



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Εφαρμογές των μεταλλικών στα σύγχρονα συστήματα επικοινωνιών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΤΟΛΙΟΥ ΜΑΡΙΑ

Επιβλέπων : κ. ΖΥΓΚΙΡΙΔΗΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ

Κοζάνη Οκτώβριος 2022



DEPARTMENT OF ELECTRICAL
& COMPUTER ENGINEERING
UNIVERSITY OF WESTERN MACEDONIA
FACULTY OF ENGINEERING

«Applications of meta-materials in modern communication systems»

TOLIOU MARIA

SUPERVISOR:

Zygiridis Theodoros

KOZANI OCTOBER 2022



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο «Εφαρμογές των μεταλλικών στα σύγχρονα συστήματα επικοινωνιών» καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του μέλους του Τμήματος κ. Ζυγκιρίδη Θεόδωρου αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. 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 τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και μόνο.

Copyright (C) Τόλιου Μαρία , Ζυγκιρίδης Θεόδωρος , 2022 , Κοζάνη

Copyright (C) Toliou Maria, Zygiridis Theodoros ,2022 , Kozani

Υπογραφή Φοιτητή: _____

Περίληψη

Η παρούσα εργασία αποτελεί μια βιβλιογραφική επισκόπηση με θέμα «Εφαρμογές των μεταλλικών στα σύγχρονα συστήματα επικοινωνιών» και έχει ως στόχο να διερευνήσει τις εφαρμογές των μεταλλικών και μεταεπιφανειών στα σύγχρονα συστήματα επικοινωνιών. Για την επίτευξη του στόχου αυτού η παρούσα εργασία διαρθρώνεται σε τρία κεφάλαια.

Το πρώτο κεφάλαιο εισάγει τον αναγνώστη στην έννοια των μεταλλικών, μέσα από την ιστορική τους αναδρομή, την περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών τους και την αναφορά των κατηγοριών τους. Ακολουθεί το δεύτερο κεφάλαιο με θέμα «Εφαρμογές των μεταλλικών», το οποίο διερευνά τις εφαρμογές τους σε γραμμές μεταφοράς, σε μικροκυματικούς ζεύκτες, σε κάτοπτρα, σε υλικά απόκρυψης και σε κεραίες. Τέλος, ακολουθεί το τρίτο κεφάλαιο με τίτλο «Οι μεταεπιφάνειες», όπου αναλύονται οι διάφορες κατηγορίες μεταεπιφανειών καθώς και οι σύγχρονες εφαρμογές τους.

Έπειτα εξάγονται τα συμπεράσματα από όλη την έρευνα και παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για το σύνολο της εργασίας.

Λέξεις Κλειδιά

Μεταλλικά, μεταεπιφάνειες, κεραίες, συστήματα επικοινωνίας.

Abstract

Abstract

This thesis is a bibliographic review on "Applications of meta-materials in modern communication systems" and aims to investigate the applications of meta-materials and metasurfaces in modern communication systems. To achieve this goal the present work is structured in three chapters.

The first chapter introduces the reader to the concept of metamaterials, through their historical background, the description of their main characteristics and the reference of their categories. The following is the second chapter on "Applications of meta materials", which explores their applications in transmission lines, microwave couplers, mirrors, concealer materials and antennas.

Finally, follows the third chapter is entitled "Meta-Surfaces", which analyzes the various categories of metasurfaces as well as their modern applications. The conclusions are then drawn from all the research and the bibliography used for the whole work is listed.

Keywords

Meta-materials, metasurfaces, antennas, communication systems.

Ευχαριστίες

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ζυγκιρίδη Θεόδωρο για όλα όσα μας δίδαξε και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για τη στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια .

Περιεχόμενα

Περίληψη	7
Abstract	8
Ευχαριστίες	9
Περιεχόμενα	11
Κατάλογος Εικόνων	14
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	17
1.1 Ιστορική αναδρομή	18
1.2 Βασικά χαρακτηριστικά των μεταλλικών	20
1.3 Κατηγορίες μεταλλικών	21
2. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ	26
2.1. Μεταλλικά σε γραμμές μεταφοράς	26
2.2 Εφαρμογές σε μικροκυματικούς ζεύκτες	27
2.3 Εφαρμογές των μεταλλικών σε κάτοπτρα	28
2.4 Εφαρμογές μεταλλικών σε υλικά απόκρυψης	29
2.4.1 Τεχνικές Ακύρωσης Σκέδασης	30
2.4.2 Τεχνικές Μετασχηματισμού Συντεταγμένων	30
2.4.3 Τεχνικές Γραμμών Μεταφοράς	32
2.5 Τα μεταλλικά στην κατασκευή κεραιών	32
2.5.1 Μοναδιαίο κελί των μεταλλικών	32
2.5.2 Η χρησιμότητα των μεταλλικών στο σχεδιασμό κεραιών	34
2.5.3. Αποτελέσματα της εφαρμογής μεταλλικών στο σχεδιασμό της κεραίας	36
2.5.4 Παραδείγματα κεραιών με μεταλλικά	41
3. ΜΕΤΑΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ	46
3.1. Μεταεπιφάνειες πολλαπλού συντονισμού	46
3.2 Οι μεταεπιφάνειες ανακλαστικής συστοιχίας	48
3.3 Οι μεταεπιφάνειες Huygens	48

3.4 Διηλεκτρικές μεταεπιφάνειες του Huygens	50
3.5. Μεταεπιφάνειες υψηλής αντίθεσης	51
3.6 Εφαρμογές των μεταεπιφανειών	52
3.6.1. Χειρισμός και ανίχνευση πόλωσης	52
3.6.2 Διαμόρφωση μετώπου κύματος	56
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	58
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	60

Απόδοση ξενόγλωσσων όρων

AMC: τεχνητοί μαγνητικοί αγωγοί

CSRR: (Complementary Split Ring Resonator): Συμπληρωματικός συντονιστής διακεκομμένου δακτυλίου

CTL: κυκλική γραμμική εκτέλεση

DNG: (Double Negative): Διπλό αρνητικό

DPS: (Double Positive): Διπλό θετικό

ENG: (Electromagnetic Band Gap): Ηλεκτρομαγνητικό διακενό ζώνης

ENG: (Epsilon Negative): Αρνητική διηλεκτρική σταθερά

GSM: (Global System for Mobile communications): Παγκόσμιο σύστημα κινητής τηλεφωνίας

HIS: επιφάνειες υψηλής αντίστασης

HWPs: πλάκες μισού κύματος

LHM: Left Handed Materials, Αριστερόστροφα υλικά

MD: μαγνητοδιηλεκτρικό

MNG: Mu Negative, Αρνητική μαγνητική διαπερατότητα

PIFA: Planar Inverted F Antennas

SNG: Single Negative, Μονό αρνητικό

SRR: Split Ring Resonator, Συντονιστής διακεκομμένου δακτυλίου

WLAN: Wireless Local Area Network, Ασύρματα τοπικά δίκτυα

MIMO: Multiple Input Multiple Output System, Σύστημα πολλαπλών εισόδων και πολλαπλών εξόδων.

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Το πρώτο μεταϋλικό που κατασκευάστηκε, Αριστερά-Πάνω: Συστοιχία λεπτών μεταλλικών συρμάτων. Δεξιά-Πάνω: Συστοιχία χάλκινων διαχωρισμένων δακτυλίων. Κάτω: Τελικό αποτέλεσμα.	19
Εικόνα 2. Υγρό με θετικό (αριστερά) και αρνητικό (δεξιά) δείκτη διάθλασης.....	20
Εικόνα 3. Διπλή εστίαση δέσμης με τη χρήση πλάκας από μεταϋλικό.	21
Εικόνα 4. Κατηγοριοποίηση των υλικών με βάση τις τιμές των ϵ και των μ (Στότας, 2008).	22
Εικόνα 5. Συνδυασμός λεπτών συρμάτων και SRR για το σχηματισμό μεταϋλικών DNG (α) και παραδείγματα πραγματοποίησης μεταϋλικών DNG (b,c).	23
Εικόνα 6. Η κατασκευή μεταϋλικού ηλεκτρομαγνητικού διάκενού ζώνης (EBG).	24
Εικόνα 7. Τρισδιάστατες δομές μεταϋλικών με αρνητικό δείκτη διάθλασης.....	25
Εικόνα 8. Δομική μονάδα μεταϋλικού.....	26
Εικόνα 9. Δομική μονάδα μεταϋλικού δύο διαστάσεων.....	27
Εικόνα 10. Γραμμή μεταφοράς κατασκευασμένη από 5 δομικές μονάδες μεταϋλικού (Liu & Huang, 2010).	27
Εικόνα 11. Κατευθυντικός ζεύκτης σε γραμμή μικροταινίας με (αριστερά) και χωρίς (δεξιά) την χρήση γραμμής μεταφοράς μεταϋλικού.....	28
Εικόνα 12. Εφαρμογή μεταϋλικών στο τετραγωνικό υβρίδιο που εισάγουν μηδενική διαφορά φάσης (α) ανάμεσα στη θύρα 1 και τη θύρα 4 και (b) ανάμεσα στη θύρα 1 και τη θύρα 3.....	28
Εικόνα 13. Υπερφακός βαθμιδωτού δείκτη από μεταϋλικά.	29
Εικόνα 14. Μανδύας για την τεχνική ακύρωσης σκέδασης	30
Εικόνα 15. Η τεχνική απόκρυψης με μετασχηματισμό συντεταγμένων (Wood, 2009).	31
Εικόνα 16. Μανδύας απόκρυψης με χρήση πολλών στρωμάτων μεταϋλικών (Wood, 2009).....	31
Εικόνα 17. Ένα μοναδιαίο κελί ενός εγκλεισμού με SRR (α), συμπερίληψη φράκταλ δεύτερης τάξης Hilbert (b), τετραγωνική σπείρα (c), τρίτης τάξης φράκταλ συμπερίληψης Hilbert (d) και εγκλεισμού φράκταλ Hilbert τέταρτης τάξης (e).	33
Εικόνα 18. Βέλτιστος αλγόριθμος στο σχεδιασμό κελιών μονάδας μεταϋλικού	34
Εικόνα 19. Τυπικό διάγραμμα φάσης ανάκλασης AMC (α) και σχέδιο επιφάνειας που μοιάζει με μανιτάρι (β) (Dewan & Rahim, 2015).	35

Εικόνα 20. Patch κεραία με υπόστρωμα μεταλλικού υψηλού μ (a) και διαγράμματα σύνθετης αντίστασης εισόδου για διαφορετικά υποστρώματα αέρα, διηλεκτρικό και μαγνητοδιηλεκτρικό υπόστρωμα (b) (Dewan & Rahim, 2015).....	36
Εικόνα 21. Μοντέλα εφαρμογής μεταλλικών για τη βελτίωση του κέρδους ισχύος των κεραιών: κελιά μονάδας που περιβάλλουν το ακτινοβολημένο patch (a), μεταλλικά ως υπερστρώμα (b), χρησιμοποιώντας τα μεταλλικά ως φόρτωση κεραίας (c).	37
Εικόνα 22. Η κεραία φράκταλ του χαλιού Sierpinski (a), η κεραία καλυμμένη με το AMC MTM (b) το κέρδος ισχύος της κεραίας (c), για δύο συχνότητες συντονισμού.	38
Εικόνα 23. Μοντέλα προσομοίωσης των δύο κεραιών λειτουργούν στα 1,88 GHz για το σύστημα GSM. Σύγκριση του μεγέθους της MPA της κεραίας patch microstrip χωρίς φορτωμένο CSRR (a) και με φορτωμένο CSRR (b) για σύστημα GSM (Cao & Krzysztofik, 2018).....	39
Εικόνα 24. S-Παράμετροι κεραιών χωρίς και με MTMs: ως φόρτωση CSRR (α), ως στρώμα υπερστρώματος για συχνότητα ζώνης C μικροκυμάτων (Cao & Krzysztofik, 2018).....	40
Εικόνα 25. Η διαμόρφωση της κεραίας microstrip για συστήματα WLAN χωρίς CSRR (a), κεραία fractal με CSRR (b) και S11 παραμέτρους αυτών (c) (Krzysztofik & Cao, 2018).	41
Εικόνα 26. Μονοπολικές κεραίες σχήματος L με διπλά SRR και μεταλλικές λωρίδες και παράμετροι σκέδασης συναρτήσει της συχνότητας	42
Εικόνα 27. Δομικό κελί τετραγωνικού διαχωρισμένου βρόχου απλής χωρητικής φόρτισης.....	43
Εικόνα 28. (a). Μονή κεραία με μεταλλικό.(b) MIMO κεραία με μεταλλικό και σχισμές στο επίπεδο γείωσης.....	43
Εικόνα 29. Κεραία τύπου patch σε υπόστρωμα FR4 (a)δομικό κελί μεταλλικού τετραγωνικού συντονιστή διαχωρισμένου δακτυλίου(b).....	44
Εικόνα 30. Κεραίες PIFA (Planar Inverted F Antennas).....	45
Εικόνα 31. α) Μια κεραία σε σχήμα V που υποστηρίζει δύο λειτουργίες συντονισμού που χαρακτηρίζονται ως συμμετρικές και αντισυμμετρικές λειτουργίες σύμφωνα με τις κατανομές ρεύματος. Η συμμετρική και η αντισυμμετρική λειτουργία διεγείρονται από συνιστώσες του προσπίπτοντος πεδίου κατά μήκος των αξόνων \hat{s} και \hat{a} , αντίστοιχα. β) Υπερκύτταρο κεραίας σχήματος V με σταθερή κλίση φάσης $\Delta\Phi = \pi/4$	47
Εικόνα 32. Συνύπαρξη των συνηθισμένων και ανώμαλων ανάκλασεων/διαθλάσεων.....	47
Εικόνα 33. Σχέδιο κεραιών νανοράβδου και κεραιών σχήματος H, που λειτουργούν στο κοντινό υπέρυθρο και τα συστήματα μικροκυμάτων, αντίστοιχα.	48

Εικόνα 34. Επάνω μια κατασκευασμένη μικροκυματική μεταεπιφάνεια του Huygens που αποτελείται από μια δέσμη πανομοιότυπων λωρίδων πλακέτας κυκλώματος. Κάτω ίχνη χαλκού στην επάνω και κάτω πλευρά των σανίδων, τα οποία παρέχουν τα απαραίτητα ηλεκτρικά και μαγνητικά ρεύματα πόλωσης, αντίστοιχα.....	49
Εικόνα 35. Μεταεπιφάνεια του Huygens αποτελούμενη από τρία στοιβαγμένα στρώματα από πλασμονικό (οξειδίο του ψευδαργύρου με πρόσμειξη αλουμινίου) και διηλεκτρικό υλικό (Si) υλικά ως βασικό δομικό στοιχείο του (αριστερά).....	50
Εικόνα 36. Σχηματική απεικόνιση της διηλεκτρικής μεταεπιφάνειας του Huygens με χρήση συστοιχιών νανοδίσκων που συμπεριφέρονται ως ηλεκτρικά και μαγνητικά δίπολα καθώς και κατανομές ηλεκτρικού (έγχρωμα βέλη) και μαγνητικού (απλού χρώματος).	51
Εικόνα 37. Εφαρμογές που βασίζονται σε μετα-επιφάνειες για τον έλεγχο πόλωσης και τη διαμόρφωση μετώπου κύματος.....	52
Εικόνα 38. Παραδείγματα πλακών τετάρτου κύματος (QWPs) που βασίζονται στην εξαιρετικά λεπτή μετα-επιφάνεια.....	53
Εικόνα 39. Αριστερό πλαίσιο: γεωμετρία ενός ανακλαστικού HWP. Ένθετα: η γεωμετρία συντεταγμένων του βασικού δομικού στοιχείου και η εικόνα SEM του μέρους της κατασκευασμένης μεταεπιφάνειας με γαλάζιο χρώμα έδειχνε το υπερκυψέλη. Δεξί πλαίσιο: τα ανακλώμενα φάσματα φάσης για το προσπίπτον φως είναι πολωμένα κατά μήκος των αξόνων u και v	54
Εικόνα 40. Κυψέλης μονάδας μεταδιδόμενου HWP και διάγραμμα HWP που βασίζονται σε μεταεπιφάνεια που χρησιμοποιεί την ισχυρή σύζευξη κοντινού πεδίου κεραιών νανοράβδων (Grady et al., 2013).....	55
Εικόνα 41. α) Σχηματική απεικόνιση PSHE. Το εκπεμπόμενο φως CP με την ίδια πολικότητα όπως το προσπίπτον κύμα διαδίδεται κατά μήκος της κάθετης κατεύθυνσης, ενώ το μετατρεπόμενο φως CP με την αντίθετη πολικότητα αποκτά έναν επιπλέον όρο φάσης PB και έτσι διαθλάται σε ανώμαλες κατευθύνσεις. β) PSHE που αποδεικνύεται από ανακλαστικές μεταεπιφάνειες φάσης PB και SEM ενός κατασκευασμένου δείγματος (Shaltout et al., 2015).	55
Εικόνα 42. Τρισδιάστατη (3D) οπτική ολογραφία για προβολή μιας τρισδιάστατης εικόνας σε σχήμα πίδακα επί άξονα με a ευρύ FOV αξιολογημένο ως $\pm 40^\circ$	57

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Στα σύγχρονα συστήματα των τεχνολογιών των επικοινωνιών επικρατεί μία διαρκής ζήτηση για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και μεγαλύτερη χωρητικότητα καναλιού, χωρίς την αναγκαιότητα να αυξήσουμε το χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης και την ισχύ εκπομπής. Παράλληλα υπάρχει η απαίτηση για περιορισμό του μεγέθους των διατάξεων αυτών. Για τον λόγο αυτό ο επιστημονικός κόσμος στρέφεται σε νέα υλικά και δομές που μπορούν να ικανοποιήσουν τους στόχους αυτούς. Τέτοια υλικά είναι τα μεταϋλικά και οι μεταεπιφάνειες, τα οποία και θα μελετηθούν διεξοδικά στην παρούσα εργασία.

Αναλυτικότερα, στόχος της παρούσας εργασίας είναι να μελετήσει τις ιδιότητες και τις εφαρμογές των μεταϋλικών και μεταεπιφανειών γενικά αλλά και ειδικότερα στα συστήματα επικοινωνιών. Η πρώτη φορά που αναφέρθηκαν τα μεταϋλικά ήταν τη δεκαετία του 1960, όπου ο Veselago, θέλοντας να περιγράψει κάποια υλικά με ειδικά χαρακτηριστικά χρησιμοποίησε το ελληνικό πρόθεμα «μετά» και την ελληνική λέξη «υλικά». Ο όρος μεταϋλικά υποδηλώνει ότι τα υλικά αυτά κατά κάποιο τρόπο υπερβαίνουν τις ιδιότητες των συμβατικών υλικών που βρίσκονται στη φύση. Μετά από εκτεταμένη επιστημονική μελέτη, τα χαρακτηριστικά των μεταϋλικών συνοψίζονται στα εξής:

- Έχουν αρνητικό δείκτη διάθλασης.
- Η φάση του κύματος προπορεύεται καθώς αυτό απομακρύνεται από την πηγή.
- Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E , η ένταση του μαγνητικού πεδίου και το κυματοδιάνυσμα k σχηματίζουν μια αριστερόστροφη τριπλέτα.

Έτσι λοιπόν, τα μεταϋλικά αποτελούν τεχνητά σύνθετα υλικά που χαρακτηρίζονται από κάποιες ανώτερες ιδιότητες που δεν υπάρχουν στη φύση. Είναι επίσης τα υλικά που οι ηλεκτρομαγνητικές τους ιδιότητες, που περιγράφονται από την ηλεκτρική και την μαγνητική διαπερατότητα, μπορούν να ελεγχθούν από τον άνθρωπο.

Τα τελευταία χρόνια η χρήση των μεταϋλικών στις τηλεπικοινωνίες, και όχι μόνο, αυξάνεται συνεχώς. Χρησιμοποιούνται σε περιοδικές διατάξεις κυρίως είτε ως μικροκυματικά φίλτρα, είτε στις κεραίες για την αύξηση της αποδοτικότητας τους, καθώς έχει αποδειχθεί ότι βοηθάνε στην περιστολή της ακτινοβολίας στη διεύθυνση αποδοτικότητας τους, κάτι το οποίο βοηθάει στην καλύτερη λειτουργία της κεραίας.

Στην παρούσα μελέτη έλαβε χώρα μια βιβλιογραφική ανασκόπηση σε άρθρα και βιβλία, χρησιμοποιώντας ως λέξεις κλειδιά τις εξής: μεταϋλικά, μεταεπιφάνειες, εφαρμογές μεταϋλικών, εφαρμογές μεταεπιφανειών, μεταϋλικά και τεχνολογίες επικοινωνίας, μεταϋλικά και κεραίες. Από τα άρθρα που συγκεντρώθηκαν κρατήθηκαν μόνο αυτά που ήταν σε ελληνική ή αγγλική γλώσσα και είχαν δημοσιευθεί τα τελευταία 15 χρόνια.

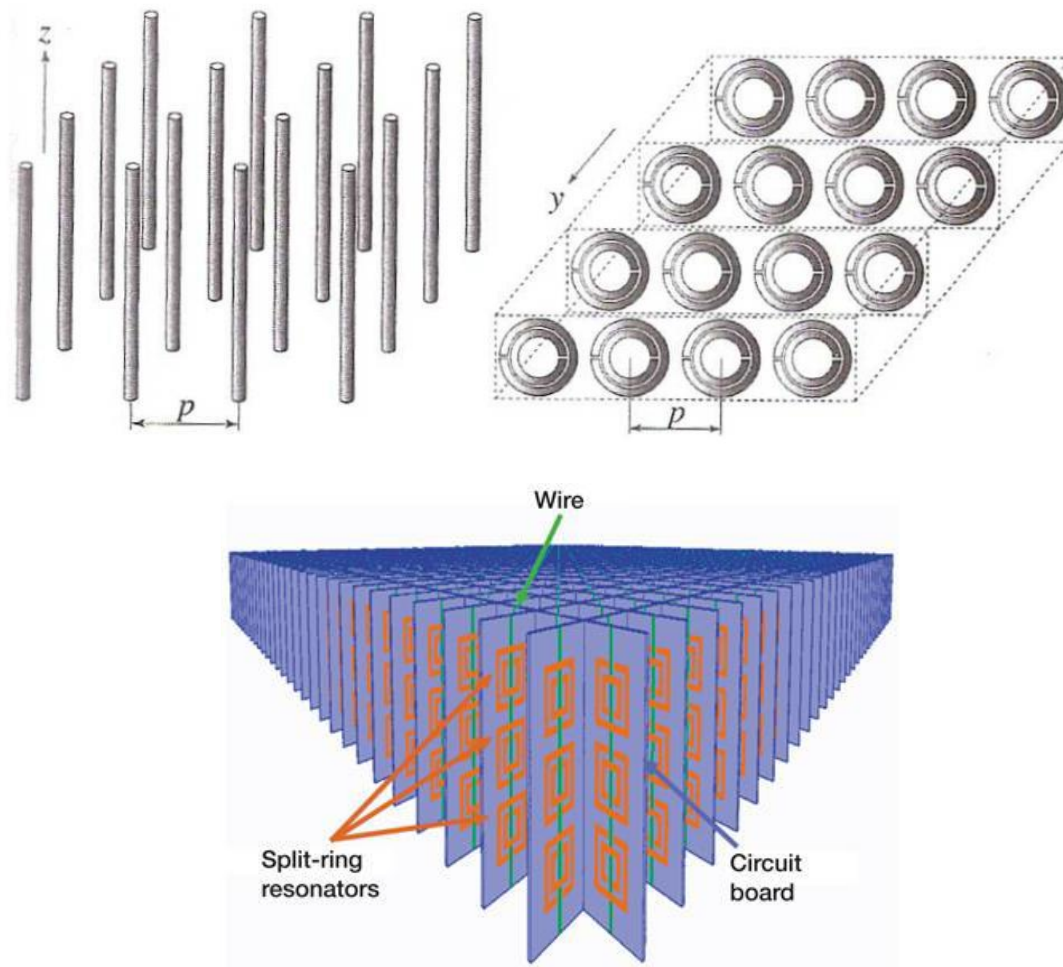
Για την επίτευξη του στόχου της παρούσας μελέτης, η εργασία διαρθρώνεται σε τρία κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο με τίτλο «Μεταϋλικά» εισάγει τον αναγνώστη στην έννοια των μεταϋλικών, μέσα από την ιστορική τους αναδρομή, την περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών τους και την αναφορά των κατηγοριών τους. Ακολουθεί το δεύτερο κεφάλαιο με θέμα «Εφαρμογές των μεταϋλικών», το οποίο διερευνά τις εφαρμογές τους σε γραμμές μεταφοράς, σε μικροκυματικούς ζεύκτες, σε κάτοπτρα, σε υλικά απόκρυψης και σε κεραίες. Τέλος, ακολουθεί το τρίτο κεφάλαιο με τίτλο «Οι μεταεπιφάνειες», όπου αναλύονται οι διάφορες κατηγορίες μεταεπιφανειών καθώς και οι σύγχρονες εφαρμογές τους.

