλό $\Delta H = 18$ Oe, η τιμή του πλάτους σιδηρομαγνητικού συντονισμού του νέου υλικού που παρασκευάστηκε δεν είναι ιδιαίτερα χαμηλή το οποίο οφείλεται στη διπολική αλληλεπίδραση των σωματιδίων YIG που είναι διεσπαρμένα στην εποξική ρητίνη ως αποτέλεσμα της μεταξύ τους ανάμειξης. Τέλος ακολουθήσε, χρησιμοποιώντας το μοντέλο κοιλότητας, η ανάλυση μιας κεραίας κυκλικού μικροταινιακού καλύμματος τυπωμένης στο υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας-φερριτικού υλικού με βελτιωμένες ιδιότητες στην πλήρως

μαγνητισμένη κατάσταση. Αποδείχθηκε θεωρητικά ότι η εφαρμογή στατικού μαγνητικού πεδίου κάθετα στο επίπεδο της κεραίας, οδηγεί στην εμφάνιση δύο συντονισμών με διαφορετική στροφή της πόλωσης (αριστερόστροφη και δεξιόστροφη κυκλική), οι οποίες μπορούν να μεταβάλλονται με ελεγχόμενο τρόπο μεταβάλλοντας την ένταση του πεδίου πόλωσης. Η θεωρητική ανάλυση παρέχει τη δυνατότητα να γίνει μια αρχική εκτίμηση των συχνοτήτων συντονισμού της κεραίας με γρήγορο και αξιόπιστο τρόπο καθώς και να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τις επιθυμητές ιδιότητες του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί ως υπόστρωμα της κεραίας. Τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις πλήρους κύματος και τις μετρήσεις της κεραίας επιβεβαίωσαν την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της θεωρητικής ανάλυσης τα οποία προέκυψαν χρησιμοποιώντας την προσεγγιστική έκφραση για τον ταυυστή μαγνητικής διαπερατότητας του σύνθετου υλικού στη πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση.

Κεφάλαιο 7

Αξιολόγηση Αναδιαρθρώσιμων Κεραίων με Μαγνητο-Διηλεκτρικά Υλικά

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια σύνοψη της αξιολόγησης των επιδόσεων των αναδιαρθρώσιμων κεραίων που σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας Διατριβής. Αρχικά, γίνεται μια σύντομη αναφορά στη γεωμετρία των προτεινόμενων κεραίων καθώς και στις ιδιότητες των μαγνητο-διηλεκτρικών υλικών που ενσωμάτωθηκαν στη δομή τους. Έπειτα, παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα για το μέτρο του συντελεστή ανάκλασης στην είσοδο της κάθε κεραίας καθώς και της πόλωσης, της απόδοσης ακτινοβολίας και των διαγραμμάτων ακτινοβολίας τους, τα οποία προέκυψαν από εκτεταμένες σειρές μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στις δύο διακριτές καταστάσεις λειτουργίας τους εντός του ανηχικού θαλάμου στην περιοχή συχνοτήτων 5 GHz. Τέλος, γίνεται μια συγκριτική μελέτη και συνοψίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

7.1 Προτεινόμενες Αναδιαρθρώσιμες Κεραίες

Στην παρούσα Διατριβή, σχεδιάστηκαν, προσομοιώθηκαν και υλοποιήθηκαν δύο κατηγορίες αναδιαρθρώσιμων κεραίων μικροταινιακού καλύμματος: κεραίες στις οποίες μέρος του συμβατικού διηλεκτρικού υποστρώματος αντικαθίσταται από δείγμα φερριτικού υλικού συγκεκριμένου σχήματος και διαστάσεων, και εκείνες οι οποίες είναι τυπωμένες πάνω σε υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας-φερριτικού υλικού. Προκειμένου να γίνει μια συγκριτική μελέτη των επιδόσεων τους πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένες σειρές μετρήσεων για την κεραία μικροταινιακού καλύμματος με τροφοδοσία σύζευξης μέσω γειτνίασης και ενσωματωμένο μαγνητο-διηλεκτρικό στο ανώτερο υπόστρωμα της (YIG-PCF) που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5, και την κεραία ορθογωνικού μικροταινιακού καλύμματος με ένθετη τροφοδοσία πάνω στο υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας-φερριτή YIG-Epoxy composite 1 (κεραία YIG-



α) YIG-PCF

β) YIG-Epoxy MSF-1

γ) YIG-Epoxy MSF-2

Σχήμα 7.1: Εργαστηριακά πρωτότυπα των αναδιαρθρώσιμων κεραίων α) YIG-PCF, β) YIG-Epoxy MSF-1, γ) YIG-Epoxy MSF-2.

Epoxy MSF-1) που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 6. Επιπρόσθετα, με στόχο να εξεταστεί η δυνατότητα βελτίωσης της απόδοσης ακτινοβολίας της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 κατασκευάστηκε μία ακόμα τυπωμένη κεραία ορθογωνικού μικροταινιακού καλύμματος πάνω σε υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας-φερρίτη, η οποία θα αναφέρεται ως κεραία YIG-Epoxy MSF-2. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το υπόστρωμα YIG-Epoxy composite 2, το οποίο έχει βελτιωμένες ιδιότητες σε σύγκριση με το YIG-Epoxy composite 1.

Στο Σχήμα 7.1 απεικονίζονται τα εργαστηριακά πρωτότυπα των κεραίων που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της συγκριτικής μελέτης. Επιπρόσθετα, στον Πίνακα 7.1 συνοψίζονται οι διηλεκτρικές και οι μαγνητικές ιδιότητες των φερριτικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στο υπόστρωμα των παραπάνω κεραίων. Αναλυτικές λεπτομέρειες για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του φερριτικού δείγματος YIG που ενσωματώθηκε στο υπόστρωμα της κεραίας YIG-PCF, και των σύνθετων υλικών YIG-Epoxy composite 1 και YIG-Epoxy composite 2 παρουσιάστηκαν στα Κεφάλαια 5 και 6.

Πίνακας 7.1: Διηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες των υλικών που ενσωματώθηκαν στις κεραίες υπό μελέτη.

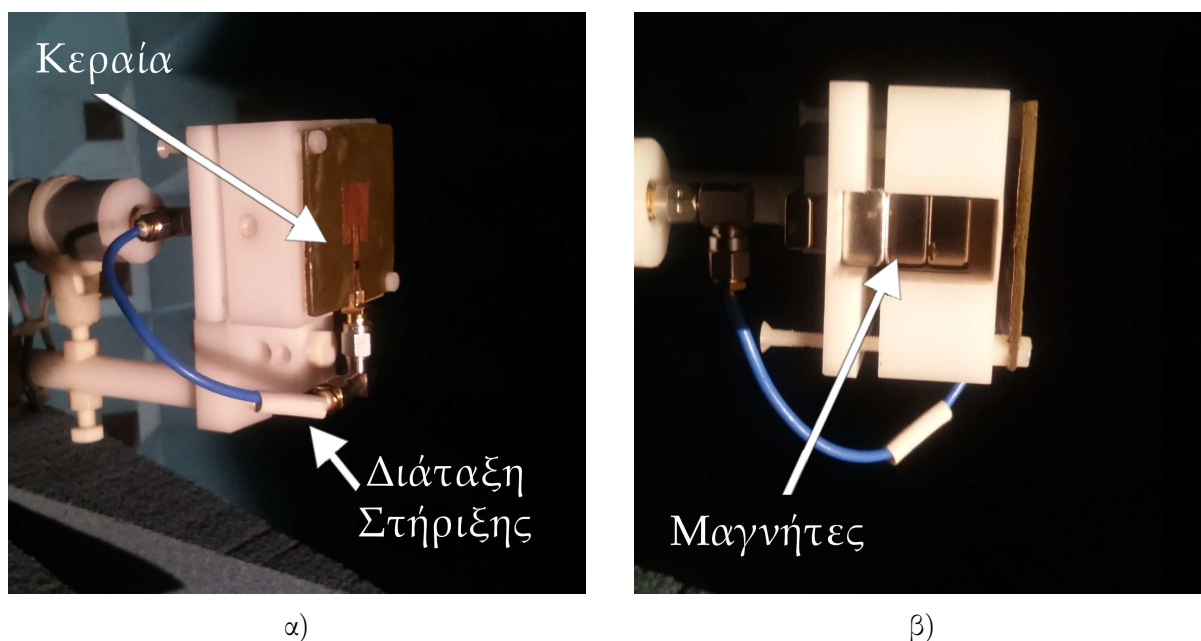
Υλικο	Μαγνητικές Ιδιότητες		Διηλεκτρικές Ιδιότητες	
	ΔH (Oe)	$4\pi M_s$ (G)	ϵ_r	$\tan\delta$
YIG	104	1832	16.5	0.001
YIG-Epoxy composite 1	400	316.14	3.65	0.024
YIG-Epoxy composite 2	370	220	3.67	0.015

