



Τ.Ε.Ι. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ Τ.Ε.

Ανάλυση νέων τεχνολογιών υλικών στις επικοινωνίες – metasurfaces – metamaterials

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Παναγιώτη Γραμματίκα

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Ιωάννης Α. Πικραμμένος, Δρ. Μηχ. ΕΜΠ

ΣΠΑΡΤΗ, 2019

Copyright © Σπάρτη – Σεπτέμβριος, 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν 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 δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Τ.Ε.Ι. Πελοποννήσου.

ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ

"Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπογράφως ότι είμαι αποκλειστικός συγγραφέας της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, για την ολοκλήρωση της οποίας κάθε βοήθεια είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτομερώς στην εργασία αυτή. Έχω αναφέρει πλήρως και με σαφείς αναφορές, όλες τις πηγές χρήσης δεδομένων, απόψεων, θέσεων και προτάσεων, ιδεών και λεκτικών αναφορών, είτε κατά κυριολεξία είτε βάση επιστημονικής παράφρασης.

Αναλαμβάνω την προσωπική και ατομική ευθύνη ότι σε περίπτωση αποτυχίας στην υλοποίηση των ανωτέρω δηλωθέντων στοιχείων, είμαι υπόλογος έναντι λογοκλοπής, γεγονός που σημαίνει αποτυχία στην Πτυχιακή μου Εργασία και κατά συνέπεια αποτυχία απόκτησης του Τίτλου Σπουδών, πέραν των λοιπών συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων. Δηλώνω, συνεπώς, ότι αυτή η Πτυχιακή Εργασία προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από εμένα προσωπικά και αποκλειστικά και ότι, αναλαμβάνω πλήρως όλες τις συνέπειες του νόμου στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δε μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής άλλης πνευματικής ιδιοκτησίας."

Όνομα και Επώνυμο Συγγραφέα: ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

Υπογραφή (Ολογράφως, χωρίς μονογραφή):

Ημερομηνία :

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Έχοντας φτάσει στο τέλος της πτυχιακής μου εργασίας, αισθάνομαι υποχρεωμένος να μιλήσω για κάποιους ανθρώπους, που ο καθένας με τον δικό του τρόπο σηματοδότησε την πορεία των χρόνων μου στις προπτυχιακές σπουδές μου και να τους ευχαριστήσω.

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντά μου κύριο Πικραμμένο Ιωάννη του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής ΤΕ του Τ.Ε.Ι. Πελοποννήσου, για την καθοδήγησή του και την πολύτιμη βοήθειά του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας διότι η συνεργασία μαζί του ήταν ένας καταλύτης για την ολοκλήρωση των προπτυχιακών μου σπουδών. Η συνεργασία μας ξεκίνησε όταν ήμουν προπτυχιακός φοιτητής στο χειμερινό εξάμηνο του 2009 – 2010, στο μάθημα “Δίκτυα”. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την αμέριστη υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια, των προπτυχιακών σπουδών μου. Αφιερώνω αυτή την εργασία στους γονείς μου, ως ελάχιστη ευγνωμοσύνη για την κατανόηση και την υπομονή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Γραμματικός Παναγιώτης

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1	Εισαγωγή.....	10
1.1	Περιγραφή	10
1.2	Εξέλιξη	13
1.3	5G τεχνολογίες.....	15
2	Θεωρητικό Υπόβαθρο	17
2.1	Ιστορική Αναδρομή.....	19
2.2	Παρούσα κατάσταση της τεχνικής (state of the art).....	20
2.2.1	Κατευθυντική Ακτινοβολία: Ολογραφικές μετα-επιφάνειες	21
2.2.2	Κατευθυντική Ακτινοβολία διαβαθμισμένου Δείκτη μετα-φακοί.....	21
2.2.3	Καταστολή κατευθυνόμενων κυμάτων: EBG για τεχνολογία κενού κυματοδηγού	22
2.3	Θεωρία των μετα-υλικών	23
2.3.1	Κατάταξη και ιδιότητες.....	24
2.3.2	Επίδραση στο νόμο του Snell	25
2.3.3	Αρνητικό ϵ	26
2.3.4	Αρνητικό μ	26
3	Μετα-επιφάνειες.....	27
3.1	Μετα-επιφάνειες εμπέδησης.....	28
3.1.1	Μετα-επιφάνειες υψηλής εμπέδησης.....	28
3.1.2	Επιφάνειες ενεργής εμπέδησης.....	34
3.2	Μετα-επιφάνειες διαρρέοντος κύματος	37
3.2.1	Κεραία ομοιόμορφης μετα-επιφάνειας.....	38
3.2.2	Ολογραφικές μετα-επιφάνειες διαρρέοντος κύματος	40
3.3	Διαμορφωτές και πολωτές.....	43
4	Εφαρμογές και Προοπτικές.....	49
4.1	Μετα-υλικά σαν κεραία	49

4.1.1	Μετα-υλικά σαν απορροφητής.....	49
4.1.2	Μετα-υλικά σαν υπερ-φακοί.....	50
4.1.3	Μετα-υλικά σαν κάλυψη.....	51
4.1.4	Μετα-υλικά σαν αισθητήρες.....	51
4.2	Προοπτικές.....	52
5	Συμπεράσματα.....	53
6	Βιβλιογραφία.....	54

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1	Κεραίες τύπου Pillbox [15].....	18
Εικόνα 2	ολογραφική κεραία [16] και υλικά βαθμωτού δείκτη [17].	20
Εικόνα 3	Παραδείγματα κεραίας τοποθετημένης σε κενό κυματοδηγού [27]	23
Εικόνα 4	Κατάταξη μετα-υλικών βάση πρόσημου των ϵ , μ	24
Εικόνα 5	Διάταξη με υλικό αρνητικών τιμών ϵ και μ	25
Εικόνα 6	Διάθλαση με βάση το πρόσημο του δείκτη διάθλασης του υλικού	25
Εικόνα 7	Υλικά με αρνητικό ϵ και μ	26
Εικόνα 8	Στοιχειώδες τμήμα και δομή μετα-επιφάνειας.....	29
Εικόνα 9	Διάγραμμα απόκρισης συχνότητας με βάση την φάση.....	30
Εικόνα 10	Διάγραμμα απόκρισης τρόπων διάδοσης σε συνάρτηση με την συχνότητα..	31
Εικόνα 11	Διαγράμματα ακτινοβολίας κεραίας υψηλής εμπέδησης χαμηλού προφίλ.	32
Εικόνα 12	Χρήση επιφανειών υψηλής εμπέδησης ως αποσβεστήρας.	33
Εικόνα 13	Διάταξη ανακλαστήρα μετα-επιφάνειας με χρήση διόδων	34
Εικόνα 14	Αρχιτεκτονική επαναρυθμιζόμενη κεραίας με χρήση γραφένιου	35
Εικόνα 15	γραμμική αυτοεπιλεγόμενη επιφάνεια εμπέδησης	36
Εικόνα 16	Απόκριση τιμής εμπέδησης συναρτήσει της συχνότητας.....	37
Εικόνα 17	Διαμόρφωσης δέσμης ακτινοβολίας με βάση τις τάσεις τροφοδοσίας	39
Εικόνα 18	Ημιτονοειδώς διαμορφωμένη κεραία διαρροής γραφένιου	40
Εικόνα 19	Μοτίβο παρεμβολής.....	41
Εικόνα 20	πολυλειτουργική επιφάνεια που υποστηρίζει διπλή δέσμη και διπλή πόλωση ακτινοβολίας	42
Εικόνα 21	Νανο-κεραίες που περιστρέφονται περιοδικά και αλλάζουν τη φάση	45
Εικόνα 22	μετα-επιφάνειες βασιζόμενες σε οπτικούς διασκορπιστές	45
Εικόνα 23	ορθογώνιες μεταστροφικές επιφάνειες	46
Εικόνα 24	Απόκριση συχνότητας απλού υλικού και μετα-υλικού	49
Εικόνα 25	Αποσβεστήρας.....	50

Εικόνα 26	υπερ-φακός	51
Εικόνα 27	Κάλυψη	51
Εικόνα 28	Αισθητήρες	52

1 Εισαγωγή

Σκοπός της εργασίας είναι να παρουσιάσει την παρούσα κατάσταση στις τεχνολογίες υλικών με εξαιρετικές εφαρμογές στις επικοινωνίες δεδομένων όπως για παράδειγμα σε μοντέλα 5G. Η διάδοση των Η/Μ κυμάτων σε οδηγούς μπορεί να αξιοποιήσει τις ιδιότητες που αποκτούν με τεχνητό τρόπο ώστε η επιφάνεια να συμπεριφέρεται επιλεκτικά στο διαδιδόμενο κύμα. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να διαμορφωθούν επιφάνειες ή ακόμα και τρισδιάστατες δομές όπου με χρήση συμμετρίας να επιτευχθούν βέλτιστα χαρακτηριστικά των οδηγών αλλά και των κεραιών, με παράδειγμα την δυναμική διαμόρφωση (scanning) λοβού ακτινοβολίας σε μονοδιάστατο επίπεδο, εφαρμογή εξαιρετικής σημασίας για τεχνολογίες 5G όπως για παράδειγμα σε επιβατηγές μεταφορές υψηλών ταχυτήτων.

1.1 Περιγραφή

Η ασύρματη τεχνολογία της πέμπτης γενιάς προκαλεί πολλούς ενθουσιασμούς στον κλάδο των τηλεπικοινωνιών αλλά και διαφορές απόψεων. Μερικοί βλέπουν το 5G ως την επόμενη εξέλιξη στις ασύρματες επικοινωνίες, υποσχόμενοι υψηλότερα ποσοστά εύρους ζώνης και ρυθμούς δεδομένων, με σημαντικά λιγότερες καθυστερήσεις μετάδοσης. Άλλοι, ωστόσο, λένε ότι η τεχνολογία θα είναι επαναστατική, επιτρέποντας μια σειρά από νέες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των ανθρωποειδών ρομπότ, των συνδεδεμένων αυτοκινήτων και του Διαδικτύου των πραγμάτων, με τα δισεκατομμύρια των συσκευών που είναι φορτωμένα με ενσωματωμένους αισθητήρες.

Οι εταιρείες έχουν ξεκινήσει να κατασκευάζουν δίκτυα 5G, παρόλο που ακόμη εκκρεμούν θέματα όπως ο καθορισμός προτύπων για τη διασφάλιση της διαλειτουργικότητας και η περιγραφή των απαιτήσεων ασφαλείας. Ο τρόπος με τον οποίο τα πρώτα δίκτυα 5G, που αναμένεται να κάνουν το ντεμπούτο τους το 2020, θα είναι σημαντικός λόγω των επιπτώσεων που θα έχουν στις επιχειρήσεις που βασίζονται σε κυψέλες και στις υπηρεσίες πολυμέσων.

Ανησυχώντας για το γεγονός ότι δεν εξετάζονται ζωτικά ζητήματα αναλήφθηκε από διεθνή οργανισμό πρωτοβουλία με σκοπό να εμπλέξει τη βιομηχανία, την πολιτεία και τον ακαδημαϊκό κόσμο να συνεργαστούν και να

θέσουν τα θεμέλια έτσι ώστε να μπορούν να υλοποιηθούν οι ευκαιρίες που προβλέπονται για το 5G. Η πρωτοβουλία διοικείται από μια συντονιστική επιτροπή και οργανώνεται από ομάδες εργασίας που καλύπτουν την εκπαίδευση, τα γεγονότα, τις δημοσιεύσεις, τα πρότυπα και άλλους τομείς.

Σε όλο το ιστορικό των κινητών επικοινωνιών, οι ταχύτητες δεδομένων έχουν αυξηθεί εκθετικά σε κάθε νέα γενιά (Generation) του δικτύου. Αυτό θα συμβαίνει και με το 5G (5^η γενιά), αλλά αναμένονται πολλά περισσότερα όπως βελτιωμένη απόδοση, χωρητικότητα και ταχύτητα, καθώς και ένα δίκτυο που λειτουργεί παγκοσμίως, ανεξάρτητα από το πού ή από ποια συσκευή συνδέεται ένας χρήστης.



1

Οι πάροχοι θα εστιάσουν στην προσπάθεια να μειώσουν τις καθυστερήσεις στον χρόνο μετάδοσης αφού η ανάλογη καθυστέρηση στο 5G αναμένεται να

¹ *iStockphoto*

είναι μικρότερη από 1 χιλιοστό του δευτερολέπτου. Τα δίκτυα 4G έχουν καθυστέρηση διάδοσης 25 χιλιοστών του δευτερολέπτου. Η καθυστέρηση διάδοσης είναι ο χρόνος που απαιτείται για ένα πακέτο δεδομένων να μεταδοθεί από ένα σημείο προώθησης σε ένα άλλο. Η λανθάνουσα κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας είναι ιδιαίτερα σημαντική για εφαρμογές όπως η αυτόματη οδήγηση αυτοκινήτων και οι χειρουργικές επεμβάσεις με ρομπότ, όπου η παραμικρή καθυστέρηση στο χρόνο μετάδοσης μπορεί να σημαίνει ζωή ή θάνατο.

Όμως ο συγχρονισμός με τις τελευταίες τεχνολογίες δεν θα είναι αρκετός. Τα νέα δίκτυα θα πρέπει να χειρίζονται δισεκατομμύρια συσκευές που αναμένονται από το IoT και άλλες, νέες εφαρμογές. Πρέπει να παρέχει συνδέσεις 100 φορές πιο γρήγορες από τις τρέχουσες ταχύτητες δικτύου. Αυτό υποστηρίζεται αποδοτικά από τα δίκτυα που ορίζονται από το λογισμικό (SDN) και την εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου (NFV). Οι τεχνικές αυτές υποστηρίζουν την ευελιξία και τη δυναμική του αυξανόμενου αριθμού προηγμένων και έξυπνων τερματικών μηχανών στις απολήξεις των δικτύων. Τα SDN μπορούν να παρέχουν βελτιωμένες ταχύτητες και χαμηλότερη καθυστέρηση, ενώ εξαλείφουν τα σημεία συμφόρησης.

- Το SDN αποσυνδέει το υλικό από λογισμικό. Το λογισμικό εκτελείται όχι απαραίτητα στον εξοπλισμό, αλλά ίσως στο σύννεφο ή σε συστοιχίες καταμεμημένων διακομιστών. Αυτό σημαίνει ότι τα δίκτυα θα μπορούσαν να κατασκευαστούν και να αναμορφωθούν κεντρικά με αυτοματοποιημένο τρόπο, αντί να έχουν οι υπεύθυνοι δικτύων να μεταπηδούν από συσκευή σε συσκευή για να κάνουν αλλαγές ή και αναβαθμίσεις χειροκίνητα.
- Το NFV συνδυάζεται συχνά με SDN. Η ιδέα χρησιμοποιεί εικονικούς πόρους και άλλες τεχνολογίες υπολογιστικού σύννεφου όπως εντοπισμός, κατάτμηση δικτύων και Mobile Edge Computing για τη μετεγκατάσταση λειτουργιών δικτύου από ειδικό υλικό σε εικονικές μηχανές που λειτουργούν με υλικό γενικού σκοπού. Το NFV μπορεί να ενισχύσει την ταχύτητα, την ευελιξία και την αποδοτικότητα όταν αναπτυχθεί με τις νέες υπηρεσίες που αναμένεται να εισαχθούν από το 5G. Τα στοιχεία μπορούν να αναβαθμιστούν για να ικανοποιήσουν τις ανάγκες ενός παρόχου υπηρεσιών.
- Το Mobile Edge Computing (MEC) είναι μια έννοια αρχιτεκτονικής δικτύου που επιτρέπει τις δυνατότητες του cloud computing και ένα περιβάλλον υπηρεσιών πληροφορικής στην άκρη του κυψελοειδούς δικτύου και γενικότερα στην άκρη οποιουδήποτε δικτύου [1] [2]. Η βασική ιδέα πίσω από το MEC είναι ότι με την εκτέλεση εφαρμογών και την εκτέλεση σχετικών εργασιών επεξεργασίας πιο κοντά στον κυτταρικό πελάτη,

μειώνεται η συμφόρηση του δικτύου και οι εφαρμογές λειτουργούν καλύτερα [4]. Η τεχνολογία MEC έχει σχεδιαστεί για να εφαρμοστεί στους κυψελωτούς σταθμούς βάσης ή άλλους ακρογωνιαίους κόμβους και επιτρέπει την ευέλικτη και ταχεία ανάπτυξη νέων εφαρμογών και υπηρεσιών για τους πελάτες. Συνδυάζοντας στοιχεία της τεχνολογίας της πληροφορίας και της τηλεπικοινωνιακής δικτύωσης, η MEC επιτρέπει επίσης στους παρόχους τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών κυψέλης να ανοίξουν το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης (RAN) σε εξουσιοδοτημένους τρίτους, όπως οι προγραμματιστές εφαρμογών και οι πάροχοι περιεχομένου [5].

1.2 Εξέλιξη

Η τρέχουσα κατάσταση της τεχνολογίας 5G για τα κυψελοειδή συστήματα βρίσκεται σε μεγάλο βαθμό στα αρχικά στάδια ανάπτυξης. Πολλές εταιρείες εξετάζουν τις τεχνολογίες που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να γίνουν μέρος του συστήματος. Επιπλέον, πολλά πανεπιστήμια έχουν δημιουργήσει ερευνητικές μονάδες 5G με επίκεντρο την ανάπτυξη των τεχνολογιών για 5G. Εκτός αυτού, οι φορείς τυποποίησης, ιδιαίτερα το 3GPP, γνωρίζουν την εξέλιξη αλλά δεν σχεδιάζουν ενεργά τα συστήματα 5G ακόμα.

Πολλές από τις τεχνολογίες που θα χρησιμοποιηθούν για το 5G θα αρχίσουν να εμφανίζονται στα συστήματα που χρησιμοποιούνται για το 4G και στη συνέχεια καθώς το νέο 5G σύστημα αρχίζει να διαμορφώνει με πιο συγκεκριμένο τρόπο, θα ενσωματωθούν στο νέο κυψελοειδές σύστημα 5G.

Καθώς οι διάφορες γενιές των κυψελοειδών τηλεπικοινωνιών έχουν εξελιχθεί, ο καθένας έχει φέρει τις δικές του βελτιώσεις. Το ίδιο ισχύει και για την τεχνολογία 5G.

- Πρώτη γενιά, 1G: Αυτά τα τηλέφωνα ήταν αναλογικά και ήταν τα πρώτα κινητά ή κυψελωτά τηλέφωνα που θα χρησιμοποιηθούν. Αν και επαναστατικοί στην εποχή τους, προσέφεραν πολύ χαμηλά επίπεδα απόδοσης και ασφάλειας φάσματος.
- Δεύτερη γενιά, 2G: Βασίζονταν στην ψηφιακή τεχνολογία και προσφέρουν πολύ καλύτερη απόδοση ραδιοφάσματος, ασφάλεια και νέα χαρακτηριστικά όπως μηνύματα κειμένου και επικοινωνίες χαμηλού ρυθμού δεδομένων.
- Τρίτη γενιά, 3G: Στόχος αυτής της τεχνολογίας ήταν η παροχή δεδομένων υψηλής ταχύτητας. Η αρχική τεχνολογία βελτιώθηκε για να επιτρέψει δεδομένα έως 14 Mbps και περισσότερα.

- Τέταρτη γενιά, 4G: Αυτή ήταν μια τεχνολογία βασισμένη σε IP, ικανή να παρέχει ταχύτητες δεδομένων μέχρι 1 Gbps.

Οποιαδήποτε νέα κυψελωτή τεχνολογία 5ης γενιάς πρέπει να προσφέρει σημαντικά κέρδη σε σχέση με τα προηγούμενα συστήματα, ώστε να παρέχει μια κατάλληλη επιχειρηματική περίπτωση για τους φορείς εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας να επενδύουν σε οποιοδήποτε νέο σύστημα. Οι εγκαταστάσεις που μπορεί να παρατηρηθούν με την τεχνολογία 5G περιλαμβάνουν πολύ καλύτερα επίπεδα συνδεσιμότητας και κάλυψης. Ο όρος World Wide Wireless Web, ή το WWW εισάγεται για αυτό.

Για να επιτευχθεί αυτή η τεχνολογία 5G, απαιτούνται νέες μέθοδοι σύνδεσης, καθώς ένα από τα βασικά μειονεκτήματα με τις προηγούμενες γενιές είναι η έλλειψη κάλυψης, οι μειωμένες κλήσεις και η χαμηλή απόδοση στις άκρες των κυψελών. 5G τεχνολογία θα πρέπει να αντιμετωπίσει αυτό. Καθώς οι εργασίες μετακινούνται προς τα εμπρός στους οργανισμούς τυποποίησης, οι προδιαγραφές υπέρβασης για το σύστημα κινητών επικοινωνιών έχουν καθοριστεί από την ITU ως μέρος του IMT2020. Τα ισχύοντα σήμερα πρότυπα για το 5G συνοψίζονται παρακάτω:

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΑΠΟΔΟΣΗ
Ρυθμός μετάδοσης	Τουλάχιστον 20Gbps κατερχόμενη ζεύξη και 10Gbps ζεύξη ανά κινητό σταθμό βάσης. Αυτό αντιπροσωπεύει εικοσαπλάσια (x20) αύξηση στην κατερχόμενη ζεύξη έναντι αυτής στην περίπτωση της LTE.
Πυκνότητα σύνδεσης	Τουλάχιστον 1 εκατομμύριο συνδεδεμένες συσκευές ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο (για να είναι δυνατή η υποστήριξη του IoT).
Κινητικότητα	0km / h έως "500km / h ταχύτητα οχημάτων" πρόσβαση.
ενεργειακή απόδοση	Η προδιαγραφή 5G απαιτεί ραδιοδιεργασίες που είναι ενεργειακά αποδοτικές όταν βρίσκονται υπό φορτίο, αλλά επίσης πέφτουν γρήγορα σε λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας όταν δεν χρησιμοποιούνται.
φασματική απόδοση	30bits / Hz downlink και 15 bits / Hz uplink. Αυτό προϋποθέτει 8x4 MIMO (8 χωρικά επίπεδα κάτω, 4 χωρικά επίπεδα επάνω).
Ρυθμοί μετάδοσης σε πραγματικές	Η απαίτηση "μόνο" απαιτεί ταχύτητα λήψης ανά χρήστη

συνθήκες	100Mbps και ταχύτητα φόρτωσης 50Mbps.
Καθυστέρηση	Υπό ιδανικές συνθήκες, τα δίκτυα 5G πρέπει να προσφέρουν στους χρήστες μέγιστη καθυστέρηση μόλις 4ms (σε σύγκριση με 20ms για LTE).