Η παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση αποσκοπεί στο να συνοψίσει τις εφαρμογές των μεταϋλικών και μεταεπιφανειών στα σύγχρονα συστήματα επικοινωνιών και να εστιάσει στις δυνατότητές τους στον κλάδο των επικοινωνιών.

1.1 Ιστορική αναδρομή

Τα τελευταία χρόνια παρατηρήθηκε, και είναι ακόμα ενεργό, έντονο ενδιαφέρον για τα ηλεκτρομαγνητικά μεταϋλικά και τις χρήσεις τους (Eleftheriades & Balmain, 2005; Καμπιτάκης, 2011). Η ιδέα τους ξεκίνησε το 1967 από το Vaselago, ο οποίος αναζητούσε υλικά με διηλεκτρική σταθερά και μαγνητική διαπερατότητα αρνητικές. Κατά την αναζήτησή του διαπίστωσε ότι στα υλικά αυτά η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, η ένταση του μαγνητικού πεδίου και το κυματικό διάνυσμα, σχηματίζουν μια αριστερόστροφη τριπλέτα, η οποία είναι αντίθετη (με τη δεξιόστροφη) με αυτή των συμβατικών υλικών και για το λόγο αυτό αρχικά αναφέρθηκαν ως αριστερόστροφα υλικά (left-handed media, LHM). Επιπρόσθετα, επειδή το κυματικό διάνυσμα των μεταϋλικών είναι αντιπαράλληλο του διανύσματος Poynting, περιγράφηκε ως ένα οπισθοδρομικό κύμα και τα γι' αυτό κάποιοι ονόμασαν τα μεταϋλικά ως «μέσα οπισθοδρομικού κύματος» (backward wave media) (Κωσταράς, 2010). Στη συνέχεια ο Vaselago εξέτασε το κατά πόσο υπάρχουν υλικά με τα παραπάνω χαρακτηριστικά στη φύση και κατέληξε ότι τα υλικά αυτά μπορούν να είναι μόνο τεχνητά. Έπειτα, οι Smith και Schultz συνδύασαν δύο είδη διατάξεων και κατασκεύασαν ένα υλικό που είχε τις επιθυμητές ιδιότητες που αναζητούσε ο Victor Veselago. Το υλικό αυτό αποτελούνταν από μη ομογενή δομή από μια συστοιχία χάλκινων διαχωρισμένων δακτυλίων (SRRs) και λεπτών χάλκινων συρμάτων διαθέτοντας αρνητική μαγνητική διαπερατότητα (μ) και αρνητική διηλεκτρική σταθερά (ϵ) αντίστοιχα (Καμπιτάκης, 2011).

Αρκετά χρόνια αργότερα, ο Pendry (1999) και η επιστημονική του ομάδα μελέτησαν τους τρόπους, με τους οποίους μπορεί να επιτευχθεί η αρνητική τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας σε αγωγούς. Το πρώτο μεταϋλικό που κατασκευάστηκε με αρνητικό δείκτη διάθλασης, ήταν μια δομή αποτελούμενη από συστοιχία χάλκινων διαχωρισμένων δακτυλίων και λεπτών μεταλλικών συρμάτων (Εικόνα 1) (Eleftheriades, 2009).



Εικόνα 1. Το πρώτο μεταϊλικό που κατασκευάστηκε, Αριστερά-Πάνω: Συστοιχία λεπτών μεταλλικών συρμάτων. Δεξιά-Πάνω: Συστοιχία χάλκινων διαχωρισμένων δακτυλίων. Κάτω: Τελικό αποτέλεσμα.¹

Αν και αυτά τα πρώτα μεταϊλικά διατηρήσαν τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά, η πρακτική τους εφαρμογή αποδείχθηκε άκαρπη λόγω του μεγάλου όγκου που καταλάμβαναν. Όμως, οι Caloz et al (2001) ανέπτυξαν τα μεταϊλικά γραμμής μεταφοράς άνευ συντονισμού με αρνητικό δείκτη διάθλασης (non-resonant transmission line NRI metamaterials) (Κωσταράς, 2010).

¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Split-ring_resonator

1.2 Βασικά χαρακτηριστικά των μεταϋλικών

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των μεταϋλικών είναι ο αρνητικός δείκτης διάθλασης. (Fisher, 2014). Όταν ένα υλικό έχει αρνητικό δείκτη διάθλασης, η ενέργεια και η φάση κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται το οπτικό αποτέλεσμα του αρνητικού δείκτη



Εικόνα 2. Υγρό με θετικό (αριστερά) και αρνητικό (δεξιά) δείκτη διάθλασης².

Με βάση τις εξισώσεις του Maxwell, καθώς και με τη χρήση της διανυσματικής ταυτότητας $\nabla \times (fF) = \nabla f \times F + f \nabla \times F$ και της σχέσης $\nabla(e^{-ikr}) = -ike^{-ikr}$ καταλήγει κανείς στα εξής:

$$k \times E = \omega \mu H$$

$$k \times H = -\omega \epsilon E$$

Στην περίπτωση των συνήθων υλικών που υπάρχουν στη φύση με $\epsilon, \mu > 0$ οι εξισώσεις που προαναφέρθηκαν ορίζουν ένα δεξιόστροφο σύστημα του ηλεκτρικού πεδίου, μαγνητικού πεδίου και του διανύσματος διάδοσης. Όταν όμως τα ϵ και μ είναι μικρότερα του μηδενός τότε δημιουργείται ένα αριστερόστροφο σύστημα, με αποτέλεσμα η ταχύτητα φάσης να είναι αντίθετη από αυτήν των υλικών της φύσης.

² <https://content.metamaterial.com/blog/what-are-metamaterials>

Γίνεται σαφές από τα παραπάνω ότι στα μεταλλικά η σταθερά διάδοσης και η ταχύτητα φάσης είναι αρνητικές, με αποτέλεσμα η φάση των κυμάτων να διαδίδεται με φορά προς την πηγή, δηλαδή προς τα πίσω. Από όλα αυτά προκύπτει και η αντιστροφή του νόμου Snell, με βάση την εξής εξίσωση:

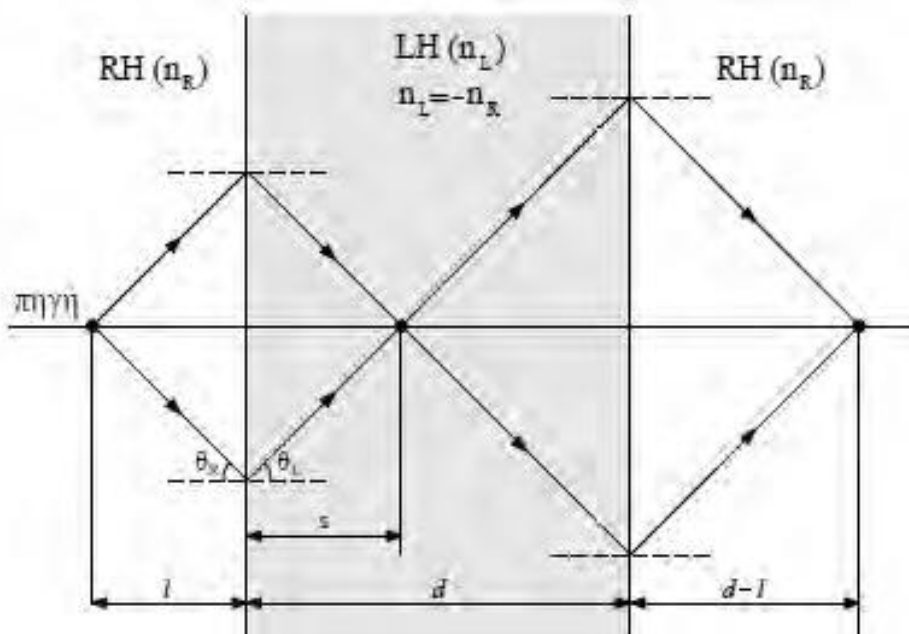
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

όπου n_1, n_2 , οι δείκτες διάθλασης του συνήθους υλικού και του μεταλλικού αντίστοιχα

και θ_1, θ_2 οι γωνίες πρόσπτωσης και διάθλασης.

Επειδή $n_2 < 0$ προκύπτει ότι η γωνία διάθλασης θ_2 πρέπει να είναι επίσης αρνητική, δηλαδή η διάθλαση να πραγματοποιείται κατά την αντίθετη κατεύθυνση από ό,τι συνήθως. Με βάση αυτό μπορεί να επιτευχθεί διπλή εστίαση μίας προσπίπτουσας δέσμης με χρήση κάποιου μεταλλικού.

Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, όταν μια δέσμη πέφτει σε μια διαχωριστική επιφάνεια ενός υλικού κι ενός μεταλλικού, τότε γίνεται διάθλαση με την αντίθετη φορά. Στην περίπτωση μάλιστα που ο δείκτης διάθλασης του μεταλλικού έχει τιμή αντίθετη από το δείκτη διάθλασης του συνήθους υλικού, τότε δε συμβαίνει καθόλου ανάκλαση στις διαχωριστικές επιφάνειες και έτσι γίνεται η επίτευξη της εστίασης αυτής.



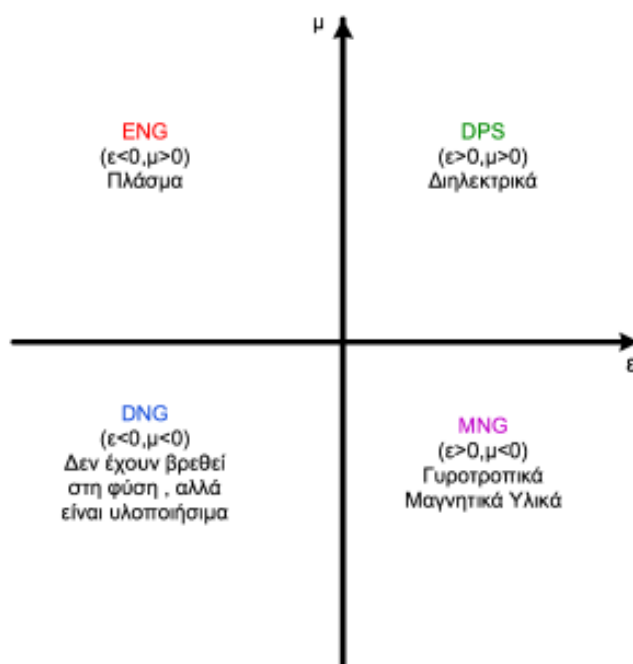
Εικόνα 3. Διπλή εστίαση δέσμης με τη χρήση πλάκας από μεταλλικό.

1.3 Κατηγορίες μεταλλικών

Όπως περιγράφηκε και παραπάνω τα πρώτα μεταϋλικά ήταν ηλεκτρομαγνητικά αλλά σήμερα η σχετική έρευνα έχει γίνει διεπιστημονική και πλέον περιλαμβάνει τόσο την εφαρμοσμένη μηχανική και τον ηλεκτρομαγνητισμό, όσο και τα μικροκύματα, την κατασκευή κεραιών, την οπτοηλεκτρονική, την σεισμολογία και άλλα πεδία (Καμπιτάκης, 20011; Κωσταράς, 2010; Πελεκανίδης, 2016).

Τα υλικά ανάλογα με τη διηλεκτρική σταθερά (ϵ) και τη μαγνητική διαπερατότητα (μ) κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- double-positive (DPS): με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon > 0$ και μαγνητική διαπερατότητα $\mu > 0$, τα οποία υπάρχουν στη φύση.
- epsilon-negative (ENG): με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon < 0$ και μαγνητική διαπερατότητα $\mu > 0$, όπως κάποια ευγενή μέταλλα, όπως ο χρυσός και ο άργυρος.
- mu-negative (MNG): με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon > 0$ και μαγνητική διαπερατότητα $\mu < 0$, όπως τα γυροτροπικά και φερρομαγνητικά υλικά.
- double-negative (DNG) ή αλλιώς διπλαρνητικά: Υλικά με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon < 0$ και μαγνητική διαπερατότητα $\mu < 0$, τα οποία δεν υπάρχουν στη φύση.

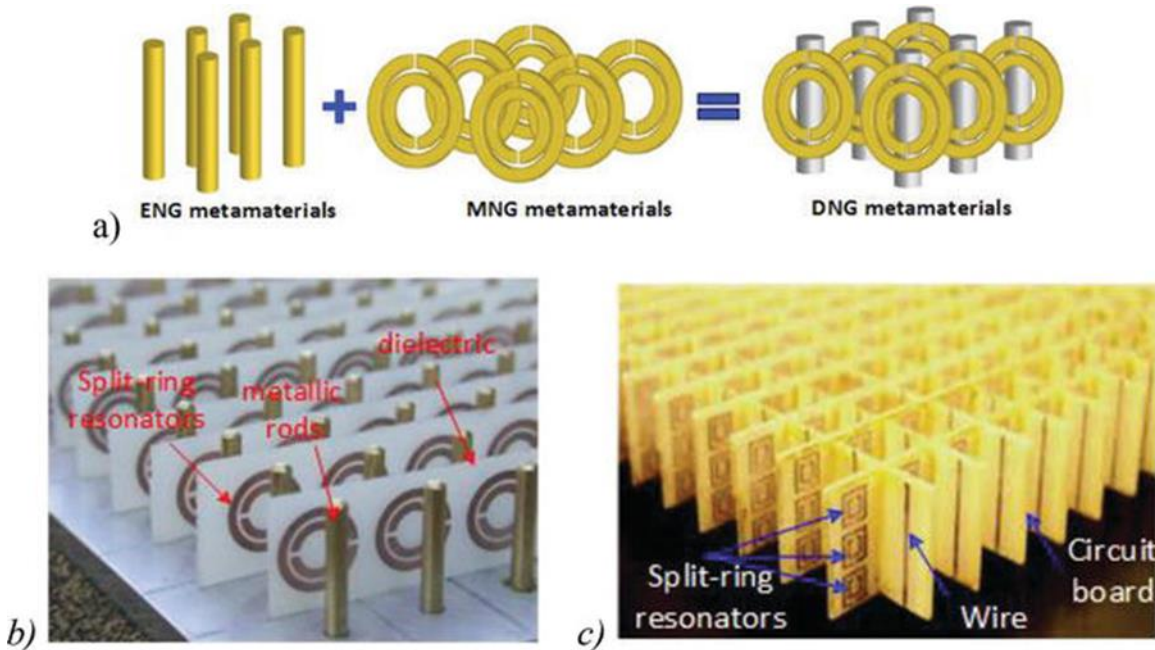


Εικόνα 4. Κατηγοριοποίηση των υλικών με βάση τις τιμές των ϵ και των μ (Στότας, 2008).

Κατά την κατασκευή των μεταϋλικών λαμβάνεται υπόψη η χρήση για την οποία προορίζονται και αναλόγως συντίθενται με την βοήθεια τεχνητών προσθηκών, πάνω σε κάποια ορισμένη επιφάνεια ή σε ένα μέσο υποδοχής. Οι κατασκευές αυτές μπορεί να αλλάζουν το σχήμα, τις τεχνητές προσθήκες, το μέγεθος, τη χωρική διαρρύθμιση αλλά και την πυκνότητα των μεταϋλικών, ανάλογα

με τις ανάγκες της χρήσης τους. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι πιο βασικές κατηγορίες ηλεκτρομαγνητικών μεταυλικών (Caloz, 2009; Ελευθεριάδης, 2009):

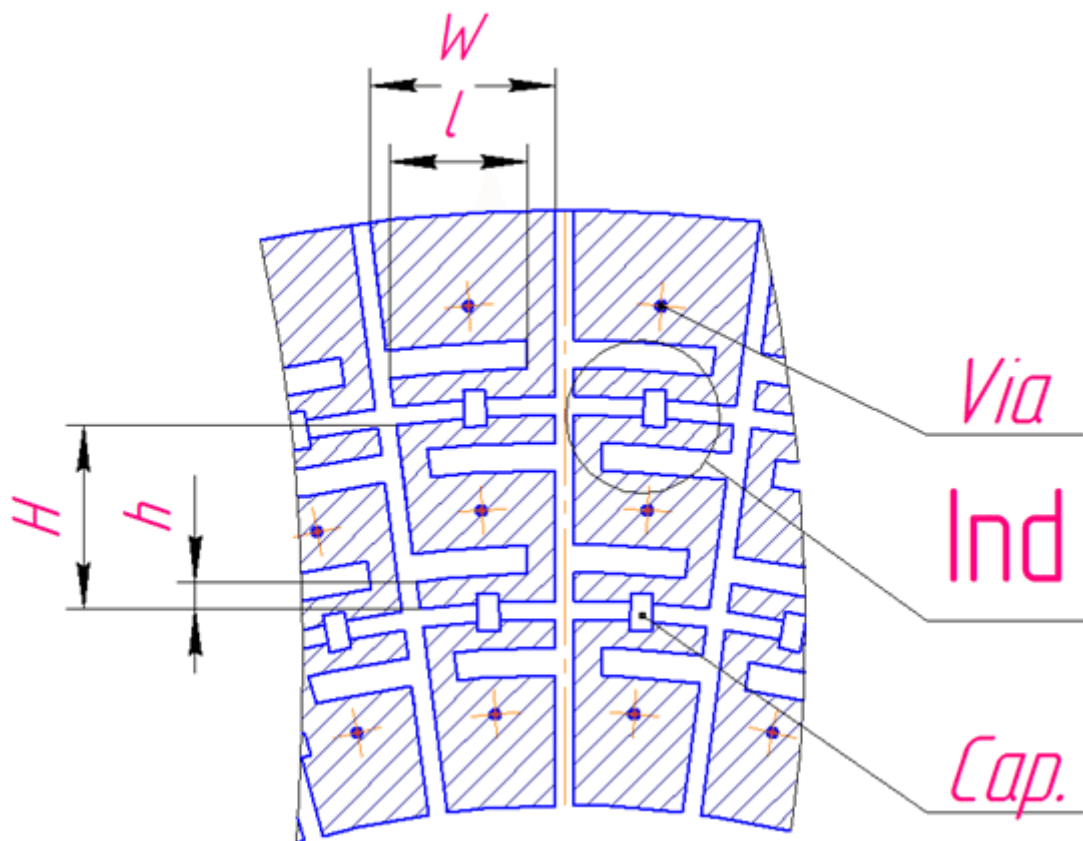
- Διπλά αρνητικά μεταυλικά (Double Negative medium, DNG): στα υλικά αυτά η επιτρεπτότητα, η διαπερατότητα και ο δείκτης διάθλασης είναι αρνητικά και για το λόγο αυτό ονομάζονται και υλικά αρνητικού δείκτη διάθλασης (NRI), καθώς υποστηρίζουν τη διάδοση οπισθοδρομικών κυμάτων .



Εικόνα 5. Συνδυασμός λεπτών συρμάτων και SRR για το σχηματισμό μεταυλικών DNG (α) και παραδείγματα πραγματοποίησης μεταυλικών EBG (b,c).³

- Μονά αρνητικά μεταυλικά: τα υλικά αυτά μπορεί να έχουν αρνητική μαγνητική διαπερατότητα ή αρνητική διηλεκτρική σταθερά, αλλά όχι και τις δύο ταυτόχρονα αρνητικές. Συνεπώς υπάρχουν τα μεταυλικά με αρνητική μαγνητική διαπερατότητα (mu-negative metamaterial, MNG) και τα μεταυλικά με αρνητική διηλεκτρική σταθερά (epsilon-negative metamaterial, ENG).
- Μεταυλικά ηλεκτρομαγνητικού διακένου ζώνης (electromagnetic bandgap metamaterials, EBG): στην κατηγορία αυτή των μεταυλικών ανήκουν τεχνητές διατάξεις όπως οι φωτονικοί κρύσταλλοι, αλλά και γενικά τα αριστερόστροφα υλικά, τα οποία μπορούν να ελέγξουν τη διάδοση των κυμάτων και να επιτρέπουν ηλεκτρομαγνητικά κενά σε επιθυμητές ζώνες συχνοτήτων.

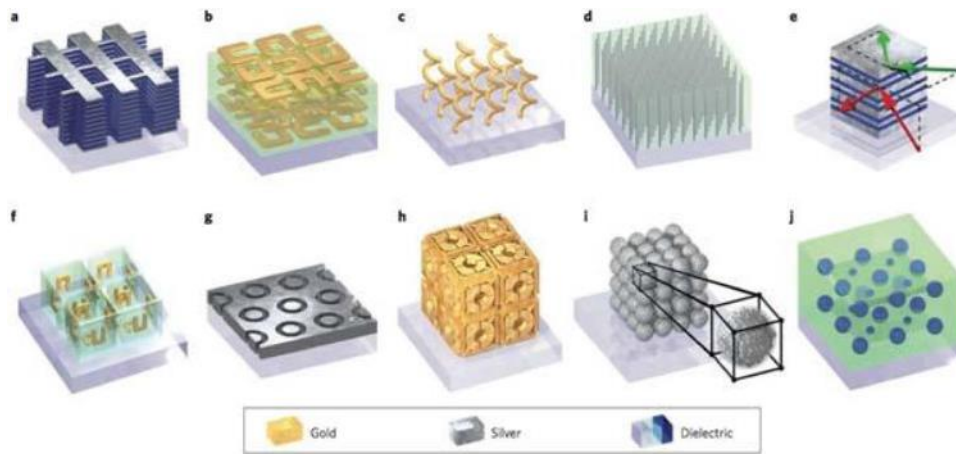
³ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321074435>



Εικόνα 6. Η κατασκευή μεταλλικού ηλεκτρομαγνητικού διάκενού ζώνης (EBG)⁴.