7.2 Πειραματικά Αποτελέσματα - Αξιολόγηση

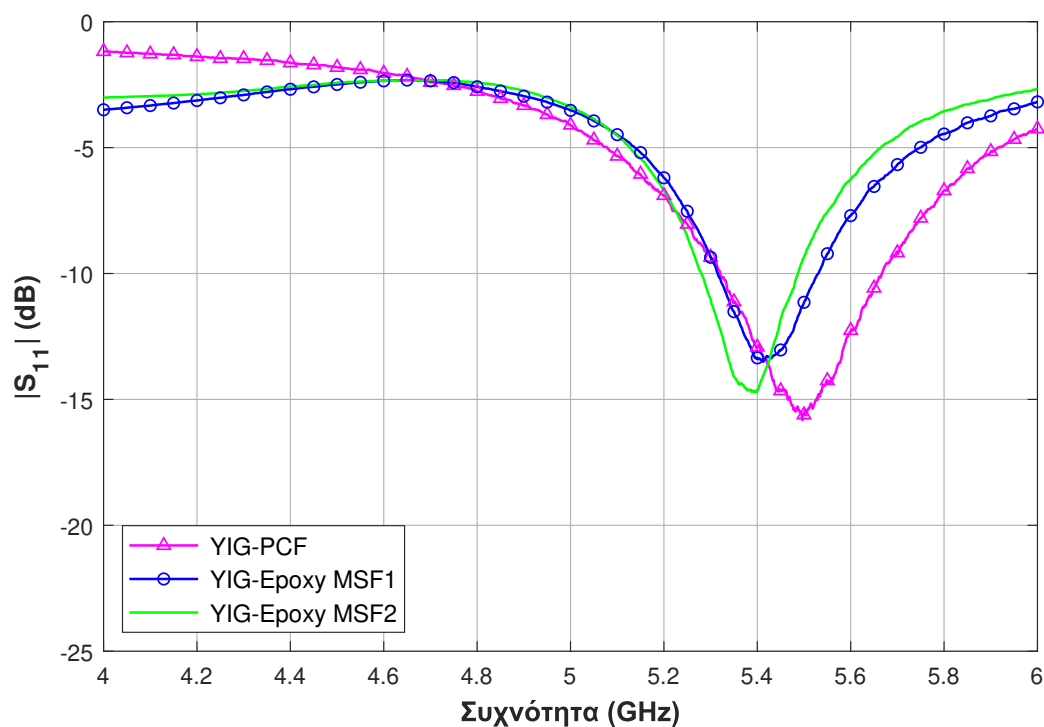
Προκειμένου να γίνει μια συγκριτική μελέτη των επιδόσεων των κεραίων YIG-PCF, YIG-Epoxy MSF-1 και YIG-Epoxy MSF-2 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του συντελεστή ανάκλασης, των διαγραμμάτων ακτινοβολίας, της πόλωσης και της απόδοσης ακτινοβολίας στις δύο καταστάσεις λειτουργίας τους στον ανηχωτικό θάλαμο του ΠΠΤ/Δ. Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση χρησιμοποιήθηκε η διάταξη στήριξης που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 6 και μία στοίβα μόνιμων μαγνητών διαστάσεων $15 \times 15 \times 8 \text{ mm}^3$ και $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$ η οποία τοποθετήθηκε κάτω από το επίπεδο γείωσης της εκάστοτε κεραίας. Η AUT (αποτελείται από το εργαστηριακό πρωτότυπο της εκάστοτε κεραίας, τη στοίβα μόνιμων μαγνητών και τη διάταξη στήριξης) τοποθετήθηκε εντός του ανηχωτικού θαλάμου (Σχήμα 7.2) και συνδέθηκε στη θύρα-1 του VNA. Στην άλλη θύρα του VNA συνδέθηκε μία γραμμικά πολωμένη κεραία αναφοράς.

Στην “κατάσταση OFF” (Σχήμα 7.3), οι υπό μέτρηση κεραίες λειτουργούν στη ζώνη συχνοτήτων των 5.5 GHz. Συγκεκριμένα, η κεραία YIG-PCF συντονίζεται στη συχνότητα 5.5 GHz, η κεραία YIG-Epoxy MSF-1 στη συχνότητα 5.41 GHz και η κεραία YIG-Epoxy MSF-2 στη συχνότητα 5.38 GHz ($|S_{11}| \leq -10 \text{ dB}$). Στην “κατάσταση ON”, εμφανίζονται δύο συντονισμοί (Σχήμα 7.4), οι οποίοι εξαρτώνται από την ένταση του εφαρμοζόμενου στατικού μαγνητικού πεδίου. Στον Πίνακα 7.2, συνοψίζονται οι συχνότητες συντονισμού της κάθε κεραίας υπό την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου ίδιας έντασης.

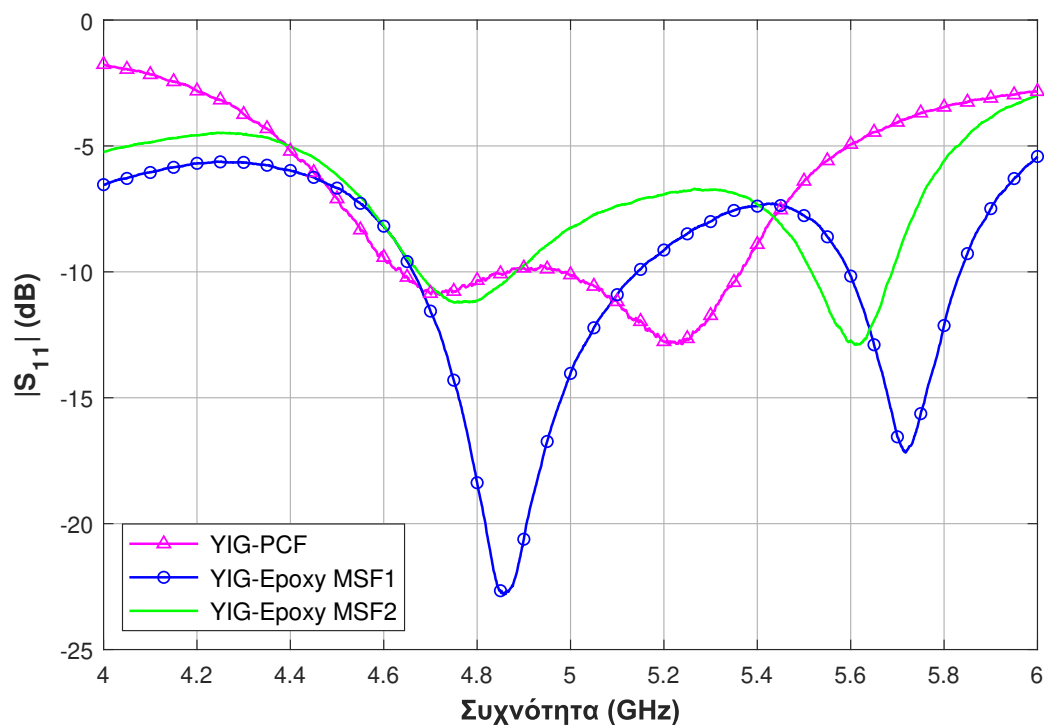
Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις πόλωσης και τριδιάστατων διαγραμμάτων



Σχήμα 7.2: Εργαστηριακό πρωτότυπο αναδιαρθρώσιμης κεραίας τοποθετημένο στη διάταξη στήριξης για τη διεξαγωγή μετρήσεων υπό την επίδραση μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου α) πλάγια όψη, β) κάτωψη.



Σχήμα 7.3: Μέτρο του συντελεστή ανάκλασης στην είσοδο των κεραιών YIG-PCF, YIG-Epoxy MSF-1 και YIG-Epoxy MSF-2 στην “κατάσταση OFF”.



Σχήμα 7.4: Μέτρο του συντελεστή ανάκλασης στην είσοδο των κεραιών YIG-PCF, YIG-Epoxy MSF-1 και YIG-Epoxy MSF-2 στην “κατάσταση ON”.

Πίνακας 7.2: Συχνότητες συντονισμού των υπό μελέτη κεραίων στην “κατάσταση ON”.

Κεραία	“κατάσταση ON” – Συχνότητες Συντονισμού	
	f_{res1}	f_{res2}
YIG-PCF	4.72 GHz	5.24 GHz
YIG-Epoxy MSF-1	4.84 GHz	5.71 GHz
YIG-Epoxy MSF-2	4.72 GHz	5.24 GHz

ακτινοβολίας. Ο αξονικός λόγος υπολογίστηκε βάσει των μετρήσεων της λαμβανόμενης ισχύος στην κεραία αναφοράς καθώς αυτή περιστρέφεται σε επίπεδο κάθετο προς την κατεύθυνση του προσπίπτοντος πεδίου με βήμα 10° στο εύρος γωνιών $0^\circ - 180^\circ$). Για τον υπολογισμό της απόδοσης ακτινοβολίας η_{rad} χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της τριδιάστατης ολοκλήρωσης του διαγράμματος ακτινοβολίας. Αναλυτική περιγραφή των διαδικασιών μέτρησης παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3.

Στους Πίνακες 7.3 και 7.4 παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την πόλωση και την απόδοση ακτινοβολίας της κάθε κεραίας στην κατεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας στην “κατάσταση OFF” και στην “κατάσταση ON” αντίστοιχα. Στην “κατάσταση OFF”, οι κεραίες είναι γραμμικά πολωμένες. Όσον αφορά την απόδοση ακτινοβολίας, η κεραία YIG-PCF παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση ακτινοβολίας σε σύγκριση με τις δύο τυπωμένες κεραίες μικροταινιακού καλύμματος σε υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας-φερρίτη. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η απόδοση ακτινοβολίας της κεραίας YIG-Epoxy MSF-2 είναι καλύτερη (περίπου κατά 9%) σε σύγκριση με την απόδοση ακτινοβολίας της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1, γεγονός που οφείλεται στις χαμηλότερες διηλεκτρικές απώλειες που παρουσιάζει το σύνθετο υλικό YIG-Epoxy composite 2 σε σχέση με το YIG-Epoxy composite 1 (Πίνακας 7.1).

