



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Ανάπτυξη κεραιών για *in vitro* φασματοσκοπία
βιολογικών ιστών στο THz φάσμα συχνοτήτων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΤΟΥΜΑΣΗ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ

Επιβλέπων: Νικόλαος Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2018



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής

Ανάπτυξη κεραιών για *in vitro* φασματοσκοπία βιολογικών ιστών στο THz φάσμα συχνοτήτων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΤΟΥΜΑΣΗ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ

Επιβλέπων: Νικόλαος Ουζούνογλου
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 20η Μαρτίου 2018.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

Νικόλαος Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Ειρήνη Καρανάσιου
Αν. Καθηγήτρια Σ.Σ.Ε

.....

Δήμητρα Κακλαμάνη
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2018

(Υπογραφή)

.....

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΤΟΥΜΑΣΗΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

© 2018 – All rights reserved

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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 το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Στην διπλωματική αυτή κατασκευάζεται μία ανακλαστική στοιχειοκεραία που λειτουργεί στο THz φάσμα συχνοτήτων. Αρχικά παρουσιάζεται το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο που χρειάζεται να έχει κανείς ώστε να κατανοήσει στη συνέχεια την λειτουργία της κεραίας αυτής. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται για αρχή τα βασικά στοιχεία της θεωρίας των κεραιών και πως αυτές λειτουργούν. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η τεχνολογία των THz και πως αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί. Τέλος αναφέρονται οι βασικές ιδιότητες του γραφένιου και γιατί αυτές είναι χρήσιμες στην συγκεκριμένη περίπτωση. Αφού παρουσιαστούν τα προαναφερθέντα θεωρητικά στοιχεία περιγράφεται αναλυτικά η κεραία που κατασκευάστηκε. Η κεραία αυτή έχει σαν βασικό υλικό το γραφένιο. Αποτέλεσμα αυτού είναι το γεγονός ότι έχει μεταβαλλόμενη, μιγαδική, επιφανειακή αγωγιμότητα στο THz φάσμα συχνοτήτων. Ακόμη το γραφένιο δίνει την δυνατότητα στην κεραία να έχει πάρα πολύ μικρό μέγεθος στοιχείων, (της τάξης των nanometer), και παρόλα αυτά να διατηρεί την καλή απόδοσή της. Η κεραία αυτή λειτουργεί στα 1.3 THz και εμπεριέχει πάνω από 25.000 στοιχεία που το μήκος τους όμως δεν ξεπερνά το $\lambda_0/16$. Αξίζει, τέλος, να αναφέρουμε πως για το σχεδιασμό, την προσομοίωση και εν τέλει την ανάλυση της κεραίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό HFSS. Για την ανάλυση της κεραίας αυτής λαμβάνουμε υπόψιν την γωνία πρόσπτωσης του κύματος στην κεραία και θεωρούμε δεδομένο το άπειρο μήκος της. Στη συνέχεια μετράμε την απόδοση της κεραίας σε όρους κατευθυντικότητας, εύρους ζώνης, αλληλοπώλωσης και κέρδους. Εν κατακλείδι, η κεραία αυτή αποτελεί ένα πρώτο βήμα για την κατασκευή ανακλαστικών στοιχείων από γραφένιο.

Λέξεις Κλειδιά

ανακλαστική συστοιχία, terahertz, γραφένιο, κατευθυντική κεραία, αναπροσαρμοζόμενη, φασματοσκοπία, βιολογικών, ιστών, HFSS, floquet ports, φάσμα συχνοτήτων.

Abstract

In this diploma thesis we build a reflectarray antenna which operates at THz. Initially the necessary theoretical background for someone to understand this diploma thesis is explained. More specifically we present the basic antenna theory and how antennas work. After that we present the basic features of graphene and the reason why these features are useful to us. We describe also the manufactured antenna. To be more specific this antenna is build from graphene. This leads to a drastic reduction of the electrical size of the array unit cell and thereby good array performance. The proposed reflectarray has been designed to work at 1.3 THz and comprises more than 25 000 elements. The array reflective unit cell is analyzed using a full vectorial approach,taking into account the variation of the angle of incidence and assuming local periodicity. Good performance is obtained in terms of bandwidth, cross-polar, and grating lobes suppression, proving the feasibility of graphene-based reflectarrays and other similar spatially fed structures at Terahertz frequencies. This result is also one first important step toward reconfigurable THz reflectarrays using graphene's electric field effect. This antenna is designed in the HFSS software.

Keywords

antenna, terahertz, spectroscopy, HFSS, reconfigurable, bandwidth, floquet ports, graphene, biological tissues, reflectarray.

Ευχαριστίες

Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ.Ουζούνογλου Νικόλαο για τη δυνατότητα που μου έδωσε να εκπονήσω αυτήν την διπλωματική εργασία και να εμβαθύνω τις γνώσεις μου πάνω στη σχεδίαση και στην ανάλυση των κεραιών.

Επιπλέον, για την ολοκλήρωση της διπλωματικής οφείλω πολλά στη διαρκή και κοντινή συνεργασία που είχα με την Δρ. Καρανάσιου Ειρήνη την οποία ευχαριστώ για τη σημαντική συνεισφορά της, την διαρκή και αμέριστη υποστήριξη και επίσης την προθυμία της να βοηθήσει κάθε στιγμή.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που με στήριξε όλα αυτά τα χρόνια και δείχνοντας υπομονή και εμπιστοσύνη στις ικανότητές μου. Προπάντων όμως τους ευχαριστώ γιατί χωρίς αυτούς δε θα είχα καταφέρει να φτάσω ως εδώ που είμαι τώρα αλλά κυρίως γιατί διαμόρφωσαν και σφυρηλάτησαν τον χαρακτήρα μου, προσπαθώντας να μου εμφυσήσουν τις ηθικές αξίες και αρχές που με διέπουν μέχρι σήμερα.