- Δισοτροπικά και δισανισοτροπικά μεταλλικά (double positive medium, DPS): τα υλικά αυτά έχουν τροποποιηθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να αποκτούν ιδιότητες DPS, ENG και MNG υλικών.
- Μεταλλικά γραμμής μεταφοράς με αρνητικό δείκτη διάθλασης: τα μεταλλικά αυτά βασίζονται στη χρήση γραμμών μεταφοράς με στοιχεία όπως πυκνωτές και πηνία.
- Τρισδιάστατες δομές μεταλλικών με αρνητικό δείκτη διάθλασης: τα υλικά αυτά στην ουσία αποτελούν επέκταση των SRR αντηγείων στις 3 διαστάσεις. Αυτό μπορεί να καταστεί εφικτό με την εκτύπωση ενός SRR σε όλες τις έδρες ενός κύβου και τοποθετώντας καλώδια που να διέρχονται από το κέντρο του.

⁴ https://www.researchgate.net/figure/The-electromagnetic-band-gap-EBG-metamaterial-construction_fig2_304272377



Εικόνα 7. Τρισδιάστατες δομές μεταλλικών με αρνητικό δείκτη διάθλασης⁵

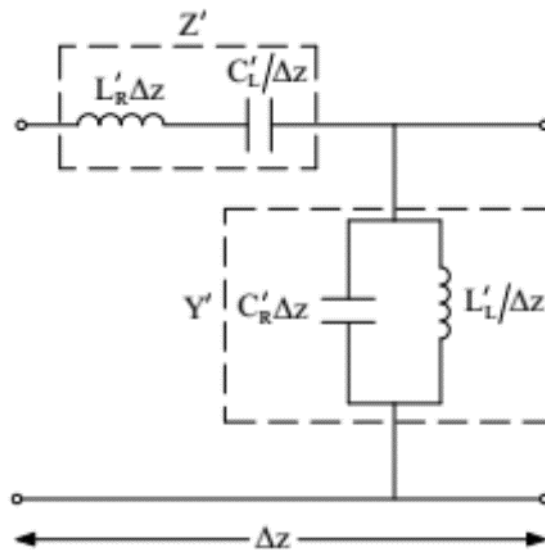
- Terahertz μεταλλικά: τα οποία αλληλεπιδρούν σε συχνότητες Terahertz και συγκεκριμένα από 0.1 έως 10 THz. Τα μεταλλικά μπορούν να αποτελέσουν δομικά υλικά αυτών των τεχνολογιών και έτσι να αποκτήσουν προηγμένες ιδιότητες για προβλήματα μετάδοσης.

⁵ <https://www.mdpi.com/2076-3417/7/10/1071/htm>

2. Εφαρμογές των μεταϋλικών

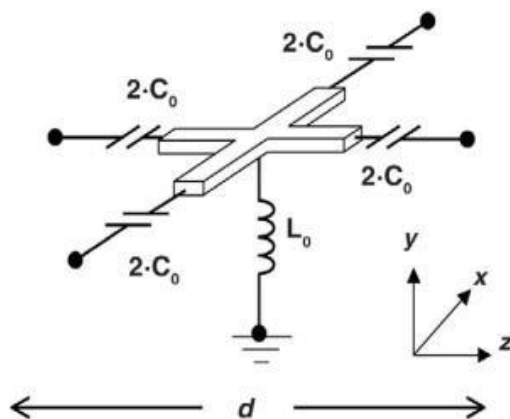
2.1. Μεταϋλικά σε γραμμές μεταφοράς

Μια ευρεία εφαρμογή των μεταϋλικών είναι με την χρήση γραμμών μεταφοράς (Transmission Line Metamaterials) (Liu & Huang, 2010). Η γραμμή μεταφοράς αποτελεί ένα κύκλωμα με δύο αγωγούς, στο οποίο μεταφέρεται ενέργεια μεταξύ δύο σημείων. Λόγω της δυσκολίας κατασκευής των μεταϋλικών, στο ισοδύναμο κύκλωμα θα πρέπει να υπάρχει μια παρασιτική αυτεπαγωγή σε σειρά και μια παρασιτική χωρητικότητα παράλληλα



Εικόνα 8. Δομική μονάδα μεταϋλικού

Ένα παράδειγμα μεταϋλικού δύο διαστάσεων που αποτελείται από 1 διακλαδωμένο πηνίο και 4 πυκνωτές σε σειρά, φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Eleftheriades & Balmain, 2005).



Εικόνα 9. Δομική μονάδα μεταλλικού δύο διαστάσεων⁶

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται μια εφαρμογή μεταλλικού σε γραμμή μεταφοράς, με 5 δομικές μονάδες. Για να είναι λειτουργική η εφαρμογή αυτή θα πρέπει η κάθε δομική μονάδα να έχει διαστάσεις μικρότερες από το μήκος κύματος στη γραμμή (Liu & Huang, 2010).



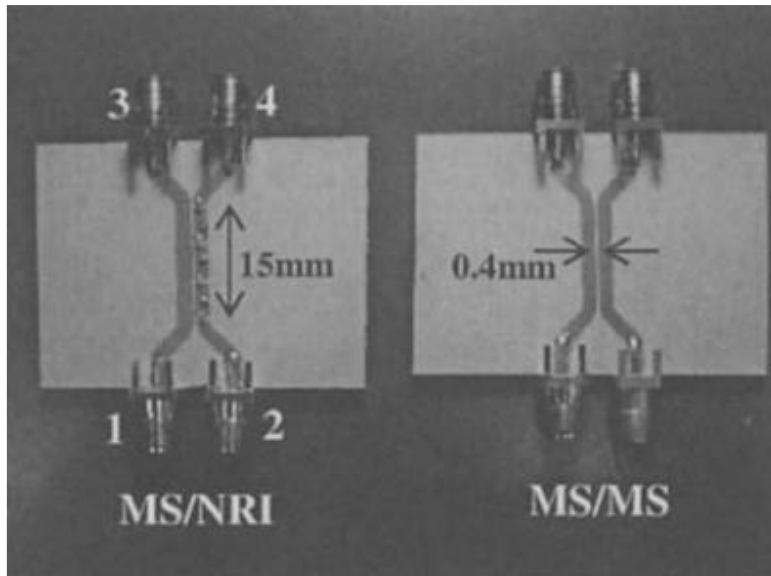
Εικόνα 10. Γραμμή μεταφοράς κατασκευασμένη από 5 δομικές μονάδες μεταλλικού (Liu & Huang, 2010).

2.2 Εφαρμογές σε μικροκυματικούς ζεύκτες

Μια ακόμη ευρεία εφαρμογή των μεταλλικών είναι αυτή στους μικροκυματικούς ζεύκτες, οι οποίοι λόγω των μεταλλικών αποκτούν καλύτερες επιδόσεις και μεγαλύτερη λειτουργικότητα (Islam, Elek & Eleftheriades, 2004; Islam & Eleftheriades, 2004).

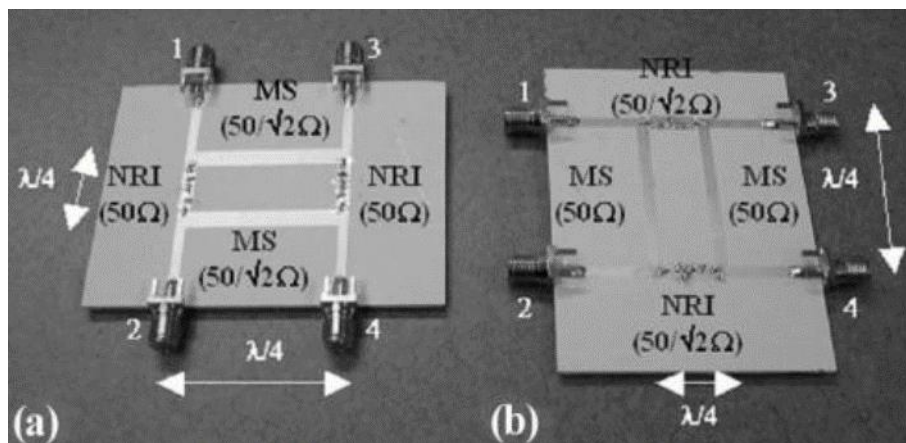
Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι μπορεί να δημιουργηθεί κατευθυντικός ζεύκτης οπισθοδρομικού κύματος, στον οποίο το κύμα στην θύρα σύζευξης διαδίδεται προς την αντίθετη φορά σε σχέση με το προσπίπτον κύμα. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται η εφαρμογή μεταλλικού του κατευθυντικού ζεύκτη σε γραμμή μικροταινίας.

⁶ https://www.researchgate.net/figure/Unit-cell-for-the-2-D-TL-based-NRI-metamaterial_fig2_4088477



Εικόνα 11. Κατευθυντικός ζεύκτης σε γραμμή μικροταινίας με (αριστερά) και χωρίς (δεξιά) την χρήση γραμμής μεταφοράς μεταυλικού.

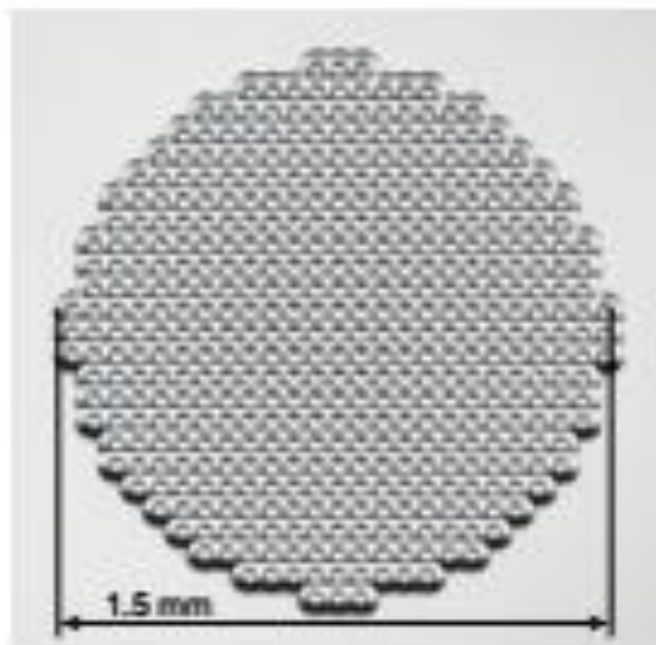
Μία ακόμα εφαρμογή είναι ο διαιρέτης 3dB καθώς και το τετραγωνικό υβρίδιο, το οποίο διαιρεί την ισχύ που προσπίπτει στην θύρα 1 σε δύο ίσα μέρη ανάμεσα στις θύρες 2 και 3, προσφέροντας απομόνωση με την θύρα 4, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 12. Εφαρμογή μεταυλικών στο τετραγωνικό υβρίδιο που εισάγουν μηδενική διαφορά φάσης (a) ανάμεσα στη θύρα 1 και τη θύρα 4 και (b) ανάμεσα στη θύρα 1 και τη θύρα 3

2.3 Εφαρμογές των μεταυλικών σε κάτοπτρα

Σημαντικές είναι οι εφαρμογές των μεταλλικών στα κάτοπτρα, όπως ο υπερφακός βαθμιδωτού δείκτη διάθλασης (Neu et al., 2010). Ο φακός αυτός κατασκευάζεται από πολλά δομικά κελιά που τοποθετούνται σε κατάλληλες θέσεις σε έναν χώρο. Η ακτίνα του κάθε δομικού κελιού μεταβάλλεται προοδευτικά από τα εξωτερικά στρώματα μέχρι το κέντρο του φακού.



Εικόνα 13. Υπερφακός βαθμιδωτού δείκτη από μεταλλικά.

Ο υπερφακός που απεικονίζεται στην παραπάνω εικόνα έχει την ικανότητα να εστιάσει μια δέσμη ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε ένα σημείο, με μεγαλύτερη απόδοση λόγω της χρήσης στρωμάτων μεταλλικού.

Επιπρόσθετα, εφαρμογή βρίσκουν τα μεταλλικά στα κάτοπτρα οπτικών συχνοτήτων, τα λεγόμενα τέλεια κάτοπτρα στην κοντινή και μακρινή υπέρυθρη περιοχή (Mitra et al., 2015; Namin et al., 2011).

2.4 Εφαρμογές μεταλλικών σε υλικά απόκρυψης

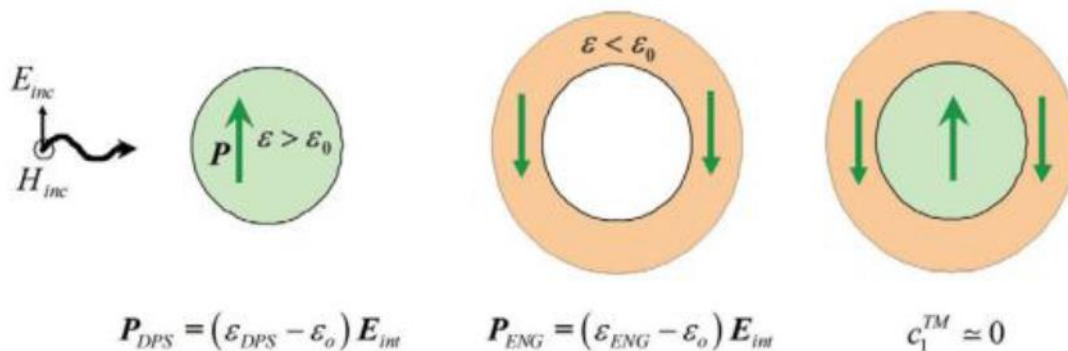
Μία ακόμη βασική εφαρμογή των μεταλλικών είναι στις τεχνικές απόκρυψης ή αλλιώς cloaking. Η κύρια ιδέα είναι ο σχεδιασμός του υλικού μανδύα που καλύπτει ένα αντικείμενο και δεν ανακλά αλλά ούτε σκεδάζει, αλλά επιτρέπει το ηλεκτρομαγνητικό κύμα να περάσει χωρίς να διαταράσσει τη μορφή του ή το υπάρχον ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο γύρω του (Alitalo &

Tretyakov, 2009; Wood, 2009). Προς τον σχεδιασμό αυτό υπάρχουν οι εξής τεχνικές, οι οποίες και αναλύονται παρακάτω:

- τεχνικές ακύρωσης σκέδασης
- τεχνικές μετασχηματισμού συντεταγμένων
- και τεχνικές γραμμών μεταφοράς.

2.4.1 Τεχνικές Ακύρωσης Σκέδασης

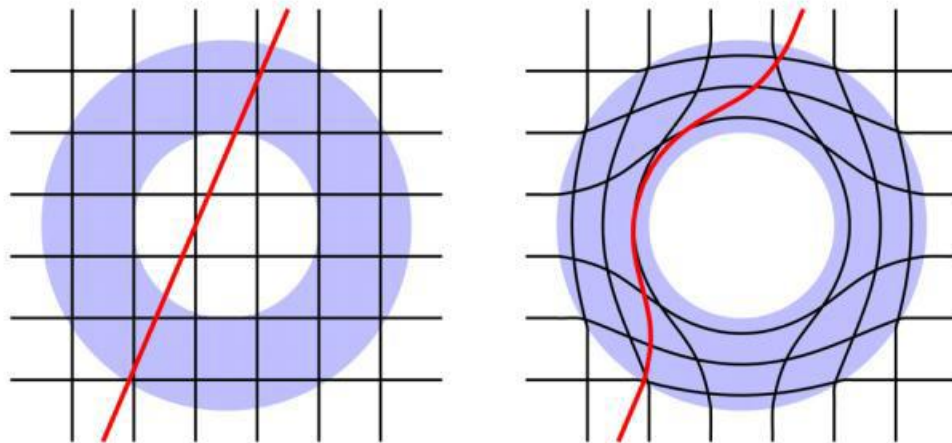
Στις τεχνικές αυτές η σκέδαση ακυρώνεται με τη χρήση ενός άλλου αντικειμένου, το οποίο όμως θα πρέπει να έχει συμπληρωματικό τύπο σκέδασης (Alitalo & Tretyakov, 2009). Τα δύο συμπληρωματικά σκεδαζόμενα κύματα λειτουργούν με τέτοιο τρόπο ώστε συνολικά να μην υπάρχει σκέδαση. Βέβαια για να επιτευχθεί αυτό απαραίτητη προϋπόθεση είναι το υλικό του μανδύα να έχει διηλεκτρική σταθερά μικρότερη από αυτή του περιβάλλοντος χώρου. Εκεί βρίσκεται ο κομβικός και αναντικατάστατος ρόλος των μεταλλικών.



Εικόνα 14. Μανδύας για την τεχνική ακύρωσης σκέδασης

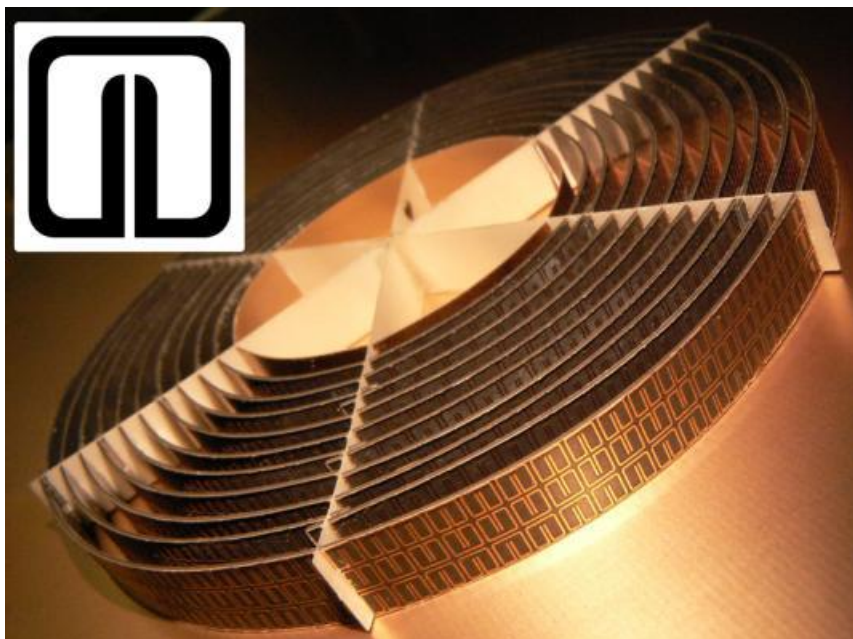
2.4.2 Τεχνικές Μετασχηματισμού Συντεταγμένων

Μια ακόμη τεχνική είναι αυτή του μετασχηματισμού συντεταγμένων (Wood, 2009). Ο μετασχηματισμός των συντεταγμένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργηθεί ένας μανδύας απόκρυψης. Αναλυτικότερα, η κεντρική ιδέα είναι ο μετασχηματισμός ενός σημείου σε μια σφαίρα ακτίνας a . Ο μετασχηματισμός αυτός θα δημιουργήσει μια τρύπα στο χώρο στην οποία δεν θα έχει πρόσβαση η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει να γίνει μια συμπίεση του χώρου γύρω από το σημείο. Ως αποτέλεσμα ο χώρος σε απόσταση b ($b > a$) γύρω από το σημείο θα πρέπει να συμπιεστεί σε ένα σφαιρικό κέλυφος ανάμεσα στις ακτίνες a και b .



Εικόνα 15. Η τεχνική απόκρυψης με μετασχηματισμό συντεταγμένων (Wood, 2009).

Στην εφαρμογή αυτή τα μεταλλικά είναι απαραίτητα έτσι ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητές καταστατικές ιδιότητες, αν και το εύρος ζώνης παραμένει αρκετά μικρό.



Εικόνα 16. Μανδύας απόκρυψης με χρήση πολλών στρωμάτων μεταλλικών (Wood, 2009)

2.4.3 Τεχνικές Γραμμών Μεταφοράς

Τέλος, μια ακόμη τεχνική είναι με κάποιους τύπους γραμμών μεταφοράς, οι οποίες «οδηγούν» το ηλεκτρομαγνητικό κύμα σε κάποιες ειδικές διαδρομές και έτσι αφήνουν αόρατο τον υπόλοιπο χώρο. Για να επιτευχθεί η κατάλληλη σύζευξη του κύματος με τον μανδύα απαιτείται κάποιο στρώμα μετάδοσης, το οποίο να μηδενίζει τις ανακλάσεις και εδώ έρχεται ο κομβικός ρόλος των μεταυλικών (Κωσταράς, 2010).

2.5 Τα μεταυλικά στην κατασκευή κεραιών

Λόγω των ειδικών ιδιοτήτων που δεν υπάρχουν στα φυσικά υλικά, τα μεταυλικά είναι πολύ ελκυστικά και μπορούν να εφαρμοστούν σε πολλούς τομείς της ζωής, όπως οι μανδύες αορατότητας μικροκυμάτων, τα επαναστατικά ηλεκτρονικά, σε φακούς, σε εξαρτήματα μικροκυμάτων, όπως τα φίλτρα, καθώς και στις κεραίες (Oliveri, Wernier & Massa, 2015).

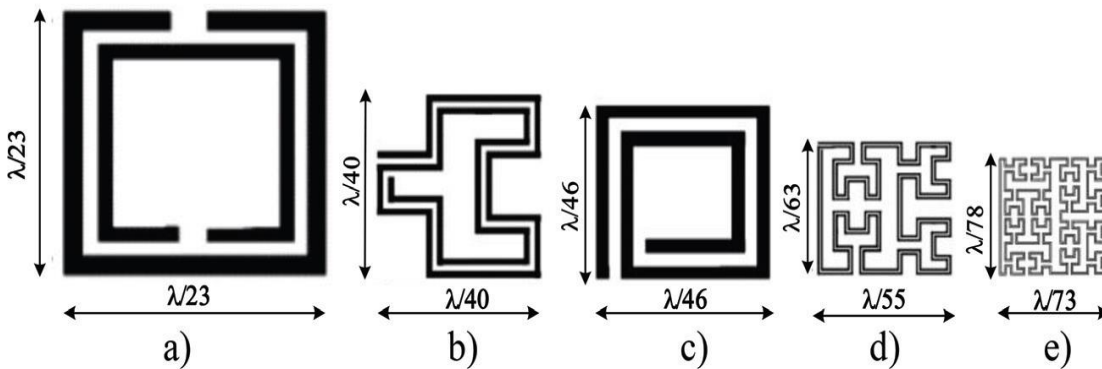
Η αξιοποίηση των μεταυλικών στο σχεδιασμό κεραιών είναι μια από τις πιο σημαντικές εφαρμογές τους (Krzysztofik, 2013, 2014). Επειδή τα μεταυλικά έχουν ασυνήθιστες ιδιότητες, μπορούμε να δημιουργήσουμε κεραίες με νέα χαρακτηριστικά, τα οποία δεν μπορούν να ληφθούν με παραδοσιακά υλικά. Η κεραία μεταυλικού είναι ένα ή περισσότερα στρώματα μεταυλικών που χρησιμοποιούνται ως υποστρώματα ή επιπρόσθετα στη διαμόρφωση της κεραίας για τη βελτίωση των ιδιοτήτων της (Alici & Ozbay, 2007; Siddiqui, Mo & Eleftheriades, 2003; Slyusar, 2009). Από την επιστημονική έρευνα προκύπτει ότι η εφαρμογή μεταυλικών στο σχεδιασμό των κεραιών μπορεί να ενισχύσει την ακτινοβολούμενη ισχύ, να βελτιώσει ορισμένες σημαντικές παραμέτρους και να μειώσει το μέγεθος της κεραίας. Ανάλογα με τον σχεδιαστικό σκοπό της κεραίας, η επιλογή της δομής και της μεθόδου εφαρμογής των μεταυλικών ποικίλλει.