Στην “κατάσταση ON”, οι κεραίες εμφανίζουν κυκλική ή ελλειπτική πόλωση ανάλογα με τη συχνότητα λειτουργίας (στον Πίνακα 7.4 η συχνότητα f_1 αντιστοιχεί στη συχνότητα με τη μικρότερη τιμή του αξονικού λόγου). Όσον αφορά την απόδοση ακτινοβολίας, παρατηρείται μείωση συγκριτικά με την αμαγνήτιστη κατάσταση. Ενδεικτικά για τις τυπωμένες κεραίες πάνω σε υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας-φερρίτη, η απόδοση ακτινοβολίας της κεραίας YIG-Epoxy composite 1 είναι ίση με 62.8% στην αμαγνήτιστη κατάσταση, ενώ στην “κατάσταση ON” μειώνεται και είναι ίση με 18.8%. Αντίθετα, η απόδοση ακτινοβολίας της κεραίας YIG-PCF είναι αποδεκτή ($> 50\%$) και στις δύο καταστάσεις λειτουργίας. Η ιδιαίτερα μεγάλη μείωση που παρατηρείται στην πρώτη περίπτωση οφείλεται στις υψηλές μαγνητικές απώλειες που παρουσιάζουν τα σύνθετα υλικά που παρασκευάστηκαν.

Τα Σχήματα 7.5, 7.6 και 7.7 απεικονίζουν τα διαγράμματα ακτινοβολίας των κεραίων YIG-PCF, YIG-Epoxy MSF-1 και YIG-Epoxy MSF-2 στα επίπεδα xz και yz στην “κατάσταση OFF” και στην “κατάσταση ON”. Παρατηρούνται μικρές διαφορές στην κα-

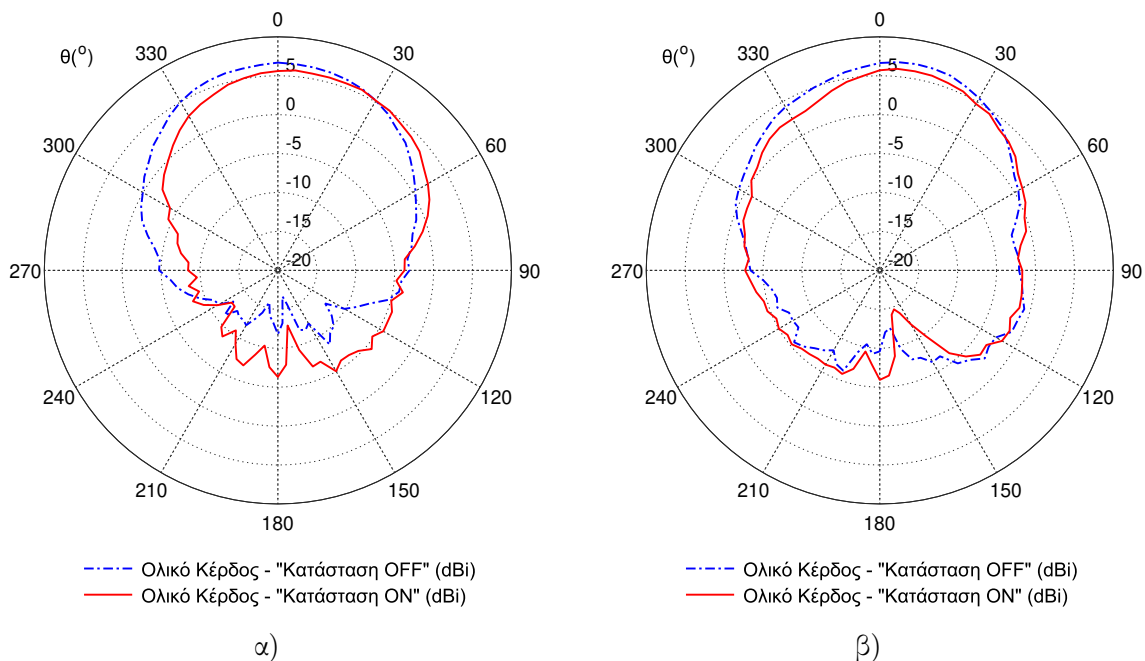
Πίνακας 7.3: Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας των κεραίων YIG-PCF, YIG-Epoxy MSF-1 και YIG-Epoxy MSF-2 στην “κατάσταση OFF”.

Κεραία	“κατάσταση OFF”		
	f (GHz)	AR (dB)	η_{rad}
YIG-PCF	5.40	22.5	99.0%
YIG-Epoxy MSF-1	5.40	15.9	53.9%
YIG-Epoxy MSF-2	5.40	17.6	62.8%

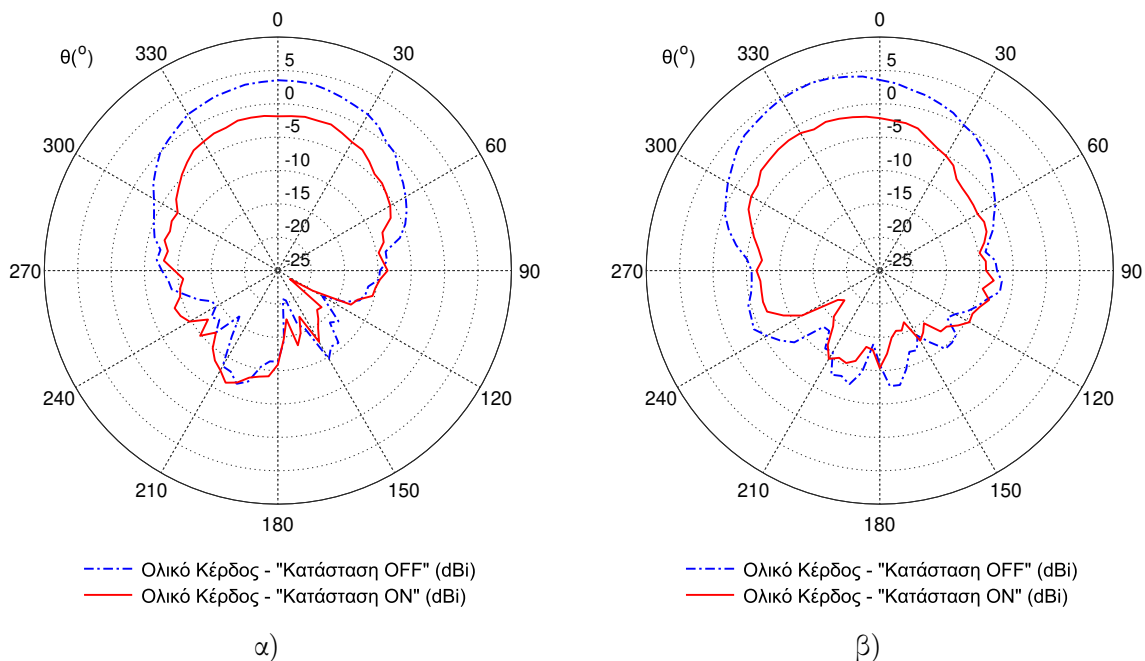
τεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας μεταξύ των δύο καταστάσεων λειτουργίας. Επιπλέον, το μέγιστο κέρδος της κεραίας μειώνεται σημαντικά στις κεραίες μικροταινιακού καλύμματος σε υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας-φερρίτη, γεγονός που υποδηλώνει υποβάθμιση της απόδοσης ακτινοβολίας τους στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση, όπως διαπιστώθηκε παραπάνω. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση απεικονίζονται μόνο τα διαγράμματα ακτινοβολίας εκπομπής των κεραίων. Λόγω της μη-αμοιβαιότητας, λόγω της παρουσίας του μαγνητισμένου υλικού στο υπόστρωμα των κεραίων, τα διαγράμματα ακτινοβολίας εκπομπής και λήψης είναι διαφορετικά.

Πίνακας 7.4: Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας των κεραίων YIG-PCF, YIG-Epoxy MSF-1 και YIG-Epoxy MSF-2 στην “κατάσταση ON”.

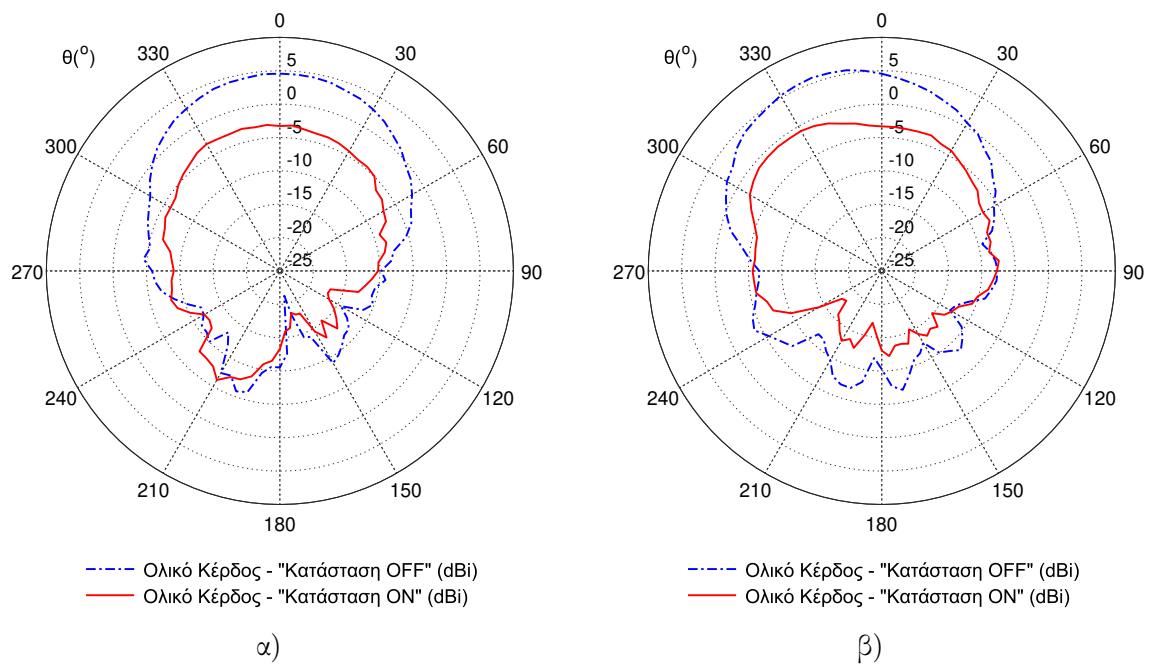
Κεραία	“κατάσταση ON”		
	f (GHz)	AR (dB)	η_{rad}
YIG-PCF	4.78	17.7	62.0%
	5.21	6.2	74.2%
	5.30	4	79.7%
	(f_1) 5.40	1.9	82.6%
YIG-Epoxy MSF-1	4.89	5.1	21.3%
	(f_1) 5.00	4.9	18.3%
	5.40	9.4	18.8%
	5.74	9.2	33.8%
YIG-Epoxy MSF-2	4.78	8.1	19.0%
	(f_1) 5.00	6.6	19.2%
	5.40	10.5	29.5%
	5.61	14.3	41.1%