Μέσα από την καρδιά μου θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την Νατάσα, η οποία ήταν πάντα δίπλα μου σε οτιδήποτε τη χρειαζόμουν, όχι μόνο όσον αφορά τη διπλωματική, αλλά και την καθημερινότητα εκτός σχολής. Έδειξε κατανόηση στα προβλήματα που αντιμετώπιζα, αλλά κυρίως αποτελούσε πάντα εκείνο το απάνεμο λιμάνι που κατέφευγα σε όλες τις δυσκολίες της ζωής μου.

Θα ήταν παράλειψη φυσικά να μην ευχαριστήσω όλους τους θαμώνες, διαχρονικά, του εργαστηρίου ΜΟΠ, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι άλλωστε σε μεγάλο βαθμό για την επιτυχή ολοκλήρωση των σπουδών μου, καθώς κατάφεραν να κάνουν λίγο πιο ευχάριστη τόσο την καθημερινότητά μου όσο και τις αμέτρητες ώρες που μελετάγαμε μαζί. Φυσικά ξεχωριστή μνεία θα ήθελα να κάνω στον φίλο μου Δημήτρη που τον ευχαριστώ θερμά γιατί, μοιραστήχαμε καθημερινά τις ίδιες αγωνίες όσον αφορά στη διπλωματική και ήταν εκεί για εμένα όσες φορές χρειαζόμουν καθοδήγηση ή παρακίνηση για να συνεχίσω

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω αυτούς που μου δίδαξαν πως μαζί μπορούμε να καταφέρουμε πολλά. Αυτούς που ποτέ δεν έσκυψαν το κεφάλι. Αυτούς, που μαζί τους θα χτίσουμε τον κόσμο των ονείρων μας. Τους Ανεξάρτητους Αριστερούς Φοιτητές Ηλεκτρολόγους.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	2
Κατάλογος Σχημάτων	4
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
1.1 ΟΙ ΚΕΡΑΙΕΣ ΣΤΗΝ ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗ	5
1.2 ΤΟ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ	6
2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	9
2.1 ΚΕΡΑΙΕΣ: ΓΕΝΙΚΑ	9
2.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
2.1.2 ΙΣΤΟΡΙΑ	9
2.1.3 ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΙΑΣ ΚΕΡΑΙΑΣ	10
2.1.4 ΒΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΚΕΡΑΙΩΝ	11
2.2 REFLECTARRAYS	17
2.2.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ REFLECTARRAYS	19
2.2.2 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΤΙΣ REFLECTARRAYS	19
2.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ THz	24
2.3.1 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ THz	25
2.3.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΤΗΣ THz ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	27
2.4 ΚΕΡΑΙΕΣ TERAHERTZ	29
2.5 ΓΡΑΦΕΝΙΟ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	31
2.5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	31
2.5.2 ΔΟΜΗ	32
2.5.3 ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	32
2.5.4 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	33
2.5.5 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ	34
2.5.6 ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	35
2.5.7 ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ	35
2.5.8 ΟΠΤΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ	36
2.5.9 ΥΠΕΡΦΙΛΤΡΑΡΙΣΜΑ	37
2.5.10 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ	38

2.5.11 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ	38
2.5.12 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	40
3 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ	41
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	41
3.2 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ	42
3.2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	42
3.2.2 ΣΧΕΔΙΑΣΗ	43
4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	49
4.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ	49
4.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	63
Βιβλιογραφία	67

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Η κεραία που σχεδιάστηκε (Πηγή: [10]	7
2.1	Γραμμή Μεταφοράς Δύο Αγωγών (Πηγή: [10]	12
2.2	Ισοδύναμο Thevenin (a) Η κεραία μας. (b) Ισοδύναμο Thevenin εκπομπής. (c) Ισοδύναμο Thevenin λήψης (Πηγή: [18]	14
2.3	Reflectarray antenna (a) Αρχιτεκτονική (b) Φάση και Πλάτος του Συντελε- στή Ανάκλασης (Πηγή: [19]	18
2.4	Reflectarray με πολλαπλά στρώματα διαφορετικού μεγέθους Πηγή: [56]	20
2.5	Phoenix cell Πηγή: [37]	21
2.6	Spiraphrase Πηγή: [38]	21
2.7	(a) Σταθερής δέσμης Reflectarray (b) Αναπροσαρμοζόμενη Reflectarray Πη- γή: [45]	22
2.8	Reflectarray με διάτρητο διηλεκτρικό υλικό Πηγή: [46]	23
2.9	THz Φάσμα συχνοτήτων Πηγή: [47]	24
2.10	(a) Απεικόνιση του καρκίνου του δέρματος (b) Απεικόνιση ενός φύλλου και του ίδιου φύλλου 48 ώρες μετά Πηγή: [49]	25
2.11	(a) Απεικόνιση της τομής μια μπάλας του golf (b) Τρύπα του όζοντος (c) Χρήση της THz ακτινοβολίας για την ανίχνευση όπλων Πηγή: [48]	26
2.12	Τεχνολογία Ανίχνευσης Μεταλλικών Γωνιών Πηγή: [58]	26
2.13	Το φαινόμενο Dember Πηγή: [59]	27
2.14	Ο διακόπτης Austin Πηγή: [54]	28
2.15	Γραφένιο Πηγή: [82]	31
2.16	Δομή Γραφενίου Πηγή: [81]	32
2.17	ΑΤΟΜΟ ΑΝΘΡΑΚΑ Πηγή: [83]	33
2.18	Αντοχή Γραφενίου Πηγή: [84]	34
2.19	Οπτικές Ιδιότητες Πηγή: [86]	35
2.20	Ηλεκτρονικό Χαρτί (e-paper) με βάση το γραφένιο Πηγή: [86]	37
2.21	Υπερφιλτράρισμα - Διαχωρισμός νερού από αλάτι Πηγή: [85]	38
2.22	Αντοχή Γραφενίου σε Σφαίρες Πηγή: [87]	39
2.23	Φωτοβολταικά από Γραφένιο Πηγή: [85]	39
2.24	Λειτουργία γραφενίου σαν πηγή ενέργειας Πηγή: [87]	40