Το κινητό σύστημα κυψελοειδών επικοινωνιών 5G θα αποτελέσει σημαντική αλλαγή στον τρόπο λειτουργίας των δικτύων κινητής επικοινωνίας. Για να επιτευχθεί αυτό απαιτείται ένα εντελώς νέο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης και ένα νέο κεντρικό δίκτυο για την παροχή της απαιτούμενης απόδοσης. Παραδείγματα:

- **5G Νέο ραδιόφωνο:** Αποτελείται από τα διάφορα στοιχεία που απαιτούνται για το νέο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης. Χρησιμοποιώντας μια πολύ πιο ευέλικτη τεχνολογία, το σύστημα είναι σε θέση να ανταποκριθεί στις διαφορετικές και μεταβαλλόμενες ανάγκες των χρηστών κινητής τηλεφωνίας είτε πρόκειται για έναν μικρό κόμβο IoT είτε για έναν υψηλό χρήστη δεδομένων, σταθερό ή κινητό.
- **5G NextGen Δίκτυο Κορμού:** Παρόλο που οι αρχικές αναπτύξεις του 5G θα χρησιμοποιήσουν το κεντρικό δίκτυο των δικτύων LTE ή πιθανώς και των 3G, ο απώτερος στόχος είναι να έχουμε ένα νέο δίκτυο ικανό να χειριστεί τους πολύ υψηλότερους όγκους δεδομένων ενώ παράλληλα θα είναι σε θέση να παρέχει πολλά χαμηλότερο επίπεδο καθυστέρησης.

1.3 5G τεχνολογίες

Υπάρχουν πολλές νέες τεχνολογίες και τεχνικές 5G που συζητούνται και αναπτύσσονται για να συμπεριληφθούν στα πρότυπα 5G. Αυτές οι νέες τεχνολογίες και τεχνικές θα επιτρέψουν στην 5G να παρέχει μια πιο ευέλικτη και δυναμική υπηρεσία. Οι τεχνολογίες που αναπτύσσονται για το 5G περιλαμβάνουν:

- **Επικοινωνία με κύμα μήκους χιλιοστού:** Χρησιμοποιώντας συχνότητες πολύ υψηλότερες στο φάσμα συχνοτήτων (1 - 2 GHz) δίνεται η δυνατότητα για περισσότερο εύρος ζώνης καναλιού. Ωστόσο, αυτό δημιουργεί νέες προκλήσεις για την ανάπτυξη φορητών ακουστικών όπου χρησιμοποιούνται σήμερα μέγιστες συχνότητες περίπου 2 GHz και εύρος ζώνης 10-20 MHz. Για το 5G, λαμβάνονται υπόψη συχνότητες άνω των 50GHz και αυτό θα παρουσιάσει μερικές πραγματικές προκλήσεις όσον αφορά τον σχεδιασμό κυκλώματος, την τεχνολογία και τον τρόπο που

χρησιμοποιείται το σύστημα, καθώς αυτές οι συχνότητες δεν ταξιδεύουν ως τώρα και απορροφούνται σχεδόν εξ ολοκλήρου από τα εμπόδια . Οι διαφορετικές χώρες κατανέμουν διαφορετικό φάσμα για το 5G.

- **Κυματομορφές:** Μια σημαντική περιοχή ενδιαφέροντος είναι αυτή των νέων κυματομορφών. Το OFDM χρησιμοποιήθηκε με μεγάλη επιτυχία σε 4G LTE καθώς και σε άλλα συστήματα υψηλών ρυθμών δεδομένων, αλλά έχει κάποιες περιορισμένες δυνατότητες σε ορισμένες περιπτώσεις. Άλλες μορφές κυματομορφών που συζητούνται περιλαμβάνουν:
 - GFDM, Generalised Frequency Division Multiplexing [7]
 - FBMC Filter Bank Multi-Carrier [8]
 - UFMC, Universal Filtered MultiCarrier [9].
 - Δεν υπάρχει τέλεια κυματομορφή και είναι πιθανό το OFDM με τη μορφή OFDMA να χρησιμοποιείται καθώς αυτό παρέχει εξαιρετική συνολική απόδοση χωρίς να είναι πολύ βαρύ στο επίπεδο επεξεργασίας που απαιτείται.
- **Πολλαπλή πρόσβαση:** Πάλι μια ποικιλία νέων συστημάτων πρόσβασης διερευνάται για την τεχνολογία 5G. Έχουν αναφερθεί τεχνικές όπως οι OFDMA, SCMA, NOMA [10], PDMA [11], MUSA [12] και IDMA [13]. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, φαίνεται ότι η πιο πιθανή μορφή θα μπορούσε να είναι το OFDMA.
- **Μαζικό MIMO με καθοδήγηση δέσμης:** Αν και το MIMO χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές από LTE σε Wi-Fi κ.λπ., ο αριθμός των κεραιών είναι αρκετά περιορισμένος. Χρησιμοποιώντας τις συχνότητες μικροκυμάτων ανοίγει η δυνατότητα χρήσης πολλών δεκάδων κεραιών σε ένα μόνο εξοπλισμό γίνεται μια πραγματική δυνατότητα λόγω των μεγεθών και των αποστάσεων της κεραίας ως προς το μήκος κύματος. Αυτό θα επέτρεπε την καθοδήγηση δέσμης για την παροχή βελτιωμένων επιδόσεων.
- **Πυκνά δίκτυα:** Η μείωση του μεγέθους των κυψελών παρέχει μια πολύ πιο γενική αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου φάσματος. Απαιτούνται τεχνικές για να διασφαλιστεί ότι τα μικρά κύτταρα στο μακρο-δίκτυο και τα οποία αναπτύσσονται ως φεμτοκύτταρα λειτουργούν ικανοποιητικά. Υπάρχει μια σημαντική πρόκληση για την προσθήκη τεράστιου αριθμού πρόσθετων κελιών σε ένα δίκτυο και αναπτύσσονται τεχνικές που επιτρέπουν αυτό.

2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Η δράση θα διερευνήσει τις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες μιας νέας τάξης τεχνητά επεξεργασμένες επιφάνειες και υλικά και κατά συνέπεια να αποκτήσουν την ικανότητα να σχεδιάζουν σκόπιμα τις ιδιότητές τους σύμφωνα με τις απαιτούμενες εφαρμογές. Αυτά τα τεχνητά υλικά θα επιτρέψουν την ανάπτυξη νέων συσκευών για τη μελλοντική επικοινωνιακή υποδομή της αυριανής κοινωνίας. Οι μεγαλύτερες ροές δεδομένων και οι κοινές πλατφόρμες μεταξύ υπηρεσιών και χρηστών ήδη υποκινούν μια επανάσταση. Αυτή αφορά προσεγγίσεις επεξεργασίας δεδομένων και τεχνολογίες συσκευών σε διαφορετικά περιβάλλοντα, δηλαδή την επόμενη γενιά 5G. Εν τω μεταξύ, οι δορυφορικές επικοινωνίες κινούνται ανοδικά προς τη ζώνη Ka (17,7-21,2 και 27,5-31 GHz για τον πομπό και τον δέκτη, αντίστοιχα) όπου είναι διαθέσιμο περισσότερο εύρος ζώνης και μπορεί να μειωθεί το μέγεθος του τερματικού [14]. Αυτές οι νέες παγκόσμιες τάσεις θα να είναι ζωτικής σημασίας για τη συνεκτικότητα της σύγχρονης κοινωνίας. Η παραγωγικότητα της εργασίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα της ανταλλαγής πληροφοριών και των συνδέσεων δικτύου. Αφενός, συνδέσεις υψηλής ταχύτητας δεδομένων είναι αναγκαία για την εφαρμογή της ανταλλαγής πληροφοριών που απαιτούνται από τις έξυπνες πόλεις. Από την άλλη πλευρά, το η εφαρμογή συνδέσεων χαμηλού κόστους στις αγροτικές περιοχές θα φτάσει σε μεγαλύτερο πληθυσμό και θα προσφέρει (ηλεκτρονική υγεία, βελτιωμένη ασφάλεια, έλεγχος της κυκλοφορίας κλπ.) βελτιώνοντας δραστικά τις συνθήκες ζωής.

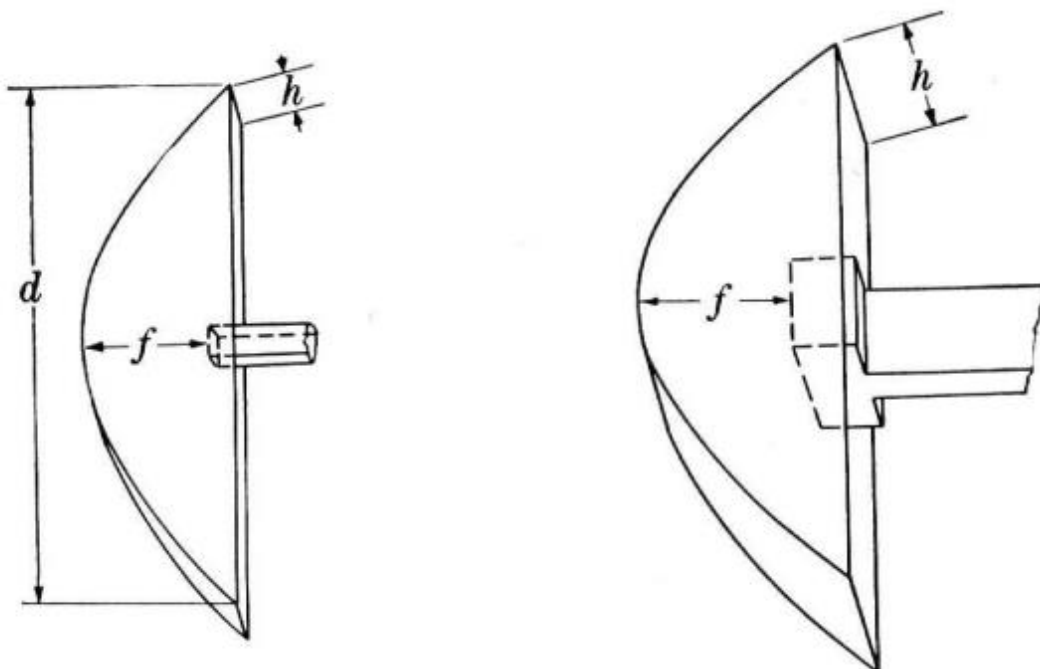
Επιπλέον, οι συνδέσεις στα κινούμενα οχήματα καθίστανται όλο και πιο σημαντικές όχι μόνο για παραδοσιακές μεταφορές, όπως σε τρένα και αεροπλάνα, αλλά και σε ό, τι αφορά τις νέες εξελίξεις στην περιοχή σχεδιασμό αυτόνομων αυτοκινήτων, που αναμένεται να φτάσουν σύντομα στην ευρύτερη αγορά. Είναι ενδιαφέρον, το ίδιο οι τεχνολογικές προκλήσεις αντιμετωπίζονται στις δομές διαστημικής παρατήρησης, όπου απαιτούνται εκτελέσεις για να κατανοήσουμε καλύτερα την προέλευση και τη σύνθεση του κόσμου μας.

Ωστόσο, αυτές οι νέες παγκόσμιες τάσεις μπορούν να ικανοποιηθούν μόνο εάν μια νέα κατηγορία συσκευών επικοινωνίας καθίσταται διαθέσιμο, ικανό να εκπέμπει και να δέχεται ηλεκτρομαγνητικά κύματα κατά τρόπο συμβατό με τα ολοένα και πιο απαιτητικά πρότυπα μελλοντικής παραγωγής. Θα είναι ευρύ εύρος ζώνης, ελαφρύς, χαμηλού κόστους, συμβατό και πολύ χαμηλό

προφίλ (π.χ., για αισθητικούς ή αεροδυναμικούς λόγους για μετακίνηση) και είναι εύκολο να σχεδιαστεί.

Επιπλέον, δυνατότητα κατεύθυνσης της δέσμης (σάρωση) ή τουλάχιστον μετακίνησης της δέσμης απαιτείται εάν όταν διαφορετικές υπηρεσίες μοιράζονται από κοινού μεταξύ των χρηστών και όταν οι συσκευές είναι ενσωματωμένες σε πλατφόρμες κινητών επικοινωνιών. Τέλος, θα πρέπει να είναι εύκολο να ενσωματωθούν σε κυκλώματα κατάλληλα για την ανάπτυξη κεραιών όπου τα δίκτυα μεταξύ των κυκλωμάτων και των κεραιών μειώνονται ή αναιρούνται, μειώνοντας έτσι το μέγεθος και την πολυπλοκότητα και αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία. Δυστυχώς δίκτυα σχηματισμού δεσμών (BFN) είναι επί του παρόντος πολύ ογκώδη, ζημιογόνα, βαριά και δεν είναι εύκολο να κατασκευαστούν και να ενσωματωθούν. Παραδείγματα είναι

- διηλεκτρικοί φακοί,
- παραβολικά συστήματα,
- επίπεδη κεραία ηλεκτρομηχανολογικής σάρωσης,
- συστοιχίες κεραιών.



Εικόνα 1 Κεραίες τύπου Pillbox [15]

Τα Pillboxes είναι ελκυστικές λύσεις, αλλά εξακολουθούν να μην έχουν την ευελιξία να διαμορφώνουν αυθαίρετα το σχέδιο ακτινοβολίας, απαιτούν ένα

διηλεκτρικό (που οδηγεί σε απώλειες) και δεν είναι πλήρως επίπεδες. Πρόσφατα, οι ερευνητές πρότειναν συσκευές βασισμένες σε μεταλλικά υλικά, δηλαδή συσκευές που βασίζονται σε τεχνητό υλικό / επιφάνειες. Συνειδητοποιούνταν από την ενσωμάτωση περιοδικής διευθέτησης των αντικειμένων με μήκος κύματος σε ένα μέσο ξενιστή, με περιοδικότητα κατά μήκος δύο κατευθύνσεις (μετα-επιφάνειες) ή τρεις κατευθύνσεις (μετα-υλικά). Ωστόσο, αρκετές απαιτήσεις δεν αντιμετωπίζονται ακόμη από τα υπάρχοντα τεχνητά υλικά: έχουν σημαντικό περιορισμό όσον αφορά το εύρος ζώνης, τη σάρωση δέσμης και τις απώλειες, που τους εμποδίζουν να είναι που χρησιμοποιούνται σε πρακτικές συσκευές.

2.1 Ιστορική Αναδρομή

Περιοδικές ηλεκτρομαγνητικές δομές υψηλής συμμετρίας αναφέρθηκαν για πρώτη φορά την δεκαετία του 1970 σε σχέση με μεταλλικούς κυματοδηγούς [3]. Εντούτοις δεν επηρέασαν σημαντικά την έρευνα μέχρι σήμερα. Τα πράγματα έχουν αλλάξει χάρη σε πρόσφατες προόδους της έρευνας:

- στην πολύ πρόσφατη ανάπτυξη των μετα-επιφανειών, των επίπεδων φακών και των υλικών EBG (από το 2010),
- στις προηγμένες μελέτες σε τεχνητά ηλεκτρομαγνητικά υλικά (2000-σήμερα),
- στην απαίτηση για συνδέσεις υψηλής ποιότητας στη σύγχρονη κοινωνία μας.

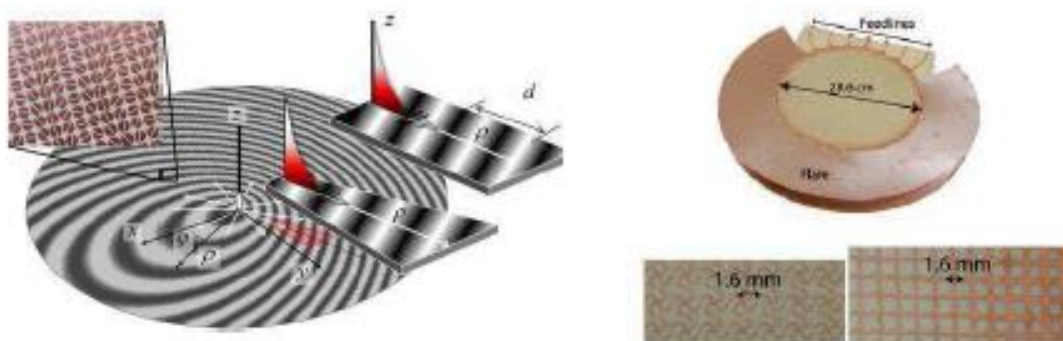
Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, πρόσφατα ανακαλύφθηκαν νέες ιδιότητες υλικών υψηλής συμμετρίας για τις κεραίες φακού σάρωσης δέσμης UWB καθώς και τα υλικά EBG. Λόγω του μεγάλου ενδιαφέροντος για τις κεραίες και την διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας η περαιτέρω διερεύνηση των παραπάνω αυτή τη στιγμή μπορεί να προσφέρει σημαντική επιστημονική και οικονομική εξέλιξη. Ορισμένες μεγάλες βιομηχανίες μπορούν να αναφερθούν ως τελικοί χρήστες για τα αποτελέσματα της έρευνας, όπως ως ευρωπαϊκές σιδηροδρομικές εταιρείες μεγάλης ταχύτητας, εταιρείες και πρακτορεία αεροπορικών και διαστημικών εταιρειών κλπ.

Στην κοινότητα της φυσικής, πολλές προσπάθειες αφιερώνεται τώρα στη μελέτη περιοδικών δομών με ειδικές συμμετρίες που περιλαμβάνουν χώρο και χρόνο. Όπως επιβεβαιώθηκε από το Βραβείο Νόμπελ Φυσικής του 2016 για το ανακάλυψη "τοπολογικών μονωτών", υπάρχει μεγάλη υπόσχεση στην εφαρμογή της τοπολογίας για τον έλεγχο της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Πράγματι, οι "τεχνητοί τοπολογικοί μονωτήρες" για τα

ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι τώρα αντικείμενο έντονης έρευνα, παρέχοντας δυνητικά χρήσιμες ιδιότητες όπως ο προστατευμένος περιορισμός της εκπομπής άκρης. Αυτά τα μετα-υλικά μπορούν να απαιτούν πλέγματα χρόνου μη αναστρέψιμων διασκορπιστών (π.χ. γυροτροπικοί υλικοί), αλλά εξετάζονται επίσης λύσεις που χρησιμοποιούν αμετάβλητες διασκορπιστές χρονικής αναστροφής. Ακόμα κι αν αυτά τα νέα μέσα δεν είναι επί του παρόντος έτοιμα για πρακτικές συσκευές χαμηλού κόστους, η δράση αυτή θα αφιερώσει επίσης προσπάθειες τη μελέτη τους. Η συμμετοχή των τελικών χρηστών στη Δράση θα βοηθήσει στη διερεύνηση και τον εντοπισμό πιθανών πρακτικές εφαρμογές που δεν είναι ακόμη εμφανείς για πρακτικές συσκευές. Συμπερασματικά, τώρα είναι η κατάλληλη στιγμή για την Ευρώπη να επενδύσει σε υψηλότερα συμμετρικά τεχνητά υλικά : Η Ευρώπη πρέπει να καθορίσει κοινές στρατηγικές και να καθιερώσει κοινές μεθόδους για την ικανοποίηση των μελλοντικών κοινωνικών αναγκών. Η παρουσία στο ίδιο δίκτυο των κύριων φορέων έρευνας και ανάπτυξης στον τομέα της οι μεταστροφές θα τονώσουν την ανάπτυξη μιας ενιαίας προσέγγισης προς ένα νέο πρότυπο την τεχνολογία και την πιθανή εφαρμογή και οφέλη της. Αυτή είναι μια κρίσιμη χρονική στιγμή για την έρευνα αυτό το θέμα, καθώς η τεχνολογία ωριμάζει γρήγορα, και αυτή η Δράση θα συμβάλει στη δημιουργία δυνατοτήτων πλεονέκτημα για την Ευρώπη σε σχέση με άλλες χώρες όπως οι ΗΠΑ ή η Κίνα που συνεχίζουν να επενδύουν έντονα στην έρευνα σε τεχνητά υλικά.

2.2 Παρούσα κατάσταση της τεχνικής (state of the art)

Δεδομένου ότι οι συσκευές επικοινωνίας για αστικό περιβάλλον και κινούμενα οχήματα χρειάζονται λύσεις χαμηλού προφίλ, οι εφαρμογές ακτινοβολίας που περιγράφονται εδώ αφορούν τις μετα-επιφάνειες για ολογραφικές κεραίες και για τεχνητούς επίπεδους φακούς. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι μετα-επιφάνειες θα πρέπει να είναι κατάλληλα προσανατολισμένες κάθετα προς την επιφάνεια αναφοράς έτσι ώστε να μπορούσαν να τα ταξινομήσουν ως μετα-υλικά παρά ως μετα-επιφάνειες.



Εικόνα 2 ολογραφική κεραία [16] και υλικά βαθμωτού δείκτη [17].