Σχήμα 7.5: Διάγραμματα ακτινοβολίας της κεραίας YIG-PCF στη συχνότητα f_1 στην “κατάσταση OFF” και στην “κατάσταση ON” α) xz -επίπεδο, β) yz -επίπεδο.



Σχήμα 7.6: Διάγραμματα ακτινοβολίας της κεραίας YIG-Epoxy MSF-1 στη συχνότητα f_1 στην “κατάσταση OFF” και στην “κατάσταση ON” α) xz -επίπεδο, β) yz -επίπεδο.



Σχήμα 7.7: Διάγραμματα ακτινοβολίας της κεραίας YIG-Epoxy MSF-2 στη συχνότητα f_1 στην "κατάσταση OFF" και στην "κατάσταση ON" α) xz -επίπεδο, β) yz -επίπεδο.

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα

8.1 Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας Διατριβής ήταν η μοντελοποίηση, σχεδίαση και αξιολόγηση αναδιαρθρώσιμων κεραιών με τη χρήση μαγνητο-διηλεκτρικών υλικών για εφαρμογές ασύρματων επικοινωνιών. Σε αυτή την ενότητα συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα και η συμβολή της Διατριβής στον τομέα της τεχνολογίας των αναδιαρθρώσιμων κεραιών αξιοποιώντας με αποτελεσματικό τρόπο δεδομένα και γνώσεις της επιστήμης των υλικών.

1. Πραγματοποιήθηκε μελέτη των κρίσιμων παραγόντων που επηρεάζουν την ακρίβεια των αριθμητικών αποτελεσμάτων με στόχο την ακριβέστερη μοντελοποίηση των μαγνητο-διηλεκτρικών υλικών στις δύο διακριτές καταστάσεις λειτουργίας της κεραίας (αμαγνήτιστη και πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση). Βάσει της μελέτης αυτής, αναπτύχθηκε κατάλληλη μεθοδολογία για τη σχεδίαση και την αξιόπιστη προσομοίωση αναδιαρθρώσιμων κεραιών που ενσωματώνουν μαγνητο-διηλεκτρικά υλικά στη δομή τους.
2. Σχεδιάστηκαν, μοντελοποιήθηκαν, κατασκευάστηκαν και μετρήθηκαν εργαστηριακά πρωτότυπα αναδιαρθρώσιμων κεραιών μικροταινιακού καλύμματος στα οποία χρησιμοποιήθηκε διαφορετική τεχνική ενσωμάτωσης του μαγνητο-διηλεκτρικού υλικού στη δομή της κεραίας.
3. Μελετήθηκε η δυνατότητα καταπίεσης της αμοιβαίας σύζευξης σε ένα σύστημα πολλαπλών κεραιών αξιοποιώντας τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν τα μαγνητο-διηλεκτρικά υλικά υπό την επίδραση εξωτερικού στατικού μαγνητικού πεδίου.

Αρχικά, παρουσιάστηκε η σχεδίαση μιας αναδιαρθρώσιμης κεραίας μικροταινιακού καλύμματος με τροφοδοσία σύζευξης μέσω γειτνίασης στο ανώτερο υπόστρωμα της οποίας

ενσωματώθηκε δοκίμιο φερριτικού υλικού σε συμπαγή μορφή και πραγματοποιήθηκε ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση της κεραίας χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη μεθοδολογία. Μελετήθηκε η δυνατότητα επίτευξης αναδιαρθρωσιμότητας της κεραίας υπό την επίδραση στατικού μαγνητικού πεδίου. Στη συνέχεια, κατασκευάστηκε το εργαστηριακό πρωτότυπο της κεραίας προκειμένου να ελεγχθεί πειραματικά η δυνατότητα μεταβολής της συχνότητας συντονισμού και της πόλωσης της. Τέλος, παρουσιάστηκε μια συγκριτική μελέτη μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων με στόχο να εξεταστεί η αξιοπιστία της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν είναι τα εξής:

- Διαπιστώθηκε ότι η μετάβαση από την “κατάσταση OFF” στην “κατάσταση ON” οδηγεί στη δημιουργία δύο μη επικαλυπτόμενων ζωνών συχνότητας λειτουργίας και στη μεταβολή της πόλωσης της προτεινόμενης κεραίας από γραμμική σε ελλειπτική στην κάτω ζώνη λειτουργίας και από γραμμική σε κυκλική στην άνω ζώνη λειτουργίας της. Η στροφή της πόλωσης είναι αντίθετη στις δύο ζώνες λειτουργίας της κεραίας. Επιπρόσθετα, επιτυγχάνεται μεταβολή των δύο συχνότητες συντονισμού με ελεγχόμενο τρόπο μεταβάλλοντας την ένταση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου.
- Παρατηρήθηκε καλή συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων προσομοίωσης και μετρήσεων γεγονός που επιβεβαίωσε την επίτευξη αναδιαρθρωσιμότητας της κεραίας και επιπλέον επαληθεύτηκε η εφικτότητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας σχεδίασης και η ακρίβεια της ηλεκτρομαγνητικής μοντελοποίησης.
- Οι μικρές αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων προσομοίωσης και μετρήσεων οφείλονται στη μη καλή ομοιογένεια του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου λόγω της μονόπλευρης στοίβαξης των μόνιμων μαγνητών κάτω από το επίπεδο γείωσης της κεραίας.
- Παρατηρήθηκαν κατασκευαστικές δυσκολίες κατά την υλοποίηση του εργαστηριακού πρωτοτύπου της κεραίας, οι οποίες σχετίζονται με την ακρίβεια στις διαστάσεις του δοκιμίου, στη δημιουργία εσοχής και στον τρόπο ενσωμάτωσής του στο υπόστρωμα.

Στη συνέχεια, παρουσιάστηκε μια τεχνική περιορισμού του φαινομένου της αμοιβαίας σύζευξης η οποία βασίζεται στη χρήση μαγνητο-διηλεκτρικών υλικών και παρουσιάζει χαμηλή πολυπλοκότητα και κόστος. Το σύστημα δύο κεραίων που σχεδιάστηκε, προσομοιώθηκε και κατασκευάστηκε για τις ανάγκες της μελέτης αυτής αποτελείται από δύο κεραίες μικροταινιακού καλύμματος με τροφοδοσία σύζευξης γειτνίασης στο ανώτερο υπόστρωμα των οποίων ενσωματώθηκαν δυο δοκίμια μαγνητο-διηλεκτρικού υλικού. Η βασική ιδέα της προτεινόμενης τεχνικής είναι η αξιοποίηση της αναδιαρθρωσιμότητας πόλωσης που παρουσιάζει κάθε κεραιοστοιχείο υπό την παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Μελετήθηκαν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί που σχετίζονται με τις καταστάσεις μαγνήτισης των δύο δοκιμίων. Επιπρόσθετα, στην περίπτωση που τα δύο δοκίμια είναι μαγνητικά κορεσμένα εξετάστηκε

η επίδραση της φοράς του εφαρμοζόμενου εξωτερικού μαγνητικού πεδίου στην αμοιβαία σύζευξη μεταξύ των στοιχείων. Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν είναι τα εξής:

- Διαπιστώθηκε μέσω προσομοιώσεων και μετρήσεων καταπίεση της αμοιβαίας σύζευξης η οποία κυμαίνεται από 4 έως 10 dB.
- Η επιτεύξιμη αποσύζευξη καθορίζεται από την κατάσταση μαγνήτισης των δοκιμίων και την πολικότητα του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Η μεγαλύτερη μείωση επιτυγχάνεται στην περίπτωση εφαρμογής μαγνητικού πεδίου αντίθετης πολικότητας στα δύο δοκίμια. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση εφαρμογής μαγνητικού πεδίου κατά τη θετική διεύθυνση του άξονα z στο ένα δοκίμιο και κατά την αρνητική διεύθυνση του άξονα z στο δεύτερο παρατηρείται μείωση της σύζευξης κατά περίπου 10 dB σε σχέση με την περίπτωση που τα δοκίμια είναι αμαγνήτιστα. Η διαφορετική στροφή κυκλικής πόλωσης που εμφανίζει το κάθε στοιχείο οδηγεί στη διατάραξη της επιφανειακής ρευματικής κατανομής προκαλώντας μείωση της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ τους.