3.1	a Αρχιτεκτονική όλης της Reflectarray b Αρχιτεκτονική του στοιχείου της κεραίας Πηγή: [85]	42
3.2	Υπόστρωμα της κεραίας	43
3.3	Το υπόστρωμα πάνω στο γραφένιο της κεραίας	44
3.4	Υπόστρωμα της κεραίας	44
3.5	Master-Slave όρια	45
3.6	Όριο στη γείωση	45
3.7	Η διέγερση της κεραίας	47
4.1	Διάγραμμα πλάτους συναρτήσει του μήκους του στοιχείου για το χρυσό	51
4.2	Διάγραμμα πλάτους συναρτήσει του μήκους του στοιχείου για το γραφένιο	51
4.3	Διάγραμμα φάσης συναρτήσει του μήκους του στοιχείου για το χρυσό	52
4.4	Διάγραμμα φάσης συναρτήσει του μήκους του στοιχείου για το γραφένιο	52
4.5	Πολικό διάγραμμα της S παραμέτρου για το χρυσό	53
4.6	Πολικό διάγραμμα της S παραμέτρου για το γραφένιο	53
4.7	3D Πολικό διάγραμμα της ακτινοβολίας της κεραίας για το χρυσό	54
4.8	3D Πολικό διάγραμμα της ακτινοβολίας της κεραίας για το γραφένιο	54
4.9	3D Καρτεσιανό διάγραμμα του ηλεκτρικού πεδίου της κεραίας	55
4.10	3D Καρτεσιανό διάγραμμα του ηλεκτρικού πεδίου της κεραίας	55
4.11	3D Πολικό διάγραμμα του ηλεκτρικού πεδίου της κεραίας στο μακρινό πεδίο για το χρυσό	56
4.12	3D Πολικό διάγραμμα του ηλεκτρικού πεδίου της κεραίας στο μακρινό πεδίο για το γραφένιο	56
4.13	3D Πολικό διάγραμμα του κέρδους στο μακρινό πεδίο για το χρυσό	57
4.14	3D Πολικό διάγραμμα του κέρδους στο μακρινό πεδίο για το γραφένιο	57
4.15	Καρτεσιανό διάγραμμα του ηλεκτρικού πεδίου της κεραίας στο μακρινό πεδίο για το χρυσό	58
4.16	Καρτεσιανό διάγραμμα του ηλεκτρικού πεδίου της κεραίας στο μακρινό πεδίο για το γραφένιο	58
4.17	Καρτεσιανό διάγραμμα του κέρδους στο μακρινό πεδίο για το χρυσό	59
4.18	Καρτεσιανό διάγραμμα του κέρδους στο μακρινό πεδίο για το γραφένιο	59
4.19	Καρτεσιανό διάγραμμα της κατευθυντικότητας στο μακρινό πεδίο για το χρυσό	60
4.20	Καρτεσιανό διάγραμμα της κατευθυντικότητας στο μακρινό πεδίο για το γραφένιο	60
4.21	Καρτεσιανό διάγραμμα της κατευθυντικότητας στο μακρινό πεδίο για το χρυσό	61
4.22	Καρτεσιανό διάγραμμα της κατευθυντικότητας στο μακρινό πεδίο για το γραφένιο	61
4.23	Διάγραμμα ακτινοβολίας για το χρυσό	62
4.24	Διάγραμμα ακτινοβολίας για το γραφένιο	62
4.25	Το διάγραμμα φάσης του ανακλώμενου κύματος συναρτήσει του μεγέθους του γραφενίου [45]	63
4.26	Το διάγραμμα πλάτους του ανακλώμενου κύματος συναρτήσει του μεγέθους του γραφενίου [45]	64

Κεφάλαιο 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΟΙ ΚΕΡΑΙΕΣ ΣΤΗΝ ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗ

Οι κεραιές αποτελούν βασικό στοιχείο πολλών συστημάτων για βιοϊατρικές εφαρμογές. Ο σκοπός των εφαρμογών αυτών μπορεί να είναι είτε θεραπευτικός, όπως η υπερθερμία για αντιμετώπιση του καρκίνου, είτε διαγνωστικός, όπως η φασματοσκοπία βιολογικών ιστών η οποία βρίσκεται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο.

Ένας άλλος διαχωρισμός βασίζεται στο αν είναι επεμβατικές ή μη, δηλαδή σε αυτές που θα πρέπει η κεραία να διεισδύσει στον ιστό ή σε αυτές που ο ιστός ακτινοβολείται εξωτερικά από κάποια απόσταση. Τέλος, η διάταξη που θα χρησιμοποιηθεί μπορεί να επιτρέπει μόνο παθητική μέτρηση της ακτινοβολίας, όπως η ραδιομετρία του εγκεφάλου, ή ενεργητική, όπως είναι η μέτρηση της απόκρισης ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος όταν αυτό διέρχεται μέσα από έναν ιστό.

Οι πρώτες προσπάθειες για την δημιουργία των κεραιών έγιναν από τον Guglielmo Marconi το 1901 και βασίστηκαν στην ηλεκτρομαγνητική θεωρία του James Clerk Maxwell. Σήμερα οι κεραιές αποτελούν βασικό κομμάτι οποιουδήποτε συστήματος “επικοινωνεί” με άλλο και έχουν ενσωματωθεί σε πάρα πολλές εφαρμογές. Μερικές από αυτές είναι οι επίγειες επικοινωνίες (π.χ. κινητά τηλέφωνα), τα ασύρματα δίκτυα (wireless), οι δορυφορικές επικοινωνίες, τα ραντάρ, οι βιοϊατρικές εφαρμογές κ.τ.λ.