Η διάκριση είναι κυρίως θέμα της ονοματολογίας, και ο όρος metasurface θα διατηρηθεί στο υπόλοιπο τμήμα του κειμένου. Η έρευνα για πιθανές υψηλότερες συμμετρίες των πλήρως τρισδιάστατων αντικειμένων θα συνεχιστεί, για να αξιολογηθεί αν η προσθήκη μιας τρίτης διάστασης περιοδικότητας μπορεί να φέρει πλεονεκτήματα στις εφαρμογές παρά τη δυσκολία κατασκευής. Επίσης δεν θα εξεταστούν οι μετα-επιφάνειες από την άποψη της μετάδοσης / αντανάκλασης ακτινοβολίας και η προκύπτουσα ολοκληρωμένη δομή δεν είναι χαμηλού προφίλ.

2.2.1 Κατευθυντική Ακτινοβολία: Ολογραφικές μετα-επιφάνειες

Η παρουσία μιας τεχνητής υφής που εκτυπώνεται σε μια επιφάνεια τροποποιεί την κατάσταση των ορίων που εφαρμόζεται τα επαπτόμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, αναλογικά μεταξύ τους μέσω της επιφάνειας αντίστασης Z . Μια κατευθυνόμενη ομοιογενής μετα-επιφάνεια μπορεί να επιτρέψει τη διάδοση των επιφανειακών κυμάτων κατά μήκος μιας κατεύθυνσης και την αποτροπή της κατά μήκος μιας άλλης [18]. Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας μπορούν επίσης να ληφθούν μέσω ενός χωρική διαμόρφωση της σύνθετης αντίστασης Z [19]. Μόλις τροφοδοτηθεί με επιφανειακά κύματα η διαμορφωμένη μετα-επιφάνεια μπορεί να μετατρέψει το επιφανειακό κύμα σε κύμα ακτινοβολίας. Με τον τρόπο αυτό υλοποιείται η απαίτηση χαμηλού-προφίλ, χαμηλού κόστους και ελαφριάς κατασκευής συσκευή ακτινοβολίας. Αυτές ονομάζονται ολογραφικές κεραίες, επειδή η διαμόρφωση του Z μπορεί να οριστεί κατά προσέγγιση με ολογραφικές τεχνικές [20].

Από την άλλη πλευρά, σημαντικά μειονεκτήματα δεν έχουν ακόμη αντιμετωπιστεί πλήρως. Δηλαδή, περιορισμένη ευελιξία είναι διαθέσιμη για διαμορφώσεις πολλαπλών πηγών για κεραίες πολλαπλών δεσμών. Επιπλέον, η εξάρτηση της σύνθετης αντίστασης μπορεί να περιορίσει τις εφαρμογές υπερευρείας ζώνης (UWB). Τέλος ενώ η χρήση μη-συντονιστικών στοιχείων θεωρείται συνήθως ότι έχει ως αποτέλεσμα χαμηλές απώλειες, η παρουσία διηλεκτρικού υποστρώματος μπορεί να επηρεάσει τις συνολικές απώλειες

2.2.2 Κατευθυντική Ακτινοβολία διαβαθμισμένου Δείκτη μετα-φακοί

Άλλες ενδιαφέρουσες επίπεδες δομές χαμηλού προφίλ, οι οποίες μπορούν επίσης να παράσχουν κατευθυντική ακτινοβολία που παρέχουν σάρωση δέσμης, είναι βαθμωτού δείκτη μετα-φακοί. Αυτοί μπορούν να υλοποιηθούν

ενσωματώνοντας μια τεχνητή επιφάνεια σε έναν κυματοδηγό παράλληλης πλάκας [21] - [23]. Η τεχνητή υφή χρησιμοποιείται εδώ για να συνθέσει έναν αποτελεσματικό δείκτη διαθλάσεως μέσα στο κυματοδηγό παρά μια αποτελεσματική σύνθετη αντίσταση στην επιφάνεια. Με τη διαμόρφωση των ιδιοτήτων της υφής κατά μήκος της επιφάνειας μπορούμε να επιτύχουμε μια διαμόρφωση του δείκτη διαθλάσεως και να πραγματοποιήσει έναν φακό βαθμωτού δείκτη εντός του κυματοδηγού, χωρίς τη χρήση διηλεκτρικών. Ενώ ο κυματοδηγός είναι κλειστό περιβάλλον, στο τέλος του μπορεί να σχεδιαστεί μια διάταξη για να ακτινοβολεί όπως μια σχισμή, μια συστοιχία σχισμών, ή κάποια άλλη μετα-επιφάνεια. Το σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με οι ολογραφικές κεραίες οφείλονται στην τεράστια βιβλιογραφία σχετικά με τις διαμορφώσεις των φακών: μπορούν να εκτελέσουν σάρωση δέσμης (όπως ένας φακός του Luneburg), να εστιάσουν σε ορισμένες περιοχές και όχι σε άλλες (Maxwell μάτι ψαριού), και μπορούν να συντεθούν με την εφαρμογή οπτικών μετασχηματισμών [24], [25] για να χαλαρώσουν τους περιορισμούς στο σχήμα τους.

Ωστόσο, αυτές οι δομές έχουν επίσης συνήθως περιορισμούς ως προς το λειτουργικό εύρος ζώνης λόγω τη συμπεριφορά του τεχνητού υλικού μέσα στο κυματοδηγό. Επίσης, η παρουσία ενός διηλεκτρικού μέσα στο κυματοδηγό δημιουργεί μια πιο δύσκολη κατάσταση αντιστοίχισης για να ακτινοβολεί αποτελεσματικά στην άκρη του κυματοδηγού, όπου το διηλεκτρικό είναι αναγκαστικά περικομμένο κατά την επαφή με τον ελεύθερο χώρο. Τέλος, η παρουσία του διηλεκτρικού μπορεί να δημιουργήσει ανεπιθύμητες απώλειες μειώνοντας έτσι την απόδοση της κεραίας.

2.2.3 Καταστολή κατευθυνόμενων κυμάτων: EBG για τεχνολογία κενού κυματοδηγού

Η τεχνολογία κενού κυματοδηγού είναι μια νέα τεχνολογία χωρίς επαφή με χαμηλές απώλειες (δεν απαιτεί διηλεκτρικά) που σχεδιάστηκαν να χρησιμοποιηθούν στην κλίμακα συχνοτήτων χιλιοστών [26], [27]. Η βάση της λειτουργίας είναι την καταστολή του τρόπου διάδοσης παράλληλα στις πλάκες με χρήση δομών EBG σε συνδυασμό με ένα ομαλό μεταλλικό πιάτο. Από την σύλληψή του το 2009 και την πρώτη επίδειξη το 2011, η τεχνολογία είναι σήμερα σε ανάπτυξη ειδικά για το σχεδιασμό επίπεδων κεραιών υψηλού κέρδους, το οποίο είναι μία από τις απαιτήσεις των μελλοντικών συστημάτων 5G. Ακόμα, η αναζήτηση μιας ανταγωνιστικής τεχνολογίας κατασκευής, που επιτρέπει τη μαζική παραγωγή, αποτελεί βασικό ερευνητικό θέμα. Τα περισσότερα παραδείγματα αυτής της τεχνολογίας είναι σχεδιασμένα με χρήση ως EBG, δομές που κατασκευάζονται με καρφίτσες

(επίσης γνωστές ως κρεβάτι νυχιών) που γίνονται πάρα πολύ στενό και λεπτό στις υψηλές συχνότητες.



Εικόνα 3 Παραδείγματα κεραίας τοποθετημένης σε κενό κυματοδηγού [27]

Τα πρώτα παραδείγματα σχεδιασμών των εξαρτημάτων κυματοδηγού κενού που βασίζονται σε συμμετρικές δομές ολίσθησης σε τρύπες παρουσιάστηκαν πρόσφατα. Αυτά τα αρχικά παραδείγματα είναι απλά σχέδια καταδεικνύουν την πιθανότητα μεγαλύτερης περιοδικής δομής συμμετρίας και σε αυτή την εφαρμογή. Το δυναμικό είναι τεράστιο καθώς το κόστος κατασκευής μειώνεται δραματικά σε σχέση με τη χρήση ακίδων και αυτό η τεχνολογία έχει πολλές εφαρμογές τόσο ως μέρος των συστημάτων κεραίας σε συνδυασμό με την κλασική τεχνολογίες ή ακόμα και να αναπτύξουν ολοκληρωμένες μονάδες RF.

2.3 Θεωρία των μετα-υλικών

Αυτή η λέξη είναι ένας συνδυασμός "μετα" και "υλικού". Η «μετά» είναι μια ελληνική λέξη η οποία σημαίνει κάτι πέραν από, αλλαγμένο, αλλαγμένο ή κάτι τέτοιο. Με έναν ακριβή τρόπο μπορούν να έχουν τις ηλεκτρομαγνητικά τους ιδιότητες μεταβαλλόμενες σε κάτι πέρα από αυτό που μπορεί να βρεθεί στη φύση.

Τα μετα-υλικά μπορούν να ερμηνευθούν χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του Maxwell. Οι εξισώσεις του Maxwell στο πεδίο χρόνου είναι:

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{E} &= -j\omega\mu\vec{H} ; \nabla \cdot \vec{D} = \rho \\ \nabla \times \vec{H} &= \vec{J} + j\omega\varepsilon\vec{E} \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0\end{aligned}$$

Για το επίπεδο κύμα οι εξισώσεις μετασχηματίζονται σε

$$\vec{k} \times \vec{E} = \omega\mu\vec{H} ; \vec{k} \times \vec{H} = -\omega\varepsilon\vec{E}$$

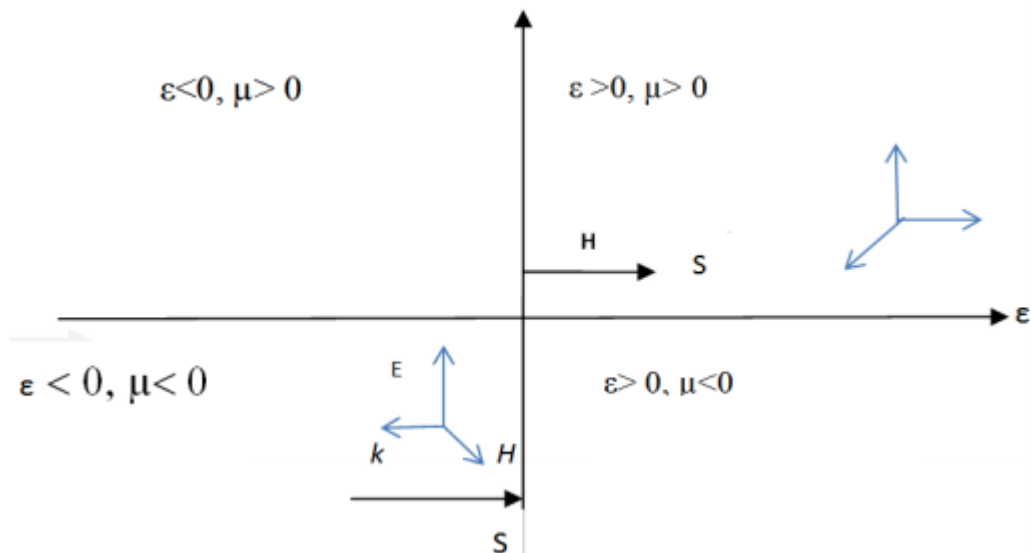
Έτσι, για θετικές τιμές των ϵ και μ τα διανύσματα E , H , k ορίζουν το ορθογώνιο σύστημα του «δεξιού χεριού». Όταν τα ϵ και μ είναι αρνητικά, η εξίσωση γίνεται:

$$\vec{k} \times \vec{E} = -\omega\mu\vec{H} ; k \times \vec{H} = \omega\epsilon\vec{E}$$

Η παραπάνω εξίσωση αναφέρεται στα υλικά «αριστερού χεριού», δηλαδή σε αυτά που ορίζονται από το ορθογώνιο σύστημα του αριστερού χεριού.

2.3.1 Κατάταξη και ιδιότητες

Τα υλικά μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τις τιμές των ϵ και μ σε τέσσερα τεταρτημόρια όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 4 Κατάταξη μετα-υλικών βάση πρόσημου των ϵ , μ

- Το πρώτο τεταρτημόριο ($\epsilon > 0$, $\mu > 0$) αντιπροσωπεύει υλικό δεξιού χεριού. Αφορά τα συνήθη χρησιμοποιούμενα υλικά. Ακολουθεί τον κανόνα του «δεξιού χεριού» για την κατεύθυνση της διάδοσης του κύματος.
- Το δεύτερο τεταρτημόριο ($\epsilon < 0$ και $\mu > 0$) περιγράφει ηλεκτρικά υλικά που υποστηρίζουν ανεπαίσθητα κύματα. Καλείται επίσης υλικό ENG (epsilon negative).
- Το τέταρτο τεταρτημόριο ($\epsilon > 0$ και $\mu < 0$) υποστηρίζει επίσης το φανταστικό (ανεπαίσθητα κύματα), που αντιστοιχεί στο MNG (mu αρνητικό υλικό).

- Το τρίτο τεταρτημόριο περιγράφει την διάδοση του κύματος ακολουθώντας του κανόνα του «αριστερού χεριού» επειδή η διάδοση του κύματος λαμβάνει χώρα προς τα πίσω σε αυτό το μέσο. Ονομάζεται επίσης DNG (double negative). Λόγω αρνητικών μ και ϵ ο δείκτης διάθλασης του μέσου υπολογίζεται ότι είναι αρνητικός που επίσης ονομάζεται NIM (negative index material).

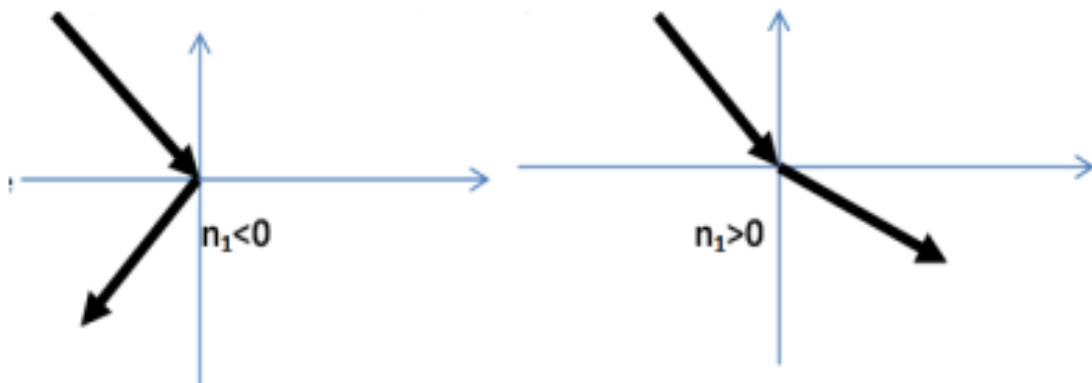
Παράδειγμα δομής η οποία ήταν ο συνδυασμός υλικού με αρνητικό ϵ και αρνητική μ φαίνεται ακολούθως:



Εικόνα 5 Διάταξη με υλικό αρνητικών τιμών ϵ και μ^2

2.3.2 Επίδραση στο νόμο του Snell

Στο τρίτο τεταρτημόριο στην Εικόνα 4ο δείκτης διαθλάσεως στον νόμο Snell είναι αρνητικός. Όταν ένα προσπίπτον κύμα αντιμετωπίζει αρνητική διάθλαση στη διεπαφή, κάμπτεται προς την εσωτερική κατεύθυνση μετά τη διάθλαση σε μέσο. Το φως διαθλάται με αντίθετο τρόπο σε σύγκριση με το υλικό «δεξιού χεριού».



Εικόνα 6 Διάθλαση με βάση το πρόσημο του δείκτη διάθλασης του υλικού³

² D. R. Smith, J. B. Pendry (2004), and M. C. K. Wiltshire, Metamaterials and negative refractive index, Science 305, 788-792

2.3.3 Αρνητικό ϵ

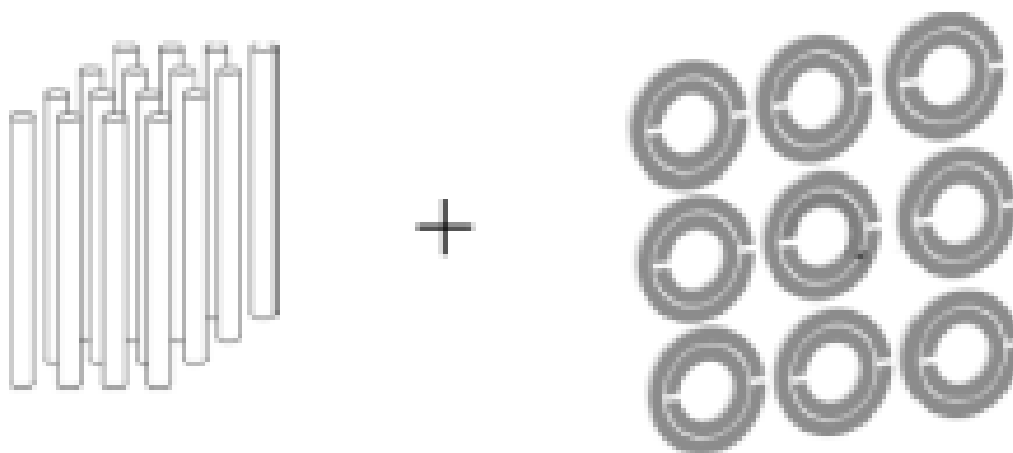
Το μετα-υλικό χρησιμοποιείται σαν πλέγμα λεπτών καλωδίων για την επίτευξη αρνητικής τιμής του ϵ . Η τιμή της εφαρμοζόμενης ηλεκτρικής διαπερατότητας εκφράζεται ως:

$$\epsilon_p = 1 - \omega_p^2 / \omega^2$$

όταν η συχνότητα του υποστρώματος είναι ω_p και ω είναι η συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Η τιμή του ϵ_p από την εξίσωση αυτή γίνεται αρνητική όταν η συχνότητα κύματος είναι μικρότερη από τη συχνότητα υποστρώματος. Όταν οι δύο συχνότητες ταυτίζονται τότε η τιμή μηδενίζεται και προκύπτει διάθλαση μηδενικού δείκτη. Παράδειγμα τέτοιου υλικού είναι λεπτές μεταλλικές (από χρυσό, άργυρο ή αλουμίνιο) ράβδοι διατεταγμένοι σε τακτά διαστήματα.

2.3.4 Αρνητικό μ

Μια συστοιχία διαιρεμένων δακτυλίων που αποτελούνται από δύο ομόκεντρους μεταλλικούς δακτυλίους με ένα κενό ο καθένας, διατεταγμένοι ώστε τα κενά να βρίσκονται σε απόσταση 180° έκαστο και που τοποθετούνται σε τακτά διαστήματα προσδίδουν αρνητική τιμή μ . Αυτό διότι τα κενά στους δακτυλίους τους κάνουν να συμπεριφέρεται ο καθένας σαν πυκνωτής ενώ συνολικά συμπεριφέρονται σαν πηνίο, σχηματίζοντας ένα LC κύκλωμα.



Εικόνα 7 Υλικά με αρνητικό ϵ και μ

³ Enghetaand Ziolkowski, R. W., (eds.) (2006), Electromagnetic Metamaterials: Physics and Engineering Exploration, Willey-IEEE PRESS, NewJersy, U.S.A

3 Μετα-επιφάνειες

Τα μετα-υλικά, τα οποία είναι τρισδιάστατα, συχνά περιοδικά τεχνητά υλικά που αποτελούνται από μέταλλα και / ή διηλεκτρικά, έχουν μελετηθεί ευρέως την τελευταία δεκαετία [31], [32] λόγω της μοναδικής αλληλεπίδρασής τους με ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία ξεπερνούν τις δυνατότητες φυσικών ή ομοιογενών υλικών. Η εξαιρετική τους ικανότητα να χειρίζονται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα οφείλεται στην ισχυρή τους αλληλεπίδραση με ηλεκτρικά ή / και μαγνητικά πεδία, τα οποία συνήθως παρέχονται από συντονισμένα εφέ που ελέγχονται από τη γεωμετρία των στοιχειωδών μονάδων εκπομπής. Αυτές οι δυνατότητες οδηγούν σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών όπως η ενίσχυση της απόδοσης των κεραιών, οι τέλει απορροφητές, υπερ-φακοί, μείωση σκέδασης και συγκομιδή ενέργειας μεταξύ άλλων εφαρμογών τόσο στις μικροκυματικές όσο και στις οπτικές συχνότητες. Ωστόσο, πολλές εφαρμογές των μετα-υλικών παρεμποδίζονται από τις μεγάλες απώλειες και τις δυσκολίες στην τρισδιάστατη κατασκευή, ιδιαίτερα στις μικρο- και νανο-κλίμακες.

Οι μετα-επιφάνειες είναι δισδιάστατες ή επίπεδες εκδόσεις των μετα-υλικών με πάχος μικρότερο του μήκους κύματος [33]. Εξετάζονται ευρέως και εφαρμόζονται σε ηλεκτρομαγνητικές εφαρμογές λόγω του μικρού τους βάρους και της ευκολίας κατασκευής τους. Οι μεταβάσεις έχουν μοναδικές ικανότητες για την παρεμπόδιση, απορρόφηση, συμπύκνωση, διασπορά ή καθοδήγηση των κυμάτων τόσο στην επιφάνεια όσο και στο διάστημα σε κανονική και πλάγια εμφάνιση, από μικροκύματα μέσω ορατών συχνοτήτων.

Τα επιφανειακά κύματα μπορούν να ελεγχθούν με το σχεδιασμό κυψελών μονάδας metasurface με την απαιτούμενη σύνθετη αντίσταση για τον χειρισμό της ταχύτητας φάσης ή ομάδας [33]. Διαμορφώνονται με τρόπους που μπορούν να οδηγήσουν ή να χωρίσουν κύματα σε ορισμένες κατευθύνσεις και να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές για έλεγχο σκέδασης. Με τον έλεγχο των μεγεθών και σχημάτων των στοιχειωδών μονάδων μετα-επιφανειών, μπορούν να επιτευχθούν διαφορετικοί αποτελεσματικοί δείκτες διάθλασης επιφανείας και η επιφάνεια μπορεί να σχεδιαστεί για να παρέχει διάφορες λειτουργίες. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον σχεδιασμό 2D φακών μικροκυμάτων / οπτικών φακών όπως Luneburg και φακών φαριού-οφθαλμών, οι οποίοι εφαρμόζονται σε επιφανειακούς κυματοδηγούς για συστήματα κεραιάς και επίπεδες πηγές μικροκυμάτων.