Κατόπιν, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μια τυπωμένη κεραία μικροταινιακού καλύμματος με ένθετη τροφοδοσία πάνω σε υπόστρωμα αποτελούμενο από σωματίδια φερρίτη τα οποία βρίσκονται ομοιογενώς διεσπαρμένα σε (μη μαγνητική) πολυμερική μήτρα και μελετήθηκε η εφικτότητα μεταβολής των χαρακτηριστικών της υπό την επίδραση μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Επιπλέον, διερευνήθηκε μέσω προσομοιώσεων η επίδραση των διηλεκτρικών και των μαγνητικών ιδιοτήτων του υλικού του υποστρώματος στην απόδοση ακτινοβολίας της κεραίας και έγινε προσπάθεια παρασκευής ενός σύνθετου υλικού πολυμερικής μήτρας-φερρίτη με βελτιωμένες ιδιότητες. Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν είναι τα εξής:

- Αποδείχθηκε μέσω προσομοιώσεων και μετρήσεων ότι η μετάβαση από την “κατάσταση OFF” στην “κατάσταση ON” οδηγεί στην εμφάνιση δύο συχνοτήτων συντονισμού, οι οποίες μπορούν να μεταβάλλονται ελεγχόμενα με την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου διαφορετικής έντασης. Αντίστοιχη συμπεριφορά είχε διαπιστωθεί και στην πρώτη κατηγορία αναδιαρθρώσιμων κεραιών. Όσον αφορά την πόλωση της προτεινόμενης κεραίας, τα αποτελέσματα ήταν πολλά υποσχόμενα καθώς ήταν δυνατή η μεταβολή της πόλωσης από γραμμική σε αμιγώς κυκλική σε ολόκληρη την κάτω ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας της κεραίας με την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου.
- Διαπιστώθηκε μέσω προσομοιώσεων ότι η απόδοση ακτινοβολίας της κεραίας (περίπου 60% στην αμαγνήτιστη και 30% στην πλήρως μαγνητισμένη) είναι μικρότερη συγκριτικά με την απόδοση ακτινοβολίας της κεραίας μικροταινιακού καλύμματος και τροφοδοσία σύζευξης γειτνίασης και ενσωματωμένο μαγνητο-διηλεκτρικό υλικό.
- Από τη μελέτη της επίδρασης των απωλειών του υλικού στην απόδοση ακτινοβολίας της κεραίας, διαπιστώθηκε ότι οι διηλεκτρικές απώλειες του υλικού ευθύνονται

για την υποβάθμιση της στην αμαγνήτιστη κατάσταση, ενώ, η αποδοτικότητα της κεραίας στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση καθορίζεται από την τιμή του πλάτους σιδηρομαγνητικού συντονισμού του υλικού.

- Δυνατότητα παρασκευής ενός υλικού πολυμερικής μήτρας-φερρίτη με μία τάξη μεγέθους μικρότερο $\tan\delta_e$ και ελαφρώς μικρότερο ΔH .

Ακολούθησε, χρησιμοποιώντας το μοντέλο κοιλότητας, η ανάλυση μιας κεραίας κυκλικού μικροταινιακού καλύμματος τυπωμένης στο υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας-φερριτικού υλικού στην πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση. Αποδείχθηκε θεωρητικά ότι η εφαρμογή στατικού μαγνητικού πεδίου κάθετα στο επίπεδο της κεραίας, οδηγεί στην εμφάνιση δύο συντονισμών με διαφορετική στροφή της πόλωσης (αριστερόστροφη και δεξιόστροφη κυκλική), οι οποίες μεταβάλλονται με ελεγχόμενο τρόπο μεταβάλλοντας την ένταση του πεδίου πόλωσης. Η θεωρητική ανάλυση μας βοήθησε να γίνει μια αρχική εκτίμηση των συχνοτήτων συντονισμού της κεραίας με γρήγορο και αξιόπιστο τρόπο καθώς και να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τις επιθυμητές ιδιότητες του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί ως υπόστρωμα της κεραίας. Παραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις πλήρους κύματος και μετρήσεις της κεραίας, οι οποίες επιβεβαίωσαν την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της θεωρητικής ανάλυσης τα οποία προέκυψαν χρησιμοποιώντας την προσεγγιστική έκφραση για τον τανυστή μαγνητικής διαπερατότητας του σύνθετου υλικού στη πλήρως μαγνητισμένη κατάσταση.

Τέλος, παρουσιάστηκε μια σύνοψη της αξιολόγησης των επιδόσεων των προτεινόμενων αναδιαρθρώσιμων κεραιών μέσω μετρήσεων του συντελεστή ανάκλασης στην είσοδο της κεραίας, των διαγραμμάτων ακτινοβολίας, της πόλωσης και της απόδοσης ακτινοβολίας τους. Διαπιστώθηκε πειραματικά ότι η αναδιαρθρώσιμη κεραία μικροταινιακού καλύμματος με τροφοδοσία σύζευξης μέσω γεινίασης και ενσωματωμένο μαγνητο-διηλεκτρικό υλικό στο υπόστρωμά της παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση ακτινοβολίας σε σύγκριση με τις τυπωμένες κεραίες μικροταινιακού καλύμματος σε υπόστρωμα πολυμερικής μήτρας-φερριτικού υλικού. Παρά ταύτα τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η δεύτερη κατηγορία κεραιών όσον αφορά την απλότητα υλοποίησης, ειδικά στην προοπτική μαζικής κατασκευής, και με δεδομένο ότι η δυνατότητα αναδιαρθρωσιμότητας αποδείχθηκε πλήρως, οδηγούν στο να θεωρούμε και την κατηγορία αυτή των προτεινόμενων κεραιών πιθανή επιλογή για περιπτώσεις όπου εξετάζεται συμβιβασμός μεταξύ χαμηλού κόστους κατασκευής και απόδοσης ακτινοβολίας.

8.2 Μελλοντική Έρευνα

Τα προαναφερθέντα συμπεράσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αφετηρία για μελλοντικές κατευθύνσεις στην επέκταση της έρευνας της αναδιαρθρωσιμότητας κεραίων με τη χρήση μαγνητο-διηλεκτρικών υλικών. Το μεγαλύτερο βάρος της έρευνας στα πλαίσια της Διατριβής αυτής δόθηκε στην τεκμηρίωση της εφικτότητας των προτεινόμενων μεθοδολογιών και τεχνικών που αφορούν την αξιοποίηση υλικών με μαγνητικές ιδιότητες στη σχεδίαση και στην κατασκευή αναδιαρθρώσιμων κεραίων. Η συνέχεια της έρευνας στην περιοχή θα πρέπει να έχει σαν στόχο την προσαρμογή των παραπάνω συμπερασμάτων σε ρεαλιστικές εφαρμογές. Τα προτεινόμενα θέματα μελλοντικής έρευνας συνοψίζονται ως εξής:

- Ο πρώτος από τους μελλοντικούς μας στόχους είναι η βελτιστοποίηση της σχεδίασης της κεραίας μικροταινιακού καλύμματος με σύζευξη γειτνίασης και ενσωματωμένο μαγνητο-διηλεκτρικό υλικό στο υποστρώμα της, έτσι ώστε να εμφανίζει κυκλική πόλωση σε μεγαλύτερο εύρος ζώνης συχνοτήτων καθώς και σε μεγαλύτερο εύρος γωνιών.
- Όσον αφορά τη σχεδίαση και την υλοποίηση αναδιαρθρώσιμων κεραίων σε υπόστρωμα αποτελούμενο από σωματίδια φερρίτη διεσπαρμένα σε μη μαγνητική μήτρα, η παρασκευή σύνθετου υλικού με όσο τον δυνατόν χαμηλές μαγνητικές απώλειες είναι ένα σημαντικό ανοιχτό ζήτημα. Μελλοντικός στόχος είναι να διερευνηθεί ο μηχανισμός που οδηγεί σε υψηλές μαγνητικές απώλειες, μετά την ανάμειξη της εποξικής ρητίνης με το φερριτικό υλικό προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση ακτινοβολίας αυτής της κατηγορίας κεραίων.
- Η μελέτη που πραγματοποιήθηκε κατά την πορεία της Διατριβής εστίασε στην ενσωμάτωση μαγνητο-διηλεκτρικού (φερριτικού) υλικού είτε σε μορφή συμπαγή είτε υπό μορφή σωματιδίων στο υπόστρωμα κεραίων μικροταινιακού καλύμματος. Προκειμένου να ξεπεραστούν τα κατασκευαστικά προβλήματα που επιφέρει η ενσωμάτωση του υλικού σε μορφή συμπαγή και σε συνέχεια της παραπάνω μελέτης, ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάπτυξη φερριτικών υλικών σε μορφή λεπτών υμενίων και η ενσωματώσή τους ως υπέρστρωμα της κεραίας. Απώτερος στόχος είναι η δυνατότητα ελέγχου των χαρακτηριστικών του με την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου. Η έρευνα θα μπορούσε να επεκταθεί και στη μελέτη της δυνατότητας σμίκρυνσης των διαστάσεων της κεραίας με τη χρήση φερριτικών υλικών σε μορφή λεπτών υμενίων.
- Τέλος, ένα ανοιχτό ζήτημα προς διερεύνηση στο οποίο μπορεί να επεκταθεί η έρευνα μας είναι ο τρόπος πόλωσης του μαγνητο-διηλεκτρικού υλικού και η ομοιογένεια του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Στα πλαίσια της παρούσας Διατριβής, χρησιμοποιήθηκαν εμπορικά διαθέσιμοι μόνιμοι μαγνήτες NdFeB, οι οποίοι επιλέχθηκε να τοποθετηθούν κάτω από το επίπεδο γείωσης της κεραίας (μονόπλευρη στοίβαξη),

και όχι εκατέρωθεν του εργαστηριακού πρωτοτύπου της κεραίας, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση τους στα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της κεραίας λόγω της αγωγιμής συμπεριφοράς του κράματος NdFeB. Για την επίτευξη καλύτερης ομοιογένειας, οι μόνιμοι μαγνήτες πρέπει να τοποθετούνται εκατέρωθεν του μαγνητοδιηλεκτρικού υλικού. Προς αυτή την κατεύθυνση, θα είχε ενδιαφέρον να πραγματοποιηθεί περαιτέρω μελέτη μεθόδων εφαρμογής ομογενούς μαγνητικού πεδίου. Όσον αφορά το μέγεθος των μαγνητών που χρησιμοποιήθηκαν καθορίζεται από την ένταση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου που απαιτείται ώστε το δείγμα να φθάσει σε κατάσταση μαγνητικού κόρου. Προκειμένου να αποφευχθεί η χρήση ογκωδών μόνιμων μαγνητών, θα είχε ενδιαφέρον να εξεταστεί η ενσωμάτωση μικροσκοπικών πηνίων στο υπόστρωμα φερρίτη με χρήση της πολυστρωματικής τεχνολογίας LTCC (low temperature co-fired ceramic).