2.5.1 Μοναδιαίο κελί των μεταυλικών

Τα μεταυλικά που εφαρμόζονται στη σχεδίαση κεραιών μπορεί να έχουν τη μορφή κυψέλης μονάδας ή πολλαπλών κυψελών μονάδων συναρμολογημένων σε μια συστοιχία. Έτσι, το πρώτο βήμα στο σχεδιασμό των μεταυλικών της κεραίας είναι ο σχεδιασμός και η ανάλυση των κύριων παραγόντων που επηρεάζουν τη συχνότητα συντονισμού (Yayun et al., 2017).

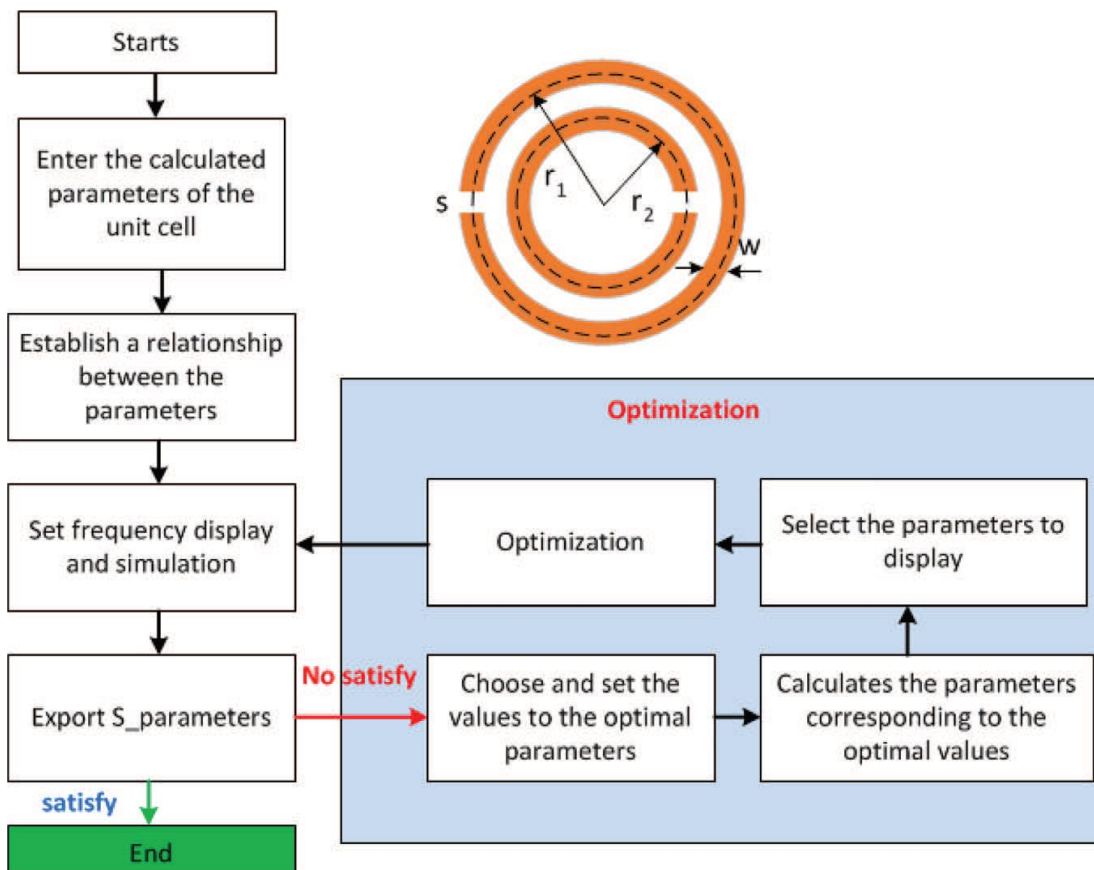
Ο σχεδιασμός των μονάδων κυψελών μεταυλικών βασίζεται στον υπολογισμό του μεγέθους και στην προσομοίωση των κυψελών μονάδας, έτσι ώστε οι παράμετροι ϵ και μ αυτών των κυψελών μονάδας να ικανοποιούν τις απαιτήσεις στην αναμενόμενη συχνότητα συντονισμού. Ανάλογα με τη δομή και το μέγεθος κάθε κυψέλης μονάδας, μπορούμε να λάβουμε διαφορετικές συχνότητες συντονισμού f . Για κάθε τύπο κυψέλης μονάδας, οι διαστάσεις μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να ικανοποιούν τις συνθήκες στη συχνότητα συντονισμού f_r (Phan, Phan & Nguyen, 2016). Ένα κελί μονάδας είναι συνήθως μικρότερο από το $1/10$ του μήκους κύματος λειτουργίας, ανάλογα με το

σχήμα του μεταϋλικού, αλλά το μέγεθος κυψέλης μονάδας είναι διαφορετικό (Krzysztofik, 2013, 2014, 2017).



Εικόνα 17. Ένα μοναδιαίο κελί ενός εγκλεισμού με SRR (a), συμπερίληψη φράκταλ δεύτερης τάξης Hilbert (b), τετραγωνική σπείρα (c), τρίτης τάξης φράκταλ συμπερίληψης Hilbert (d) και εγκλεισμού φράκταλ Hilbert τέταρτης τάξης (e).

Σε πολλές περιπτώσεις, οι αριθμητικές προσομοιώσεις των κελιών μονάδας, σύμφωνα με τους υπολογισμούς, δεν επιτυγχάνουν πλήρως τα επιθυμητά αποτελέσματα. Έτσι, τα μεγέθη των κελιών μονάδας πρέπει να προσαρμόζονται ξανά και ξανά, έως ότου τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις της δομής του μεταϋλικού. Για να ικανοποιηθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο συντομότερο δυνατό χρόνο, το μέγεθος των κελιών μονάδας μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας έναν υπολογιστικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Για παράδειγμα, στο λογισμικό Ansoft HFSS, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο βελτιστοποίησης για να εξοικονομήσουμε χρόνο και να έχουμε τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης του μεγέθους κελιών μονάδας φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 18. Βέλτιστος αλγόριθμος στο σχεδιασμό κελιών μονάδας μεταλλικού⁷

2.5.2 Η χρησιμότητα των μεταλλικών στο σχεδιασμό κεραιών

Στις εφαρμογές κεραιών, μεταξύ των εφαρμογών υλικών υποστρώματος μικροκυμάτων και ραδιοσυχνοτήτων, οι τεχνητοί μαγνητικοί αγωγοί (AMC) και οι επιφάνειες υψηλής αντίστασης (HIS) είναι οι πιο συχνές και εφαρμοσμένες διατάξεις. Χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό συμπαγών και χαμηλού προφίλ συστημάτων κεραιών τοποθετώντας HIS ή AMC γύρω ή κοντά στα στοιχεία ακτινοβολίας της κεραίας. Επιπλέον, τα μεταλλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέρος της δομής της κεραίας ή ως τμήμα τροφοδοσίας του συστήματος κεραίας.

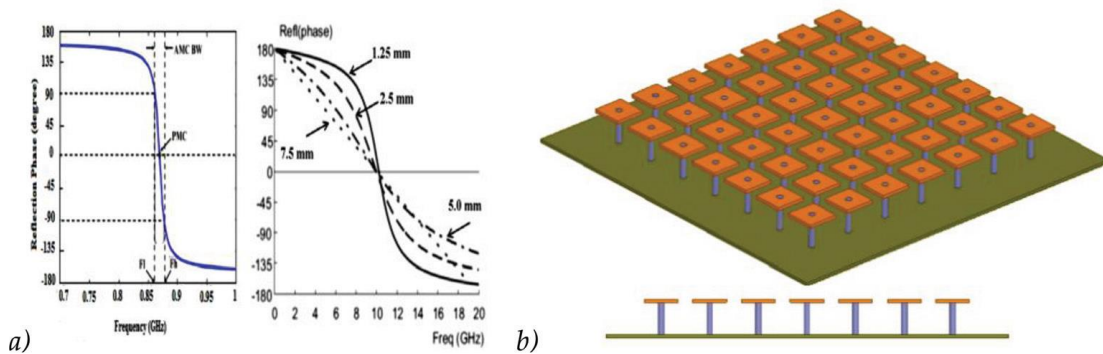
2.5.2.1. Μεταλλικά που χρησιμοποιούνται στο περιβάλλον κεραίας

Τα μεταλλικά εφαρμόζονται στον περιβάλλοντα χώρο κεραιών, για να βελτιώσουν τις ιδιότητες ακτινοβολίας τους χρησιμοποιώντας τον τεχνητό μαγνητικό αγωγό (AMC).

⁷ <https://www.intechopen.com/chapters/63993>

Χρησιμοποιώντας τα μοναδικά χαρακτηριστικά των μεταλλικών που δεν υπάρχουν στη φύση, η απόδοση διαφόρων μικροκυματικών διατάξεων μπορεί να βελτιωθεί. Η χρήση της AMC έχει λύσει πολλά ζητήματα, ενώ έχει ξεπεράσει τους τυπικούς περιορισμούς στα συμβατικά σχέδια κεραιών. Για να βελτιωθούν οι ιδιότητες ακτινοβολίας της κεραιάς με τη χρήση μεταλλικών, οι κεραιές τοποθετούνται συχνά πάνω από τον ανακλαστήρα προκειμένου να ακτινοβολούν προς μία μόνο κατεύθυνση, ενώ μειώνουν την αντίστροφη ακτινοβολία (Singh, Horwood & Sonkusale, 2014). Σε αυτή την περίπτωση, το μεταλλικό δεν χρησιμοποιείται ως μέσο αλλά ως συσκευή, η οποία λειτουργεί ως ενεργό υπόστρωμα για τη δημιουργία περιβάλλοντος πλάσματος σε κάθε μονάδα δομής του μεταλλικού. Η απόσταση μεταξύ της κεραιάς και της μεταλλικής επιφάνειας θα πρέπει να επιλέγεται για τουλάχιστον $\lambda/4$, όπου το μεταλλικό δρα ως ανακλαστικό επίπεδο για την ενίσχυση της ακτινοβολίας (Yeo & Kim, 2008).

Τα AMC είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα μεταλλικά στη σχεδίαση κεραιών, τα οποία χρησιμοποιούνται για να μιμηθούν τη συμπεριφορά του PMC, η οποία δεν είναι διαθέσιμη στη φύση. Η απόδοση της κεραιάς βελτιώνεται όταν συνδυάζεται με AMC. Έτσι με αυτόν τον συνδυασμό, το AMC μιμείται το PMC παρέχοντας φάσεις ανάκλασης μηδενικού βαθμού στη συχνότητα συντονισμού του, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα (Dewan & Rahim, 2015).



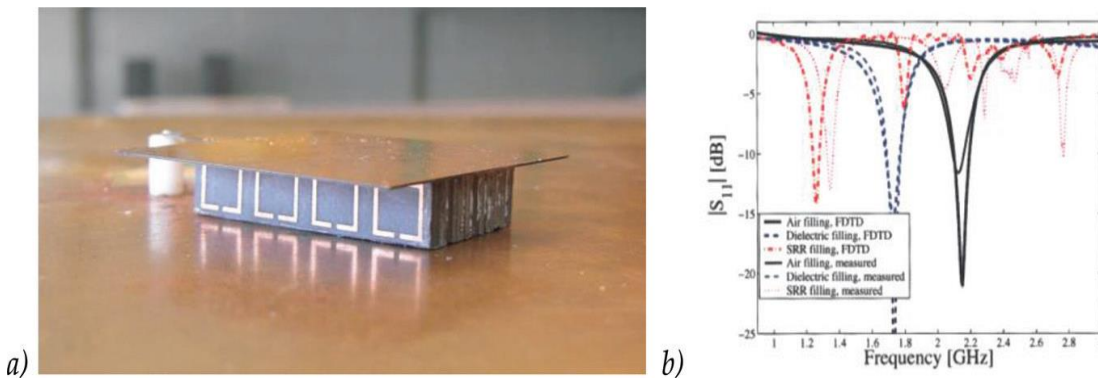
Εικόνα 19. Τυπικό διάγραμμα φάσης ανάκλασης AMC (a) και σχέδιο επιφάνειας που μοιάζει με μανιτάρι (b) (Dewan & Rahim, 2015).

Μία από τις πρώτες επιφάνειες AMC ήταν η επιφάνεια ηλεκτρομαγνητικής ζώνης (EBG), η οποία εισήχθη από τον Sievenpiper το 1999 (Sievenpiper et al., 1999). Η επιφάνεια που μοιάζει με μανιτάρι αποτελείται από ένα επίπεδο γείωσης με ένα πλέγμα τετραγώνων που συνδέονται με το επίπεδο γείωσης μέσω μεταλλικών αγωγών, όπως φαίνεται στην παραπάνω Εικόνα.

2.5.2.2. Μεταλλικά ως μέρος της δομής της κεραιάς

Τα μεταλλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέρος της δομής της κεραιάς, έτσι ώστε να σχεδιαστεί μια διάταξη με συμπαγές μέγεθος χωρίς να υποβαθμιστεί η απόδοσή της. Στην περίπτωση αυτή, τα μεταλλικά χρησιμοποιούνται με υψηλές τιμές διαπερατότητας ($\mu \gg 1$) ως μαγνητοδιηλεκτρικό (MD) υπόστρωμα των κεραιών (Ikonen et al., 2006; Karkkainen & Ikonen,

2005). Με τον τρόπο αυτό, το μέγεθος της κεραίας μειώνεται σημαντικά. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται κεραίες «patch» καθώς και η σύγκριση με τη μετατόπιση συχνοτήτων συντονισμού για διαφορετικά υποστρώματα: αέρα, διηλεκτρικό και μαγνητοδιηλεκτρικό υπόστρωμα.



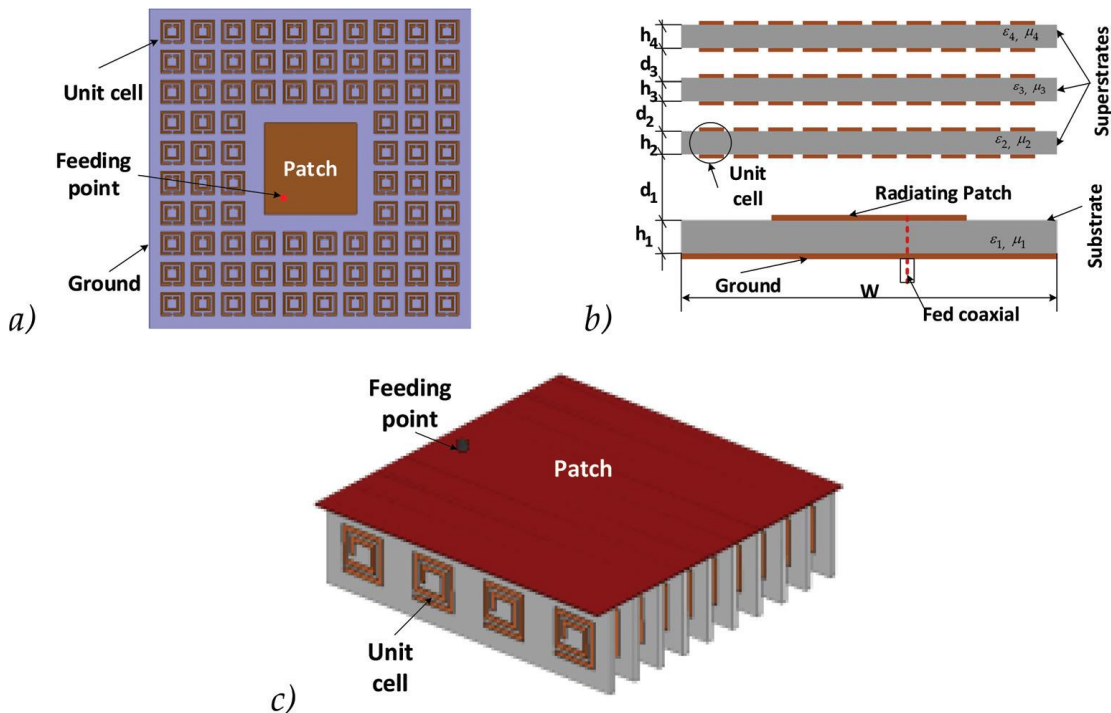
Εικόνα 20. Patch κεραία με υπόστρωμα μεταλλικού υψηλού μ (a) και διαγράμματα σύνθετης αντίστασης εισόδου για διαφορετικά υποστρώματα αέρα, διηλεκτρικό και μαγνητοδιηλεκτρικό υπόστρωμα (b) (Dewan & Rahim, 2015).

2.5.3. Αποτελέσματα της εφαρμογής μεταλλικών στο σχεδιασμό της κεραίας

Η χρήση των μεταλλικών στο σχεδιασμό της κεραίας μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του μεγέθους της, βελτίωση του κέρδους, ενίσχυση του εύρους ζώνης ή δημιουργία κεραίας πολλαπλών ζωνών. Ανάλογα με τον εκάστοτε στόχο, τα μεταλλικά χρησιμοποιούνται για τις διαφορετικές λειτουργίες της κεραίας.

2.5.3.1 Τα μεταλλικά στη βελτίωση του κέρδους των κεραιών

Το χαμηλό κέρδος είναι κύριο μειονέκτημα των μικρών επίπεδων κεραιών, το οποίο πρέπει να ξεπεραστεί για να ικανοποιηθεί ο συνολικός ενεργειακός προϋπολογισμός των συστημάτων πομποδέκτη. Εκτός από τη χρήση συστοιχίας κεραιών, πρόσφατα το μεταλλικό αποτελεί μια λύση που έχει εφαρμοστεί στο σχεδιασμό κεραιών. Στην περίπτωση αυτή, τα χρησιμοποιούμενα μεταλλικά μπορεί να είναι τεχνητοί μαγνητικοί αγωγοί (AMC) ή τεχνητά μαγνητικά υλικά (AMM). Εφαρμόζονται ως περιβάλλον της κεραίας με τέτοιο τρόπο ώστε να διευθετούν τα κελιά μονάδας που περιβάλλουν ακτινοβολούμενα στοιχεία της κεραίας (Gao & Oguz, 2016), ή χρησιμοποιώντας ένα ή περισσότερα υπερστρώματα πάνω ή κάτω από τα ακτινοβολούμενα στοιχεία (Kim & Choi, 2010), ή χρησιμοποιώντας μεταλλικά για την φόρτωση της κεραίας (Mosallaei & Sarabandi, 2007). Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνονται ορισμένες από τις εφαρμοζόμενες μεθόδους των μεταλλικών για τη βελτίωση του κέρδους στις κεραίες.



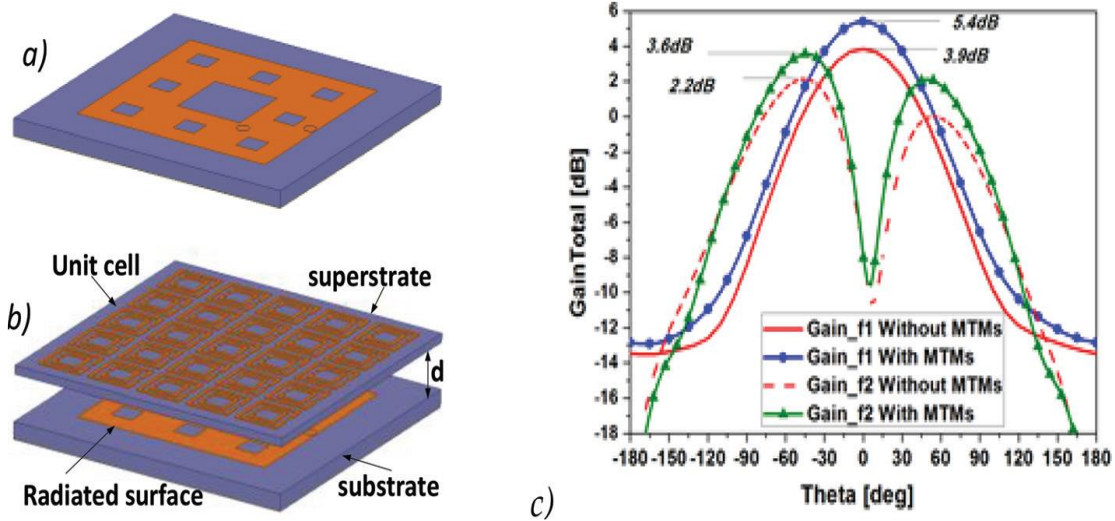
Εικόνα 21. Μοντέλα εφαρμογής μεταλλικών για τη βελτίωση του κέρδους ισχύος των κεραιών: κελιά μονάδας που περιβάλλουν το ακτινοβολημένο patch (α), μεταλλικά ως υπερστρώμα (β), χρησιμοποιώντας τα μεταλλικά ως φόρτωση κεραίας (γ).⁸

Στην περίπτωση που τα μοναδιαία κελιά των μεταλλικών είναι διατεταγμένα γύρω από τα στοιχεία ακτινοβολίας της κεραίας, μπορούν να τοποθετηθούν στη μία ή και στις δύο πλευρές του υποστρώματος. Το μέγεθος αυτών των κυψελών μονάδας πρέπει να διερευνηθεί, έτσι ώστε τα μεταλλικά να έχουν ειδικές ιδιότητες που να ταιριάζουν με τη συχνότητα συντονισμού της κεραίας. Οι κυψέλες μονάδας ενσωματώνονται εύκολα με στοιχεία ακτινοβολίας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάκλαση των επιφανειακών κυμάτων με βάση τα αρνητικά χαρακτηριστικά μ . Με την εισαγωγή των κυψελών μονάδας του MTM, που φορτώνονται γύρω από τη συμβατική κεραία, η απόδοση ακτινοβολίας της κεραίας αυξάνεται και το κέρδος ισχύος είναι υψηλότερο από ≥ 2 dB (Caloz, Sanada & Itoh, 2004).

Ανάλογα με τον αριθμό των μονάδων κυψελών, καθώς και τη συχνότητα συντονισμού της σχεδιασμένης κεραίας, το επιτευχθέν κέρδος μπορεί να είναι επίσης διαφορετικό. Στην περίπτωση που τα μεταλλικά τοποθετούνται σε ένα άλλο διηλεκτρικό στρώμα που ονομάζεται υπερστρώμα, τα μοναδιαία κελιά των μεταλλικών φορτώνονται σε διαφορετικό διηλεκτρικό με την απόσταση d από τα στοιχεία ακτινοβολίας στο υπερστρώμα. Αυτά τα κελιά μονάδων συστοιχίας δημιουργούν AMC ή AMM, τα οποία μπορούν να φορτωθούν στη μία ή και στις δύο πλευρές του υπερστρώματος. Το κέρδος ισχύος μιας κεραίας εξαρτάται από το υπόστρωμα, τον αριθμό των μονάδων κυψελών και την

⁸ <https://www.intechopen.com/chapters/63993>

απόσταση από τα στοιχεία ακτινοβολίας στο υπερστρώμα (Cao & Krzysztofik, 2016; Liu et al., 2013).