Εκτός από τα επιφανειακά κύματα, μελετώνται ευρέως οι εφαρμογές μετα-επιφανειών για τον χειρισμό των κυμάτων σε ελεύθερο χώρο [34]. Η φάση αντανάκλασης των κυμάτων που πέφτουν στην επιφάνεια του μετασχηματισμού ονομάζεται μετασχηματισμός υπερφυσικής πόλωσης [35]. Τα γραμμικά πολωμένα εισερχόμενα κύματα μπορούν να περιστραφούν κατά 90° προς την ορθογώνια πόλωση τους ή να μετασχηματιστούν σε κυκλικά πολωμένα κύματα. Οι μηχανισμοί μετωπικού κύματος [36], όπως η διαμόρφωση δέσμης, συμπεριλαμβανομένης της εστίασης και της διάθλασης, διερευνάται επίσης ευρέως.

Εκτός από το χειρισμό της απορρόφησης ή της σκέδασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, οι μετα-επιφάνειες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την ακτινοβολία των κυμάτων σε ελεύθερο χώρο μετατρέποντας τα επιφανειακά κύματα σε λειτουργίες ακτινοβολίας ως κεραία διαρροής [37]. Οι πρόσφατες εργασίες για τις μετρήσεις πεπερασμένων κυμάτων περιλαμβάνουν ολογραφικές επιφάνειες, οι οποίες παρέχουν υψηλό βαθμό ελέγχου επί του σχεδίου ακτινοβολίας.

3.1 Μετα-επιφάνειες εμπέδησης

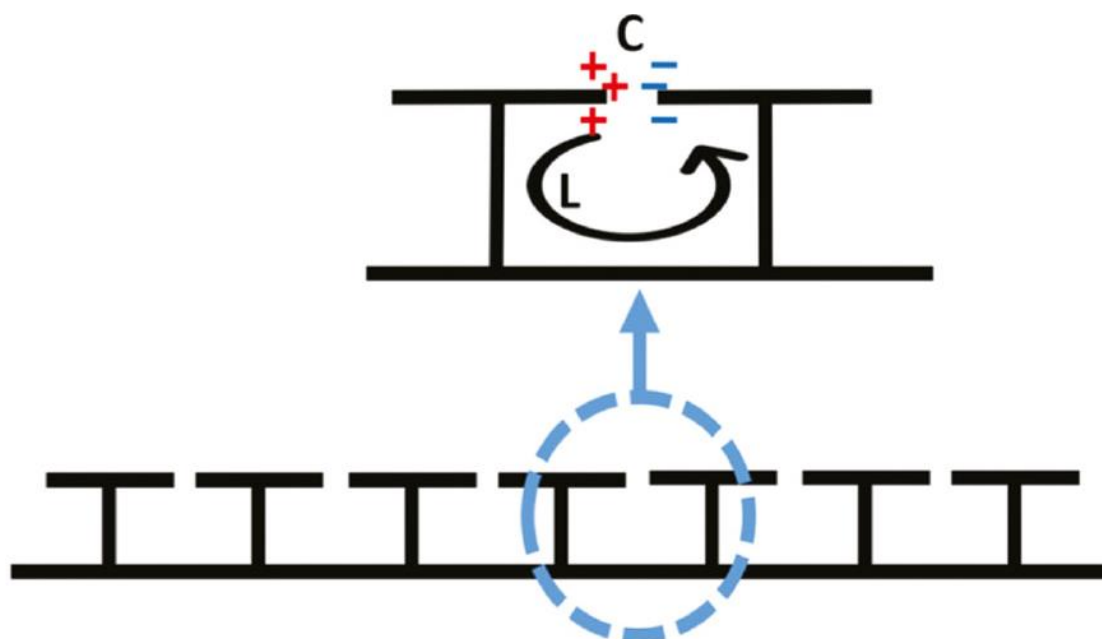
Όταν ένα κύμα σε ελεύθερο χώρο προσκρούει σε μια επιφάνεια, η αντανάκλαση και η μετάδοση διέπονται από τις ιδιότητες της επιφάνειας αυτής, οι οποίες μπορούν να περιγραφούν ως σύνθετη αντίσταση. Οι επιλεκτικές συχνότητας επιφάνειες (FSS) έχουν μελετηθεί ευρέως και χρησιμοποιούνται σε φίλτρα, απορροφητές, κεραίες κλπ., λόγω της ικανότητάς τους να εκπέμπουν ή να αντικατοπτρίζουν επιλεκτικά κύματα διαφορετικών συχνοτήτων ή γωνιών πρόσπτωσης. Τα FSS αποτελούνται από περιοδικές μεταλλικές δομές μήκους μικρότερου του μήκους κύματος [38]. Οι μετα-επιφάνειες, παρόμοιες με τις FSS, παρέχουν μια αποτελεσματική επιφανειακή σύνθετη αντίσταση, η οποία μπορεί να σχεδιαστεί και να επεξεργαστεί ειδικά για διάφορες εφαρμογές, όπως η απορρόφηση, η μηχανική μετωπικού κύματος, η ακτινοβολία διαρροής, η απόκρυψη (cloaking), ο έλεγχος πόλωσης, καθώς και οι φακοί και οι δομές απεικόνισης.

3.1.1 Μετα-επιφάνειες υψηλής εμπέδησης

Τα σύγχρονα συστήματα κεραίας απαιτούν πιο συμπαγή γεωμετρία και χαμηλότερα προφίλ. Ωστόσο, αυτό περιορίζεται συχνά από την ύπαρξη ενός αγωγίμου επιπέδου γείωσης κάτω από τα ακτινοβόλα στοιχεία. Συγκεκριμένα,

μία απόσταση τετάρτου μήκους κύματος απαιτείται μεταξύ μιας κεραίας του επιπέδου γείωσης λόγω της επίδρασης των ρευμάτων ειδώλου. Αν η κεραία είναι πολύ κοντά στο επίπεδο γείωσης, η ακτινοβολία από τα ρεύματα ειδώλου θα παρεμποδίσει την άμεση ακτινοβολία από την κεραία, οδηγώντας σε από-προσαρμογή της σύνθετης αντίστασης κεραίας με γραμμή μεταφοράς.

Μια επιφάνεια υψηλής εμπέδησης [39] αποτελείται από περιοδικά μεταλλικά στοιχειώδη τμήματα που υποστηρίζονται από ένα επίπεδο γείωσης, με αγωγό μέσω του κέντρου κάθε στοιχειώδους μονάδας ακτινοβολίας. Αυτές οι μετα-επιφάνειες μεγάλης εμπέδησης σχετίζονται με τις κυματοειδείς επιφάνειες [40], [41], οι οποίες έχουν μελετηθεί και οι οποίες παρέχουν επίσης τρόπους για τον έλεγχο της διασποράς και της διάδοσης των επιφανειακών κυμάτων [42]. Η κυματοειδής επιφάνεια είναι μια μεταλλική πλάκα με περιοδικές κατακόρυφες σχισμές με απόσταση μικρότερη από το μήκος κύματος. Με σχισμές τετάρτου μήκους κύματος, το βραχυκύκλωμα στο κάτω άκρο της επιφάνειας μετατρέπεται σε ανοιχτοκύκλωμα στο επάνω άκρο, αποδίδοντας υψηλή αντίσταση.

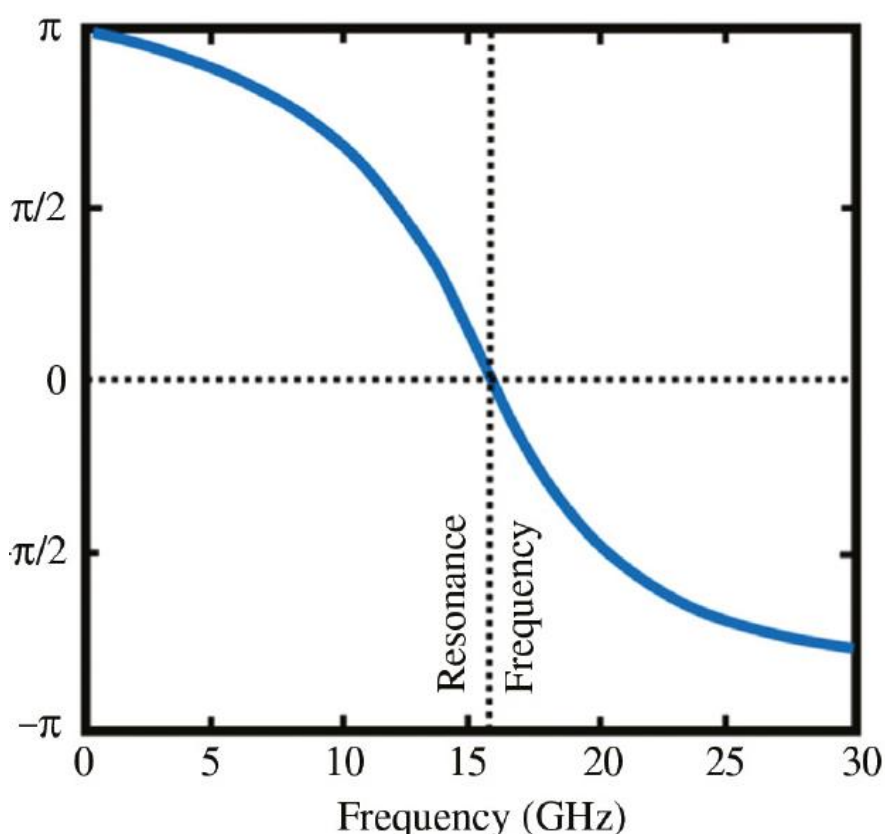


Εικόνα 8 Στοιχειώδες τμήμα και δομή μετα-επιφάνειας

Η συμπεριφορά των επιφανειών υψηλής εμπέδησης μπορεί να γίνει κατανοητή ως εξής: κάθε στοιχειώδες τμήμα είναι συζευγμένο με τα γειτονικά του παρέχοντας μια αποτελεσματική επιφανειακή χωρητικότητα. Είναι επίσης συνδεδεμένο με τους γείτονές τους μέσω ενός αγωγίμου μονοπατιού που περιλαμβάνει το επίπεδο γείωσης, το οποίο παρέχει μια αποτελεσματική επαγωγική επιφάνεια. Η πλευρική όψη μιας επιφάνειας υψηλής σύνθετης αντίστασης με κυψέλη μεγέθους μονάδας. Το ισοδύναμο μοντέλο κυκλώματος

είναι συνεπώς ένα παράλληλο κύκλωμα LC, όπου τα L και C ελέγχονται από τη γεωμετρία των μεταλλικών στοιχείων τμημάτων και το πάχος του υποστρώματος [43]. Το πεδίο στο διάκενο μεταξύ των γειτονικών επιπέδων συμβάλλει στην χωρητικότητα, ενώ η διαδρομή ρεύματος από το στοιχειώδες τμήμα στο έδαφος μέσω των βιδών συμβάλλει στην επαγωγή.

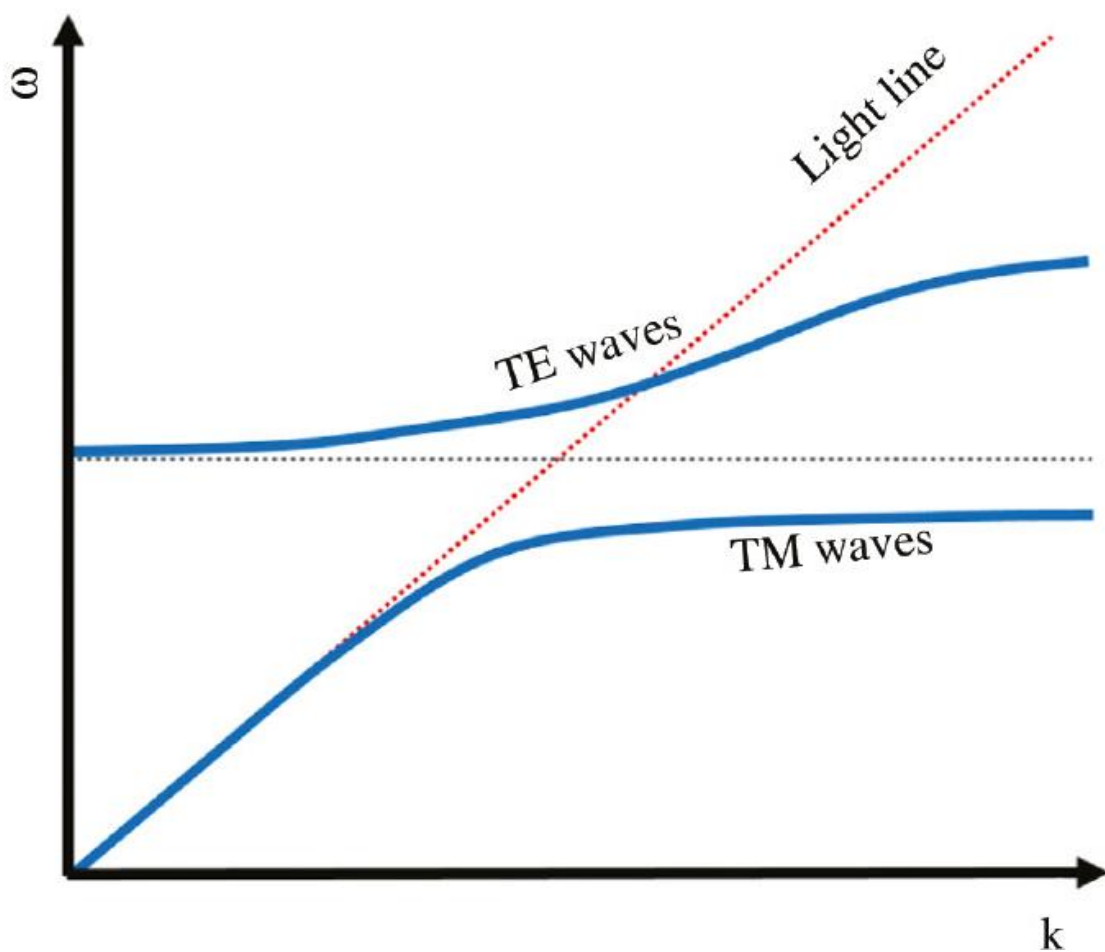
Στη συχνότητα συντονισμού $f_0 = \sqrt{1/2\pi LC}$, το παράλληλο κύκλωμα LC είναι ισοδύναμο με ένα ανοικτοκύκλωμα που έχει άπειρη αντίσταση, οπότε η φάση ανάκλασης ισούται με 0° σε κανονική συχνότητα που υποδεικνύεται στην Εικόνα 9, σε αντίθεση με έναν συνηθισμένο μεταλλικό ανακλαστήρα ο οποίος έχει φάση ανάκλασης π . Αυτή η ιδιότητα είναι ισοδύναμη με μαγνητικό αγωγό αλλά με περιορισμένο εύρος ζώνης και ονομάζεται συχνά τεχνητός μαγνητικός αγωγός [44], επειδή το επαπτόμενο στην επιφάνεια μαγνητικό πεδίο (και όχι το ηλεκτρικό πεδίο) είναι μηδενικό, όπως φαίνεται σε έναν ηλεκτρικό αγωγό. Αυτή η μοναδική ιδιότητα είναι χρήσιμη σε εφαρμογές όπως κεραίες χαμηλού προφίλ [45], επειδή η τρέχουσα εικόνα στην επιφάνεια προσθέτει φάση με το ρεύμα στην κεραία, εξαλείφοντας την ανάγκη για διαχωρισμό μήκους τετάρτου μήκους κύματος μεταξύ της κεραίας και του επιπέδου γείωσης.



Εικόνα 9 Διάγραμμα απόκρισης συχνότητας με βάση την φάση

Εκτός από την παροχή μιας ασυνήθιστης φάσης ανάκλασης, οι επιφάνειες υψηλής εμπέδησης μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τον χειρισμό

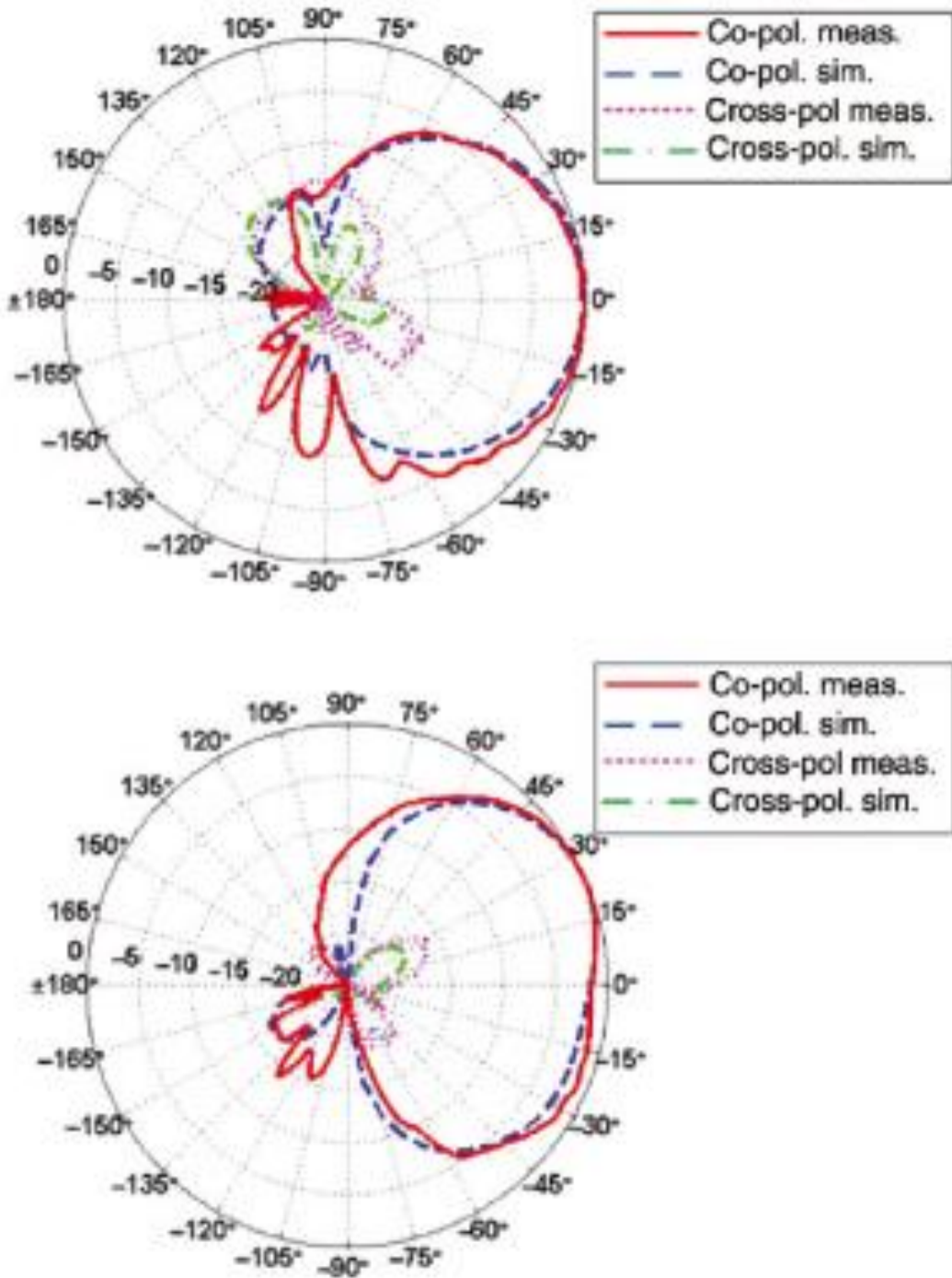
επιφανειακών κυμάτων. Αυτές οι δομές έχουν ένα διάκενο ζώνης μεταξύ του πρώτου τρόπου διάδοσης, η οποία στηρίζει εγκάρσια μαγνητικά κύματα (TM), και του δεύτερου τρόπου διάδοσης ο οποίος στηρίζει εγκάρσια ηλεκτρικά κύματα (TE), απεικονίζεται και απεικονίζεται στο σχήμα 1D. Η ζώνη TM δεν φτάνει στην άκρη της ζώνης TE αλλά σταματά λίγο κάτω από αυτήν. Για την ζώνη TE, κλίνει προς τα πάνω πριν διασχίσει τη γραμμή φωτός, με αποτέλεσμα ένα χάσμα μεταξύ των επιφανειακών κυμάτων TE και TM κάτω από τη γραμμή φωτός. Με άλλα λόγια, δεν υποστηρίζονται κύματα επιφανείας μέσα στο διάκενο ζώνης, και αυτή η ενδιαφέρουσα ιδιότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές όπως η αποσύνδεση κοντινών κεραιών.