Φυσικά σε κάθε εφαρμογή χρησιμοποιείται και διαφορετικό είδος κεραιάς. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τις βιοϊατρικές εφαρμογές που είναι και το αντικείμενο αυτής της διπλωματικής, οι κεραιές πρέπει να πληρούν ορισμένα κριτήρια. Τα πιο σημαντικά από αυτά είναι ότι πρέπει να είναι πολύ μικρές ώστε να μπορούν να εμφυτευτούν, να είναι ικανές να λειτουργούν σε περιβάλλοντα μεγάλων απωλειών (και αυτό λόγω των βιολογικών ιστών που θα τις περικλείει) και τέλος να είναι φτιαγμένες από βιοσυμβατά υλικά ώστε να μην δημιουργούν βλάβη στον οργανισμό που εμφυτεύονται.

1.2 ΤΟ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ

Συγκεκριμένα σε αυτή τη διπλωματική κατασκευάζεται μία επίπεδη ανακλαστική συστοιχία (planar reflectarray) που λειτουργεί στο φάσμα των THz συχνοτήτων. Το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένη είναι το γραφένιο και σαν υπόστρωμα έχει το υλικό quartz. Οι διαστάσεις της είναι πολύ μικρές, της τάξης των νανομέτρων και αυτός είναι ένας από τους λόγους που την καθιστά κατάλληλη για χρήση στην φασματοσκοπία βιολογικών ιστών.

Ένας λόγος που η κεραία αυτή είναι κατάλληλη για in vitro φασματοσκοπία βιολογικών ιστών είναι, όπως αναφέραμε παραπάνω ότι λειτουργεί στο φάσμα των THz. Τα τελευταία μόνο χρόνια πραγματοποιείται εντατική ερευνητική προσπάθεια να αναπτυχθούν THz κεραίες, και αυτό συμβαίνει λόγω των εξαιρετικών δυνατοτήτων που προσφέρει η THz ακτινοβολία. Πιο συγκεκριμένα η χαμηλή ισχύς των σημερινών THz πηγών και η σημαντική απόσβεση που υφίσταται η THz ακτινοβολία όταν διέρχεται από υλικά με υψηλή συγκέντρωση σε νερό και υδρατμούς, όπως οι περισσότεροι βιολογικοί ιστοί, δημιουργεί την ανάγκη σχεδίασης και κατασκευής κεραιών με υψηλή κατευθυντικότητα και κέρδος. Μία τέτοια κεραία κατασκευάζεται και στη διπλωματική αυτή.

Ακόμη στην διπλωματική αυτή προτείνεται η κατασκευή μιας κεραίας με την χρήση γραφενίου. Το γραφένιο είναι ένα state-of-the-art υλικό και ερευνάται κυρίως τα τελευταία χρόνια. Οι εκπληκτικές του ιδιότητες το καθιστούν κατάλληλο για πολλές εφαρμογές. Οι κύριες ιδιοτητές του είναι ότι είναι πολύ λεπτό, καθώς μπορεί να σχηματίσει μονοατομικά φύλλα, είναι πολύ ανθεκτικό στον εφελκυσμό, λόγω των ισχυρών δεσμών που υπάρχουν μεταξύ των ατόμων άνθρακα και τέλος έχει μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα, λόγω των ελεύθερων σωματιδίων που υπάρχουν στην δομή του. Αυτές ακριβώς τις ιδιότητες αξιοποιούμε και εμείς και κατασκευάζουμε την προαναφερθείσα κεραία.

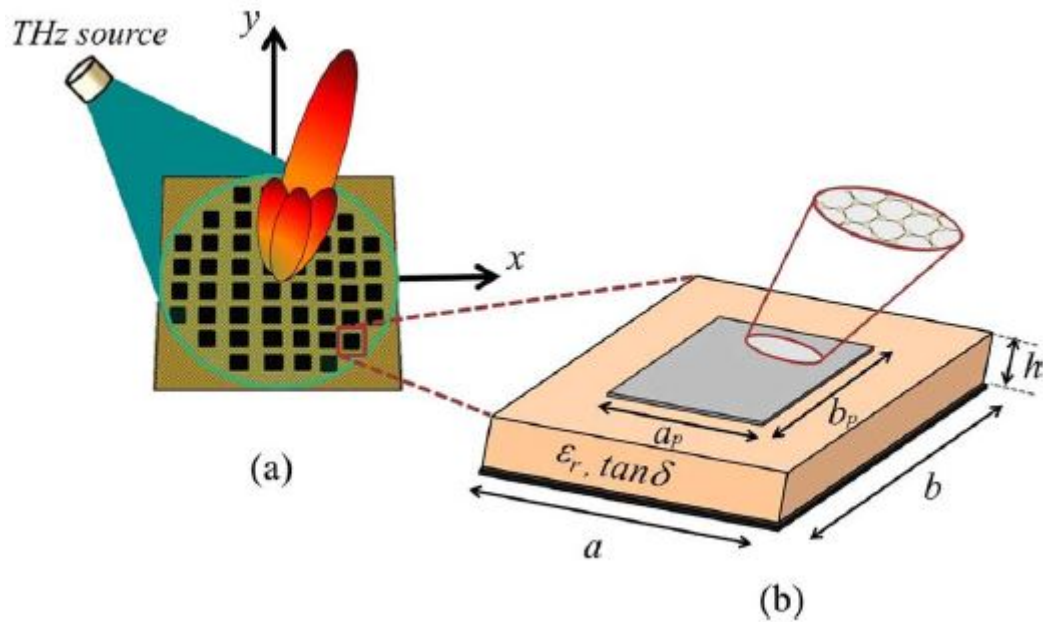
Τέλος η σημαντική και καινοτόμος ιδιότητα αυτής της κεραίας είναι το γεγονός ότι είναι επανακατευθυνόμενη. Μπορούμε δηλαδή, ελέγχοντας την αγωγιμότητά της να ελέγξουμε και την κατεύθυνση που θα έχει το ανακλώμενο κύμα. Έτσι μπορούμε στην ουσία να ελέγξουμε και σε ένα βαθμό την κατευθυντικότητα της κεραίας αυτής.