Βιβλιογραφία

- [1] R. V. Petrov, A. S. Tatarenko, G. Srinivasan, and J. V. Mantese, “Antenna miniaturization with ferrite-ferroelectric composites,” *Microw. Opt. Techn. Lett.*, vol. 50, no. 12, pp. 3154–3157, Dec. 2008.
- [2] R. V. Petrov, A. S. Tatarenko, S. Pandey, G. Srinivasan, J. V. Mantese, and R. Azadegan, “Miniature antenna based on magnetoelectric composites,” *Electron. Lett.*, vol. 44, no. 8, pp. 506–507, Apr. 2008.
- [3] G. M. Yang, O. Obi, M. Liu, and N. X. Sun, “Miniaturized patch antennas with ferrite/dielectric/ferrite magnetodielectric sandwich substrate,” *Progr. Electromagn. Res. Online*, vol. 7, pp. 609–612, Jan. 2011.
- [4] J. L. Mattei, L. Huitema, P. Queffelec, J. F. Pintos, P. Minard, A. Sharahia, B. Jamier, F. Ferrero, R. Staraj, D. Jouriou, and A. Thakur, “Suitability of Ni-Zn ferrites ceramics with controlled porosity as granular substrates for mobile handset miniaturized antennas,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no. 10, pp. 3720–3723, Oct. 2011.
- [5] R. C. Hansen and M. Burke, “Antennas with magneto-dielectrics,” *Microwave Opt. Techn. Lett.*, vol. 26, no. 2, pp. 75–78, July 2000.
- [6] H. Mosallaei and K. Sarabandi, “Magneto-dielectrics in electromagnetics: Concept and applications,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 52, no. 2, pp. 1558–1567, June 2004.
- [7] P. M. T. Ikonen, K. N. Rozanov, A. V. Osipov, P. Alitalo, and S. A. Tretyakov, “Magnetodielectric substrates in antenna miniaturization: Potential and limitations,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 1, pp. 3391–3399, Nov. 2006.
- [8] A. K. Skrivervik, J.-F. Zurcher, O. Staub, and J. R. Mosig, “PCS antenna design: the challenge of miniaturization,” *IEEE Antennas Propag. Magaz.*, vol. 43, no. 4, pp. 12–27, Aug. 2001.

- [9] M. Karkkainen and P. Ikonen, “Patch antenna with stacked split-ring resonators as an artificial magneto-dielectric substrate,” *Microwave Opt. Techn. Lett.*, vol. 46, no. 6, pp. 554–556, Sept. 2005.
- [10] K. Buell, H. Mosallaei, and K. Sarabandi, “A substrate for small patch antennas providing tunable miniaturization factors,” *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 54, no. 1, pp. 135–146, Jan. 2006.
- [11] P. M. T. Ikonen, S. I. Maslovski, C. R. Simovski, and S. A. Tretyakov, “On artificial magnetodielectric loading for improving the impedance bandwidth properties of microstrip antennas,” *Microwave Opt. Techn. Lett.*, vol. 54, no. 6, pp. 1654–1662, June 2006.
- [12] P. Ikonen and S. Tretyakov, “On the advantages of magnetic materials in microstrip antenna miniaturization,” *Microwave Opt. Techn. Lett.*, vol. 50, no. 12, pp. 3131–3134, Dec. 2008.
- [13] A. O. Karilainen, P. M. T. Ikonen, C. R. Simovski, S. A. Tretyakov, A. N. Lagarkov, S. Maklakov, K. N. Rozanov, and S. N. Starostenko, “Experimental studies on antenna miniaturisation using magneto-dielectric and dielectric materials,” *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 5, no. 4, pp. 495–502, Apr. 2011.
- [14] A. O. Karilainen, P. M. T. Ikonen, C. R. Simovski, , and S. A. Tretyakov, “Choosing dielectric or magnetic material to optimize the bandwidth of miniaturized resonant antennass,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 11, pp. 3991–3998, Nov. 2011.
- [15] G. C. Christodoulou, Y. Tawk, A. Youssef, A. S. Lane, and R. S. Scott, “Reconfigurable antennas for wireless and space applications,” *Proc. IEEE*, vol. 100, no. 7, pp. 2250–2261, July 2012.
- [16] R. L. Haupt and M. Lanagan, “Reconfigurable antennas,” *IEEE Antennas Propag. Magaz.*, vol. 55, no. 1, pp. 49–61, Feb. 2013.
- [17] N. Haider, D. Caratelli, and A. G. Yarovoy, “Recent developments in reconfigurable and multiband antenna technology,” *Int. J. Antennas Propag.*, vol. 2013, pp. 2371–2378, Mar. 2013.
- [18] J. Constantine, Y. Tawk, S. E. Barbin, and C. G. Christodoulou, “Reconfigurable antennas: design and application,” *Proc. IEEE*, vol. 103, no. 3, pp. 424–437, Mar. 2015.
- [19] D. M. Pozar and V. Sanchez, “Magnetic tuning of a microstrip antenna on a ferrite substrate,” *Electron. Lett.*, vol. 24, no. 12, pp. 729–731, June 1988.

- [20] P. J. Rainville and F. J. Harackiewicz, “Magnetic tuning of a microstrip patch antenna fabricated on a ferrite film,” *IEEE Microw. Guid. Wave Lett.*, vol. 2, no. 12, pp. 483–485, Dec. 1992.
- [21] R. K. Mishra, S. S. Pattnaik, and N. Das, “Tuning of microstrip antenna on ferrite substrate,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 41, no. 2, pp. 230–233, Feb. 1993.
- [22] A. D. Brown, J. L. Volakis, L. C. Kempel, and Y. Y. Botros, “Patch antennas on ferromagnetic substrates,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 47, no. 1, pp. 26–32, Jan. 1999.
- [23] D. Pozar, “Radiation and scattering characteristics of microstrip antennas on normally biased ferrite substrates,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 40, no. 9, pp. 1088–1092, 1992.
- [24] J.S. Roy, P. Vaudon, A. Reineix, F. Jecko, and B. Jecko, “Circularly polarized far fields of an axially magnetized circular ferrite microstrip antenna,” *Microwave Opt. Techn. Lett.*, vol. 5, no. 5, pp. 228–230, May 1992.
- [25] A. Petosa, R. K. Mongia, M. Cuhaci, and J. S. Wight, “Magnetically tunable ferrite resonator antenna,” *Electron. Lett.*, vol. 30, no. 13, pp. 1021–1022, June 1994.
- [26] K. K. Tsang and R. J. Langley, “Design of circular patch antennas on ferrite substrates,” *IEEE Proc. Microwave, Antennas Propag.*, vol. 145, no. 1, pp. 49–55, Feb 1998.
- [27] T. Fukusako, A. Imahase, , and N. Mita, “Polarization characteristics of patch antenna using in-plane and weakly biased ferrite substrate,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 52, no. 6, pp. 325–327, Jan. 2004.
- [28] A.A. Mavridis, G. Kyriacou, and J. Sahalos, “Analysis of circular patch antenna tuned by a ferrite post,” *Microwave Opt. Techn. Lett.*, vol. 46, no. 3, pp. 234–237, Aug. 2005.
- [29] R. Pourush, G. S. Tyagi, G. P. Srivastava, and P. K. S. Pourush, “Radiation performance of switchable ferrite microstrip array antenna,” *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 5, pp. 195–982, May 2006.
- [30] A.A. Mavridis, G. Kyriacou, and J. Sahalos, “On the design of patch antennas tuned by transversely magnetized lossy ferrite including a novel resonating mode,” *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 62, pp. 165–192, 2006.
- [31] M. Sigalov, R. Shavit, R. Joffe, and E. O. Kamenetskii, “Manipulation of the radiation characteristics of a patch antenna by small ferrite disks inserted in its