Εικόνα 10 Διάγραμμα απόκρισης τρόπων διάδοσης σε συνάρτηση με την συχνότητα

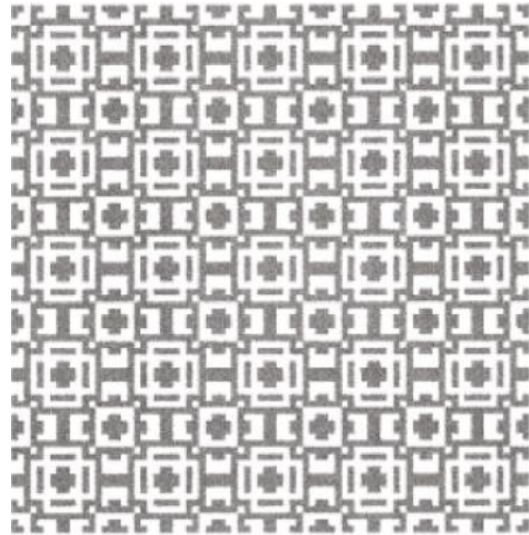
Το ακόλουθο σχήμα [46] δείχνει μια εφαρμογή κεραιάς χαμηλού προφίλ, όπου η επιφάνεια αποτελείται από στοιχεία σχήματος δοκού «H». Η περιοχή υψηλής εμπέδησης σχεδιάζεται με βάση τη συχνότητα συντονισμού του διπλωμένου διπόλου. Η επιφάνεια συμπεριφέρεται ως ένας τέλειος μαγνητικός αγωγός έτσι

ώστε τα ρεύματα της εικόνας να προστεθούν στη φάση, οδηγώντας σε ένα μονόδρομο διάγραμμα ακτινοβολίας που φαίνεται στο Σχήμα 2B [46].

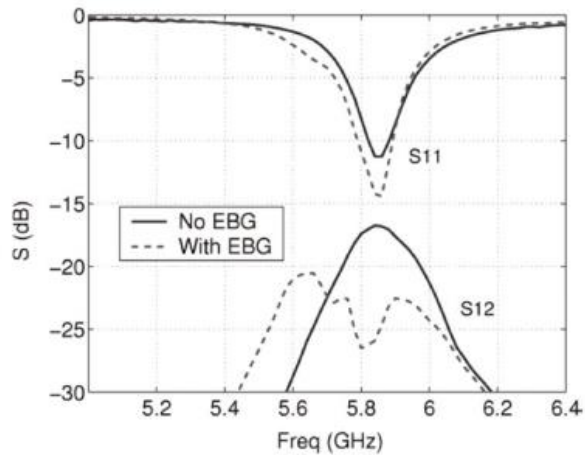
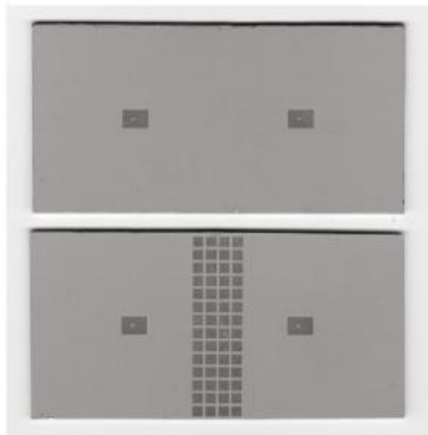


Εικόνα 11 Διαγράμματα ακτινοβολίας κεραίας υψηλής εμπέδησης χαμηλού προφίλ

Οι επιφάνειες υψηλής εμπέδησης έχουν το πλεονεκτήματα του χαμηλού προφίλ, χαμηλού βάρους και χαμηλού κόστους. Ως απορροφητές μικροκυμάτων για την προστασία ευαίσθητων κεραιών ή ηλεκτρονικών από ανεπιθύμητες παρεμβολές. Ένα παράδειγμα επιφανείας επιλεκτικής συχνότητας που υποστηρίζεται από αγωγούς που παρέχει μια υψηλή εμπέδηση που χρησιμοποιείται ως απορροφητής μικροκυμάτων παρουσιάζεται παραπλεύρως [47].



Επειδή οι επιφάνειες υψηλής εμπέδησης δεν υποστηρίζουν τα επιφανειακά κύματα εντός της περιοχής διακένου ζώνης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε επίπεδες εφαρμογές αποσύνδεσης κεραιάς, όπως φαίνεται στην Εικόνα 12 [48], όπου φαίνονται δύο επίπεδες κεραιές με και χωρίς τη δομή διακένου ηλεκτρομαγνητικής ζώνης τους. Τα αποτελέσματα που δείχνονται στο Σχήμα 2E [48] απεικονίζουν το πλεονέκτημα της διακοπής της διάδοσης των επιφανειακών κυμάτων σε χαμηλότερη σύζευξη μεταξύ των κεραιών.



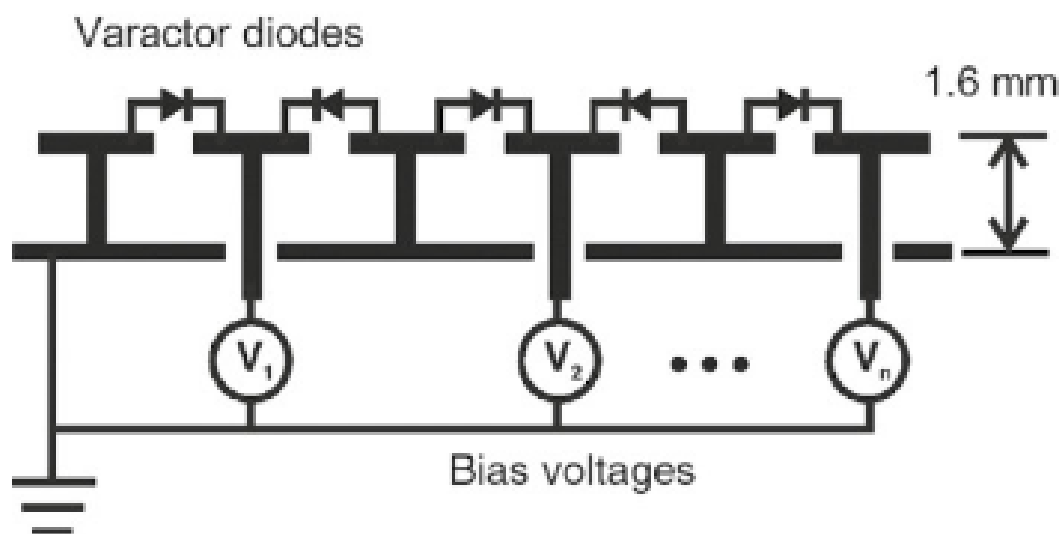
Εικόνα 12 Χρήση επιφανειών υψηλής εμπέδησης ως αποσβεστήρας.

Μια άλλη εφαρμογή περιλαμβάνει κυματοδηγό όπου τα πλευρικά τοιχώματα του είναι επικαλυμμένα με μια μετα-επιφάνεια, η οποία παρέχει ένα μαγνητικό αγωγιμο όριο επιτρέποντας έτσι στον κυματοδηγό να υποστηρίζει τους τρόπους TEM σε ένα περιορισμένο εύρος συχνοτήτων.

3.1.2 Επιφάνειες ενεργής εμπέδησης

Παρά τις μοναδικές ιδιότητες των επιφανειών υψηλής εμπέδησης, έχουν περιορισμούς που περιλαμβάνουν τη γωνιακή εξάρτηση και το περιορισμένο εύρος ζώνης [49]. Εντούτοις, μερικές μελέτες έχουν διερευνήσει πόλωση και επιφάνειες μη ευαίσθητες σε γωνίες [50], [51] με την εφαρμογή μονοαξονικού μαγνητο-διηλεκτρικού μέσου με ακραίες τιμές παραμέτρων και πλέγματα συντονισμού χωρίς βίδες στην πλάκα. Άλλοι περιορισμοί των παθητικών επιφανειών υψηλής εμπέδησης είναι η γραμμική απόκριση και η σταθερή συχνότητα λειτουργίας. Το πρόβλημα αυτό είναι συνήθως δύσκολο να αντιμετωπιστεί μόνο με παθητικές δομές. Εντούτοις, είναι δυνατόν να ξεπεραστούν αυτοί οι περιορισμοί προσθέτοντας στην επιφάνεια ηλεκτρονικές συσκευές, συμπεριλαμβανομένων των διόδων και των τρανζίστορ [52].

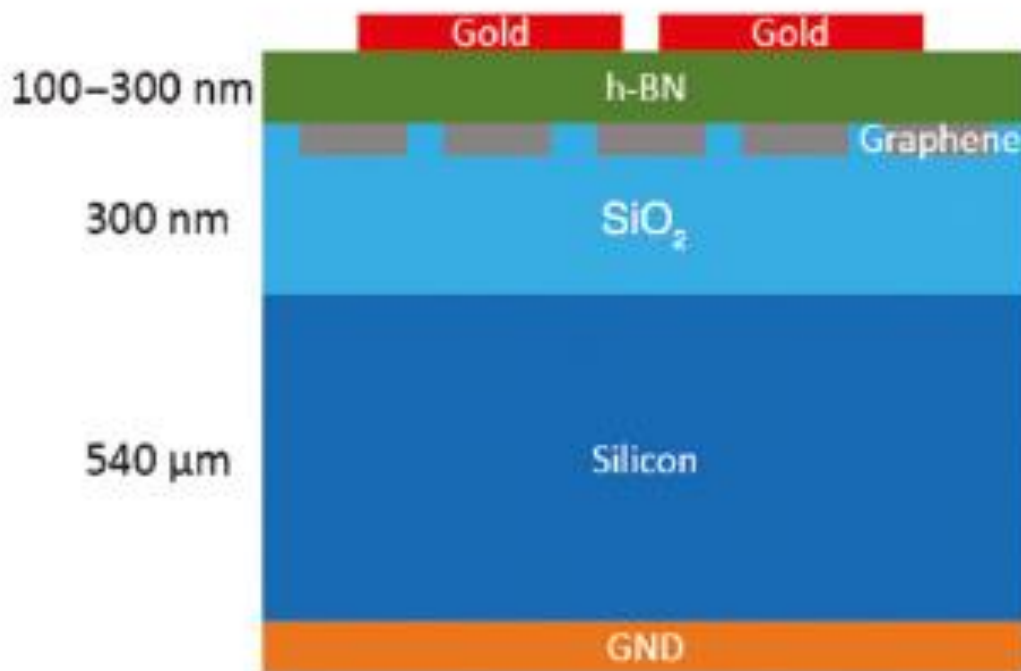
Οι δίοδοι Varactor παρέχουν χωρητικότητα εξαρτώμενη από την τάση, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί στα κενά μεταξύ των στοιχειωδών μονάδων για να συντονιστεί η χωρητικότητα. Ένας συντονισμένος επιφανειακός ανακλαστήρας [54] χειρίζεται τη φάση ανάκλασης της επιφάνειας ρυθμίζοντας τις τάσεις πόλωσης στις διόδους.



Εικόνα 13 Διάταξη ανακλαστήρα μετα-επιφάνειας με χρήση διόδων

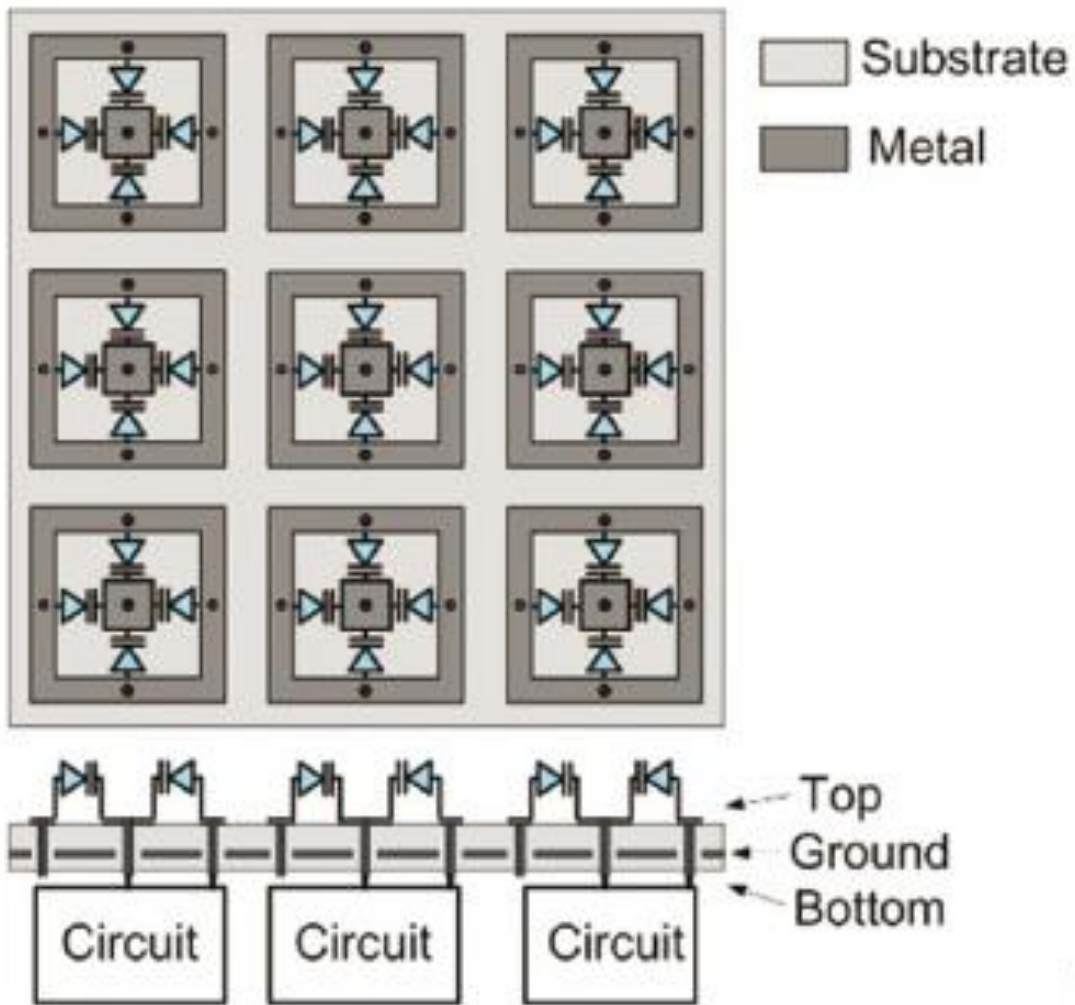
Ένας ηλεκτρονικά κατευθυνόμενος ανακλαστήρας δημιουργείται εφαρμόζοντας μια βαθμίδα φάσης ανάκλασης, η οποία μπορεί να προγραμματιστεί για τον έλεγχο της γωνίας της ανακλώμενης δέσμης. Στις συχνότητες THz, το γραφένιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές επιφανειών συντονισμού και μεταγωγής. Στην Εικόνα 14 [55] παρουσιάζεται μια επαναρυθμιζόμενη κεραία βασισμένη σε μια επιφάνεια υψηλής εμπέδησης σε γραφένιο. Η αγωγιμότητα του γραφένιου ελέγχεται από μια τάση πόλωσης,

επηρεάζοντας έτσι την ιδιότητα ακτινοβολίας της κεραίας που αναπτύσσεται στην κορυφή της, δημιουργώντας ένα επαναδιαμορφώσιμο σύστημα κεραίας.



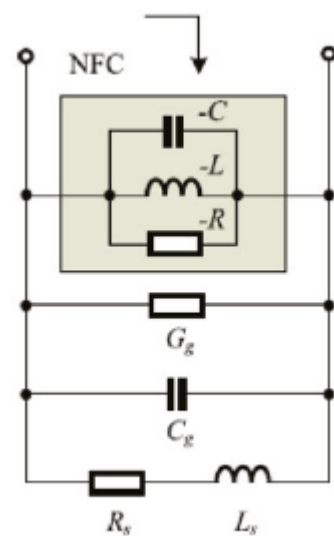
Εικόνα 14 Αρχιτεκτονική επαναρυθμιζόμενη κεραίας με χρήση γραφένιου

Επιπλέον, στην Εικόνα 15 [56] παρουσιάζεται μια μη γραμμική αυτοεπιλεγόμενη επιφάνεια εμπέδησης που δημιουργείται με την προσάρτηση κυκλωμάτων ανίχνευσης ισχύος κάτω από την επιφάνεια και την τροφοδοσία των αντίστοιχων τάσεων ελέγχου στις διόδους. Η εμπέδηση της επιφάνειας μεταβάλλεται σε σχέση με τα διαφορετικά επίπεδα της προσπίπτουσας ισχύος, επιτρέποντας ιδιότητες όπως αυτό-εστίαση των επιφανειακών κυμάτων ή απορρόφηση τους ανάλογα με την ισχύ.

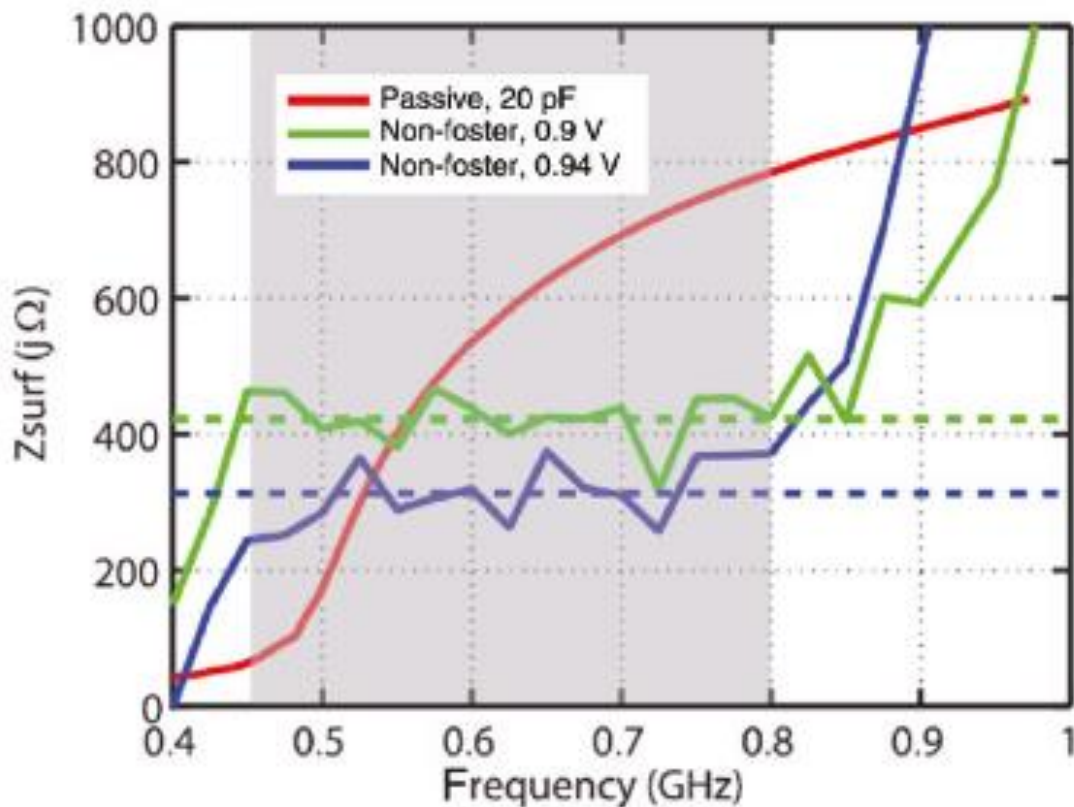


Εικόνα 15 γραμμική αυτοεπιλεγόμενη επιφάνεια εμπέδησης

Παρόλο που με την δίοδο varactor η συχνότητα συντονισμού ή η εμπέδηση της επιφάνειας μπορεί να ρυθμιστεί, υπάρχουν βασικοί περιορισμοί στο εύρος ζώνης. Οι επιφάνειες εμπέδησης που μπορούν να υπερβούν αυτόν τον περιορισμό χρησιμοποιώντας αρνητικούς πυκνωτές ή / και αρνητικούς επαγωγείς σε διάταξη non-Foster. Στην διπλανή εικόνα [57] παρουσιάζεται κυκλώματα non-Foster (NFC) σε μια επιφάνεια τεχνητής εμπέδησης αυξάνοντας σημαντικά το εύρος ζώνης σε σύγκριση με μια παθητική επιφάνεια με το ίδιο πάχος υποστρώματος.



Τα ενεργά κυκλώματα επιτρέπουν στην επιφάνεια εμπέδησης να έχει σταθερή αντίσταση και χαμηλή διασπορά πάνω από σχεδόν μια οκτάβα εύρους ζώνης με μια ηλεκτρικά λεπτή δομή, όπως παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.



Εικόνα 16 Απόκριση τιμής εμπέδησης συναρτήσει της συχνότητας

Αυτά τα πλεονεκτήματα του εύρους ζώνης έρχονται σε βάρος του πενιχρού χειρισμού ισχύος και της συχνότητας λειτουργίας (συνήθως κάτω από 1 GHz) των non-Foster κυκλωμάτων. Επίσης απαιτούν προσεκτικό σχεδιασμό για να αποφευχθεί η αστάθεια.