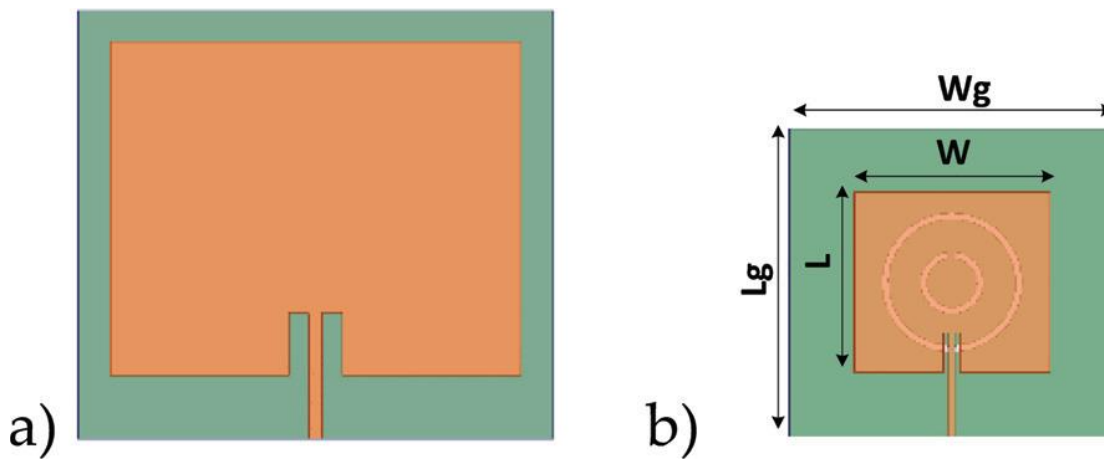
Εικόνα 22. Η κεραία φράκταλ του χαλιού Sierpinski (a), η κεραία καλυμμένη με το AMC MTM (b) το κέρδος ισχύος της κεραίας (c), για δύο συχνότητες συντονισμού⁹.

Γίνεται λοιπόν σαφές από τα παραπάνω ότι η εφαρμογή μεταλλικών ως υπερστρώμα στη σχεδίαση κεραιών έχει βελτιώσει σημαντικά το επιτυγχανόμενο κέρδος. Ωστόσο, θα πρέπει να αναφερθεί ότι αυτή η μέθοδος αυξάνει το μέγεθος και το πάχος της κεραίας.

2.5.3.2 Τα μεταλλικά στη μείωση του μεγέθους των κεραιών

Υπάρχουν πολλές τεχνικές λύσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό συμπαγών κεραιών, όπως το διηλεκτρικό υπόστρωμα κεραιών μικροταινιών υψηλής διαπερατότητας, οι ακροδέκτες βραχυκυκλώματος, το βραχυκύκλωμα τοίχων, η εισαγωγή ορισμένων διαταραχών στη δομή της κεραίας, η εφαρμογή της γεωμετρίας φράκταλ κ.λπ. Πρόσφατα, πολλοί σχεδιαστές χρησιμοποίησαν τα μεταλλικά ως DGS (Defected Ground Structure) για τη μείωση του μεγέθους της κεραίας. Σε αυτή την περίπτωση, τα μοναδιαία κελιά των μεταλλικών έχουν ασυνήθιστες ιδιότητες στη συχνότητα συντονισμού της σχεδιασμένης κεραίας. Η διάσταση αυτών των μοναδιαίων κελιών είναι ίση με το μέγεθος των τμημάτων του DGS τα οποία αφαιρέθηκαν (Raval, Kosta & Joshi, 2015).

⁹ <https://www.intechopen.com/chapters/63993>

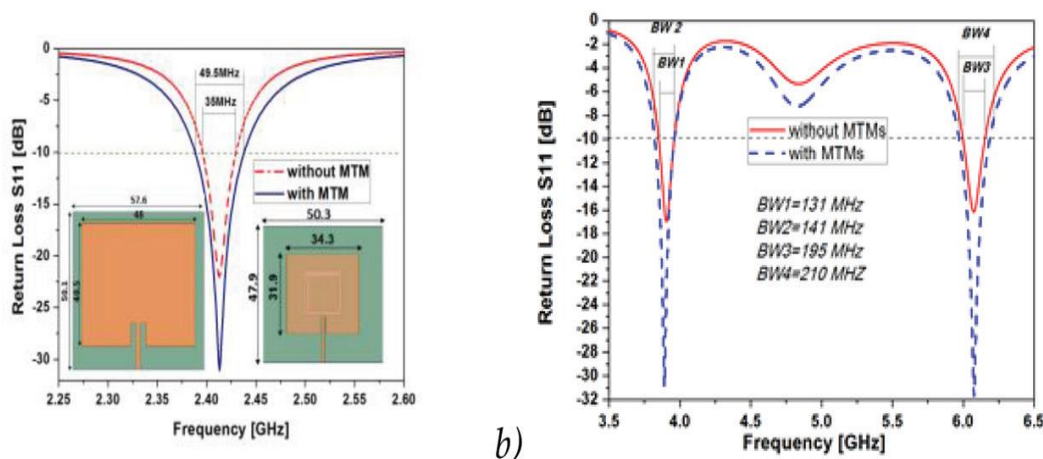


Εικόνα 23. Μοντέλα προσομοίωσης των δύο κεραιών που λειτουργούν στα 1,88 GHz για το σύστημα GSM. Σύγκριση του μεγέθους της MPA της κεραίας patch microstrip χωρίς CSRR (a) και με CSRR (b) για σύστημα GSM (Cao & Krzysztofik, 2018).

Όπως φαίνεται, οι διαστάσεις της κεραίας microstrip είναι μεγαλύτερες από τις διαστάσεις της κεραίας microstrip με συμπληρωματικό αντηχείο διαχωρισμού δακτυλίου (CSRR) σχεδιασμένο στο επίπεδο γείωσης της κεραίας.

2.5.3.3 Χρήση μεταλλικών για τη βελτίωση του εύρους ζώνης συχνότητας κεραίας

Εκτός από τα οφέλη από τη χρήση μεταλλικών για το σχεδιασμό των κεραιών που αναφέρθηκαν παραπάνω, χρησιμοποιούνται επίσης για τη βελτίωση του εύρους ζώνης συχνοτήτων της κεραίας. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, τα μεταλλικά χρησιμοποιούνται ως εξαρτήματα της κεραίας ή ως υπερστρώμα τοποθετημένο πάνω από την επιφάνεια ακτινοβολίας (όπως η μέθοδος βελτίωσης του κέρδους της κεραίας), Μοναδιαίες κυψέλες μεταλλικών μπορούν να τοποθετηθούν πάνω ή κάτω από το υπερστρώμα. Το εύρος ζώνης αυτής της κεραίας εξαρτάται από τον αριθμό των μονάδων κυψελών καθώς και από την απόσταση του υπερστρώματος από την επιφάνεια ακτινοβολίας.



a)

b)

Εικόνα 24. S-Παράμετροι κεραιών χωρίς και με MTMs: ως φόρτωση CSRR (α), ως στρώμα υπερστρώματος για συχνότητα ζώνης C μικροκυμάτων (Cao & Krzysztolik, 2018).

Ανάλογα με την περίπτωση, η εφαρμογή MTMs ως DGS της κεραιάς όχι μόνο μειώνει το μέγεθος αλλά και αυξάνει το εύρος ζώνης που προκύπτει από την κεραιά. Στην παραπάνω εικόνα συγκρίνονται τα μεγέθη και τα εύρη ζώνης δύο κεραιών πριν και μετά την εφαρμογή των MTM με την ίδια συχνότητα συντονισμού.

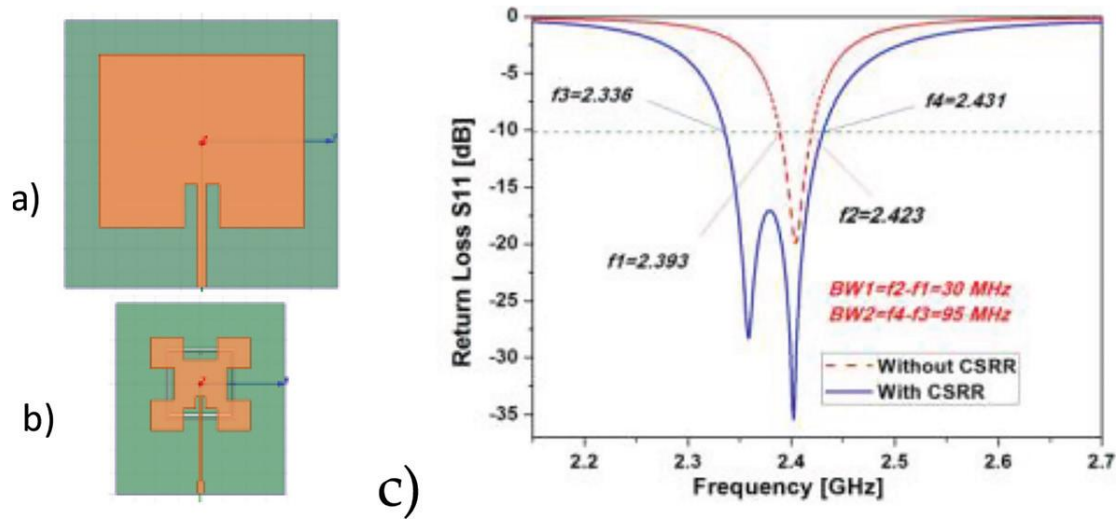
Συνεπώς, η εφαρμογή μεταλλικών στον σχεδιασμό των κεραιών έχει βελτιώσει το εύρος ζώνης των κεραιών. Ανάλογα με τις τεχνικές απαιτήσεις της σχεδιασμένης κεραιάς, επιλέγονται οι διαφορετικές δομές μεταλλικών και οι διαφορετικές μέθοδοι εφαρμογής για την επίτευξη του καταλληλότερου εύρους ζώνης κεραιάς.

2.5.3.4 Μεταλλικά και πολλαπλές ζώνες λειτουργίας

Από την ανάγκη ενσωμάτωσης πολλαπλών λειτουργιών (λειτουργία πολλών συστημάτων επικοινωνίας) σε μεμονωμένες συσκευές, οι κεραιές πολλαπλών ζωνών παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Η χρήση μεταλλικών στο σχεδιασμό κεραιών αποτελεί μια ελκυστική τάση όχι μόνο για τη μείωση του μεγέθους, τη βελτίωση της ισχύος και τη βελτίωση του εύρους ζώνης, αλλά και για το σχεδιασμό κεραιών ζώνης πολλαπλών συχνοτήτων (Rajkumar & Kiran, 2016).

Τα μοναδιαία κελιά των μεταλλικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συστατικά ακτινοβολίας, ως δομικό μέρος ή τμήμα του επιπέδου γείωσης της κεραιάς. Τα MTM μπορούν να υποστηρίξουν αρνητικούς δείκτες διάθλασης σε συχνότητες συντονισμού και δομές μοναδιαίων κυψελών συμμετρικών ζευγών και αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό κεραιών πολλαπλών συχνοτήτων με μικρότερες διαστάσεις από τις παραδοσιακές (Rajkumar & Kiran, 2016). Το μεταλλικό μπορεί να συνδυαστεί με μια συμβατική ή φράκταλ μικρολωρίδα κεραιάς για τη δημιουργία κεραιάς πολλαπλών ζωνών, στην οποία το μέγεθος της κεραιάς καθορίζεται από τη χαμηλότερη συχνότητα. Η εικόνα που ακολουθεί δείχνει το μοντέλο προσομοίωσης και τον συντελεστή S11 των δύο κεραιών, οι οποίες λειτουργούν σε πολλαπλές συχνότητες. Η συχνότητα

συντονισμού της κεραίας μπορεί να ρυθμιστεί αλλάζοντας το μέγεθος της κεραίας ή της κυψέλης μονάδας (Dakhli et al., 2016; Krzysztofik & Cao, 2018; Yu, Li & Wang, 2017).



Εικόνα 25. Η διαμόρφωση της κεραίας microstrip για συστήματα WLAN χωρίς CSRR (a), κεραία fractal με CSRR (b) και S11 παραμέτρους αυτών (c) (Krzysztofik & Cao, 2018).

Από όλα τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι υπάρχουν πολλές εφαρμογές των μεταλλικών στο σχεδιασμό για τη βελτίωση των παραμέτρων των κεραιών. Τα μεταλλικά μπορούν να εφαρμοστούν στο περιβάλλον της κεραίας ή ως δομικό μέρος της κεραίας. Ανάλογα με τις παραμέτρους της επιθυμητής ιδιότητας της κεραίας προς βελτίωση, τα μεταλλικά μπορούν να εφαρμοστούν με διαφορετικές μεθόδους. Τα μεταλλικά μπορούν να εφαρμοστούν για τη βελτίωση του εύρους ζώνης, ισχύος ή για τη δημιουργία συμπαγών κεραιών ζώνης πολλαπλών συχνοτήτων. Για την εφαρμογή μεταλλικών σε μια κεραία, το πρώτο μέλημα είναι να σχεδιαστούν τα μοναδιαία κελιά τους, τα οποία θεωρούνται ως άτομα, δημιουργώντας ειδικές ιδιότητες του μεταλλικού στην επιθυμητή συχνότητα. Η αποτελεσματικότητα της βελτίωσης των παραμέτρων της κεραίας εξαρτάται από τη δομή, το μέγεθος, την ποσότητα και τη μέθοδο χρήσης της μονάδας κυψέλης των μεταλλικών. Η εφαρμογή μεταλλικών στο σχεδιασμό της κεραίας μπορεί να αυξήσει το κέρδος ισχύος τους ≥ 2 dB, το εύρος ζώνης $\geq 100\%$, να μειώσει το μέγεθος $\geq 50\%$ ή να δημιουργήσει πρόσθετες ζώνες συχνοτήτων για κεραιές που λειτουργούν με συστήματα πολυεπικοινωνίας.

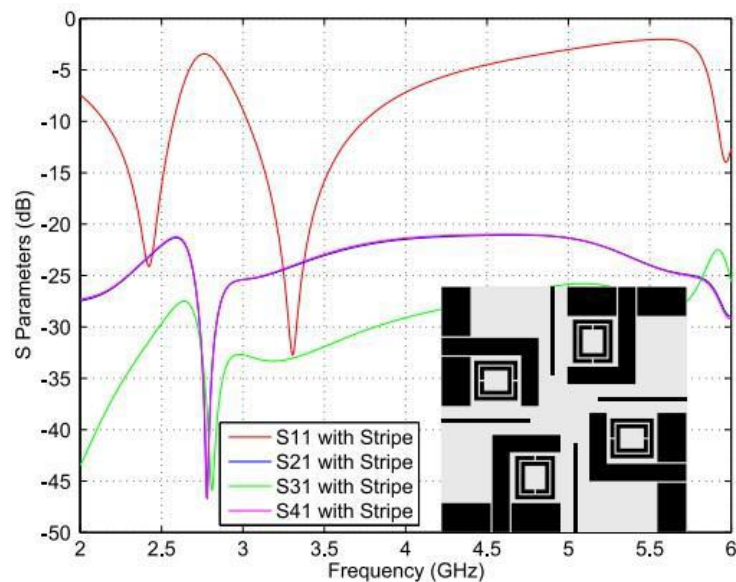
2.5.4 Παραδείγματα κεραιών με μεταλλικά

Στην παρούσα υποενότητα θα αναφερθούν κάποια παραδείγματα κεραιών, στις οποίες χρησιμοποιούνται τα μεταλλικά με στόχο κάποιες επιθυμητές ιδιότητες των κεραιών (Κωσταράς, 2010).

Αρχικά θα πρέπει να αναφερθεί κανείς στις κεραίες MIMO, τα κύρια χαρακτηριστικά των οποίων είναι τα εξής (Ντάικος, 2013; Kiem et al., 2015):

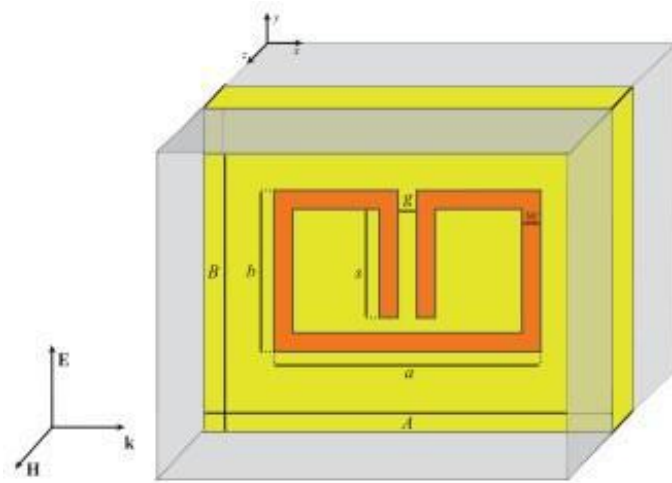
- είναι ηλεκτρικά μικρές
- είναι συμπαγείς
- έχουν πολλαπλές ζώνες λειτουργίας
- έχουν την μικρότερη δυνατή αμοιβαία σύζευξη .

Τα μεταλλικά ουσιαστικά μεταβιβάζουν τις ιδιότητές τους στις κεραίες και για το λόγο αυτό ενσωματώνονται στις κεραίες σε όσο το δυνατόν μικρότερες διαστάσεις. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται μια κεραία MIMO με μονόπολα σχήματος L με διπλό SRR και μεταλλική λωρίδα (Ντάικος, 2013).



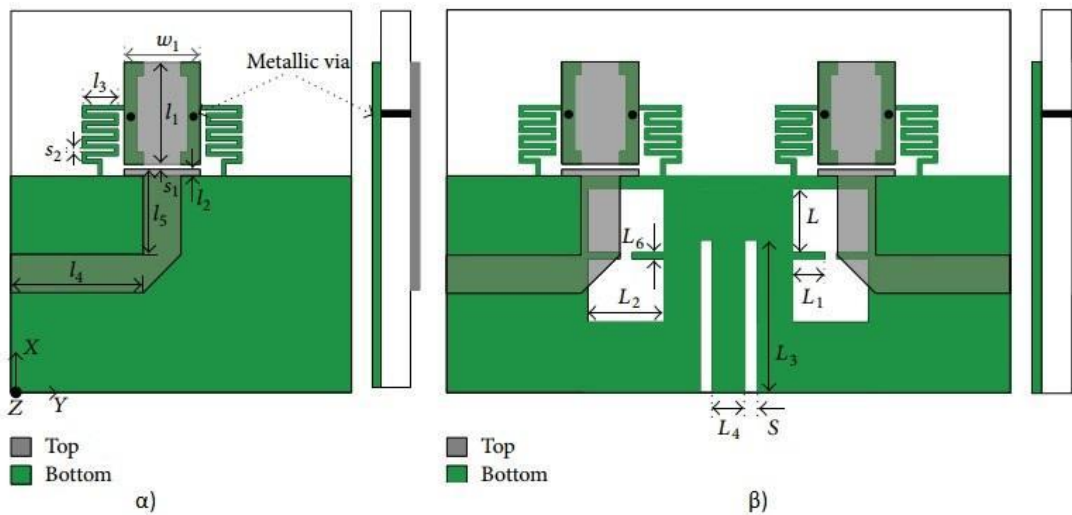
Εικόνα 26. Μονοπολικές κεραίες σχήματος L με διπλά SRR και μεταλλικές λωρίδες και παράμετροι σκέδασης συναρτήσει της συχνότητας.

Μια ακόμη εφαρμογή αποτελεί η κεραία MIMO με επίπεδα μονόπολα και SRR, η οποία αποτελείται από μια στοιχειοκεραία MIMO αποτελούμενη από 2 παραλληλόγραμμα, επίπεδα μονόπολα που βρίσκονται σε απόσταση και τροφοδοτούνται από μικροταινία (Ketzaki et al., 2012). Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται οι τετραγωνικοί διαχωρισμένοι βρόχοι απλής χωρητικής φόρτισης (Single capacitively-loaded split rectangular loops), όπως φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 27. Δομικό κελί τετραγωνικού διαχωρισμένου βρόχου απλής χωρητικής φόρτισης¹⁰

Ένα ακόμη παράδειγμα αποτελεί η κεραία MIMO με τροποποιημένο επίπεδο γείωσης για WLAN εφαρμογές, στην οποία υπάρχουν 2 μονόπολα, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Kiem et al., 2015).



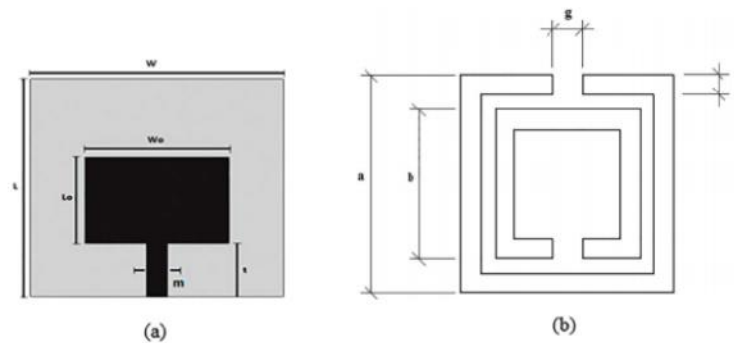
Εικόνα 28.(α). Μονή κεραία με μεταλλικό.(β) MIMO κεραία με μεταλλικό και σχισμές στο επίπεδο γείωσης (N. K. Kiem, H. N. B. Phuong, Q. N. Hieu, and D. N. Chien)

Ένα ακόμη παράδειγμα, αποτελούν οι κεραίες βρόχου μηδενικής μετατόπισης φάσης (Chen, 2014). Επιπρόσθετα, μια ακόμη εφαρμογή είναι η κωνική κεραία σχισμής υψηλού κέρδους με δομή μηδενικού δείκτη. Στην σχισμή της κεραία αυτής προστίθεται μεταλλικό με μηδενικό δείκτη διάθλασης (zero index metamaterial, ZIM), με αποτέλεσμα να αυξάνεται η απόδοση του ανοίγματος

¹⁰ https://www.researchgate.net/figure/a-Unit-cell-of-the-capacitive-loaded-split-rectangular-loop-with-parameters-A13-mm_fig3_267244073

(Chen, 2014). Επίσης, υπάρχουν οι επίπεδες ευρυζωνικές κεραίες χαμηλού προφίλ με μεταλλικό υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς, το οποίο τοποθετείται ανάμεσα στο δίπολο και το επίπεδο της γείωσης υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς, με αποτέλεσμα να αποκτά η κεραία υψηλό κέρδος για μεγάλο εύρος ζώνης (Chen, 2014). Ακόμη, υπάρχουν οι κεραίες Patch χαμηλού προφίλ από τεχνητό μαγνητικό αγωγό που ονομάζονται και μεταεπιφάνειες. Οι μεταεπιφάνειες αποτελούν μια άριστη λύση για συμπαγείς κεραίες, έτσι ώστε να μειωθεί το κόστος (Yan, 2015).

Επίσης, υπάρχουν οι κεραίες με υπόστρωμα μεταλλικών, οι οποίες μπορεί να είναι είτε μια τυπωμένη κεραία μικροταινίας στις οποίες το υπόστρωμα τυπώνεται μια διάταξη μεταλλικού και μια μονοπολική κεραία στις οποίες το κοντινό πεδίο τοποθετούμε στοιχειώδη κελιά μεταλλικών (Wu et al., 2005). Στις περιπτώσεις αυτές το δομικό κελί του μεταλλικού αποτελεί έναν τετραγωνικό συντονιστή διαχωρισμένου δακτυλίου (Silva et al., 2015).