- cavity domain,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 5, pp. 2371–2378, May 2013.
- [32] H. How and T. M. Fang, “Magnetic steerable ferrite patch antenna array,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 30, no. 6, pp. 4551–4553, Nov. 1994.
- [33] H. How, T. M. Fang, W. Liu, C. Vittoria, M. H. Champion, and H. I. Southall, “Antenna array of circular patches on ferrite substrate,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 33, no. 1, pp. 735–738, Jan. 1997.
- [34] A. Shamim, J. R. Bray, N. Hojjat, and L. Roy, “Ferrite LTCC-based for tunable SoP applications,” *IEEE Trans. Compon. Manuf. Techn.*, vol. 1, no. 7, pp. 196–205, July 2011.
- [35] F. A. Ghaffar, J. R. Bray, and A. Shamim, “Theory and design of a tunable antenna on a partially magnetized ferrite LTCC substrate,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 3, pp. 1238–1245, March 2014.
- [36] G. M. Yang, X. Xing, A. Daigle, M. Liu, O. Obi, S. Stoute, K. Naishadham, and N. X. Sun, “Tunable miniaturized patch antennas with self-biased multilayer magnetic films,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57, no. 7, pp. 2190–2193, July 2009.
- [37] G. M. Yang, X. Xing, O. Obi, A. Daigle, M. Liu, S. Stoute, K. Naishadham, and N. X. Sun, “Loading effects of self-biased magnetic films on patch antennas with substrate/superstrate sandwich structure,” *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 4, no. 9, pp. 1172–1181, Sep. 2010.
- [38] G. M. Yang, X. Xing, A. Daigle, O. Obi, M. Liu, J. Lou, S. Stoute, K. Naishadham, and N. X. Sun, “Planar annular ring antennas with multilayer self-biased NiCo-ferrite films loading,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 3, pp. 648–655, Mar. 2010.
- [39] P. B. A. Fachine, R. S. T. Moretzsohn, R. C. S. Costa, J. Derov, J. W. Stewart, A. J. Drehman, C. Junqueira, and A. S. B. Sombra, “Magneto-dielectric properties of the $Y_3Fe_5O_{12}$ and $Gd_3Fe_5O_{12}$ dielectric ferrite resonator antennas,” *Microw. Opt. Techn. Lett.*, vol. 50, no. 11, pp. 2852–2857, Nov. 2008.
- [40] P. B. A. Fachine, A. F. L. Almeida, R. S. de Oliveira, R. S. T. Moretzsohn, R. R. Silva, and A. S. B. Sombra, “Bulk and patch ferrite resonator antennas based on the ceramic matrix composite: $GdIG_xYIG_{1-x}$,” *Microw. Opt. Techn. Lett.*, vol. 51, no. 6, pp. 1595–1602, June 2009.

- [41] P. B. A. Fechine, H. H. B. Rocha, R. S. T. Moretzsohn, J. C. Denardin, R. Lavin, and A. S. B. Sombra, “Study of a microwave ferrite resonator antenna, based on a ferrimagnetic composite $(\text{Gd}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12})\text{GdIG}_X-(\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12})\text{YIG}_{1-X}$,” *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 3, no. 8, pp. 1191–1198, June 2009.
- [42] S. Bae, Y. K. Hong, J. J. Lee, W. M. Seong, J. S. Kum, W. K. Ahn, S. H. Park, G. S. Abo, J. Jalli, and J. H. Park, “Miniaturized broadband ferrite T-DMB antenna for mobile-phone application,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 6, pp. 2361–2364, June 2010.
- [43] J. Lee, Y. K. Hong, S. Bae, G. Abo, W. M. Seong, and G. H. Kim, “Miniature long-term evolution (LTE) MIMO ferrite antenna,” *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 10, pp. 603–606, June 2011.
- [44] J. Lee, J. Heo, J. Lee, and Y. Han, “Design of small antennas for mobile handsets using magnetodielectric material,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 4, pp. 2080–2084, Apr. 2012.
- [45] J. Lee, J. Lee, K. Min, and Y. Cheon, “Miniaturized antennas with reduced hand effects in mobile phones using magneto-dielectric material,” *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 13, pp. 935–938, May 2014.
- [46] F. A. Ghaffar, M. Vaseem, L. Roy, and A. Shamim, “Design and fabrication of a frequency and polarization reconfigurable microwave antenna on a printed partially magnetized ferrite substrate,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 66, no. 9, pp. 4866–4871, Sep. 2018.
- [47] K. Borah and N. Bhattacharyya, “Magnetodielectric composite with NiFe_2O_4 inclusions as substrates for microstrip antennas,” *IEEE Trans. Dielectrics Electr. Insul.*, vol. 19, no. 5, pp. 1825–1832, Apr. 2012.
- [48] B. D. Cullity and C. D. Graham, *Introduction to Magnetic Materials*, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2009.
- [49] M. Pardavi-Horvath, “Microwave applications of soft ferrites,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 215–216, pp. 171–183, June 2010.
- [50] R. A. McCurrie, *Ferromagnetic Materials Structures and Properties*. New York: Academic Press, 1994.
- [51] IEEE Magnetics Society, “Magnetic units,” [Online]. Available: http://www.ieemagnetics.org/index.php?option=com_content&view=article&id=118&Itemid=107 (accessed on Jan. 30, 2022).

- [52] B. Lax and K. J. Button, *Microwave Ferrites and Ferrimagnetics*. New York: McGraw-Hill, 1962.
- [53] D.M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2012.
- [54] L.D. Landau and E. Lifshitz, *Electrodynamics of Continuous Media*. Oxford, U.K.: Pergamon Press, 1984.
- [55] H. B. G. Casimir, “On onsager’s principle of microscopic reversibility,” *Rev. Mod. Phys.*, vol. 17, pp. 343–350, Apr. 1945.
- [56] Exxelia Temex, “Microwave ferrites & FDA,” 2015, [Online]. Available: <https://exxelia.com/uploads/PDF/y1-series-v1.pdf> (accessed on Jan. 30, 2022).
- [57] Skyworks, “Microwave ferrites,” 2021, [Online]. Available: https://www.skyworksinc.com/-/media/SkyWorks/Documents/Products/2601-2700/MicrowaveFerrites_203765D.pdf (accessed on Jan. 30, 2022).
- [58] V. C. Harris, “Modern microwave ferrites,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 3, pp. 1075–1104, Mar. 2012.
- [59] E. Schloemann, “Microwave behavior of partially magnetized ferrites,” *J. Appl. Physics*, vol. 41, no. 1, pp. 204–214, Jan. 1970.
- [60] G. T. Rado, “Theory of the microwave permeability tensor and Faraday effect in nonsaturated ferromagnetic materials,” *Phys. Rev.*, vol. 89, p. 529, Jan. 1953.
- [61] J. J. Green and F. Sandy, “Microwave characterization of partially magnetized ferrites,” *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 22, no. 6, pp. 641–645, June 1974.
- [62] M. Igarashi and Y. Naito, “Tensor permeability of partially magnetized ferrites,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 13, no. 5, pp. 1664–1668, Sep. 1977.
- [63] —, “Parallel component μ_z of partially magnetized microwave ferrites,” *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 29, no. 6, pp. 568–571, June 1981.
- [64] P. Gelin and K. Berthou-Pichavant, “New consistent model for ferrite permeability tensor with arbitrary magnetization state,” *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 45, no. 8, pp. 1185–1192, June 1997.
- [65] P. Q. P. Gelin and F. L. Pennec, “Effect of domain shapes on the dynamical behavior of polycrystalline ferrites: Application to the initial permeability,” *J. Appl. Physics*, vol. 98, no. 5, pp. 1185–1192, Sep. 2005.

- [66] P. Gelin and P. Queffelec, “Generalized permeability tensor model: Application to Barium hexaferrite in a remanent state or self-biased circulators,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 1, pp. 24–31, Jan. 2008.
- [67] Le Gouellec, G. Verissimo, P. Queffelec, V. Laur, I. Albert, and T. Girard, “Ferrite-based shifters design: the modeling of non-saturated anisotropic ferrites,” in *Proc. IEEE MMT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, Seattle, USA, June 2013, pp. 1–4.
- [68] J. P. C. Nino, P. Queffelec, and A. Chevalier, “Modeling antennas printed on magnetized substrate: Application to the design of a tunable PIFA antenna,” in *Proc. 45th European Microwave Conf.*, Paris, France, Sept. 2015, pp. 933–936.
- [69] A. Le Gouellec, G. Verissimo, V. Laur, P. Queffelec, I. Albert, and T. Girard, “Modeling non-saturated ferrite-based devices: Application to twin toroid ferrite phase shifters,” *J. Appl. Physics*, vol. 120, no. 7, Aug. 2016.
- [70] R. F. Soohoo, *Theory and Application of Ferrites*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1960.
- [71] P. J. B. Clarricoats, *Microwave Ferrites*. New York: Wiley, 1961.
- [72] E. P. Wohlfarth, *Handbook of Magnetic Materials*, 1st ed. Amsterdam, Holland: North-Holland Publishing Company, 1980.
- [73] K.-H. Hellwege and A. Hellweg, Eds., *Magnetic and Other Properties of Oxide and Related Compounds*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1970, vol. 4, pp. 547–583.
- [74] A. K. Srivastava and M. J. Patni, “Ferromagnetic resonance of gadolinium doped calcium vanadium garnets,” *J. Appl. Physics*, vol. 81, no. 4, pp. 1863–1867, Feb. 1997.
- [75] “IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas, IEEE std. 145-1983,” New York, 1983.
- [76] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- [77] <https://www.supermagnete.gr>.
- [78] <https://www.lakeshore.com/products/categories/overview/discontinued-products/discontinued-products/model-410-hand-held-gaussmeter>.
- [79] “IEEE Standards Test Procedures for Antennas, IEEE std. 149-1979,” Nov. 1979.