3.2 Μετα-επιφάνειες διαρρέοντος κύματος

Οι μετα-επιφάνειες έχουν μοναδική ικανότητα και ξεχωριστό πλεονέκτημα ως μέσα για την ακτινοβολία των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε ελεύθερο χώρο, εκτός από τις ευρείες εφαρμογές τους στον χειρισμό κυμάτων επιφανείας και ελεύθερου χώρου. Τα συστήματα κεραιάς χρειάζονται μεγάλο κέρδος για την ικανοποίηση των απαιτήσεων σύνδεσης επικοινωνιών. Μεγάλες επίπεδες συστοιχίες υιοθετούνται σε πολλά συστήματα κεραιών λόγω του μεγάλου μεγέθους τους ανοίγματος και του στενού εύρους δέσμης. Ωστόσο, τα συστήματα τροφοδοσίας είναι συνήθως περίπλοκα προκειμένου να

ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες και να παρέχεται έλεγχος φάσης σε κάθε στοιχείο κεραίας για τον καθορισμό του διαγράμματος ακτινοβολίας. Οι κεραίες διαρροής επιτρέπουν (για ορισμένες εφαρμογές) την εξάλειψη των δικτύων τροφοδοσίας, και χρησιμοποιούν αντί αυτών μια τεχνική τροφοδοσίας του οδεύοντως κύματος. Όταν μια κεραία διαρροής τροφοδοτείται από μια σημειακή πηγή, το πεδίο της επιφάνειας μπορεί να αναπαρασταθεί ως εξής:

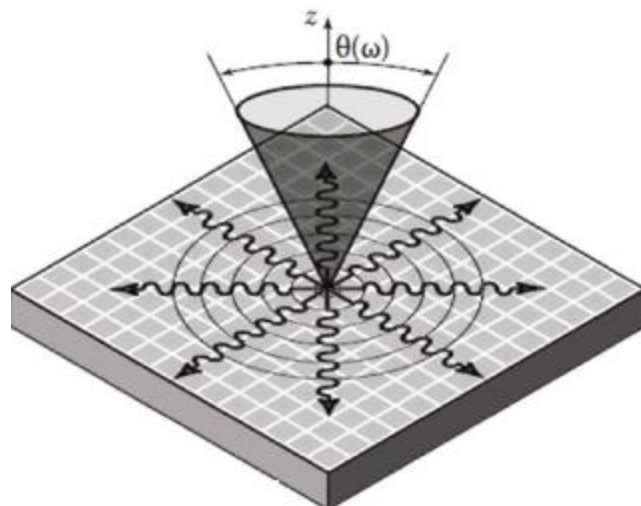
$$\psi(\rho, \zeta) = \psi_0 e^{(-j\gamma\rho - jk_z z)}$$

όπου $\gamma = \alpha + j\beta$ αντιπροσωπεύει τη σταθερά διάδοσης στην επιφάνεια της κεραίας διαρροής και $k_z = \sqrt{k_0^2 - \beta^2}$ είναι η σταθερά διάδοσης κανονικοποιημένη στην επιφάνεια της κεραίας. Στο καθεστώς γρήγορου κύματος όταν $\beta < k_0$, το k_z είναι καθαρά πραγματικό, υποδεικνύοντας ότι η ενέργεια συνδέεται στον ελεύθερο χώρο ως ακτινοβολία [58]. Η κατεύθυνση της ακτινοβολίας μπορεί να σχεδιαστεί ελέγχοντας την τιμή του β .

Οι στοιχειώδης μονάδες της μετα-επιφάνειας σχεδιάζονται ειδικά για να ταιριάζουν την καθυστέρηση φάσης στην επιφάνεια με εκείνη της επιθυμητής κατεύθυνσης δέσμης στον ελεύθερο χώρο. Οι μετα-επιφάνειες κεραίας διαρροής είναι χαμηλού προφίλ και έχουν απλές δομές τροφοδοσίας. Έχουν επίσης ιδιότητες σάρωσης συστοιχίας (ακτινοβολία δέσμης) που εξαρτώνται από τη συχνότητα.

3.2.1 Κεραία ομοιόμορφης μετα-επιφάνειας

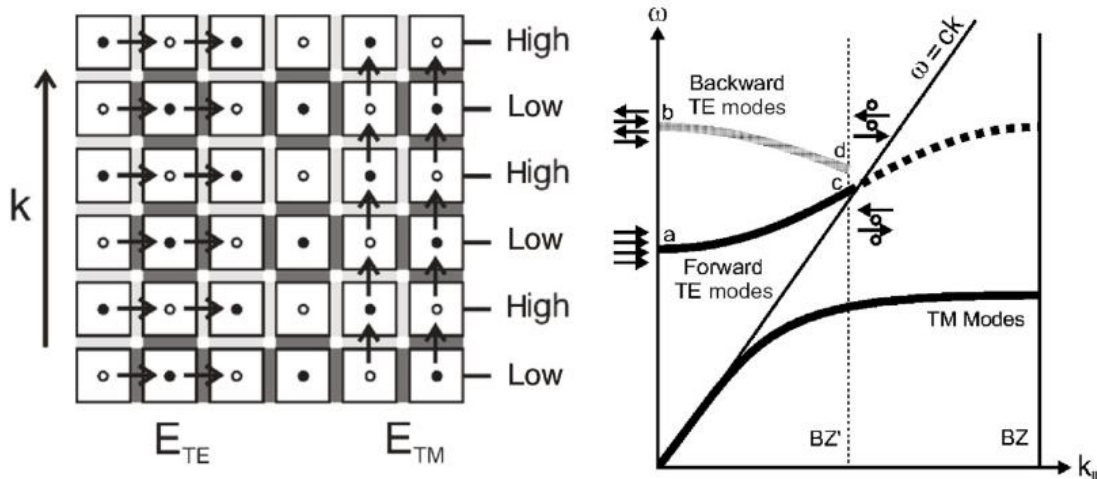
Οι ομοιόμορφες μετα-επιφάνειες έχουν ομοιογενή σταθερά διάδοσης σε ολόκληρη την επιφάνεια. Οπτικά, η επιφάνεια αποτελείται από περιοδικές κυψέλες σταθερών διαστάσεων στο επίπεδο. Οι επιφάνειες υψηλής εμπέδησης υιοθετούνται ευρέως για αυτούς τους τύπους επιφανειών λόγω της απλότητας και του χαμηλού προφίλ. Στο διπλανό σχήμα [59] φαίνεται δομή σύνθεσης



δεξιάς / αριστεράς (CRLH) με ομοαξονική τροφοδοσία κάθετη στο κέντρο της επιφάνειας. Όταν διεγείρεται στο κέντρο ένα σφαιρικό κύμα επιφάνειας

ακτινοβολεί μία κωνική δέσμη σε λειτουργία διαρροής δεδομένου ότι η φασική ταχύτητα είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός.

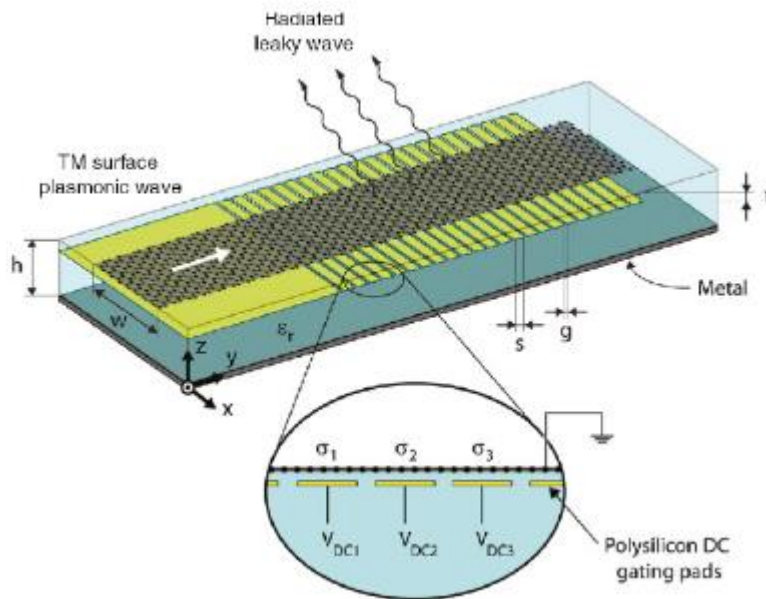
Όπως και οι παραδοσιακές κεραιές διαρροής, όταν η συχνότητα αλλάζει, η γωνία της κωνικής δέσμης ποικίλλει ανάλογα με τη σχέση διασποράς β , η οποία οδηγεί σε σάρωση δέσμης. Η εφαρμογή των διόδων varactor στην επιφάνεια επιτρέπει την ηλεκτρονική ρύθμιση, ελέγχοντας έτσι τόσο τη φάση ανάκλασης όσο και τις ιδιότητες διάδοσης των επιφανειακών κυμάτων. Μεταβάλλοντας το μοτίβο των τάσεων πόλωσης, είναι δυνατό να προσαρμοστεί η διεύθυνση δέσμης από διαρρέοντα κύματα και στις δύο κατευθύνσεις: προς τα εμπρός και προς τα πίσω. Με τον απλό έλεγχο της τάσης πόλωσης, το πλάτος και η φάση μπορούν να συντονιστούν με πολλαπλούς βαθμούς ελευθερίας ανά μισό μήκος κύματος [60]. Το διάγραμμα ρυθμιζόμενης ζώνης της ίδιας απεικονίζεται στην Εικόνα 17 [60]. Όταν οι εναλλασσόμενες σειρές των παραμορφωτών είναι διαμορφωμένες σε δύο διαφορετικές τάσεις, η ζώνη TE αναδιπλώνεται στην μειωμένη ζώνη Brillouin, με την άνω περιοχή να υποστηρίζει οπίσθιους τρόπους TE. Αυτή η δυνατότητα συντονισμού επιτρέπει τη διεύρυνση της διόδου δέσμης ευρείας γωνίας σε σταθερή συχνότητα, η οποία θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε χαμηλού κόστους συστήματα κεραιάς χαμηλού προφίλ.



Εικόνα 17 Διαμόρφωσης δέσμης ακτινοβολίας με βάση τις τάσεις τροφοδοσίας

Στην Εικόνα 18 [61] απεικονίζει μια ημιτονοειδώς διαμορφωμένη κεραιά διαρροής γραφένιου με ηλεκτρονική σάρωση δέσμης. Με την εφαρμογή τάσεων πόλωσης στις διαφορετικές πλάκες της συστοιχίας κάτω από το υπόστρωμα γραφένιου, η αντίδραση επιφανείας του γραφένιου μπορεί να

ρυθμιστεί με αποτέλεσμα μια ευέλικτη δυνατότητα σάρωσης δέσμης σε συχνότητες THz.



Εικόνα 18 Ημιτονοειδώς διαμορφωμένη κεραία διαρροής γραφένιου

3.2.2 Ολογραφικές μετα-επιφάνειες διαρρέοντος κύματος

Οι ολογραφικές κεραίες δανείζονται τη σχεδιαστική τους ιδέα από την οπτική ολογραφία [62], η οποία χρησιμοποιείται για την καταγραφή και την αναδημιουργία ενός σύνθετου οπτικού κύματος. Στην περιοχή των μικροκυμάτων, αυτή η τεχνική έχει εφαρμοστεί για επίπεδη κεραία. Η αρχή της ολογραφικής μετα-επιφάνειας με οριζόντιο κύμα μπορεί να περιγραφεί σε δύο στάδια.

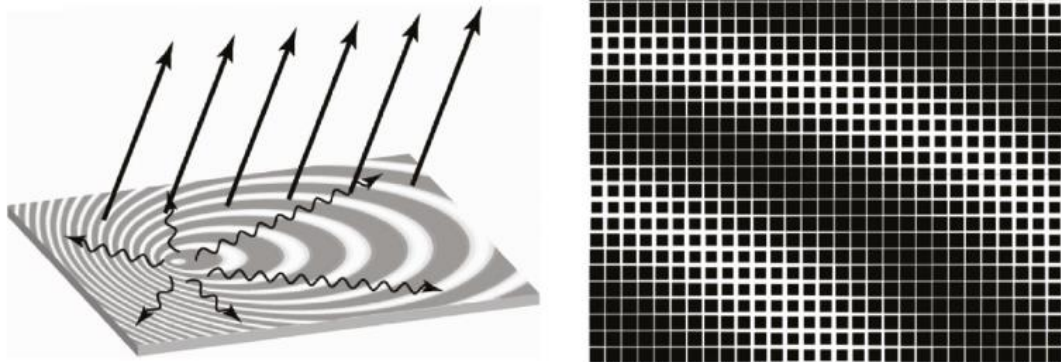
- Πρώτον, υπολογίζεται το μοτίβο παρεμβολής του κύματος αναφοράς (πηγή διέγερσης) και το παραγόμενο κύμα (επιθυμητό πρότυπο διάχυσης ακτινοβολίας), που περιγράφεται ως εξής:

$$\psi = |\psi_{\text{ref}} + \psi_{\text{obj}}|$$

όπου ψ_{ref} είναι το κύμα αναφοράς που παράγεται από την τροφοδοσία και το ψ_{obj} είναι το παραγόμενο κύμα που αντιστοιχεί στο επιθυμητό μοτίβο ακτινοβολίας. Η σύνθετη αντίσταση της επιφάνειας σχεδιάζεται κατόπιν σύμφωνα με αυτό το μοτίβο παρεμβολής.

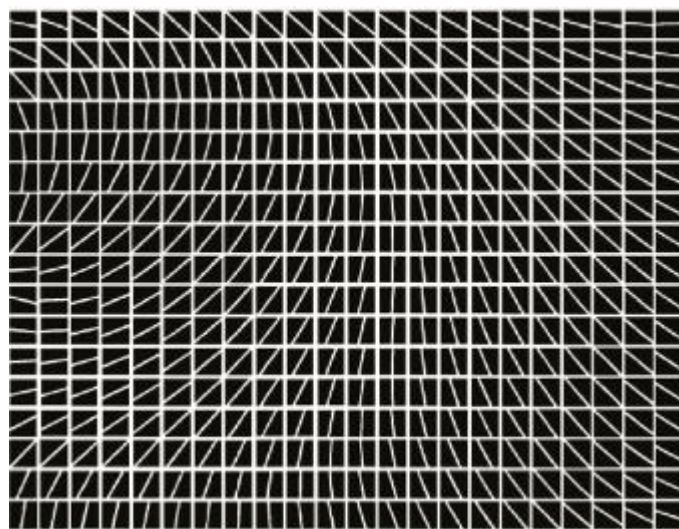
- Το δεύτερο βήμα είναι να χρησιμοποιήσουμε το ίδιο ψ_{ref} για να παρεμβαίνουμε στο $|\psi^2|$, έτσι ώστε να αναδημιουργηθεί το επιθυμητό κύμα αντικειμένου, ως $\psi_{\text{ref}}^2 \cdot |\psi_{\text{obj}}|$.

Το μοτίβο παρεμβολής αντιπροσωπεύεται από τη μεταβολή της αποτελεσματικής επιφανειακής εμπέδησης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 19 [37]. Μια επιφάνεια καλυμμένη με μια σειρά μεταλλικών επιμεταλλωμένων επιπέδων μήκους κύματος σε ένα γειωμένο διηλεκτρικό υπόστρωμα παρέχει μεταβλητή αντίσταση επιφάνειας που ελέγχεται από τη γεωμετρία των στοιχειωδών τμημάτων. Μια πιο κοντινή όψη του σχεδίου φαίνεται στην παρακάτω εικόνα [37]. Τα μικρά κενά παρέχουν μεγαλύτερη αντίσταση, ενώ μεγάλα κενά αντιστοιχούν σε χαμηλότερη αντίσταση.



Εικόνα 19 Μοτίβο παρεμβολής

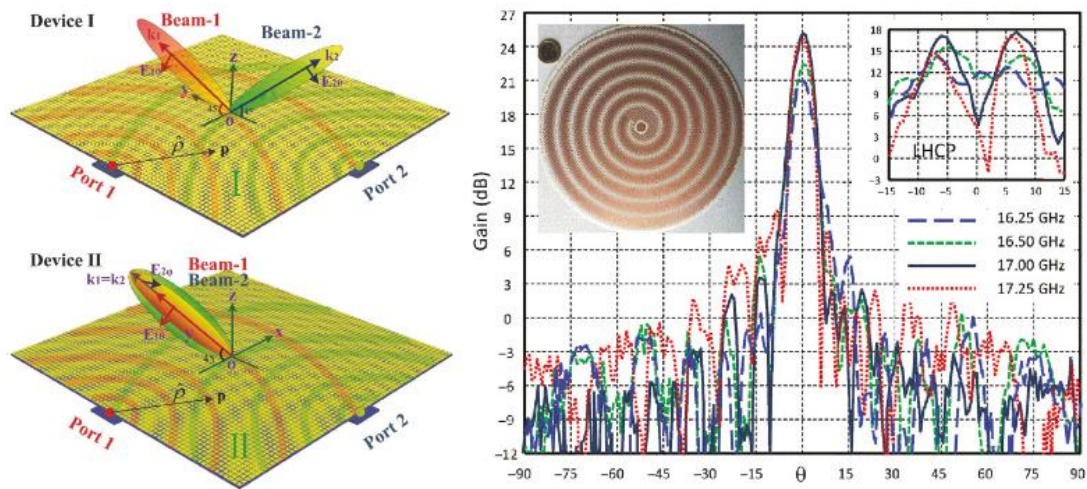
Περαιτέρω, μεταβάλλοντας το σχήμα των στοιχειωδών τμημάτων



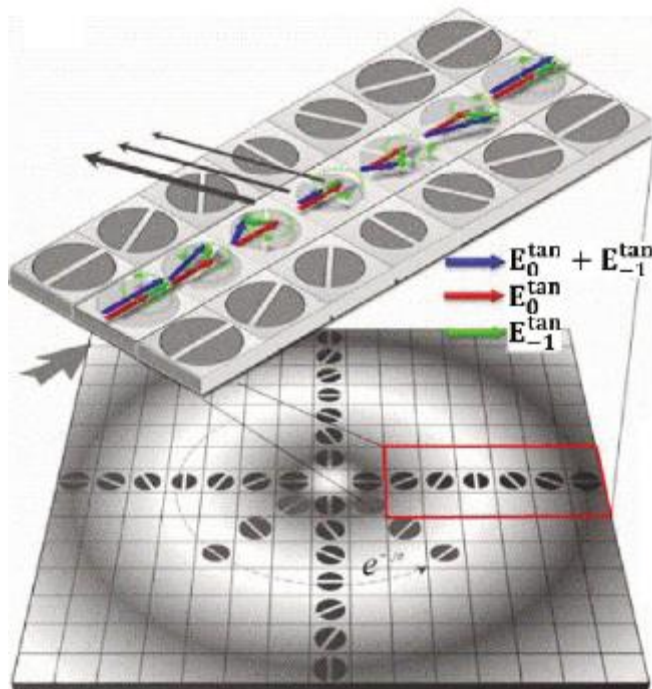
επιτυγχάνεται διακύμανσης των τιμών της εμπέδησης, επιτρέποντας έλεγχο της πόλωσης. Για παράδειγμα, μια επιφάνεια που μπορεί να δημιουργήσει κυκλική πόλωση από μια γραμμικά πολωμένη πηγή διέγερσης [37]. Κάθε στοιχειώδες τμήμα χωρίζεται σε δύο περιοχές από μια σχισμή με μεταβλητή κατεύθυνση και η ανομοιομορφία των

στοιχειωδών τμημάτων δημιουργεί μία επιφάνεια δυναμικής αντίστασης, η οποία επιτρέπει τη σύζευξη μεταξύ διαφορετικών τύπων πόλωσης.

Μια πολυλειτουργική επιφάνεια που υποστηρίζει διπλή δέσμη και διπλή πόλωση ακτινοβολίας επιτυγχάνεται με δύο ορθογώνιες διεγέρσεις [63]. Δύο διαφορετικές λειτουργίες υποστηρίζονται με το ίδιο μοτίβο ολογραφικής παρεμβολής χωρίς αμοιβαία σύζευξη και επιτυγχάνεται σάρωση δέσμης εξαρτώμενη από τη συχνότητα με ορθογώνιες πολώσεις. Με τα απλά ιστροπικά στοχειώδη τμήματα η εμπέδηση μπορεί να διαμορφωθεί με μια κεντρικά τροφοδοτούμενη σημειακή πηγή ημιτονοειδούς σπειροειδούς λειτουργίας. Έτσι επιτυγχάνεται ο μετασχηματισμός ενός επιφανειακού κύματος TM σε κυκλικά πολωμένο κύμα διαρροής με ευρεία πλευρική ακτινοβολία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8E [63].



Εικόνα 20 πολυλειτουργική επιφάνεια που υποστηρίζει διπλή δέσμη και διπλή πόλωση ακτινοβολίας



Μία ανιστροπική ολογραφική μετα-επιφάνεια με συνεπίπεδη τροφοδοσία και κυκλική πολωμένη ακτινοβολία παρουσιάζεται παραπλεύρως [64], το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί σε δορυφορικές επικοινωνίες διαστήματος-προς-έδαφος.

Μια απλή ημιτονοειδώς διαμορφωμένη επιφάνεια αντίστασης [64] επιτρέπει σχεδόν ανεξάρτητο έλεγχο των διακυμάνσεων της διαρροής και της φάσης κατά μήκος της επιφάνειας με αυθαίρετη ακτινοβολία εκτός ορίων. Επίσης, καταδεικνύεται μια μέθοδος χαρτογράφησης των κενών μεταξύ των μεταλλικών ταινιών.

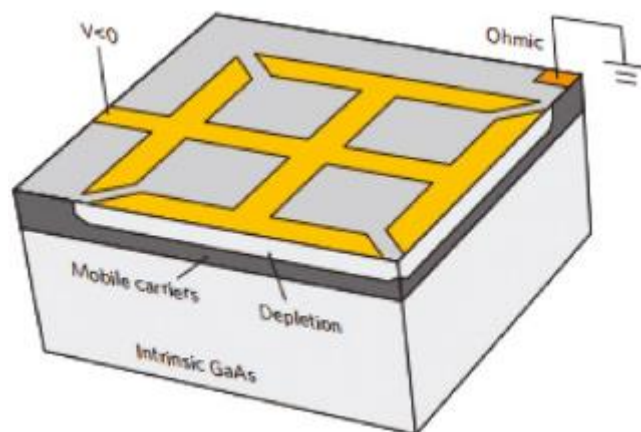


Συμπερασματικά, οι κεραιές διαρροής που βασίζονται σε μετα-επιφάνειες μπορούν να προσφέρουν πλεονεκτήματα σε επικοινωνίες από σημείο σε σημείο λόγω της επίπεδης δομής τους, της ευκολίας κατασκευής, της απλής τροφοδοσίας καθώς και της συχνότητας και του ελέγχου διεύθυνσης της δέσμης.

3.3 Διαμορφωτές και πολωτές

Οι μετα-επιφάνειες παρέχουν μερικά ξεχωριστά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών οπτικών στοιχείων. Η διαμόρφωση κυματομορφής μπορεί να επιτευχθεί σε κλίμακες πολύ μικρότερου μήκους κύματος μετά τη διεπαφή ανάκλασης ή μετάδοσης. Η απόκριση πλάτους, φάσης και πόλωσης μπορεί να σχεδιαστεί με κλίμακες μικρότερες του μήκους, καθώς οι μετρήσεις προσφέρουν την ελευθερία χειρισμού τόσο των ηλεκτρικών όσο και των μαγνητικών πεδίων.