Πιο συγκεκριμένα στο κεφάλαιο δύο παρουσιάζουμε τα βασικά στοιχεία θεωρίας των οποίων η γνώση τους είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την κατανόηση της διπλωματικής. Παρουσιάζουμε δηλαδή ορισμένα βασικά στοιχεία της θεωρίας των κεραιών και τις βασικές αρχές λειτουργίας μιας κεραίας. Ακόμη παρουσιάζουμε τις ιδιότητες του γραφενίου αλλά και τις πολυάριθμες εφαρμογές στις οποίες μπορεί αυτό να χρησιμοποιηθεί. Επιπρόσθετα αναλύουμε την θεωρία γύρω από τεχνολογίες terahertz καθώς και τα πλεονεκτήματά της σχέση με τις τεχνολογίες που λειτουργούν σε άλλες περιοχές του φάσματος. Τέλος επικεντρωνόμαστε στη θεωρητική ανάλυση των κεραιών terahertz, που είναι άλλωστε η συγκεκριμένη κεραία που κατασκευάζουμε.

Στο κεφάλαιο τρία παρουσιάζουμε αναλυτικά το λογισμικό που χρησιμοποιήσαμε για την προσομοίωση αυτής της κεραίας καθώς και πως αυτή σχεδιάστηκε, βήμα προς βήμα. Τέλος αφού κατασκευάσουμε την συγκεκριμένη κεραία τρέχουμε διάφορες προσομοιώσεις και συγκρίνουμε τα αποτελέσματα που παίρνουμε με αυτά της βιβλιογραφίας, αλλά και με αυτά

μίας κεραίας από χρυσό.

Η κεραία αυτή αποτελεί μία τεχνολογική καινοτομία και μπορεί στο μέλλον να χρησιμοποιηθεί για ιατρικούς σκοπούς. Η χρήση της όμως θα μπορούσε να επεκταθεί και σε άλλους τομείς όπως είναι η ασφάλεια ενός κράτους, η σάρωση διαφόρων αντικειμένων, ακόμα και στη διαδικασία της παραγωγής προϊόντων.



Σχήμα 1.1: Η κεραία που σχεδιάστηκε (Πηγή: [10])

Κεφάλαιο 2

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Ο σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να εισαγάγει τον αναγνώστη στις βασικές έννοιες που θα είναι σημαντικές για την κατανόηση της εργασίας που ακολουθεί. Για το λόγο αυτό παρουσιάζουμε βασικές έννοιες, μεθοδολογίες και μοντέλα, εξηγώντας γιατί είναι σημαντικά για τις σημερινές εφαρμογές.

2.1 ΚΕΡΑΙΕΣ: ΓΕΝΙΚΑ

2.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι κεραιές αποτελούν ένα από τα πιο σημαντικά και απαραίτητα στοιχεία για την ασύρματη επικοινωνία. Αν μια κεραιά έχει σχεδιαστεί καλά μπορεί να μειώσει σε μεγάλο βαθμό τις απαιτήσεις που έχει ένα σύστημα και να βελτιώσει κατά πολύ την συνολική του απόδοση. Ένα κοινότυπο παράδειγμα είναι αυτό της τηλεόρασης, στην οποία παρατηρούμε ότι έχει πολύ καλύτερο σήμα αν της βάλουμε μία πολύ καλή κεραιά. Ωστόσο κάθε κεραιά είναι το κομμάτι εκείνο του συστήματος που είναι σχεδιασμένο τόσο για να λαμβάνει όσο και για να εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Με άλλα λόγια η κεραιά είναι ένας ηλεκτρομαγνητικός μετατροπέας που όταν είναι σε λειτουργία λήψης μετατρέπει τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα του χώρου σε ρεύμα και το αντίστροφο όταν είναι σε λειτουργία εκπομπής. Ακόμη σε ένα μοντέρνο ασύρματο σύστημα η κεραιά πρέπει να λειτουργεί και σαν μια κατευθυντική συσκευή ώστε να βελτιστοποιεί την ένταση της εκπομπής (ή λήψης) σε ορισμένες κατευθύνσεις ενώ να την μειώνει σε άλλες. Σε ένα σύστημα η κεραιά εξυπηρετεί τον ίδιο σκοπό που εξυπηρετούν τα ματιά και τα γυαλιά μυωπίας τον άνθρωπο.

2.1.2 ΙΣΤΟΡΙΑ

Η ιστορία των κεραιών ξεκινάει όταν ο James Clerk Maxwell ενοποίησε τις θεωρίες του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού και περιέγραψε σαφώς την μεταξύ τους σχέση με μια σειρά από εξισώσεις οι οποίες είναι γνωστές ως οι εξισώσεις του Maxwell. Το έργο του πρώτη φορά δημοσιεύτηκε το 1837. Ακόμα απέδειξε ότι το φως είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα και πως τόσο το φως όσο και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ταξιδεύουν στο κενό με την

ίδια ταχύτητα [1]. Το 1886 ο καθηγητής Heinrich Rudolf Hertz κατασκεύασε και παρουσίασε το πρώτο ασύρματο ηλεκτρομαγνητικό σύστημα. Ενώ το 1901 ο Gugliermo Marconi κατάφερε να στείλει τα πρώτα σήματα σε μεγάλες αποστάσεις. Κατάφερε δηλαδή την πρώτη υπερατλαντική μετάδοση κυμάτων από το Poldhu της Κορνουάλης στην Αγγλία, στο St. John της Newfoundland.[;]