- [80] R. G. Vaughan and N. L. Scott, “Evaluation of antenna configurations for reduced power absorption in the head,” *IEEE Trans. Vehicular Techn.*, vol. 48, no. 5, pp. 1371—1380, Sept. 1999.
- [81] AGC Multi Material Europe SA, “TLY family of low loss laminates,” [Online]. Available: https://www.agc-multimaterial.com/uploads/ADD%20Data%20Sheets/1626974187_AGC_TLYTechnicalDataSheet.pdf (accessed on Jan. 30, 2022).
- [82] B. K. Pugh, D. P. Kramer, and C. Chen, “Demagnetizing factors for various geometries precisely determined using 3-D electromagnetic field simulation,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no. 10, pp. 4100–4103, Oct. 2011.
- [83] G. J. Foschnini and M. J. Gans, “On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas,” *Wireless Personal Communications*, vol. 6, pp. 311–335, Mar. 1998.
- [84] M. K. Ozdemir, H. Arslan, and E. Arvas, “Mutual coupling effect in multiantenna wireless communication systems,” in *Proc. GLOBECOM '03 IEEE Global Telecommunications Conference*, San Francisco, CA, USA, January 2004, pp. 829–833.
- [85] J. W. Wallace and M. A. Jensen, “Mutual coupling in MIMO wireless systems: A rigorous network theory analysis,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 3, no. 4, pp. 1317–1325, July 2004.
- [86] T. Svantesson and A. Ranheim, “Mutual coupling effects on the capacity of multielement antenna systems,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Processing (ICASP)*, Salt Lake City, UT, USA, May 2001, pp. 2485–2488.
- [87] M. Han and J. Choi, “Multiband MIMO antenna using orthogonally polarized dipole elements for mobile communications,” *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 53, no. 9, pp. 2043–2048, 2011.
- [88] H. Nigam and M. Kumar, “Design and analysis of 2x2 MIMO system for 2.4 GHz ISM band applications,” *Int. J. Advanced Research Computer Engineering & Technol. (IJARCET)*, vol. 3, no. 5, pp. 1794–1798, May 2014.
- [89] S. L. Zuo, Y. Z. Yin, W. J. Wu, Z. Y. Zhang, and J. Ma, “Investigation of reduction of mutual coupling between two planar monopoles using two $\lambda/4$ slots,” *Progress In Electromagnetics Research Lett.*, vol. 19, pp. 9–18, Nov. 2010.
- [90] Q. Li and A. P. Feresidis, “Reduction of mutual coupling between compact MIMO antenna arrays,” in *Proc. Loughborough Antennas Propag. Conf. (LAPC 2010)*, Loughborough UK, November 2010, pp. 277–280.

- [91] C. Y. Chiu, C. H. Cheng, R. D. Murch, and C. R. Rowell, “Reduction of mutual coupling between closely-packed antenna elements,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 6, pp. 1732–1738, June 2007.
- [92] B. Mukherjee, S. Parui, and S. Das, “Mutual coupling reduction of microstrip antenna arrays using rectangular split ring shaped defected ground structure,” in *Proc. Int. Conf. on Communications, Devices and Intelligent Systems (CODIS)*, Kolkata, West Bengal, India, Dec. 2012, pp. 202–204.
- [93] Z. Li, Z. Du, M. Takahashi, K. Saito, and K. Ito, “Reducing mutual coupling of MIMO antennas with parasitic elements for mobile terminals,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 2, pp. 473–481, Feb. 2012.
- [94] O. F. Ahmed, R. Ghoname, and A. A. Zekry, “Mutual coupling reduction of MIMO antennas using parasitic elements for wireless communications,” *Int. J. Computer Applications*, vol. 62, no. 19, Jan. 2013.
- [95] D. H. Margaret, M. R. Subasree, S. Susithra, S. S. Keerthika, and B. Manimegalai, “Mutual coupling reduction in MIMO antenna system using EBG structures,” in *Proc. Int. Conf. Signal Processing and Commun. (SPCOM 2012)*, Bangalore, India, July 2012.
- [96] M. A. Abdalla, A. M. Abdelreheem, M. H. Abdegellel, and A. M. Ali, “Surface wave and mutual coupling reduction between two element array MIMO antenna,” in *Proc. Antennas and Propag. Soc. Int. Symp. (APSURSI 2013)*, Orlando, FL, USA, July 2013, pp. 178–179.
- [97] E. Rajo-Iglesias, O. Quevedo-Teruel, and L. Inclan-Sanchez, “Mutual coupling reduction in patch antennas arrays by using a planar EBG structure and a multilayer dielectric structure,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 56, no. 6, pp. 1648–1655, June 2008.
- [98] H. S. Farahani, M. Veysi, M. Kamyab, and A. Tadjalli, “Mutual coupling reduction in patch antenna arrays using a UC-EBG superstrate,” *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 9, pp. 57–58, Jan. 2010.
- [99] G. Exposito-Dominguez, J. M. Fernandez-Gonzalez, P. Padilla, and M. Sierra-Castaner, “New EBG solutions for mutual coupling reduction,” in *Proc. 6th European Conf. Antennas and Propag. (EuCAP 2012)*, Prague, Czech Republic, Mar. 2012, pp. 2841–2844.
- [100] M. G. N. Alsath, M. Kanagasabai, and B. Balasubramanian, “Implementation of slotted meander-line resonators for isolation enhancement in microstrip patch

- antenna arrays,” *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 12, pp. 15–18, Jan. 2013.
- [101] M. M. B. Suwailam, M. S. Boybay, and O. M. Ramahi, “Mutual coupling reduction in MIMO antennas using artificial magnetic materials,” in *Proc. 13th Int. Sym. Antenna Technol. and Appl. Electromagnetics and the Canadian Radio Sciences Meeting*, Banff, AB, Canada, Feb. 2009.
- [102] —, “Single-Negative (SNG) metamaterials for mutual coupling reduction in high-profile antennas,” in *Proc. Antennas and Propag. Soc. Int. Symp. (APSURSI 2009)*, North Charleston, SC, USA, June 2009.
- [103] L. Mouffok, L. Damaj, X. Begaud, A. C. Lepage, and H. Diez, “Mutual coupling reduction between dual polarized microstrip patch antennas using compact spiral artificial magnetic conductor,” in *Proc. 5th European Conf. Antennas and Propag. (EuCAP 2011)*, Rome, Italy, Apr. 2011.
- [104] V. K. Pecharsky and P. Y. Zavalij, *Fundamentals of Powder Diffraction and Structural Characterization of Materials*, 2nd ed. New York, NY: Springer, 2000.
- [105] L. B. McCusker, R. B. V. Dreele, D. E. Cox, D. Loue, and P. Scard, “Rietveld refinement guidelines,” *J. Appl. Cryst.*, vol. 32, pp. 36–50, 1999.
- [106] A. M. Nicolson and G. Ross, “Measurement of intrinsic properties of materials by time domain techniques,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 19, no. 4, pp. 377–382, Nov. 1970.
- [107] J. Ghalibafanand, B. Rejaei, and N. Komjani, “A circularly polarized antenna based on the unidirectional resonant modes of a ferrite disk,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 3, pp. 88–95, Mar. 2014.
- [108] R. Gargand, P. Bhartia, I. Bahl *et al.*, *Microstrip Antenna Design Handbook*. Norwood, MA: Artech House, 2001.

Κατάλογος Δημοσιεύσεων

Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Επιστημονικά Περιοδικά με Κριτές

- [Π1] **Evmorfili Andreou**, Theodore Zervos, Antonis A. Alexandridis, George Fikioris, “Magneto-Dielectric Materials in Antenna Design”, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 61, no.1, pp. 29-40, February 2019.
- [Π2] **Evmorfili Andreou**, Theodore Zervos, Antonis A. Alexandridis, George Fikioris, “Analysis, design and fabrication of reconfigurable patch antenna on magnetodielectric composite substrate with biased ferrite particles”, *AEUE-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 144, February 2022.

Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Επιστημονικά Συνέδρια με Κριτές

- [Σ1] **E. Andreou**, T. Zervos, F. Lazarakis, A. A. Alexandridis, K. Dangakis, G. Fikioris, E. Varouti, J. C. Vardaxoglou, “Reconfigurable Proximity Coupled Patch Antenna Using Magnetic Bias”, in *Proc. of 2014 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC 2014)*, Loughborough, UK, pp. 376-380, 10-11 November 2014.
- [Σ2] **E. Andreou**, T. Zervos, F. Lazarakis, A. A. Alexandridis, F. Lazarakis, G. Fikioris, “Mutual Coupling Control in a Multiple Antenna System Using Ferrimagnetic Substrate”, in *Proc. of the 8th European Conference on Antennas & Propagation (EuCAP 2015)*, Lisbon, Portugal, 12-17 April 2015.
- [Σ3] **E. Andreou**, T. Zervos, E. Varouti, A. A. Alexandridis, F. Lazarakis, G. Fikioris, “A Reconfigurable Patch Antenna Printed on YIG-Epoxy Composite Substrate”, in *Proc. of the 9th European Conference on Antennas & Propagation (EuCAP 2016)*, Davos, Switzerland, 10-15 April 2016.
- [Σ4] **E. Andreou**, T. Zervos, E. Varouti, M. Pissas, C. Christides, A. A. Alexandridis, G. Fikioris, “Magneto-dielectric Substrate Influence on the Efficiency of a Reconfigurable Patch Antenna”, in *Proc. of the 2017 IEEE International Workshop on Antenna Technology (iWAT 2017)*, Athens, Greece, pp. 191-194, 1-3 March 2017.

- [Σ5] **E. Andreou**, Antonis A. Alexandridis, George Fikioris, “Experimental Evaluation of Patch Antennas with Ferrite Loaded Substrate at 5GHz Frequency Band”, in *Proc. of the 11th European Conference on Antennas & Propagation (EuCAP 2018)*, London, United Kingdom, 9-13 April 2018.