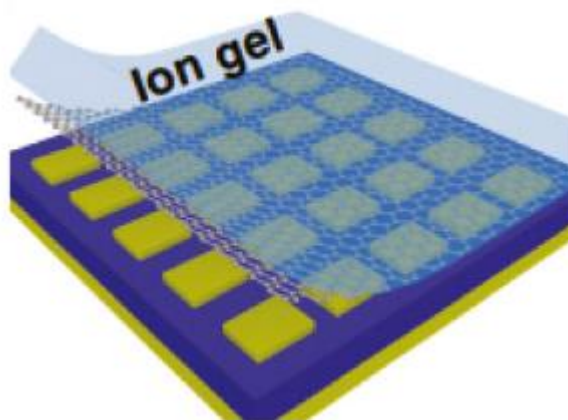
Παρά το γεγονός ότι τα πρότυπα σχέδια διαμορφωτών έχουν ενσωματωθεί



επιτυχώς σε μεγάλης κλίμακας βιομηχανικά προϊόντα, υπάρχουν πιο πρόσφατες εξελίξεις στην έρευνα. Τα αρχικά σχέδια περιελάμβαναν γραμμικές μετατοπίσεις φάσης που ελήφθησαν με ηλεκτρικά ελεγχόμενες μετα-επιφάνειες από περιοδικούς διαχωριστές δακτυλίων διαχωρισμού [65]. Η μετα-επιφάνεια τροφοδοτείται

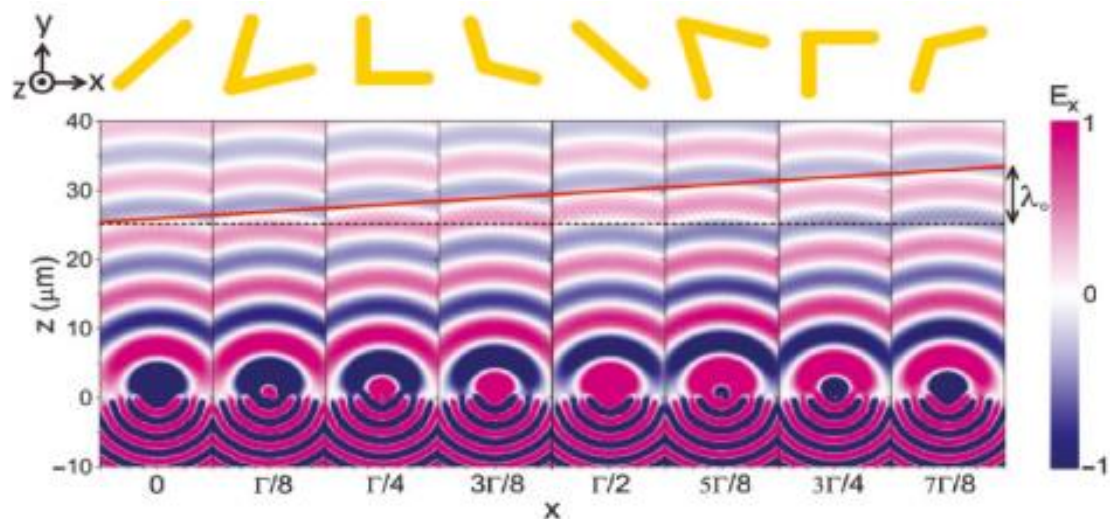
με τάση από μια εξωτερική πηγή δημιουργώντας μια περιοχή διάχυσης ακριβώς κάτω από αυτή στο υπόστρωμα GaAs.

Η μεταβολή του πλάτους του στρώματος διάχυσης παρέχει έλεγχο της ροής ηλεκτρονίων και συντονισμό της επιφάνειας μετάβασης, επιτυγχάνοντας μια γραμμική μετατόπιση φάσης της τάξης των 30° με σταθερή απώλεια εισόδου. Καθώς η απόκριση φάσης είναι ανάλογη προς την παράγωγο του πλάτους ως προς την συχνότητα, παρατηρείται επίσης διαμόρφωση εύρους. Βάσει της ίδιας αρχής προτάθηκε μια ενδιαφέρουσα σχεδίαση μετωπικής επιφάνειας που περιλάμβανε μια στιβάδα από γραφένιο [66]. Ενώ έχει τον οικείο σχεδιασμό μεταλλικής επιφάνειας πάνω από ένα διαχωριστικό, η κορυφή της κατασκευής καλύπτεται με μια στοιβάδα από γραφένιο που συμπληρώνεται περαιτέρω από ένα πηκτό στρώμα ιόντων.



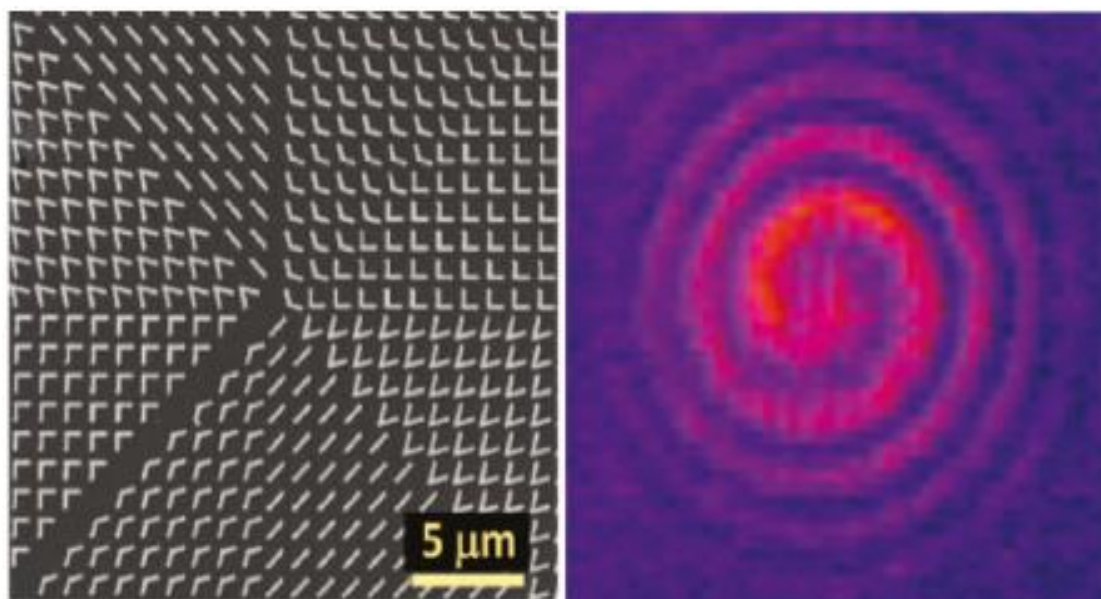
Μία εξωτερική τάση εφαρμοζόμενη στο πήκτωμα ιόντων ελέγχει το στρώμα από το γκριφένιο, ελέγχοντας έτσι το πλάτος του στρώματος διάχυσης. Αυτό μετατρέπει το σύστημα σε έναν υποβιβασμένο συντονιστή με μεγαλύτερο έλεγχο στις διακυμάνσεις φάσης παρέχοντας μετατόπιση φάσης $\pm 180^\circ$. Αυτή η μέθοδος ελέγχου της οπτικής αγωγιμότητας ελεγχόμενης από την πύλη για την οπτική αγωγιμότητα είναι επί του παρόντος ένα θέμα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος στον τομέα της έρευνας [67], [68], [69].

Τα σχέδια μετα-επιφανειών μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να επιτύχουν απότομες και ασυνεχείς μεταβάσεις φάσεων, παρέχοντας μεγάλη ευελιξία στη διαμόρφωση δέσμης. Οι επιφάνειες έχουν φύση ψεύδο-περιοδική με κάθε στοιχειώδες τμήμα να περιλαμβάνει ένα σύνολο μεταβαλλόμενων νανο-συντονιστών. Οι επιφάνειες αυτές παρέχουν συνέχεια πλάτους μαζί με βαθμωτή μεταβολή της φάσης που οδηγεί σε σωρευτικά σε άλμα φάσης [70]. Μια σειρά από οκτώ κεραιές ράβδου που περιστρέφονταν σταδιακά σε προσανατολισμό χρησιμοποιήθηκαν για να σχηματίσουν ένα στοιχειώδες τμήμα μετα-επιφάνειας και να παρέχουν τη δυνατότητα διαφοροποίησης φάσης κατά 360° .



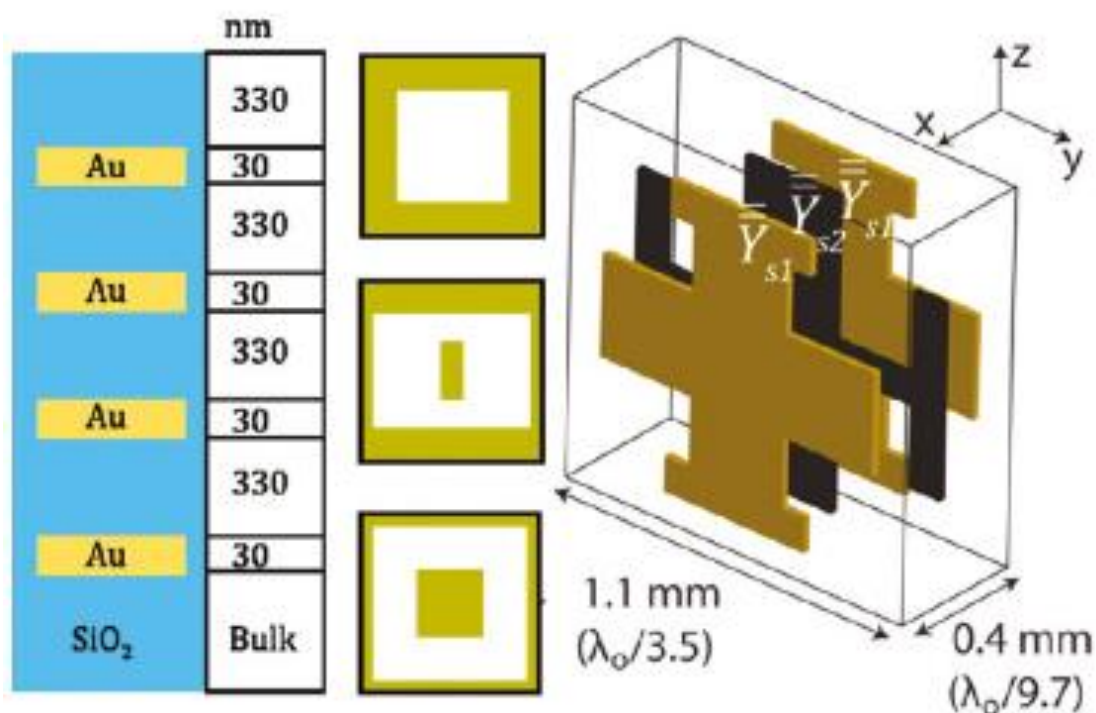
Εικόνα 21 Νανο-κεραίες που περιστρέφονται περιοδικά και αλλάζουν τη φάση

Οι νανο-κεραίες σχήματος "V" διεγέρθηκαν είτε με τους άξονες συμμετρίας είτε κατά της συμμετρίας (ή με συνδυασμό αυτών) για να παράγουν την επιθυμητή ομοιότητα (δεξιά / αριστερά) και αποτελεσματική φάση. Αυτές οι επιφάνειες αναφέρονται ως "μετα-επιφάνειες βασιζόμενες σε οπτικούς διασκορπιστές" και βασίζονται στην αλληλεπίδραση του φωτεινού περιστατικού στην κεραία και στις εντοπισμένες επιφανειακές νανο-κεραίες. Η έννοια διερευνήθηκε περαιτέρω δημιουργώντας οκτώ ίσες φέτες πίτας που περιλαμβάνουν κάθε μία από τις νανο-γραμμές στη σωστή σειρά ώστε να παρέχουν μια συνεχή βαθμίδα φάσης, δημιουργώντας μια οπτική δίνη με κάθε φέτα παρέχοντας μια μετατόπιση κατά 45° [71], [72]. Η δομή και ο λαμβανόμενος στρόβιλος μπορούν να φανούν ακολούθως.



Εικόνα 22 μετα-επιφάνειες βασιζόμενες σε οπτικούς διασκορπιστές

Οι διαμορφωτές που παρέχουν ορισμένες μετατοπίσεις σταθερής φάσης, όπως η μετατροπή των εισερχόμενων κυμάτων σε ορθογώνια αντίστοιχά τους, είναι ουσιαστικά μετατροπείς πόλωσης. Αντιστρόφως, μπορεί να ειπωθεί ότι η πόλωση του εισερχόμενου κύματος υπαγορεύει την παραχθείσα μετατόπιση φάσης. Οι δομές που περιλαμβάνουν τις νανο-κεραίες [73], οι διχρωματικοί κρύσταλλοι [74], τα ελλειπτικά πλέγματα και οι λοιπές δομές [75] έχουν δείξει όλες τις δυνατότητες τροποποίησης της πόλωσης ενός κύματος. Απλές πλάκες τετάρτου κύματος παρέχουν μία μετατόπιση φάσης 90° μεταξύ δύο ορθογώνιων στοιχείων ηλεκτρικού πεδίου. Ένας από τους απλούστερους πολωτές είναι μια ενιαία σχισμή σε μεταλλικό επίπεδο. Η μεταδιδόμενη δέσμη θα έχει πάντοτε κυρίαρχη πόλωση κατά μήκος του δευτερεύοντος άξονα της σχισμής και μπορεί εύκολα να χαρακτηριστεί με τη χρήση μήτρας πόλωσης κατά Jones. Ένας πιο χρήσιμος σχεδιασμός μπορεί να δημιουργηθεί με τη χάραξη πολλών τέτοιων σχισμοειδών ανισότροπων διασκορπιστών με παρόμοιες γεωμετρίες αλλά με ποικίλους προσανατολισμούς [30].



Εικόνα 23 ορθογώνιες μεταστροφικές επιφάνειες

Οι πρώιμες προσαρμογές βασίζονται σε ορθογώνιες μεταστροφικές επιφάνειες με διάσπαση νανο-γραμμής και νανο-κεραίας, οι οποίες ρυθμίζονται ελαφρώς πάνω και κάτω από τον συντονισμό τους, αντίστοιχα, για να επιτευχθεί ακριβής μετατόπιση φάσης κατά 90° . Στην ιδανική περίπτωση (σε συντονισμό) εμφανίζεται ξαφνική μετατόπιση φάσης από $\pm 90^\circ$ σε $\mp 90^\circ$ ή

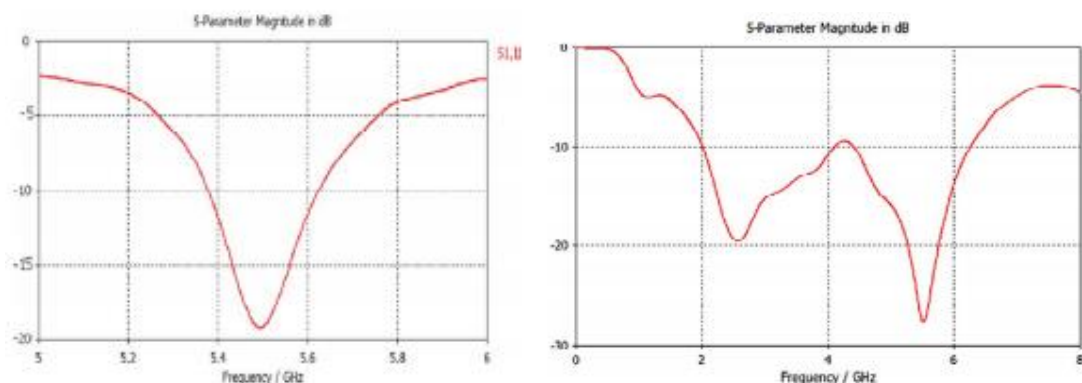
από χωρητική / επαγωγική έως επαγωγική / χωρητική απόκριση. Πολύ ακριβείς και αυθαίρετες μετατοπίσεις φάσεων μπορούν να επιτευχθούν με την τοποθέτηση ηλεκτρικών και μαγνητικών διπόλων [36]. Με βάση την αρχή του ελέγχου της ηλεκτρικής απόκρισης, προτάθηκε ποικιλία δομών όπου η προσθήκη μαγνητικού ελέγχου βελτίωσε σημαντικά την απόδοση των πολωτών. Οι κατασκευές αποτελούσαν από πολυστρωματικές ή κλιμακωτές μεταστροφικές επιφάνειες, οι οποίες επέτρεψαν τον έλεγχο τόσο των ηλεκτρικών όσο και των μαγνητικών επιδεκτικών [76]. Το ρεύμα που κυκλοφορεί μέσα από τα κλιμακωτά στρώματα παρέχει τον απαιτούμενο συντονισμό για το στοιχείο του μαγνητικού πεδίου.

Μια απλή υλοποίηση συνεπάγεται τον υπολογισμό των πινάκων Jones κάθε φύλλου για να επιτευχθεί η απαιτούμενη αλλαγή πόλωσης. Ένα πιο ακριβές μοντέλο λαμβάνει υπόψη τις πολλαπλές αντανάκλασεις μεταξύ των φύλλων και, έχοντας καθορίσει τις απαιτούμενες παραμέτρους S , υπολογίζει την απαιτούμενη σύνθετη αντίσταση φύλλου χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο κλιμακωτής κατάβασης. Ανάλογα με την ληφθείσα εμπέδηση, μπορεί να επιλεγεί η γεωμετρία για κάθε φύλλο, η οποία με τη σειρά της δημιουργεί συσκευές όπως ένας περιστροφικός πολωτής, ένας συμμετρικός κυκλικός πολωτής, ένας ασύμμετρος γραμμικός πολωτής, καθώς και ένας ασύμμετρος κυκλικός πολωτής. Οι βελτιστοποιήσεις του αριθμού των στρώσεων σε σχέση με την αποτελεσματικότητα και το φάσμα του ελέγχου φάσης / πόλωσης έχουν βρεθεί ότι έχουν τις καλύτερες επιδόσεις για τρία ή τέσσερα κλιμακωτά στρώματα μετα-επιφανειών [77].

4 Εφαρμογές και Προοπτικές

4.1 Μετα-υλικά σαν κεραία

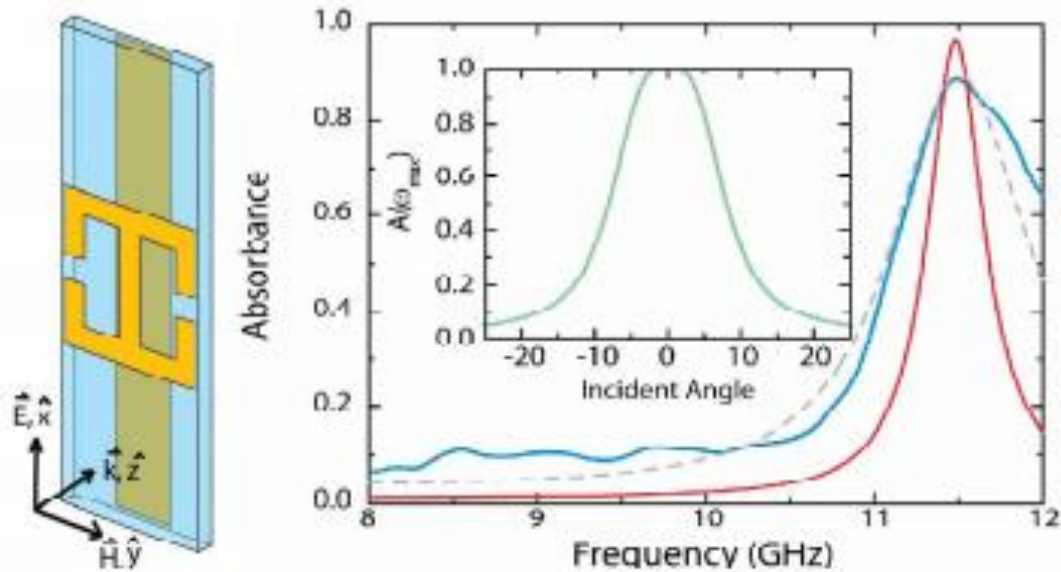
Τα περιβλήματα μετα-υλικών έχουν χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση της ακτινοβολίας και την αντιστοίχιση των ιδιοτήτων μικρών ηλεκτρικών και μαγνητικών διπολικών κεραιών. Μια κεραία μετα-υλικών ακτινοβολεί το 95% της εισόδου στα 350 MHz διατηρώντας μήκος ίσο με το ένα πέμπτο του μήκους κύματος. Ακόμα και μια σημειακή κεραία με κάλυμμα μετα-υλικού έχει αυξημένη κατευθυντικότητα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μετα-υλικά μηδενικού δείκτη για να επιτευχθεί υψηλή κατευθυντικότητα. Ένα σήμα που διαδίδεται σε ένα μετα-υλικό με μηδενικό δείκτη θα διεγείρει μια στατική στο χώρο δομή πεδίου που κυμαίνεται χρονικά και ενισχύεται. Η φάση σε οποιοδήποτε σημείο σε ένα μετα-υλικό με μηδενικό δείκτη θα έχει την ίδια σταθερή τιμή. Το μετα-υλικό μπορεί να ενισχύσει το κέρδος και να μειώσει την απώλεια επιστροφής μιας σημειακής κεραία.



Εικόνα 24 Απόκριση συχνότητας απλού υλικού και μετα-υλικού

4.1.1 Μετα-υλικά σαν απορροφητής

Ο πρώτος απορροφητής βασισμένος σε μετα-υλικά προτάθηκε από το 2008 χρησιμοποιεί τρία στρώματα: δύο μεταλλικά στρώματα και ένα διηλεκτρικό. Εμφανίζει τιμή απορροφητικότητας με προσομοίωση 99% και πραγματική 88% στα 11,48 GHz όπως φαίνεται στην εικόνα 7. Η διαφορά μεταξύ προσομοιωμένων και μετρηθέντων αποτελεσμάτων οφείλεται σε σφάλματα κατασκευής.