Από την ιδέα του Marconi και μέχρι το 1940 η τεχνολογία των κεραιών βασιζόνταν αρχικά σε στοιχεία τα οποία ήταν μεταξύ του συνδεδεμένα με καλώδια και επικοινωνούσαν με συχνότητες μέχρι τα UHF. Η επανάσταση της τεχνολογίας στον τομέα των κεραιών έγινε κατά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, όπου νέα στοιχεία ανακαλύφθηκαν, όπως είναι οι κυματοδηγοί, οι ανακλαστήρες κ.τ.λ. Στο να γίνει αυτό φυσικά συνέβαλλε πολύ και η εφεύρεση των πηγών μικροκυμάτων, όπως το κλείστρο και το magnetron, με συχνότητες που ξεπερνούν το 1 GHz

Ενώ ο Παγκόσμιος Πόλεμος στάθηκε η αφορμή για να αρχίσει μια καινούργια εποχή όσον αφορά της κεραιές, αυτό που τις βελτίωσε σημαντικά και τις έκανε να μοιάζουν με τις κεραιές της σύγχρονης εποχής ήταν η μεγάλη πρόοδος που έγινε στην τεχνολογία και την αρχιτεκτονική των υπολογιστών το 1960-1980. Η αρχή έγινε όταν εισήχθησαν νέες αριθμητικές μέθοδοι οι οποίες επέτρεψαν τον ακριβή ανάλυση και σχεδιασμό πολύπλοκων συστημάτων κεραιών. Ακόμη περισσότερο συνεισέφεραν βέβαια στην πρόοδο της θεωρίας των κεραιών και οι ασυμπτωτικές μέθοδοι που ανακαλύφθηκαν για τον υπολογισμό υψηλών αλλά και χαμηλών συχνοτήτων. Παρόλο που στο παρελθόν οι κεραιές θεωρούνταν δευτερεύον μέρος σε σχέση με το υπόλοιπο σύστημα, σήμερα παίζουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο για την λειτουργία του. Για την ακρίβεια, η καλή και εύρυθμη λειτουργία πολλών συστημάτων βασίζεται στην καλή σχεδίαση και απόδοση της κεραιάς τους. Ακόμη παρόλο που ακόμα και στο πρώτο μισό του 20ου αιώνα η κατασκευή μιας καλής κεραιάς θεωρούνταν ένα ζήτημα καθαρά πειραματικό, σήμερα η κατασκευή μιας αποτελεσματικής κεραιάς αποτελεί αντικείμενο σοβαρής επιστημονικής έρευνας. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μπορούμε να προβλέψουμε και να αναλύσουμε με τεράστια ακρίβεια την συμπεριφορά μιας κεραιάς σε σχέση με τον τρόπο που αυτή είναι σχεδιασμένη. Έτσι το κόστος παραγωγής μια κεραιάς έχει μειωθεί δραματικά καθώς μπορούμε να την κατασκευάσουμε αμέσως μετά τη θεωρητική ανάλυση και το σχεδιασμό παραλείποντας όλα τα ενδιάμεσα πειραματικά στάδια.

2.1.3 ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΙΑΣ ΚΕΡΑΙΑΣ

Πριν το Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο η πλειοψηφία των κεραιών αποτελούνταν από καλώδια, τα οποία χρησιμοποιούνταν σε διάφορα σχήματα (δίπολα, έλικες ρόμβοι κτλ.) είτε μόνα τους είτε σε συστοιχίες. Κατά τη διάρκεια αλλά και μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο χρησιμοποιήθηκαν και άλλα στοιχεία στις κεραιές, κάποια τα οποία ήταν γνωστά καιρό ενώ κάποια άλλα ανακαλύφθηκαν σχετικά πρόσφατα. Αυτό δημιούργησε την ανάγκη για την καλύτερη κατανόηση αλλά και τη βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας τους.

Πριν το 1950 οι κεραιές είχαν εύρος φάσματος το πολύ με αναλογία 2:1. Το 1950, συνέβη μία τεράστια πρόοδος όσον αφορά τις κεραιές που αύξησε κατά πολύ το εύρος φάσμα-

τος. Πήγες δηλαδή στο 40:1 ή και ακόμα περισσότερο. Εξαιτίας της γεωμετρίας τους αναγνωριστικό χαρακτηριστικό αυτών των κεραιών αποτελεί η γωνία τους, αντί των γραμμικών τους διαστάσεων. Γι' αυτό το λόγο αναφέρονται και σαν κεραιές ανεξάρτητες από τη συχνότητα. Χρησιμοποιήθηκαν κυρίως στην περιοχή των 10-100 MHz για διάφορες εφαρμογές όπως είναι η τηλεόραση, οι point-to-point επικοινωνίες και άλλα.

Είκοσι χρόνια αργότερα ανακαλύφθηκε ένα νέος τύπος κεραιάς, που έχει λάβει μεγάλη δημοσιότητα από τότε και αυτός δεν είναι άλλος από τις κεραιές γνωστές και ως patch ή microstrip. Τα πλεονεκτήματα αυτών των κεραιών ήταν ότι είναι απλές στην κατασκευή, ελαφριές, φθηνές και συμβατές με πολλές επιφάνειες. Τα μειονεκτήματα όμως των κεραιών αυτών είναι ότι έχουν μικρή αποτελεσματικότητα, στενό εύρος λειτουργίας, και είναι μικρής ισχύος. Τα τελευταία χρόνια αυτές οι κεραιές παρουσιάζουν μεγάλη πρόοδο καθώς έχουν ενσωματωθεί είτε σε ενεργητικά είτε σε παθητικά κυκλώματα διαστάσεων μερικών χιλιοστών.