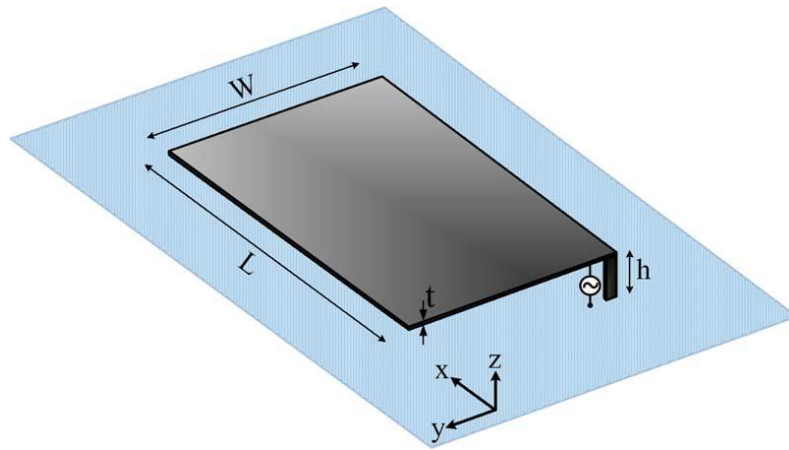


Εικόνα 29. Κεραία τύπου patch σε υπόστρωμα FR4 (a)δομικό κελί μεταλλικού τετραγωνικού συντονιστή διαχωρισμένου δακτυλίου(b).

Μία άλλη εφαρμογή των μεταλλικών στις κεραίες αποτελούν οι ηλεκτρικά μικρές μονοπολικές κεραίες, οι οποίες χρησιμοποιούν το μεταλλικό ως στοιχείο ηλεκτρικού ή μαγνητικού συντονισμού. Με τη χρήση του μεταλλικού βελτιώνεται η εκπομπή της κεραίας ενώ ταυτόχρονα διατηρείται μικρό το μέγεθος, έτσι ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί σε μικρές συσκευές (Alici & Ozbay, 2007).

Αναλυτικότερα, σήμερα οι μικρές ηλεκτρικά κεραίες είναι ιδιαίτερα χρήσιμες, αλλά δεν επιτυγχάνουν ιδιαίτερες αποδόσεις, λόγω της ειδικής τους αντίστασης. Με τη χρήση όμως των μεταλλικών, τα χαρακτηριστικά εκπομπής της κεραίας βελτιώνονται (Erentok & Ziolkowski, 2008).

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι εφαρμογές μεταλλικών υπάρχουν και στις κεραίες PIFA (Planar Inverted F Antennas), ή επίπεδες κεραίες αντεστραμμένου F. Οι κεραίες αυτές είναι ιδιαίτερα προσαρμόσιμες σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων, διατηρώντας μικρό πάχος. Οι κεραίες αυτές λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους χρησιμοποιούνται ευρέως στις ασύρματες επικοινωνίες και μπορεί να είναι με εγκοπές, με στένωση, με τροποποιημένο επίπεδο γείωσης, με κυκλική δομή φράκταλ ή τύπου patch (Karmokar & Morshed, 2009).



Εικόνα 30. Κεραίες PIFA (Planar Inverted F Antennas)¹¹

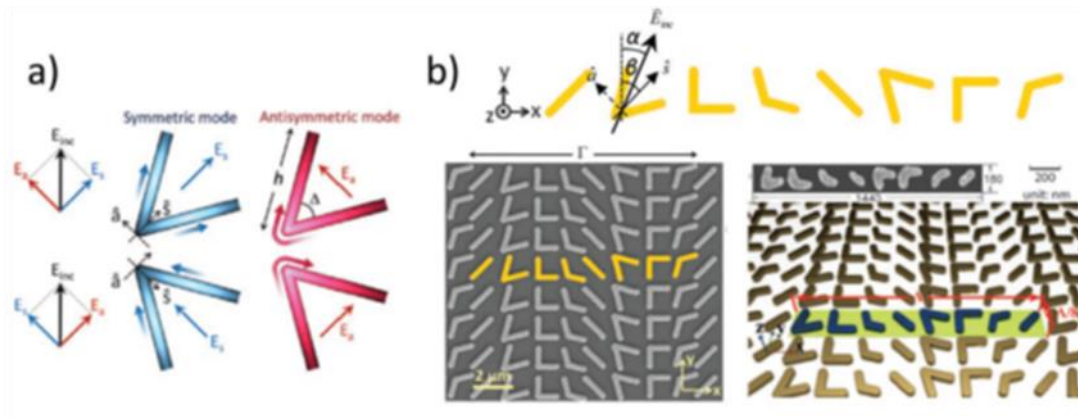
¹¹ https://www.researchgate.net/figure/Planar-inverted-F-antenna-PIFA-structure_fig3_262056415

3. Μεταεπιφάνειες

Οι μεταεπιφάνειες αποτελούν ένα ταχέως αναπτυσσόμενο πεδίο έρευνας τα τελευταία χρόνια, λόγω των εξαιρετικών τους ικανοτήτων στον χειρισμό των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και του φωτός και της ευελιξίας τους σε εξαιρετικά λεπτές οπτικές εφαρμογές. Ιδιαίτερα σημαντικές είναι οι απλοποιημένες διαδικασίες κατασκευής τους σε σύγκριση με τα μεταϊλικά και είναι πολλά υποσχόμενες για ενσωμάτωση με νανοφωτονικές συσκευές on-chip λόγω των επίπεδων προφίλ τους. Στο παρόν κεφάλαιο ανασκοπείται η πρόσφατη πρόοδος στις μεταεπιφάνειες και ταξινομούνται σε έξι κατηγορίες, ξεκινώντας από μεταεπιφάνειες πολλαπλού συντονισμού και διάκενου-πλασμονίου που βασίζονται στη γεωμετρική επίδραση των πλασμονικών νανοκεραίων και φτάνοντας σε αυτές που χρησιμοποιούν πανομοιότυπες νανοκεραίες με ποικίλες γωνίες περιστροφής. Η πρόσφατη ανάπτυξη των μεταεπιφανειών Huygens και οι πλήρως διηλεκτρικές μεταεπιφάνειες επωφελούνται ιδιαίτερα από την υψηλή απόδοση εφαρμογών μετάδοσης. Μια επισκόπηση των τεχνολογιών κατασκευής αιχμής εισάγεται, που κυμαίνονται από κοινώς χρησιμοποιούμενες διαδικασίες όπως λιθογραφία δέσμης ηλεκτρονίων και εστιασμένης δέσμης ιόντων σε ορισμένες αναδυόμενες τεχνικές, όπως αυτοσυναρμολόγηση και λιθογραφία νανοαποτυπώματος. Ποικιλία εφαρμογών επίσης παρουσιάζονται αναλυτικά για υλικά που ενσωματώνονται σε επαναδιαμορφώσιμες ή συντονίσιμες μεταεπιφάνειες. Τέλος, μερικές από τις τρέχουσες ενδιαφέρουσες εφαρμογές που βασίζονται σε μεταεπιφάνειες συζητούνται και παρέχονται απόψεις για μελλοντικές προοπτικές (Hsiao et al., 2017).

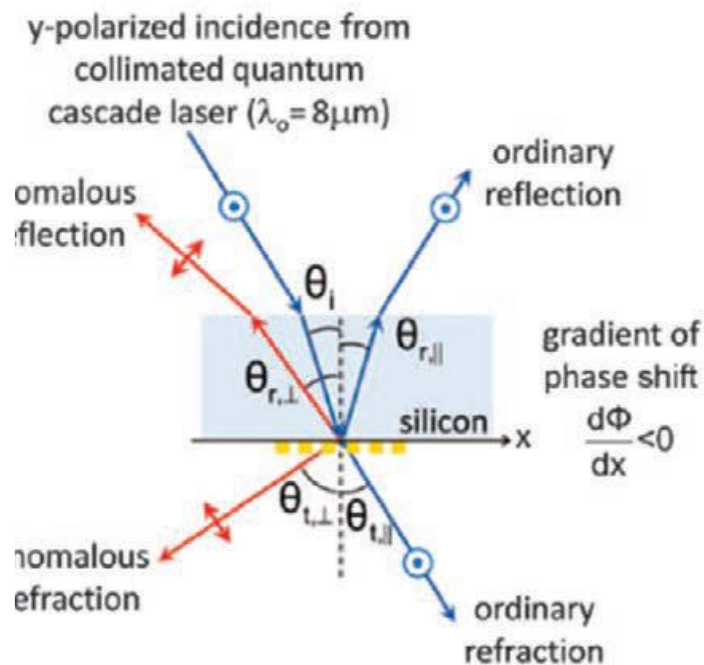
3.1. Μεταεπιφάνειες πολλαπλού συντονισμού

Οι κεραίες σε σχήμα V, αποτελούνται από δύο νανοράβδους με ίσο μήκος ενωμένες σε μια ορισμένη γωνία, έτσι ώστε να επιτρέπουν μια διακύμανση φάσης από 0 έως 2π . Αυτή η πλασμονική κεραία υποστηρίζει δύο λειτουργίες συντονισμού, που χαρακτηρίζονται ως συμμετρικές και αντισυμμετρικές λειτουργίες, ανάλογα με τις κατανομές του ρεύματος (Blanchard et al., 2012; Yu et al., 2011). Η συμμετρική λειτουργία διεγείρεται όταν η πόλωση του προσπίπτοντος ηλεκτρικού πεδίου (Einc) είναι παράλληλη στον άξονα συμμετρίας της κεραίας. Όταν το προσπίπτον κύμα δεν είναι ούτε παράλληλο ούτε κάθετο στον άξονα συμμετρίας της κεραίας, οι δύο συντονισμένες λειτουργίες μπορούν να διεγείρονται ταυτόχρονα (Yu et al., 2012).



Εικόνα 31. α) Μια κεραία σε σχήμα V που υποστηρίζει δύο λειτουργίες συντονισμού που χαρακτηρίζονται ως συμμετρικές και αντισυμμετρικές λειτουργίες σύμφωνα με τις κατανομές ρεύματος. Η συμμετρική και η αντισυμμετρική λειτουργία διεγείρονται από συνιστώσες του προσπίπτοντος πεδίου κατά μήκος των αξόνων \hat{s} και \hat{a} , αντίστοιχα. β) Υπερκύτταρο κεραίας σχήματος V με σταθερή κλίση φάσης $\Delta\Phi = \pi/4$

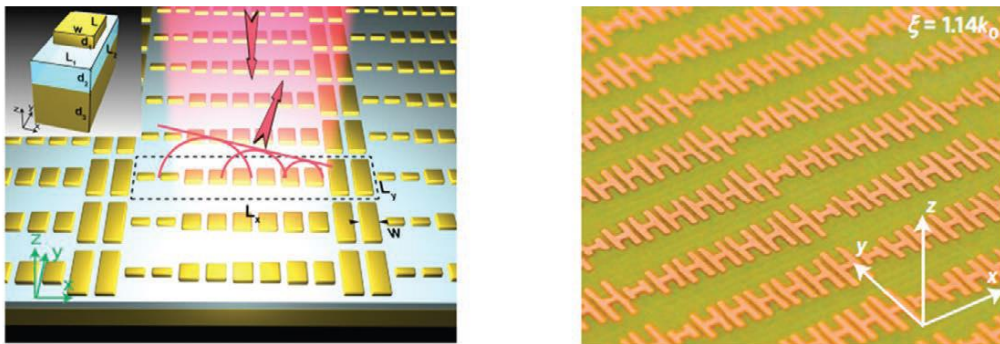
Όπως καταδείχθηκε αρχικά από τους Yu et al. (2011) στο μεσαίο υπέρυθρο φάσμα και αργότερα φαίνεται από τους Ni et al. (2012) στο εγγύς υπέρυθρο, επιλέγοντας $\beta = 45^\circ$ και $\alpha = 0^\circ$ ή 90° , το διάσπαρτο φως μπορεί να έχει μεγάλο εύρος φάσεων και πλάτη μεταβάλλοντας τη γεωμετρία και τους προσανατολισμούς της κεραίας. Ωστόσο, λόγω της συνύπαρξης των συνηθισμένων και ανώμαλων ανάκλασεων/διαθλάσεων σε αυτόν τον μηχανισμό, η αποτελεσματικότητα του επιθυμητού εφέ χειρισμού φωτός είναι αρκετά χαμηλή.



Εικόνα 32. Συνύπαρξη των συνηθισμένων και ανώμαλων ανάκλασεων/διαθλάσεων

3.2 Οι μεταεπιφάνειες ανακλαστικής συστοιχίας

Οι μεταεπιφάνειες ανακλαστικής συστοιχίας που ενσωματώνουν έναν μέταλλο-μονωτή ή μια μεταλλική κατασκευή ως βασικό δομικό στοιχείο, κατασκευάζονται με την εισαγωγή ενός διηλεκτρικού διαχωριστικού και ενός μεταλλικού φύλλου γείωσης από τις κάτω μεταλλικές συστοιχίες κεραιών. Το οπτικά λεπτό διηλεκτρικό στρώμα επιτρέπει την ισχυρή σύζευξη κοντινού πεδίου μεταξύ της επάνω διάταξης των κεραιών και τα δίπολα καθρέφτη τους στο μεταλλικό επίπεδο για να επιτευχθεί η επιθυμητή διαμόρφωση φάσης. Τα επαγόμενα ρεύματα στις νανοκεραίες και το επίπεδο γείωσης είναι αντιπαράλληλα, δημιουργώντας ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο μέσα στον μονωτή, γνωστό ως διάκενο-επιφάνειας πλασμονίου (Pors & Bozhevolnyi, 2013, Mo et al., 2016, Sun et al., 2012).



Εικόνα 33. Σχέδιο κεραιών νανοράβδου και κεραιών σχήματος H, που λειτουργούν στο κοντινό υπέρυθρο και τα συστήματα μικροκυμάτων, αντίστοιχα.

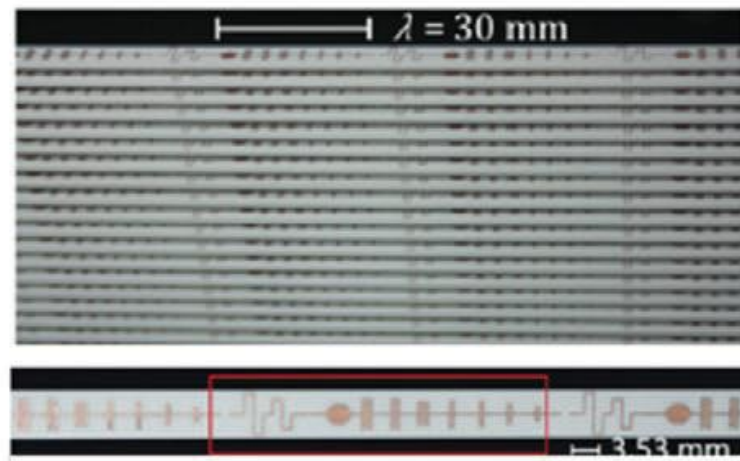
Η ακτινοβολία H μπορεί να συντονιστεί αποτελεσματικά αλλάζοντας απλώς το μήκος της κεραία. Εν τω μεταξύ, αφού το ανακλώμενο πλάτος δεν διαφέρει πάρα πολύ από τη μια δομή μονάδας στην άλλη, μπορεί κανείς να επικεντρωθεί απλώς στην απόκριση φάσης στο στάδιο του σχεδιασμού (Zhang et al., 2014; Chen et al., 2015; Pors et al., 2013). Η μετάδοση καταστέλλεται από το μεταλλικό επίπεδο γείωσης και η απόδοση στη λειτουργία ανώμαλης ανάκλασης μπορεί να φτάσει ως υψηλό ως 80%. Επιπλέον, αυτή η προσέγγιση έχει το πλεονέκτημα ότι το ανακλώμενο κύμα διατηρεί την ίδια κατάσταση πόλωσης σε σχέση με το προσπίπτον κύμα (Sun et al., 2012).

3.3 Οι μεταεπιφάνειες Huygens

Η ανεπαρκής απόδοση σύζευξης των πλασμονικών μονοστρωματικών κεραιών στη λειτουργία ελεγχόμενης φάσης υποβαθμίζει σημαντικά την απόδοση μεταεπιφανειών. Για το λόγο αυτό προτάθηκε μια άλλη προσέγγιση βασισμένη στην αρχή της ισοδυναμίας της επιφάνειας έτσι

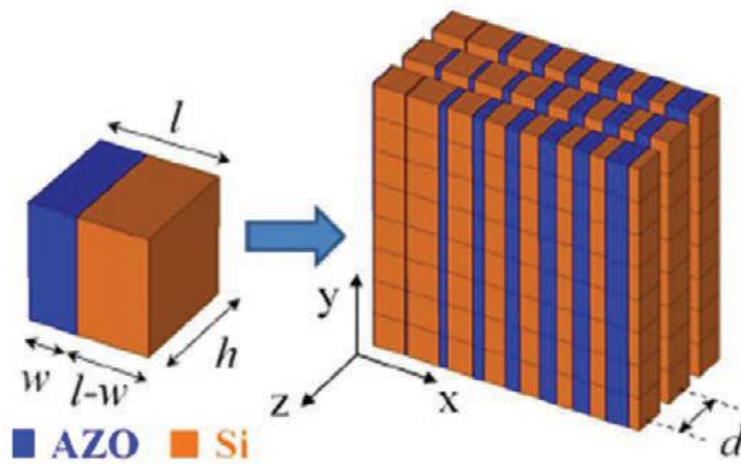
ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι ανακλάσεις με την ταυτόχρονη προσαρμογή σε ηλεκτρικές και μαγνητικές πολώσεις στη διεπαφή (Pfeiffer, 2013).

Ο σχεδιασμός των μεταεπιφανειών του Huygens μπορεί να περιλαμβάνει μη περιοδικές ή πολυεπίπεδες κατασκευές για τη δημιουργία αντιστάσεων επιφανείας τοπικά. Για παράδειγμα, οι Pfeiffer και Grbic χρησιμοποίησαν ένα supercell που αποτελείται από 12 στοιχεία με σχέδια για τη δημιουργία εκτροπέα δέσμης με 86% μετάδοση στη συχνοτική περιοχή των μικροκυμάτων (Pfeiffer, 2013).



Εικόνα 34. Επάνω μια κατασκευασμένη μικροκυματική μεταεπιφάνεια του Huygens που αποτελείται από μια δέσμη πανομοιότυπων λωρίδων πλακέτας κυκλώματος. Κάτω ίχνη χαλκού στην επάνω και κάτω πλευρά των σανίδων, τα οποία παρέχουν τα απαραίτητα ηλεκτρικά και μαγνητικά ρεύματα πόλωσης, αντίστοιχα.

Οι Monticone et al. (2013) πρότειναν μια στοίβα μεταεπιφανειών τριών στρωμάτων, που κατασκευάστηκε από έναν συνδυασμό διηλεκτρικών και πλασματικών νανομπλόκ που λειτουργούν ως νανοπυκνωτές και νανοεπαγωγείς, αντίστοιχα, για κάμψη φωτός στην περιοχή κοντά στο υπέρυθρο με θεωρητική απόδοση 75%. Ωστόσο, η απόδοση των Huygens' μεταεπιφανειών είναι πολύ φτωχότερες σε οπτικές συχνότητες (κάτω του 20%), γεγονός που οφείλεται στην ασθενή μαγνητική απόκριση των φυσικών υλικών και τις εγγενείς απώλειες των πλασματικών στοιχείων στο ορατό πεδίο (Monticone, Estakhri & Alw, 2013).

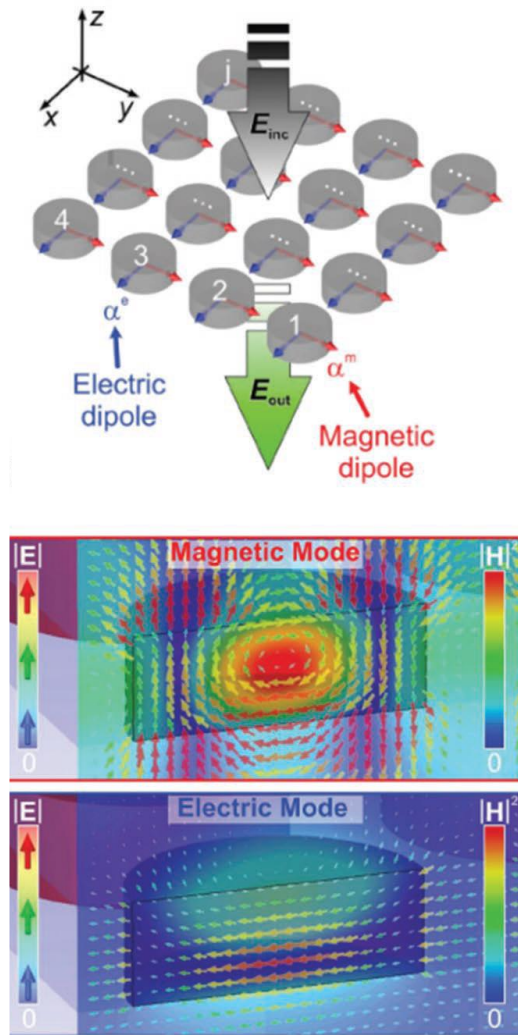


Εικόνα 35. Μεταεπιφάνεια του Huygens αποτελούμενη από τρία στοιβαγμένα στρώματα από πλασμονικό (οξειδίο του ψευδαργύρου με πρόσμειξη αλουμινίου) και διηλεκτρικό υλικό (Si) υλικά ως βασικό δομικό στοιχείο του (αριστερά).¹²

3.4 Διηλεκτρικές μεταεπιφάνειες του Huygens

Καθώς οι πλασμονικές μεταεπιφάνειες έχουν το ελάττωμα των αυξανόμενων απωλειών σε οπτικές συχνότητες, καθώς και αρκετών μηχανισμών απωλειών κατά τη διαδικασία διαμόρφωσης φάσης, όπως η περίθλαση, η συνηθισμένη ανάκλαση/διάθλαση και η πόλωση και απώλειες μετατροπής, ξεκίνησε ένας νέος κλάδος έρευνας με τα διηλεκτρικά ανάλογα των μεταεπιφανειών. Τα διηλεκτρικά νανοσωματίδια ή νανοδίσκοι βρέθηκε ότι μπορούν να παράγουν φασματικά επικαλυπτόμενους ηλεκτρικούς και μαγνητικούς συντονισμούς, κάτι που είναι κρίσιμο για την επίτευξη βέλτιστης μεταδιδόμενης απόδοσης με Huygens μεταεπιφάνειες (Decker et al., 2015; Kruk et al., 2016). Οι χαμηλές εγγενείς απώλειές τους είναι σε θέση να συνδέσουν το εισερχόμενο κύμα για τη δημιουργία κυκλικών ρευμάτων μετατόπισης μέσα στις νανοδομές και προκαλούν ισχυρό μαγνητικό διπολικό συντονισμό (Kuznetsov et al., 2016; Zywietz et al., 2014).