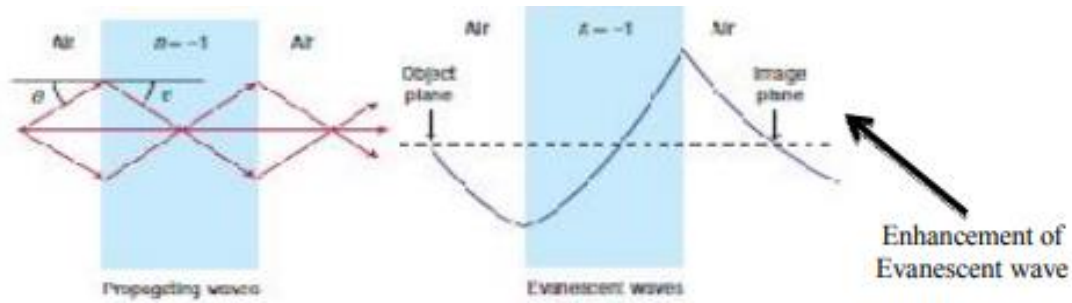


Εικόνα 25 Αποσβεστήρας⁴

4.1.2 Μετα-υλικά σαν υπερ-φακοί

Στους υπερ-φακούς χρησιμοποιούνται μετα-υλικά για να ξεπεραστεί το όριο περίθλασης. Παρουσιάζει δυνατότητες ανάλυσης που υπερβαίνουν τα συνηθισμένα μικροσκόπια. Τα συμβατικά οπτικά υλικά υφίστανται ένα όριο διάθλασης επειδή μόνο διαδιδόμενα στοιχεία εκπέμπονται από μια πηγή φωτός. Τα μη διαδιδόμενα στοιχεία (ανεπαίσθητα κύματα) δεν μεταδίδονται. Ένας τρόπος για να βελτιωθεί η ανάλυση είναι να αυξηθεί ο δείκτης διάθλασης. Αυτό περιορίζεται από τη διαθεσιμότητα υλικών υψηλού δείκτη. Ο σούπερ φακός έχει την ικανότητά να βελτιώνει σημαντικά και να ανακτά το ανεστραμμένα κύματα που μεταφέρουν πληροφορίες σε πολύ μικρές κλίμακες. Κανένας φακός δεν είναι ακόμη σε θέση να ανακατασκευάσει πλήρως όλα τα κύματα που εκπέμπονται από ένα αντικείμενο. Έτσι το μέλλον η πρόκληση είναι να σχεδιάσουμε ένα υπερ-φακό που να μπορεί να ανακτήσει όλα τα ανεπαίσθητα κύματα για να πάρουν τέλεια εικόνα.

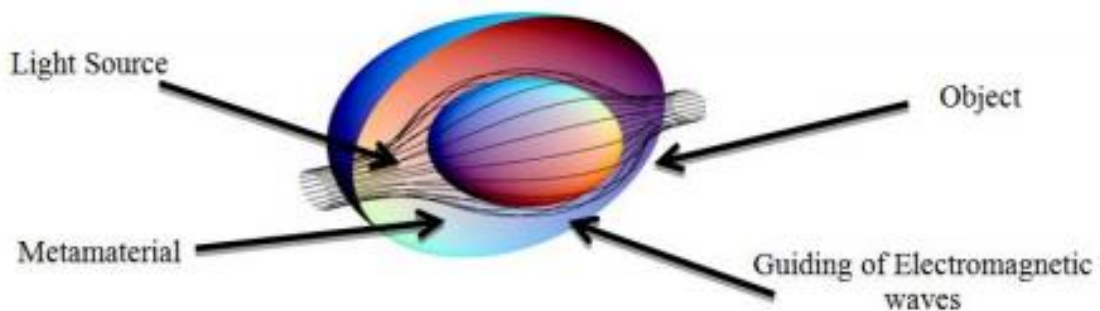
⁴ N. I. Landy, D. R. Smith, W. J. Padilla (2008), a Perfect Metamaterial Absorber.



Εικόνα 26 υπερ-φακός⁵

4.1.3 Μετα-υλικά σαν κάλυψη

Η κάλυψη μπορεί να επιτευχθεί με ακύρωση του παραγόμενου ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου από ένα αντικείμενο ή από την καθοδήγηση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος γύρω από το αντικείμενο. Καθοδήγηση του κύμα σημαίνει μετασχηματισμός του συστήματος συντεταγμένων με τέτοιο τρόπο ώστε μέσα στο κοίλο το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του μανδύα θα είναι μηδέν. Με τον τρόπο αυτό η περιοχή μέσα στο κέλυφος ηλεκτρομαγνητικά εξαφανίζεται.



Εικόνα 27 Κάλυψη⁶

4.1.4 Μετα-υλικά σαν αισθητήρες

Τα μέτα-υλικά ανοίγουν ορίζοντες για το σχεδιασμό αισθητήρα με καθορισμένη ευαισθησία. Παρέχουν εργαλεία για τη σημαντική βελτίωση της ευαισθησίας και της ανάλυσης του αισθητήρα. Τέτοιοι αισθητήρες

⁵ Ramakrishna (2005), Physics of negative refractive index materials, pp 453-467,490-495S. Raghavan and Rajesh Kumar (2013), An Overview of Metamaterials in Biomedical Applications, PIERS Proceedings.

⁶ Adnan Noor (2010), Metamaterial Electromagnetic Absorbers and Plasmonic Structures, pp.42-43.

χρησιμοποιούνται στη γεωργία, τη βιοϊατρική κλπ. Οι αισθητήρες βασίζονται σε συντονισμένο υλικό και χρησιμοποιούν μοτίβα για να αποκτήσουν καλύτερη ευαισθησία.



Εικόνα 28 Αισθητήρες⁷

4.2 Προοπτικές

Το μετα-υλικό αναμένεται να έχει αντίκτυπο σε όλο το φάσμα των τεχνολογιών όπου χρησιμοποιείται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και θα προσφέρει μια ευέλικτη πλατφόρμα για τεχνολογική πρόοδο. Μεταξύ των μετα-υλικών, τα υλικά αρνητικού δείκτη διάθλασης ή τα υλικά αριστερού χεριού έχουν προσελκύσει ιδιαίτερη προσοχή στα μικροκύματα. Οι ιδιότητες τους επιτρέπουν τη μείωση του μεγέθους σε σύγκριση με άλλα υλικά για λειτουργία πολλαπλών ζωνών και δυνατότητα επανασυντονισμού των συσκευών και των κεραιών. Η πιο ενδιαφέρουσα εφαρμογή είναι ως απορροφητής και επίσης ως αισθητήρας για την υγρασία άερρα, τη μέτρηση της υγρασίας εδάφους κλπ. Είναι σαφές ότι το μέλλον των μετα-υλικών έγκειται κυρίως στο τομέα οπτικών και ιατρικών. Αυτό συνδέεται στενά με τις προόδους στη νανοτεχνολογία.

⁷ Goran Kiti, Vasa Radoni, and Vesna Crnojevi –Bengin(2012), Soil moisture sensors based on metamaterials, SIST.

5 Συμπεράσματα

Η τεχνολογία ενδιαφέροντος είναι μια νέα τεχνολογία που βρίσκεται σε εξέλιξη. Οι προκλήσεις που αντιμετωπίζει αυτή η τεχνολογία βρίσκονται σε διάφορα επίπεδα λόγω του καινοτόμου είδους και λόγω της ποικιλίας των δυνατών εφαρμογών. Οι ερευνητικές δραστηριότητες που εξελίσσονται περιλαμβάνουν μελέτη των θεωρητικών ιδιοτήτων των κυμάτων, συμμετρικών υλικών, ανάπτυξη αναλυτικών και αριθμητικών μοντέλων για την προσομοίωση και βελτιστοποίηση, ανακάλυψη νέων μεθόδων για το σχεδιασμό συσκευών και υπέρβαση της σημερινής τεχνολογίας περιορισμούς.

Η δράση δικτύωσης και ανταλλαγής απόψεων μεταξύ των ερευνητών διαφορετικών πεδίων αλλά και των κατασκευαστών και παρόχων υπηρεσιών είναι απαραίτητη προκειμένου να καταστεί δυνατή η ανταλλαγή ικανοτήτων. Για να εξασφαλιστεί η βέλτιστη κατανομή των διαφόρων περιοχών της γνώσης απαιτείται διεπιστημονική οργάνωση με την ενσωμάτωση εταιρών με διαφορετικό υπόβαθρο: από τη φυσική, τις μηχανολογικές κοινότητες και την τελικούς χρήστες, με θεωρητικά, αριθμητικά και σχεδιαστικά προφίλ.

Η νέα τεχνολογία και οι εφαρμογές που φέρνει υπόσχονται σημαντικές επιδράσεις στην οικονομία και την καθημερινότητα της σύγχρονης κοινωνίας.

6 Βιβλιογραφία

- [1] "Mobile Edge Computing: a building block for 5G". Telecompaper(subscription)-Jul 14, 2015
- [2] Jump up to: a b c Ahmed, Arif; Ahmed, Ejaz. A Survey on Mobile Edge Computing. India: 10th IEEE International Conference on Intelligent Systems and Control(ISCO'16), India.
- [3] "Mobile Edge Computing Introductory Technical White Paper"(PDF). *etsi.org*. 2014-09-01. Retrieved 2015-10-26.
- [4] "On the edge: the story of Mobile Edge Computing". The Mobile Network, By Keith Dyer 23 February 2015
- [5] *Ovidiu Vermesan; Peter Friess, (16 June 2015)*. Building the Hyperconnected Society: Internet of Things Research and Innovation Value Chains, Ecosystems and Markets. *River Publishers*. pp. 65-. ISBN 978-87-93237-99-5.
- [6] S. Rappaport et al., Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: it will work!, *IEEE Comm. Mag.*, 2014.
- [7] Gerhard Fettweis ; Marco Krondorf ; Steffen Bittner, "GFDM - Generalized Frequency Division Multiplexing," *IEEE 69th Vehicular Technology Conference*, 2009
- [8] Lavish Kansal, Gurjot Singh Gaba, "Survey of Filter Bank Multicarrier (FBMC) as an efficient waveform for 5G ," *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, March 2018
- [9] R. Knopp et all, "Universal filtered multicarrier for machine type communications in 5G," *European Conference on Networks and Communications*, Athens, Greece 2016.

- [10] "5G Multiple Access Schemes," accessed online <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/5g-mobile-wireless-cellular/multiple-access-scheme.php> on 29.12.2018
- [11] Shanzhi Chen et al, "Pattern Division Multiple Access (PDMA) - A Novel Non-orthogonal Multiple Access for 5G Radio Networks," IEEE Transactions on Vehicular Technology 66, January 2016
- [12] Monica Alven, "ZTE touts 5G breakthrough with MUSA technology," accessed online <https://www.fiercewireless.com/tech/zte-touts-5g-breakthrough-musa-technology> on 29.12.2018
- [13] Yejian Chen et al, "Multiple Access and Waveforms for 5G: IDMA and Universal Filtered Multi-Carrier," IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2014
- [14] H. Bayer, A. Krauss, T. Zaiczek, R. Stephan, O. Enge-Rosenblatt, and M. A. Hein, "Ka-band user terminal antennas for satellite communications," IEEE Antenna Propag. Mag., vol. 58, no. 1, 2016.
- [15] Sifiso Busisa Gambahaya, "Design and Implementation of the Pillbox Antenna," Dissertation, Cape Town, December 2005.
- [16] G. Minatti, M. Faenzi, E. Martini, F. Caminita, P. De Vita, D. González-Ovejero, M. Sabbadini, S. Maci, "Modulated metasurface antennas for space: synthesis, analysis and realizations," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 63, no. 4, 2015.
- [17] C. Pfeiffer and A. Grbic, "A printed, broadband Luneburg lens antenna," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 58, no. 9, 2010.
- [18] 10. P.-S. Kildal, "Definition of artificially soft and hard surfaces for electromagnetic waves," Electr. Lett., vol. 24, no. 3, 1998.
- [19] 11. A.A. Oliner, A. Hessel, "Guided waves on sinusoidally-modulated reactance surfaces," IRE Transactions on Antennas and Propagation, vol.7, no.5, 1959.
- [20] 12. H. Fong, J. S. Colburn, J. J. Ottusch, J. L. Visher, D. F. Sievenpiper, "Scalar and tensor holographic artificial impedance surfaces," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 58, no. 10, 2010.

- [21] C. Pfeiffer and A. Grbic, "A printed, broadband Luneburg lens antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 9, 2010.
- [22] Bosiljevac, M. Casaletti, F. Caminita, Z. Sipus, S. Maci "Non-uniform metasurface Luneburg lens antenna design," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 9, 2012.
- [23] 16. Dhouibi, S. Nawaz Burokur, A. de Lustrac, A. Priou, "Compact metamaterial-based substrateintegrated Luneburg lens antenna," *IEEE Antennas Wireless Prop. Lett.*, vol. 11, 2012.
- [24] 17. J.B. Pendry, D. Schurig, D.R. Smith, "Controlling electromagnetic fields," *Science* 312 (5514), 2006.
- [25] 18. Leonhardt, "Optical conformal mapping," *Science* 312 (5781), 2006.
- [26] P.-S. Kildal, E. Alfonso, A. Valero-Nogueira, E. Rajo-Iglesias, "Local metamaterial-based waveguides in gaps between parallel metal plates," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, 2009.
- [27] D. Zarifi, A. Farahbakhsh, A. U. Zaman, P. S. Kildal, "Design and Fabrication of a High-Gain 60-GHz Corrugated Slot Antenna Array With Ridge Gap Waveguide Distribution Layer," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 7, 2016.
- [28] Zouhdi S, Sihvola A, Aarsalane M. *Advances in electromagnetics of complex media and metamaterials*. Boston, Kluwer Academic Publishers, 2002
- [29] Sihvola A. *Metamaterials in electromagnetics*. Metamaterials 2007.
- [30] Walia S, Shah CM, Gutruf P, et al. Flexible metasurfaces and metamaterials: a review of materials and fabrication processes at micro-and nano-scales. *Appl Phys Rev* 2015
- [31] [Kildishev AV, Boltasseva A, Shalaev VM., "Planar photonics with metasurfaces." *Science* 2013.
- [32] [Minovich AE, Miroshnichenko AE, Bykov AY, Murzina TV, Neshev DN, Kivshar YS., "Functional and nonlinear optical metasurfaces," *Laser Photonics Rev* 2015

- [33] Quarfoth R, Sievenpiper D., "Artificial tensor impedance surface waveguides," IEEE Trans Antennas Propag 2013
- [34] Achouri K, Lavigne G, Salem MA, Caloz C., "Metasurface spatial processor for electromagnetic remote control," IEEE Trans Antennas Propagation 2016
- [35] Wu Z, Ra'di Y, Grbic A., "A tunable polarization rotator based on metasurfaces," Paris, IEEE, 2017
- [36] Pfeiffer C, Grbic A., "Metamaterial Huygens' surfaces: tailoring wave fronts with reflectionless sheets," Physics Rev Letters 2013
- [37] Fong BH, Colburn JS, Ottusch JJ, Visher JL, Sievenpiper DF. , "Scalar and tensor holographic artificial impedance surfaces," IEEE Transactions on Antennas and Propagation 2010
- [38] Mittra R, Chan CH, Cwik T., "Techniques for analyzing frequency selective surfaces-a review," Proceedings IEEE 1988
- [39] Sievenpiper D, Zhang L, Broas RFJ, Alexopolous NG, Yablonovitch E., "High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band," IEEE Transactions on Microwave Theory Tech 1999
- [40] Ramo S, Whinnery JR, Van Duzer T. Fields and waves in communication electronics. New York, John Wiley & Sons, 1965.
- [41] Collin RE. "Field theory of guided waves." 2nd ed, New York, IEEE, 1991
- [42] Kildal PS. "Artificially soft and hard surfaces in electromagnetics." IEEE Transactions on Antennas and Propagation 1990
- [43] Clavijo S, Diaz RE, McKinzie WE. "Design methodology for Sievenpiper high-impedance surfaces: an artificial magnetic conductor for positive gain electrically small antennas." IEEE Transactions on Antennas and Propagation 2003
- [44] Feresidis AP, Goussetis G, Wang S, Vardaxoglou JC. "Artificial magnetic conductor surfaces and their application to low-profile high-gain planar antennas." IEEE Transactions on Antennas and Propagation 2005

- [45] Sievenpiper D, Hsu HP, Schaffner J, Tangonan G, Garcia R, Ontiveros S. "Low-profile, four-sector diversity antenna on high-impedance ground plane." *Electron Lett* 2000
- [46] Vallecchi A, De Luis JR, Capolino F, De Flaviis F. "Low profile fully planar folded dipole antenna on a high impedance surface." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 2012
- [47] Kern DJ, Werner DH. "A genetic algorithm approach to the design of ultra-thin electromagnetic bandgap absorbers." *Microwave Optical Technology Letters* 2003
- [48] Yang F, Rahmat-Samii Y. "Microstrip antennas integrated with electromagnetic band-gap (EBG) structures: a low mutual coupling design for array applications." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 2003
- [49] Rozanov KN. "Ultimate thickness to bandwidth ratio of radar absorbers." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 2000
- [50] Hashemi SM, Tretyakov SA, Soleimani M, Simovski CR. "Dual-polarized angularly stable high-impedance surface." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 2013
- [51] Simovski CR, de Maagt P, Melchakova IV. "High-impedance surfaces having stable resonance with respect to polarization and incidence angle." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 2005
- [52] Kim S, Li A, Sievenpiper DF. "Reconfigurable impedance ground plane for broadband antenna systems." San Diego, IEEE, 2017
- [53] Li A, Luo Z, Wakatsuchi H, Kim S, Sievenpiper DF. "Nonlinear, active, and tunable metasurfaces for advanced electromagnetics applications." *IEEE Access* 2017
- [54] Sievenpiper DF, Schaffner JH, Song HJ, Loo RY, Tangonan G. "Two-dimensional beam steering using an electrically tunable impedance surface." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 2003

- [55] Radwan A, Verri V, D'Amico M, Gentili GG. "Beam reconfigurable antenna for the THz band based on a graphene high impedance surface." *Physics E Low-dimensional System Nanostructures* 2017
- [56] Luo Z, Chen X, Long J, Quarfoth R, Sievenpiper D. "Nonlinear power-dependent impedance surface *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 2015
- [57] Tian J, Nagarkoti DS, Rajab KZ, Hao Y. "High-impedance surface loaded with graphene non-foster circuits for low-profile antennas *IEEE Transactions on Antennas and Propagation Letters* 2017
- [58] Caloz C, Itoh T. "Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications." Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2005.
- [59] Caloz C, Itoh T, Rennings A. "CRLH metamaterial leaky-wave and resonant antennas." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 2008
- [60] Sievenpiper DF. "Forward and backward leaky wave radiation with large effective aperture from an electronically tunable textured surface." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 2005
- [61] Esquiús-Morote M, Gómez-Di JS, Perruisseau-Carrier J. "Sinusoidally modulated graphene leaky-wave antenna for electronic beamscanning at THz." *IEEE Transactions on Terahertz Science Technology* 2014
- [62] Hariharan P. "Optical holography: principles, techniques and applications." Cambridge, Cambridge University Press, 1996.
- [63] Li YB, Cai BG, Cheng Q, Cui TJ. "Isotropic holographic metasurfaces for dual-functional radiations without mutual interferences." *Adv Functional Mater* 2016
- [64] Patel AM, Grbic A. "A printed leaky-wave antenna based on a sinusoidally-modulated reactance surface." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 2011
- [65] Chen H-T, Padilla WJ, Cich MJ, Azad AK, Averitt RD, Taylor AJ. "A metamaterial solid-state terahertz phase modulator." *Natural Photonics* 2009
- [66] Miao Z, Wu Q, Li X, et al. "Widely tunable terahertz phase modulation with gate-controlled graphene metasurfaces." *Physics Review X* 2015

- [67] Procházka P, Mareček D, Lišková Z, Čechal J, Šikola T. “X-ray induced electrostatic graphene doping via defect charging in gate dielectric.” Science Repository 2017
- [68] Yao Y, Wu Q, Li X, et al. “Broad electrical tuning of graphene-loaded plasmonic antennas” Nanotechnology Letters 2013
- [69] Lee SH, Choi M, Kim TT, et al. “Switching terahertz waves with gate-controlled active graphene metamaterials.” Natural Materials 2012
- [70] Yu N, Choi M, Kim TT, et al. “Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction.” Science 2011
- [71] Yu N, Aieta F, Genevet P, Kats MA, Gaburro Z, Capasso F. “A broadband, background-free quarter-wave plate based on plasmonic metasurface”s. Nanotechnology Letters 2012
- [72] Genevet P, Yu N, Aieta F, et al. “Ultra-thin plasmonic optical vortex plate based on phase discontinuities.” Applied Physics Letters 2012
- [73] Khoo EH, Li EP, Crozier KB. “Plasmonic wave plate based on subwavelength nanoslits”. Optics Letters 2011
- [74] Drezet A, Genet C, Ebbesen TW. “Miniature plasmonic wave plates.” Physics Review Letters 2008
- [75] Bai B, Svirko Y, Turunen J, Vallius T. “Optical activity in planar chiral metamaterials: theoretical study.” Physics Review A 2007
- [76] Pfeiffer C, Grbic A. “Cascaded metasurfaces for complete phase and polarization control.” Applied Physics Letters 2013
- [77] Pfeiffer C, Grbic A. “Millimeter-wave transmitarrays for wavefront and polarization control.” IEEE Transactions on Microwave Theory Technology 2013