2.1.4 ΒΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΚΕΡΑΙΩΝ

Για να αναλύσουμε μια κεραία θα πρέπει να εξετάσουμε την πηγή διέγερσής της καθώς και τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που εκπέμπονται από αυτήν την κεραία. Όταν το καταφέρουμε αυτό βρίσκουμε κάποιες παραμέτρους οι οποίες και χαρακτηρίζουν την απόδοση μιας κεραιάς. Αυτές τις παραμέτρους χρειάζεται να προσδιορίσουμε σωστά ώστε να κατασκευάσουμε μια κεραία βέλτιστα.

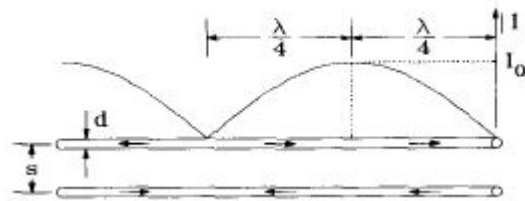
ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ - ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Η πιο βασική ερώτηση που προκύπτει για τις κεραιές είναι γιατί αυτές εκπέμπουν ακτινοβολία. Μια ποιοτική κατανόηση του μηχανισμού ακτινοβολίας μπορεί να γίνει αν θεωρήσουμε τις κεραιές σαν καλώδια τα οποία στη μία άκρη είναι πηγές παλμών, ενώ στην άλλη είναι γειωμένα. Όταν τα καλώδια φορτίζονται αρχικά, τα φορτία, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια δηλαδή, που υπάρχουν μέσα σε αυτά αρχίζουν να κινούνται λόγω των ηλεκτρικών πεδίων που δημιουργεί η πηγή. Η επιτάχυνση και ακολούθως η επιβράδυνση των φορτίων αυτών είναι οι αιτίες που δημιουργούνται ηλεκτρομαγνητικά πεδία στις άκρες αλλά και κατά μήκος του αγωγού [3]. Πιο συγκεκριμένα η επιτάχυνση των φορτίων αυτών συμβαίνει καθώς ασκείτε δύναμη σε αυτά από την εξωτερική πηγή που δημιουργεί τα ηλεκτρικά πεδία. Αντιστοίχως επιβράδυνση συμβαίνει στο τέλος του αγωγού όταν ασκούνται στα φορτία εσωτερικές δυνάμεις από τον αγωγό που μειώνουν την ταχύτητα των φορτίων στο 0 (για να μην δραπετεύουν από τον αγωγό). Παρόλο που τόσο η πυκνότητα ρεύματος όσο και η πυκνότητα φορτίου εμφανίζονται σαν πηγές ηλεκτρομαγνητισμού στις εξισώσεις του Maxwell το φορτίο αντιμετωπίζεται σαν πιο θεμελιώδης έννοια. Ακόμη και αν αυτή η ερμηνεία χρησιμοποιείται συνήθως για να εξηγήσει φαινόμενα μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας, μπορεί εξίσου εύκολα να εξηγήσει και φαινόμενα σταθερής ακτινοβολίας

Προηγουμένως εξηγήσαμε τις αρχές ακτινοβολίας από έναν και μοναδικό αγωγό. Ακολούθως θα εξετάσουμε τον τρόπο με τον οποίο εκπέμπεται η ακτινοβολία από μία γραμμή μεταφοράς δύο αγωγών όπως είναι για παράδειγμα ένα δίπολο. Την γεωμετρία των δύο αυτών

αγωγών μπορούμε να δούμε στο σχήμα 1.1. Η κίνηση των φορτίων δημιουργεί ένα οδεύον κύμα πλάτους $l_0/2$ κατά μήκος και των δύο αγωγών [5]. Όταν το ρεύμα φτάσει στην άκρη των αγωγών αυτών υφίσταται μια πλήρης ανάκλαση (αλλάζει η φάση δηλαδή κατά 180 μοίρες). Το ανακλώμενο κύμα όταν συναντηθεί με το προσπίπτον δημιουργεί σε κάθε ένα αγωγό ένα τέλει στάσιμο κύμα ημητονοειδούς κυματομορφής, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.1. Σε μια γραμμή μεταφοράς με διπλό αγωγό η οποία είναι συμμετρική και πλήρως ισορροπημένη, το ρεύμα και στους δύο αγωγούς έχει το ίδιο πλάτος αλλά αντίθετες κατευθύνσεις. Αν η απόσταση μεταξύ τους είναι πολύ μικρή τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που εκπέμπουν οι δύο αγωγοί αλληλοαναιρούνται και έτσι υπάρχει μηδενική απώλεια στην μεταφορά ενέργειας. Αν όμως οι αγωγοί δεν είναι κοντά και δεν αλληλοαναιρούνται τα ηλεκτρομαγνητικά τους πεδία, τότε έχουμε μια κεραία που εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Εν τέλει το τμήμα της γραμμής μεταφοράς μπορεί να πάρει τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 1.1. Αυτή ακριβώς είναι η γεωμετρία που χρησιμοποιείται ευρέως για της κεραίες διπόλων $X/2$. Επειδή στην κεραία αυτή δημιουργείται στάσιμο κύμα κατατάσσεται και στις κεραίες στάσιμου κύματος. Εάν $e < \lambda$ τότε η φάση του στάσιμου κύματος σε κάθε αγωγό είναι ίδια καθόλο το μήκος του. Για το λόγο αυτό από τη σύμβολη των δύο ηλεκτρομαγνητικών πεδίων θα προκύψει ενίσχυσή τους σε ορισμένες κατευθύνσεις ενώ αναίρεσή τους σε άλλες. Έτσι δημιουργούνται οι λοβοί της κεραίας.