¹² https://www.researchgate.net/figure/Huygens-metasurfaces-realized-with-a-c-metallic-meta-atoms-for-the-microwave-regime_fig6_316015543



Εικόνα 36. Σχηματική απεικόνιση της διηλεκτρικής μεταεπιφάνειας του Huygens με χρήση συστοιχιών νανοδίσκων που συμπεριφέρονται ως ηλεκτρικά και μαγνητικά δίπολα καθώς και κατανομές ηλεκτρικού (έγχρωμα βέλη) και μαγνητικού πεδίου.¹³

3.5. Μεταεπιφάνειες υψηλής αντίθεσης

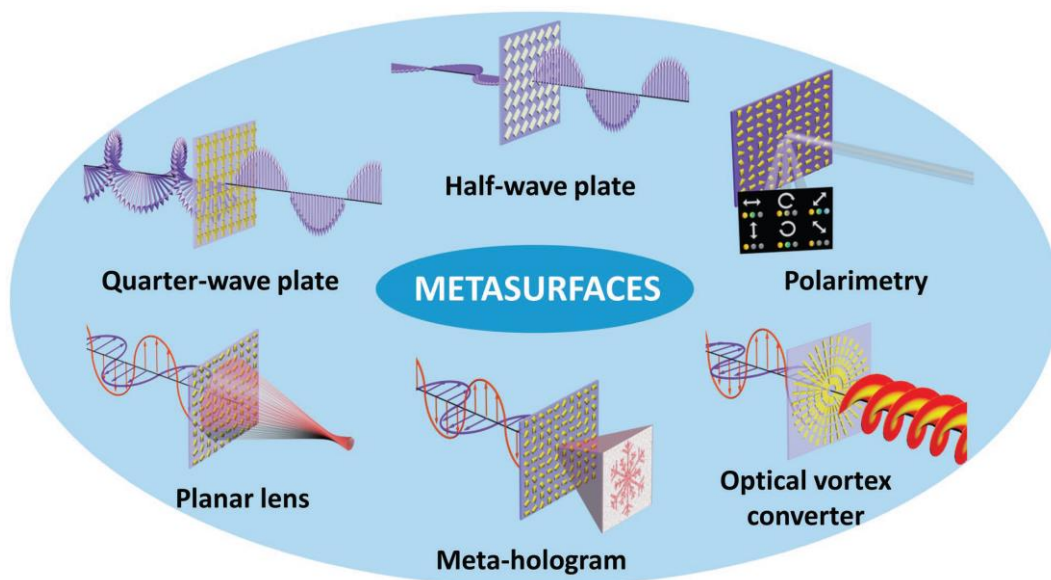
Οι μεταεπιφάνειες υψηλής αντίθεσης, αποτελούνται από αποσυνδεδεμένους διηλεκτρικούς σκεδαστές υψηλού δείκτη διάθλασης, και έτσι μπορούν να επιτύχουν ταυτόχρονα έλεγχο φάσης και πόλωσης με υψηλό βαθμό μετάδοσης. Λόγω μεγάλης διαφοράς δείκτη διάθλασης μεταξύ των νανοσκεδαστών και του περιβάλλοντος τους, η οπτική ενέργεια είναι έντονα συγκεντρωμένη μέσα

¹³ https://www.researchgate.net/figure/Huygens-metasurfaces-realized-with-a-c-metallic-meta-atoms-for-the-microwave-regime_fig6_316015543

σε κάθε νανοσκεδαστή έτσι ώστε η ιδιότητα μετάδοσης να καθορίζεται πρωτίστως από τη γεωμετρία του νανοσκεδαστή, ενώ η οπτική σύζευξη μεταξύ τους έχει αμελητέα επίδραση (Arabi et al., 2015).

3.6 Εφαρμογές των μεταεπιφανειών

Οι πρόσφατες εξελίξεις στις μεταεπιφάνειες έχουν εφαρμοστεί σε πολλές σύγχρονες οπτικές διατάξεις. Οι εφαρμογές αυτές είναι πολλά υποσχόμενες ως εναλλακτικές για να αντικαταστήσουν τις συμβατικές οπτικές συσκευές, καθώς διέπονται σε μεγάλο βαθμό από εξαιρετικά λεπτά, ελαφριά και συμπαγή χαρακτηριστικά, τα οποία παρέχουν τη δυνατότητα της υπέρβασης αρκετών περιορισμών που είχαν οι παραδοσιακές διατάξεις (Wen et al., 2016).



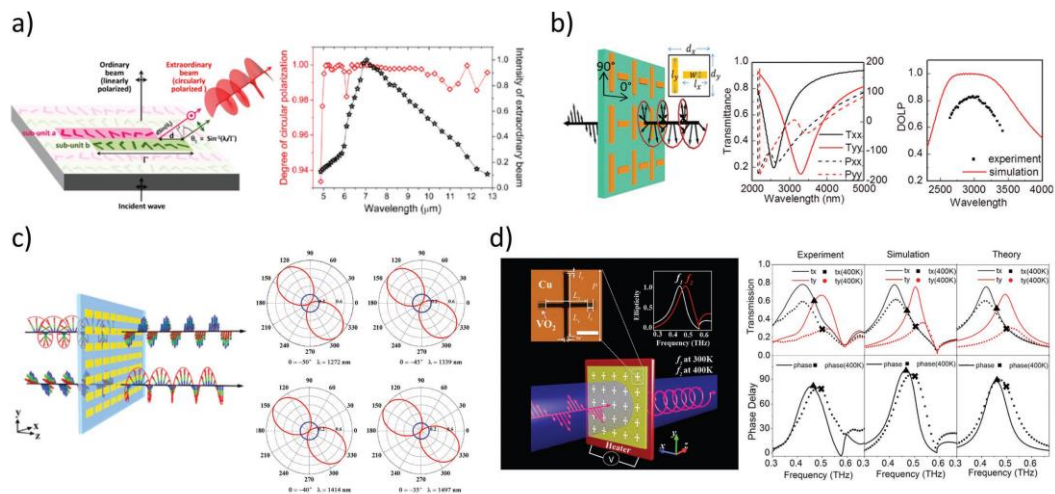
Εικόνα 37. Εφαρμογές που βασίζονται σε μετα-επιφάνειες για τον έλεγχο πόλωσης και τη διαμόρφωση μετώπου κύματος

3.6.1. Χειρισμός και ανίχνευση πόλωσης

3.6.1.1. Πλάκες Quarter-Wave

Όπως είναι γνωστό, η κατάσταση πόλωσης του φωτός μπορεί να διαμορφωθεί με διπλή διάθλαση κρυστάλλων, όπου απαιτείται επιβράδυνση φάσης μεταξύ δύο ορθογώνια πολωμένων κυμάτων. Ως αποτέλεσμα, οι διατάξεις ελέγχου πόλωσης είναι συνήθως ογκώδεις και φέρουν αρκετούς περιορισμούς, όπως η περιορισμένη λειτουργία σε μεγάλο εύρος ζώνης και η περιορισμένη επιλογή υλικών. Αυτό ενισχύει την ανάπτυξη κυματικών πλακών που βασίζονται σε μετα-επιφάνεια

που λειτουργούν σε διαφορετικά εύρη συχνοτήτων. Η εικόνα που ακολουθεί δείχνει παραδείγματα πλακών τετάρτου κύματος (QWPs) που βασίζονται στην εξαιρετικά λεπτή μετα-επιφάνεια (Li et al., 2015; Yang et al., 2013; Zhao & Alw, 2013; Wu et al., 2014).



Εικόνα 38. Παραδείγματα πλακών τετάρτου κύματος (QWPs) που βασίζονται στην εξαιρετικά λεπτή μετα-επιφάνεια¹⁴

Ο έλεγχος της κατάστασης πόλωσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάσπαση του προσπίπτοντος φωτός σε δύο ορθογώνιες συνιστώσες και έλεγχο της απαιτούμενης καθυστέρησης φάσης μεταξύ τους.

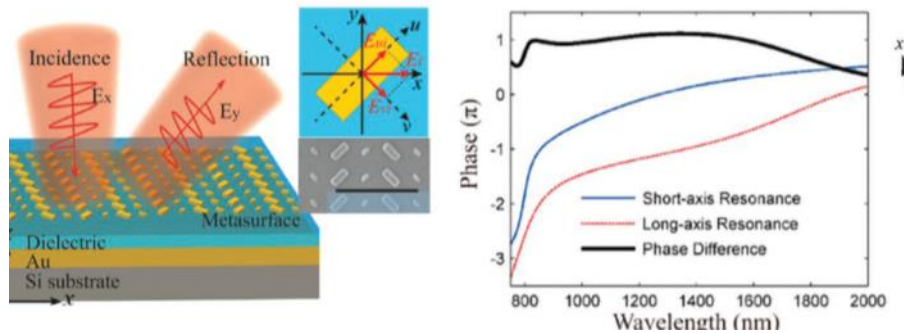
Η ανισότροπη οπτική απόκριση σε νανοκεραίες μπορεί επίσης να εφαρμοστεί στην υλοποίηση υπερλεπτών QWP που βασίζονται σε μετα-επιφάνεια. Για παράδειγμα, οι Zhao και Alù (2013) χρησιμοποίησαν τους αποσυντονισμένους πλασμονικούς συντονισμούς δύο ορθογώνιων νανοράβδων με διαφορετικά μεγέθη για κυκλική γραμμική εκτέλεση (CTL) και μετατροπή της πόλωσης στο ορατό και ως το μεσαίο του υπέρυθρου φάσματος, αντίστοιχα.

Η προσομοίωση της μετάδοσης για τη μετατροπή της πόλωσης CTL φτάνει περισσότερο από 40% στην περιοχή μήκους κύματος από 1100 nm έως 2000 nm. Με προσεκτικό χειρισμό της πόλωσης του προσπίπτοντος ηλεκτρικού πεδίου σε κάθε μήκος κύματος δειγματοληψίας, μετάδοση για LTC η μετατροπή πόλωσης μπορεί να επιτευχθεί πάνω από 30% στην περιοχή από 1170 nm έως 1590 nm. Οι Wang et al. (2015) κατασκεύασαν περαιτέρω ένα διακόπτη terahertz (THz) QWP με την εισαγωγή VO₂ σε συστοιχίες ασύμμετρου σταυρού ανοίγματα. Με το χειρισμό της φάσης μετάβασης του VO₂ σε διαφορετικές θερμοκρασίες μέσω ενός θερμαντήρα αντίστασης, το πραγματικό μήκος των αντηχείων μπορεί να μεταβληθεί και έτσι η συχνότητα λειτουργίας του QWP μπορεί να αλλάξει.

¹⁴ https://www.researchgate.net/figure/Multifunctional-meta-QWPs-a-Left-panel-schematic-of-the-background-free-meta-QWP_fig2_359664498

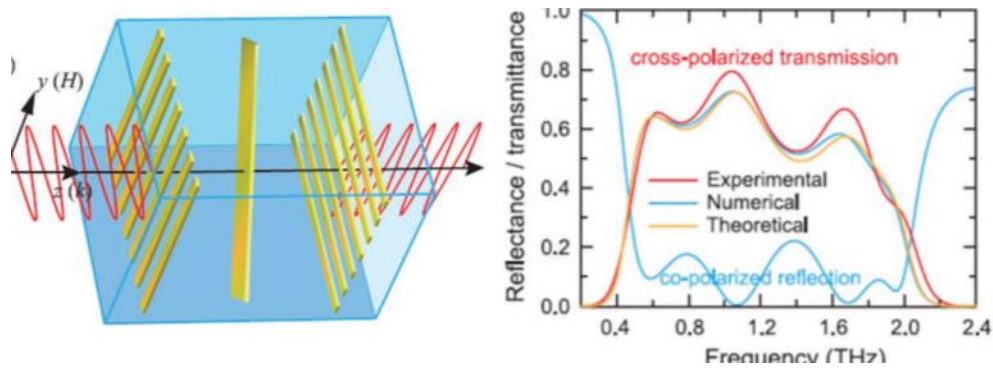
3.6.1.2 Πλάκες ημικυμάτων

Μια άλλη κατηγορία μεταεπιφανειών μετατροπής πόλωσης λειτουργεί ως πλάκες μισού κύματος (HWPs), περιστρέφοντας την κατεύθυνση της γραμμικής πόλωσης (Azad et al., 2013; Ding et al., 2015; Fan et al., 2015). Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 39. Αριστερό πλαίσιο: γεωμετρία ενός ανακλαστικού HWP. Ένθετα: η γεωμετρία συντεταγμένων του βασικού δομικού στοιχείου και η εικόνα SEM του μέρους της κατασκευασμένης μεταεπιφάνειας με γαλάζιο χρώμα έδειχνε το υπερκυψέλη. Δεξί πλαίσιο: τα ανακλώμενα φάσματα φάσης για το προσπίπτον φως είναι πολωμένα κατά μήκος των αξόνων u και v .

Οι Ding et al. (2015) περαιτέρω παρουσίασαν ένα HWP στο εγγύς υπέρυθρο φάσμα σχεδιάζοντας ένα υπερκύτταρο με κλίση χωρικής φάσης 0 έως 2π για τα διασταυρωμένα πολωμένα ανακλώμενα κύματα. Όπως καταδεικνύεται από την έρευνα των Grady et al. (2013), δύο ορθογώνια εισήχθησαν σε μεταλλικές σχάρες στο πάνω και στο κάτω μέρος μια συστοιχίας νανοδομών με περιστροφή 45° όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα.

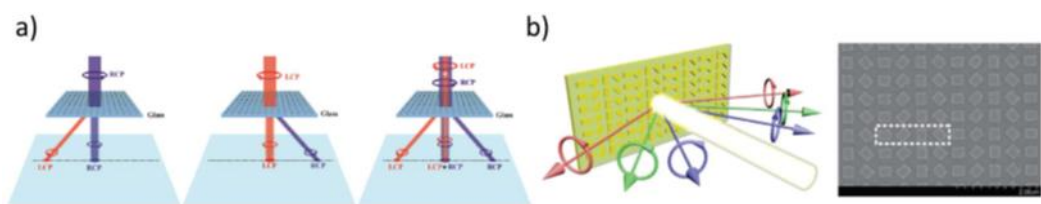


Εικόνα 40. Κυψέλης μονάδας μεταδιδόμενου HWP και διάγραμμα HWP που βασίζονται σε μεταεπιφάνεια που χρησιμοποιεί την ισχυρή σύζευξη κοντινού πεδίου κεραιών νανοράβδων (Grady et al., 2013).

Στο ίδιο πλαίσιο οι Jiang et al. (2014) χρησιμοποίησαν συστοιχίες ισχυρά συζευγμένων νανοράβδων με προσαρμοσμένη αναλογία διαστάσεων για την κατασκευή ενός ανακλαστικού HWP. Στην υπό μελέτη έρευνα ο μετρούμενος λόγος μετατροπής πόλωσης και ανακλαστικότητας βρέθηκε υψηλότερος από 92% από το ορατό στο εγγύς υπέρυθρο με ευρύ οπτικό πεδίο (FOV) έως $\pm 40^\circ$.

3.6.1.3 Πολωμετρία

Ο έλεγχος των μεταεπιφανειών επί της πόλωσης παρακινεί την εφαρμογή διατάξεων πολωμετρίας για την ανίχνευση της κατάστασης πόλωσης ή τον προσδιορισμό των παραμέτρων Stokes. Για παράδειγμα, οι Shaltout et al. (2015) χρησιμοποίησαν το PSHE για να δείξουν την πόλωση συσκευών ανίχνευσης και φασματοσκοπίας που εκτελούν χωρικό διαχωρισμό του φωτός LCP και RCP σε ανακλώμενο και μεταδιδόμενο τύπο μεταεπιφάνειες φάσης PB, αντίστοιχα.



Εικόνα 41. α) Σχηματική απεικόνιση PSHE. Το εκπεμπόμενο φως CP με την ίδια πολικότητα όπως το προσπίπτον κύμα διαδίδεται κατά μήκος της κάθετης κατεύθυνσης, ενώ το μετατρεπόμενο φως CP με την αντίθετη πολικότητα αποκτά έναν επιπλέον όρο φάσης PB και έτσι διαθλάται σε ανώμαλες κατευθύνσεις. β) PSHE που αποδεικνύεται από ανακλαστικές μεταεπιφάνειες φάσης PB και SEM ενός κατασκευασμένου δείγματος (Shaltout et al., 2015).

3.6.2 Διαμόρφωση μετώπου κύματος

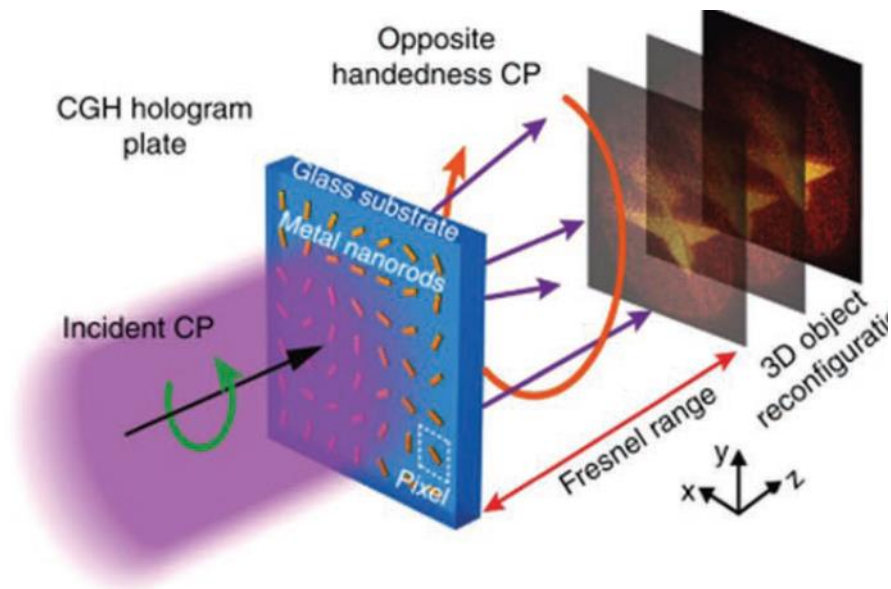
3.6.2.1 Επίπεδες μεταλλικές διατάξεις

Η διαμόρφωση ενός μετώπου κύματος από τους συμβατικούς διαθλαστικούς φακούς επιτυγχάνεται με βάση την επιφανειακή τοπολογία ή τον χωρικό δείκτη διάθλασης των οπτικών διαφανών μέσων. Σε ένα τέτοιο πλαίσιο, τα προφίλ των δοκών μεταβάλλονται ανάλογα με τη συσσώρευση φάσης κατά μήκος της οπτικής διαδρομής μέσω αυτών των συσκευών φακού (Vo et al., 2014; Aieta et al., 2012). Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα αυτών είναι σχετικά χαμηλή λόγω της ασθενούς φωτεινής σύζευξης με τις μονοστρωματικές πλασματικές κεραίες και εστιάζοντας μόνο τη διασταυρούμενη πολωμένη συνιστώσα σκέδασης. Τα συμπληρωματικά ανοίγματα σχήματος V εφαρμόστηκαν επίσης για την κατασκευή επίπεδων φακών στο ορατό φάσμα (Ni et al., 2013).

3.6.2.2 Μετα-ολογράμματα

Μια άλλη ενδιαφέρουσα χρήση των μεταεπιφανειών είναι η υλοποίηση ολογραμμάτων που παράγονται από υπολογιστή (CGHs), τα οποία απαιτούν προσεκτική διαμόρφωση της τοπικής φάσης, πλάτους και απόκριση πόλωσης για λήψη εικόνων υψηλής ποιότητας. Συμπληρωματικά έχουν χρησιμοποιηθεί δομές σε σχήμα V για την εισαγωγή μιας φάσης οκτώ επιπέδων και μιας κατανομής πλάτους δύο επιπέδων για την ανακατασκευή μιας ολογραφικής εικόνας σε ορατό φως με απόδοση 10% (Ni et al., 2013).

Μεταεπιφάνειες φάσης PB ή γεωμετρικές μεταεπιφάνειες έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί ευρέως για το σχεδιασμό μεταολογραμμάτων λόγω του ανώτερου ελέγχου φάσης τους (Huang et al., 2013; Zhang et al., 2016; Zheng et al., 2015; Wen et al., 2015; Khorasaninejad et al., 2016). Για παράδειγμα, έχει επιτευχθεί τρισδιάστατη (3D) οπτική ολογραφία για προβολή μιας τρισδιάστατης εικόνας σε σχήμα πίδακα επί άξονα με α ευρύ FOV αξιολογημένο ως $\pm 40^\circ$, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 42. Τρισδιάστατη (3D) οπτική ολογραφία για προβολή μιας τρισδιάστατης εικόνας σε σχήμα πίδακα επί άξονα με α ευρύ FOV αξιολογημένο ως $\pm 40^\circ$ ¹⁵

3.6.2.3 Οπτική Γενιά Δημιουργία δίνης Vortex

Συσκευές που βασίζονται σε μεταεπιφάνεια που εφαρμόζονται στη δημιουργία δέσμης δίνης έχουν αποκτήσει πρόσφατα τεράστιο ενδιαφέρον λόγω των πολλών και πολλά υποσχόμενων εφαρμογών τους σε μικροσκοπία υψηλής ανάλυσης καθώς και σε οπτική, κλασική και κβαντική τεχνολογία επικοινωνίας (Rui & Zhan, 2015).

Μια ποικιλία πλασμονικών νανοδομών όπως η πλασμονική σπείρα του Αρχιμήδη (Rui & Zhan, 2015) και οι πλασμονικοί δακτύλιοι (Liu et al., 2012) έχουν αποδειχθεί χρήσιμοι στη δημιουργία είτε διανυσματικών είτε βαθμωτών δεσμών στροβιλισμού με αυθαίρετη τροχιακή γωνιακή ορμή (OAM). Από την άλλη πλευρά, οι μεταεπιφάνειες φάσης PB που αποτελούνται από νανοκεραίες μπορούν να χρησιμοποιηθεί επίσης για την παραγωγή οπτικού στροβίλου, όπου ο περιστροφικός ρυθμός των νανοκεραίων σε μία περιφέρεια καθορίζει το τοπολογικό φορτίο της δομής (Maguid et al., 2016).

¹⁵ https://www.researchgate.net/figure/A-Schematic-of-a-plasmonic-metasurface-for-3D-CGH-image-reconstruction-B_fig4_359516066

Συμπέρασμα- Προτάσεις

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η μελέτη και ο έλεγχος του τρόπου λειτουργίας των μεταλλικών και μεταεπιφανειών στις σύγχρονες κεραίες και σε άλλες εφαρμογές των σύγχρονων τεχνολογιών. Από την όλη μελέτη έγινε σαφές ότι για τη βελτίωση του αποτελέσματος παίζουν σημαντικό ρόλο πολλοί παράμετροι, οι κυριότεροι εκ των οποίων είναι ο τύπος των διατάξεων των μεταλλικών που χρησιμοποιείται, η θέση στην οποία αυτά θα τοποθετηθούν, οι διαστάσεις και το πάχος των δακτυλίων, η απόσταση μεταξύ των δυο δακτυλίων, καθώς και το κενό του δακτυλίου. Ανάλογα με τις επιθυμητές ιδιότητες γίνεται ορθή επιλογή των παραγόντων αυτών, έτσι ώστε να οδηγήσει στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας της κεραίας.

Επιπρόσθετα, από την ανάλυση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας, έγινε σαφές ότι τα μεταλλικά μπορούν να εφαρμοστούν ως περιβάλλον της κεραίας ή ως μέρος της κεραίας. Ανάλογα με τις παραμέτρους της επιθυμητής κεραίας για βελτίωση, τα μεταλλικά μπορεί να αξιοποιηθούν με διαφορετικές μεθόδους. Τα μεταλλικά μπορούν να εφαρμοστούν για τη βελτίωση του εύρους ζώνης, του κέρδους ισχύος ή για τη δημιουργία συμπαγών πολυσυχνοτικών κεραίων.

Για την εφαρμογή μεταλλικών σε μια κεραία, το πρώτο βήμα είναι να σχεδιαστούν τα μοναδιαία κελιά τους, τα οποία θεωρούνται ως άτομα, δημιουργώντας ειδικές ιδιότητες του μεταλλικού στην επιθυμητή συχνότητα. Το μέγεθος των κελιών μονάδας υπολογίζεται με προσομοίωση και βελτιστοποίηση. Η αποτελεσματικότητα της βελτίωσης των παραμέτρων της κεραίας εξαρτάται από τη δομή, το μέγεθος, την ποσότητα και τη μέθοδο χρήσης της μονάδας κυψέλης των μεταλλικών. Η εφαρμογή των μεταλλικών στο σχεδιασμό της κεραίας μπορεί να αυξήσει την ισχύ τους σε 2 dB, εύρος ζώνης 100%, μείωση μεγέθους 50% ή δημιουργία πρόσθετων ζωνών συχνοτήτων για κεραίες που λειτουργούν με συστήματα πολυεπικοινωνίας.

Όσον αφορά τις μεταεπιφάνειες κατέστη σαφές από τη μελέτη της υπάρχουσας βιβλιογραφίας ότι οι εφαρμογές τους στις σύγχρονες τεχνολογίες επικοινωνίας είναι πάρα πολλές αλλά για την μελέτη μιας μεταεπιφάνειας και την αλληλεπίδραση της με το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο είναι απαραίτητες τόσο η γνώση θεωρίας ηλεκτρομαγνητισμού όσο και η χρήση υπολογιστικών μεθόδων.

Συμπερασματικά, στη σημερινή εποχή, υπάρχουν δύο βασικές ερευνητικές κατευθύνσεις που είναι οι πιο ενεργές στον τομέα των μεταλλικών και μεταεπιφανειών. Η μία κατεύθυνση της έρευνας είναι προσανατολισμένη στο να εκμεταλλευτεί τα μεταλλικά σε συμβατικά κυκλώματα μικροκυμάτων (π.χ. κυκλώματα και κεραίες) και η άλλη γραμμή έρευνας είναι αφιερωμένη στο να φέρει τις νέες δυνατότητες που ανακαλύφθηκαν στις συχνότητες μικροκυμάτων πίσω στην οπτική. Σε αυτό το πλαίσιο, νέα ώθηση δόθηκε από τη νανοτεχνολογία και την διαθέσιμη και σχετικά εύκολη κατασκευή νανοδομών. Ανεξάρτητα από τη ζώνη συχνοτήτων της εκάστοτε εφαρμογής, μπορούμε να θεωρούμε ένα μεταλλικό ως ένα ενεργό τεχνητό υλικό που αποτελείται από μια σωστή χωρική τοποθέτηση των εμφυτευμένων δομών μέσα σε ένα υλικό. Η σύνθεση, ευθυγράμμιση, πυκνότητα και το σχήμα/γεωμετρία των δομών αυτών, καθώς και οι καταστατικές παράμετροι του υλικού καθορίζουν την μακροσκοπική σύνθεση του μεταλλικού.

Η παρούσα έρευνα αποτελεί την αφετηρία για την επέκταση της έρευνας της επίδρασης των μεταλλικών και μεταεπιφανειών στη λειτουργία των σύγχρονων μέσων επικοινωνίας. Κάποιες κατευθύνσεις στις οποίες θα μπορούσε να επεκταθεί η παρούσα έρευνα στη χώρα μας θα μπορούσαν να είναι οι εξής:

Εφαρμογές των μεταλλικών στα σύγχρονα συστήματα επικοινωνιών

- Βελτίωση της λειτουργίας των κεραιών με την προσθήκη διαφορετικών διατάξεων μεταλλικών, με σκοπό την επίτευξη οξύτερων συντονισμών και μεγαλύτερου εύρους ζώνης.
- Έλεγχος της ελάττωσης της ακτινοβολούμενης ισχύος των κεραιών με τη χρήση των αριστερόστροφων υλικών.

Βιβλιογραφία

Διεθνής

Aieta, F., P. Genevet, M. A. Kats, N. Yu, R. Blanchard, Z. Gaburro, F. Capasso, Nano Lett. 2012, 12, 4932.

Alici, K. B., Ozbay, E. 2007. Electrically small split ring resonator antennas, Journal of Applied Physics, 101(8), 083104.

Alici, K.B., Özbay, E. 2007. Radiation properties of a split ring resonator and monopole composite. Physica Status Solidi B: Basic Research. 244:1192-1196. DOI: 10.1002/pssb.200674505.

Alitalo, P., and S. Tretyakov, 2009. Electromagnetic cloaking with metamaterials, Materials today, 12(3): 22-29, 2009.

Arbabi, A., Y. Horie, M. Bagheri, A. Faraon, Nat. Nanotechnol. 2015,10, 937.

Blanchard, R., G. Aoust, P. Genevet, N. Yu, M. A. Kats, Z. Gaburro, F. Capasso, Phys. Rev. B 2012, 85, 155457.

Caloz C, Sanada A, Itoh T. 2004. A novel composite right_left handed coupled-line directional coupler with arbitrary coupling level and broad bandwidth. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 52(3):980-992. DOI: 10.1109/TMTT.2004.823579.

Caloz, C. 2009. Perspectives on EM metamaterials, Materials today, 12(3), 12-20.

Cao, T.N, Krzysztofik, W.J. 2018. Metamaterials in Application for Improving the Parameters of Antennas, Telecommunication Review and Telecommunication News. Warsaw, Poland: SIGMA-NOT. pp. 300-303. DOI: 10.15199/59.2018.6.34. Yearbook XCI/LXXXVII, Notebook No. 6/2018, ISSN 1230-3496, e-ISDN 2449-7487.

Cao, TN, Krzysztofik, WJ. 2016. Multiband fractal antenna for C-band ground station of satellite TV in ITU region-3. In: 21thMIKON, 6th MRW International Microwave and Radar Conference. 9–11 May 2016, Krakow, Poland; 2016. ISBN: 978-1-5090-2214-4/16/\$31.00 ©2016 IEEE.

Chen, Z. Metamaterials and Metamaterial-Based Antenna Technology, Journal of Shanghai University (Natural Science), 20(5): 531-540.

da Silva, J. L., H. D. de Andrade, H. C. C. Fernandes, I. B. T. da Silva, I. de S. Q. Junior, J. P. P. Pereira, and A. S. S. Neto, 2015. Microstrip Patch Antenna Project with Split Ring Resonator Periodically Arrayed on the Substrate, Microwave and Optical Technology Letters, 57(12), 2715-2720.

Dakhli S, Rmili H, Floch JM, Sheikh M, Dobaie A, Mahdjoubi K, Choubani F, Ziolkowski RW. 2016. Printed multiband metamaterial inspired antennas. Microwave and Optical Technology Letters. 58(6):1281-1289. DOI: 10.1002/mop.29792

Decker, M., I. Staude, M. Falkner, J. Dominguez, D. N. Neshev, I. Brener, T. Pertsch, Y. S. Kivshar, Adv. Opt. Mater. 2015, 3, 813.

Dewan, R., Rahim, M.K.A. 2015. Antenna performance enhancement with artificial magnetic conductor (AMC). In: 2015 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA). 2015. DOI: 10.1109/CAMA.2015.7428141. ISBN: 978-1-4673-9149-8.

Ding, F., Z. Wang, S. He, V. M. Shalaev, A. V. Kildishev, ACS Nano 2015, 9, 4111.

Ding, F., Z. Wang, S. He, V. M. Shalaev, A. V. Kildishev, ACS Nano 2015, 9, 4111

Eleftheriades, G. V. 2009. EM transmission-line metamaterials, Materials Today, 12(3), 30-41.

Eleftheriades, G. V., Balmain, K.G. 2005. Negative-Refractive Metamaterials, Wiley.

Erentok, A., Ziolkowski, W. 2008. Metamaterial-Inspired Efficient Electrically Small Antennas, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 56(3), 691-707.

Fan, R., Y. Zhou, X.-P. Ren, R.-W. Peng, S.-C. Jiang, D.-H. Xu, X. Xiong, X.-R. Huang, M. Wang, Adv. Mater. 2015, 27, 1201.

Fischer, J., Thiel, M., Wegener, M. 2014. How to Make a Better Invisibility Cloak-With Lasers, IEEE Spectrum, Jan.

Gao XJ, Oguz O. 2016. Enhancement of gain and directivity for microstrip antenna using negative permeability metamaterial. International Journal of Mathematics and Computer Science. 45:880-885. DOI: 10.1016/j.aeue.2016.03.019. ISSN: 2305-7661.

Grady, N., J. E. Heyes, D. R. Chowdhury, Y. Zeng, M. T. Reiten, A. K. Azad, A. J. Taylor, D. A. R. Dalvit, H.-T. Chen, Science 2013, 340, 1304.

Guha, D., Biswas, M., Antar, Y.M.M. 2005. Microstrip patch antenna with defected ground structure for cross polarization suppression. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 4:455-459. DOI: 10.1109/LAWP.2005.860211.

Hsu, W.L., P. C. Wu, J.-W. Chen, T.-Y. Chen, B. H. Cheng, W. T. Chen, Y.-W. Huang, C. Y. Liao, G. Sun, D. P. Tsai, Sci. Rep. 2015, 5, 11226.

Huang, L., X. Chen, H. Mühlenbernd, H. Zhang, S. Chen, B. Bai, Q. Tan, G. Jin, K.-W. Cheah, C.-W. Qiu, J. Li, T. Zentgraf, S. Zhang, Nat. Commun. 2013, 4, 2808.

Ikonen PMT, Rozanov KN, Osipov AV, Io PA, Tretyakov SA. 2006. Magneto-dielectric substrates in antenna miniaturization: Potential and limitations. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 54(11):3391-3399. DOI: 10.1109/TAP.2006.884303.

Islam, R. and G. V. Eleftheriades, 2004. Phase-Agile Branch-Line Couplers Using Metamaterial Lines, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 14(7) 340-342.

Islam, R., Elek, F., Eleftheriades, G.V. 2004. Coupled-line metamaterial coupler having co-directional phase but contra-directional power flow, *Electronics Letters*, 40(5), 223-229.

Jiang, Z., L. Lin, D. Ma, S. Yun, D. H. Werner, Z. Liu, T. S. Mayer, *Sci. Rep.* 2014, 4, 7511.

Karkkainen, M., Ikonen, P.M.T. 2005. Patch antennas with stacked split-ring resonators as an artificial magneto-dielectric substrate. *Microwave and Optical Technology Letters*. 46(6):554-556. DOI: 10.1002/mop.21048.

Karmokar, D. K., K. M. Morshed, 2009. Analysis of Inverted-F and Loaded Inverted-F Antennas for 2.4 GHz ISM Band Applications, *Journal of Electrical Engineering The Institution of Engineers, Bangladesh*, 36(11), 4-9.

Ketzaki, D.A., D. K. Ntaikos, N. K. Bourgis and T. V. Yioultsis, 2012. Metamaterial-enhanced MIMO Antennas, 2nd Panhellenic Conference on Electronics and Telecommunications (PACET), March 16-18, 2012, Thessaloniki, Greece .

Khorasaninejad, M., A. Ambrosio, P. Kanhaiya, F. Capasso, *Sci.Adv.* 2016, 2, e1501258.

Kiem, N. K., Phuong, B., Q. N. Hieu, and D. N. Chien, 2015. A Novel Metamaterial MIMO Antenna with High Isolation for WLAN Applications, *International Journal of Antennas and Propagation*, 2015, 851904.

Kim D, Choi J. 2010. Analysis of antenna gain enhancement with a new planar metamaterial superstrate: An effectivemedium and a fabry-pérot resonance approach. *Journal of Infrared, Millimeter, and TerahertzWaves*. 31(11):1289-1303. DOI: 10.1007/s10762-010-9712-2.

Kruk, S. B. Hopkins, I. I. Kravchenko, A. Miroshnichenko, D. N. Neshev, Y. S. Kivshar, *APL Photonics* 2016, 1, 030801.

Krzysztofik WJ, Cao TN. Fractal antenna of MIMO system WLAN. In: 12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018). London, UK: ExCel; 2018. pp. 1-5. ISBN: 978-1-78561-815-4, e-ISBN: 978-1-78561-816-1, ISSN 0537-9989.

Krzysztofik, W.J. 2013. Fractal geometry in electromagnetics applications—From antenna to metamaterials. *Microwave Review*. 19(2):3-14. ISSN: 14505835.

Krzysztofik, W.J. 2014. Antenna properties improvement by means of modern technology—Metamaterials as a modified substrate and/or superstrate. In: 20th M&RW, MIKON 2014, 20th International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications. Vol.2. Gdansk, Poland: MIKON; 2014. pp. 637-640. ISBN 978-83-931525-2-0.

Krzysztofik, W.J. 2017. Fractals in antennas and metamaterials applications. *INTECHopen science, open minds*. In: Brambila F, editor. *Fractal Analysis—Applications in Physics, Engineering and Technology*. Rijeka, Croatia: InTech; 2017. pp. 45-81. DOI: 10.5772/intechopen.68188. Print ISBN 978-953-51-3191-5, Online ISBN 978-953-51-3192-2.

Kuznetsov, A.I., A. E. Miroshnichenko, M. L. Brongersma, Y. S. Kivshar, B. Luk'yanchuk, *Science* 2016, 354, 846.

Liu Y, Guo X, Gu S, Zhao X. 2013. Zero index metamaterial for designing high-gain patch antenna. *International Journal of Antennas and Propagation*. 1-12. DOI: 10.1155/2013/215681. Article ID 215681.

Liu, A., G. Rui, X. Ren, Q. Zhan, G. Guo, G. Guo, *Opt. Express* 2012,20, 24151

Liu, C., Huang, K. 2010. Metamaterial Transmission Line and its Applications, in *Advanced Microwave and Millimeter Wave Technologies: Semiconductor Devices, Circuits and Systems*, pp. 249-274, Moumita Mukherjee.

Maguid, E., I. Yulevich, D. Veksler, V. Kleiner, M. L. Brongersma, E. Hasman, *Science* 2016, 352, 1202.

Mo, W., X. Wei, K. Wang, Y. Li, J. Liu, *Opt. Express* 2016, 24, 13621.

Moitra, P., B. A. Slovick, W. Li, I. I. Kravchenko, D. P. Briggs, S. Krishnamurthy, and J. Valentine, 2015. Large-Scale All-Dielectric Metamaterial Perfect Reflectors, *ACS Photonics*, 2, 692-698.

Monticone, F., N. M. Estakhri, A. Alù, *Phys. Rev. Lett.* 2013, 110, 203903.

Mosallaei H, Sarabandi K. 2007. Design and modelling of patch antenna printed on magnetodielectric embedded-circuit meta-substrate. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. Jan. 55(1):45-52. DOI: 10.1109/TAP.2006.886566.

Namin, F., S. Yun, T. S. Mayer, D. H. Werner, and C. Rivero-Baleine, 2011. Near-Perfect Optical Mirrors Based on Thin All-Dielectric Zero Index Metamaterial Coatings,” *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, 3-8 July, 2011, Spokane, WA, USA.

Neu, J., Krolla, B., Paul, O., Reinhard, R. Beigang, B., Rahm, M. 2010. Metamaterial-based gradient index lens with strong focusing in the THz frequency range, *Optics Express*, 18(26): 27748-27757.

Ni, X., A. V. Kildishev, V. M. Shalaev, *Nat. Commun.* 2013, 4, 2807.

Ni, X., N. K. Emani, A. V. Kildishev, A. Boltasseva, V. M. Shalaev, *Science* 2012, 335, 427.

Ni, X., S. Ishii, A. V. Kildishev, V. M. Shalaev, *Light Sci. Appl.* 2013,2, e72.

Oliveri, G., Werner, D.H., Massa, A. 2015. Reconfigurable electromagnetics through metamaterials—A review. *Proceedings of the IEEE*. 103:1034-1056. DOI: 10.1109/JPROC.2015.2394292.

Pfeiffer, C., A. Grbic, *Phys. Rev. Lett.* 2013, 110, 197401.

Phan, D.T., Phan, H.L., Nguyen, T.Q.H. 2016. A miniaturization of microstrip antenna using negative permittivity metamaterial based on CSRR loaded ground for WLAN applications. *Journal of Science and Technology*. 54(6):689-697. DOI: 10.15625/0866-708X/54/6/8375.

Pors, A., M. G. Nielsen, R. L. Eriksen, S. I. Bozhevolnyi, *Nano Lett.* 2013, 13, 829.

Pors, A., S. I. Bozhevolnyi, *Opt. Express* 2013, 21, 27438.

Rajkumar R, Kiran KU. 2016. A compact metamaterial multiband antenna for WLAN/WiMAX/ITU band applications. *International Journal of Electronics and Communications*. 70(5):599-604. DOI: 0.1016/j.aeue.2016.01.025. ISSN 1434-8411.

Raval F, Kosta YP, Joshi H. 2015. Reduced size patch antenna using complementary split ring resonator as defected ground plane. *International Journal of Electronics and Communications*. 69:126-1133. DOI: 10.1016/j.aeue.2015.04.013.

Rui, G., Q. Zhan, *Nanophotonics* 2015, 4, 2.

Shaltout, A., J. Liu, A. Kildishev, V. Shalaev, *Optica* 2015, 2,860.

Siddiqui, O., Mo, M., Eleftheriades, G.V. 2003. Periodically loaded transmission line with effective negative refractive index and negative group velocity. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 51:2619-2625. DOI: 10.1109/TAP.2003.817556.

Sievenpiper, D.F, Zhang, L., Broas. F.J., Alexopolous, N,G, Yablonovitch, E. 1999. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 47(11):2059-2074. DOI: 10.1109/22.798001.

Singh, P.K., Hopwood, J., Sonkusale, S. 2014. Metamaterials for remote generation of spatially controllable two-dimensional array of microplasma. *Scientific Reports*; 2014;4:1-5. DOI: 10.1038/srep05964. Article number: 5964, ISSN 2045-2322 *Metamaterials in Application to Improve Antenna Parameters* <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.8063683>.

Slyusar, V.I. 2009. Metamaterials on antenna solutions. In: 7th International Conference on Antenna Theory and Techniques, ICATT'09; Lviv, Ukraine. pp. 19-24. DOI: 10.1109/ICATT.2009.4435103.

Spektor, G., A. David, B. Gjonaj, G. Bartal, M. Orenstein, Nano Lett. 2015, 15, 5739.

Sun, S. K.-Y. Yang, C.-M. Wang, T.-K. Juan, W. T. Chen, C. Y. Liao, Q. He, S. Xiao, W.-T. Kung, G.-Y. Guo, L. Zhou, D. P. Tsai, Nano Lett. 2012, 12, 6223.

Vo, S., D. Fattal, W. V. Sorin, Z. Peng, T. Tran, M. Fiorentino, R. G. Beausoleil, IEEE Photonics Technol. Lett. 2014, 26, 1375.

Wen, D. S. Chen, F. Yue, K. Chan, M. Chen, M. Ardron, K. F. Li, P. W. H. Wong, K. W. Cheah, E. Y. B. Pun, G. Li, S. Zhang, X. Chen, Adv. Opt. Mater. 2016, 4, 321.

Wen, D., F. Yue, G. Li, G. Zheng, K. Chan, S. Chen, M. Chen, K. F. Li, P. W. H. Wong, K. W. Cheah, E. Yue Bun Pun, S. Zhang, X. Chen, Nat. Commun. 2015, 6, 8241.

Wood, B. 2009. Metamaterials and invisibility, Computers Rendus Physiwue, 10, 379-390.

Wu, B., W. Wang, J. Pacheco, X. Chen, T. Grzegorzczuk, and J. A. Kong (2005). "A Study of Using Metamaterials as Antenna Substrate to Enhance Gain, Progress in Electromagnetics Research, 51, 295-328.

Wu, C., N. Arju, G. Kelp, J. A. Fan, J. Dominguez, E. Gonzales, E. Tutuc, I. Brener, G. Shvets, Nat. Commun. 2014, 5, 3892.

Yan, S. 2015. Metamaterial Design and its Application for Antennas, Dissertation thesis, KU Leuven.

- Yang, B., W.-M. Ye, X.-D. Yuan, Z.-H. Zhu, C. Zeng, Opt. Lett. 2013, 38, 679.
- Yayun, D., Wenwen, L., Xijun, Y., Chen, Y., Houjun, T. 2017. Design of unit cell for metamaterials applied in a wireless power transfer system. In: IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer. 2017. pp. 143-147. DOI: 10.1109/WoW.2017.7959382.
- Yeo, J., Kim, D. 2008. Design of a wideband artificial magnetic conductor (AMC) ground plane for low-profile antennas. Journal of Electromagnetic Waves and Applications. 22:2125-2134. DOI: 10.1163/156939308787522546.
- Yu K, Li Y, Wang Y. Multi-band metamaterial-based microstrip antenna for WLAN and WiMAX applications. In: 2017 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium–Italy (ACES). 2017. pp. 6-30. DOI: 10.23919/ROPACES.2017.7916032.
- Yu, N. P. Genevet, M. A. Kats, F. Aieta, J.-P. Tetienne, F. Capasso, Z. Gaburro, Science 2011, 334, 333.
- Yu, N., F. Aieta, P. Genevet, M. A. Kats, Z. Gaburro, F. Capasso, Nano Lett. 2012, 12, 6328.
- Zhang, L., J. Hao, M. Qiu, S. Zouhdi, J. K. W. Yang, C.-W. Qiu, Nanoscale 2014, 6, 12303.
- Zhang, X., J. Jin, Y. Wang, M. Pu, X. Li, Z. Zhao, P. Gao, C. Wang, X. Luo, Sci. Rep. 2016, 6, 19856.
- Zhao, Y., A. Aló, Nano Lett. 2013, 13, 1086.
- Zheng, G., H. Mühlenbernd, M. Kenney, G. Li, T. Zentgraf, S. Zhang, Nat. Nanotechnol. 2015, 10, 308.
- Zywietz, U., A. B. Evlyukhin, C. Reinhardt, B. N. Chichkov, Nat. Commun. 2014, 5, 3402.

Ελληνική

Καμπιτάκης Μ. 2011. Ανάλυση και Σχεδίαση Μικροκυματικών Μεταϊλικών Μέσων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Κωσταράς, Ε. Δ. 2010. Μεταϊλικά, Κατηγορίες, Κατασκευή, Ιδιότητες και Εφαρμογές, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Ντάικος, Δ. Κ., 2013. Σχεδίαση και Υλοποίηση Κεραιών Πολλαπλών Εισόδων - Πολλαπλών Εξόδων (ΜΙΜΟ) για Συστήματα Ασύρματων Επικοινωνιών με Χρήση της Τεχνολογίας Μεταϊλικών, Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Πελεκανίδης, Α. (2016). Ασύρματη Μεταφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας με Χρήση Μεταϊλικών ως Στοιχεία Συντονισμού, Διπλωματική εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.