Σχήμα 2.1: Γραμμή Μεταφοράς Δύο Αγωγών (Πηγή: [10])

ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΩΝ ΠΕΔΙΩΝ

Ο χώρος που περιβάλλει μια κεραία συνήθως υποδιαιρείται σε τρεις περιοχές, την περιοχή κοντινού πεδίου επαγωγής, την περιοχή κοντινού πεδίου ακτινοβολίας ή αλλιώς ζώνη Fresnel και την περιοχή μακρινού πεδίου, ή περιοχή Fraunhofer. Οι περιοχές αυτές είναι με τέτοιο τρόπο ορισμένες ώστε να υπάρχει συγκεκριμένη δομή των πεδίων σε κάθε μία από αυτές. Παρόλο που δεν παρατηρούνται απότομες αλλαγές ανάμεσα στις περιοχές αυτές, υπάρχουν αρκετές διαφορές μεταξύ τους που τις κάνει να ξεχωρίζουν. Τα όρια που χωρίζουν τις περιοχές αυτές, παρόλο που δεν είναι ευκρινή και διαφέρουν από κεραία σε κεραία, προκύπτουν από αρκετά συγκεκριμένα κριτήρια. Παρακάτω αναφέρουμε τους ορισμούς των περιοχών αυτών [6].

Το *κοντινό πεδίο επαγωγής* ορίζεται ως η περιοχή η οποία είναι πιο κοντά στην κεραία και στην οποία κυριαρχεί το επαγωγικό πεδίο. Για τις περισσότερες κεραίες το όριο της περιοχής αυτής δίνεται από τον τύπο:

$$R < 0.62\sqrt{(D^3)/\lambda}$$

όπου R είναι η απόσταση από την κεραία, λ είναι το μήκος κύματος και το D είναι η μεγαλύτερη διάσταση της κεραίας αυτής.

Το *κοντινό πεδίο ακτινοβολίας (Fresnel)* ορίζεται ως εκείνη η περιοχή της κεραίας που βρίσκεται ανάμεσα στο κοντινό πεδίο επαγωγής και στο μακρινό πεδίο. Η περιοχή δηλαδή στην οποία επικρατεί η ακτινοβολία εκείνη της οποίας η γωνία είναι ανεξάρτητη από την απόσταση από την κεραία. Το όριο αυτής της κεραίας (με μέγιστο σφάλμα $\pi/8$) δίνεται από τον τύπο:

$$2D^2/\lambda < R < 0.62\sqrt{(D^3)/\lambda}$$

Το *μακρινό πεδίο ακτινοβολίας (Fraunhofer)* ορίζεται ως το πεδίο το οποίο είναι ανεξάρτητο από την κεραία. Σε αυτή την περιοχή επικρατεί το πραγματικό μέρος της πυκνότητας ισχύος της κεραίας. Η ακτινική απόσταση R που βρίσκεται αυτή η περιοχή δίνεται από τον τύπο $R > 2D^2/\lambda$ (με την προϋπόθεση βέβαια ότι η απόσταση D είναι μεγαλύτερη από το μήκος κύματος). Αυτό βέβαια εκτείνεται μέχρι το άπειρο. Στην περιοχή αυτή, οι συνιστώσες του πεδίου είναι στην ουσία κάθετες στην ακτινική απόσταση και η γωνιακή κατανομή είναι ανεξάρτητη. Ο υπολογισμός αυτών των ολοκληρωμάτων ποικίλει ανάλογα με την περιοχή στην οποία γίνεται η παρατήρηση. Παρόλα αυτά ο υπολογισμός των ολοκληρωμάτων αυτών γίνεται ακόμα πιο δύσκολος στην κοντινή περιοχή επαγωγής. Όσο όμως το σημείο παρατήρησης κινείται ακτινικά προς τα έξω τόσο πιο εύκολο είναι να γίνουν προσεγγίσεις στον υπολογισμό ώστε να μειωθεί η πολυπλοκότητα που αφορά τον υπολογισμό του ολοκληρώματος. Έτσι όπως είναι φυσικό ο υπολογισμός των ολοκληρωμάτων είναι πιο εύκολος στο μακρινό πεδίο, που είναι στην ουσία και η περιοχή που γίνονται οι περισσότερες εφαρμογές [9].

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΜΙΑΣ ΚΕΡΑΙΑΣ

Υπάρχουν πολλές παράμετροι που χαρακτηρίζουν την απόδοση μιας κεραίας. Κάποιες από αυτές είναι οι παρακάτω [12]:

Διάγραμμα ακτινοβολίας: ορίζεται ως η γραφική αναπαράσταση, συνήθως στο μακρινό πεδίο των παραμέτρων μιας κεραίας. Για να το περιγράψουμε πλήρως χρειάζεται να αναφέρουμε πως οι παράμετροι αυτές συνήθως σχεδιάζονται σε σφαιρικές συντεταγμένες και είναι συνάρτηση των γωνιών θ, ϕ . Τέτοιες παράμετροι μπορεί να είναι το πλάτος, η φάση, η πολικότητα και η κατευθυντικότητα. Το διάγραμμα ακτινοβολίας του πλάτους συνήθως χωρίζεται σε λοβούς.

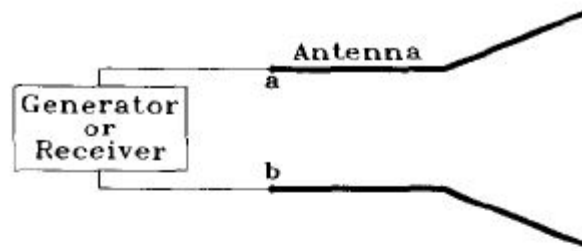
Ο *κύριος λοβός* ορίζεται ως εκείνος ο λοβός της ακτινοβολίας που εμπεριέχει την κατεύθυνση του μέγιστου πλάτους ακτινοβολίας. Σε συγκεκριμένες κεραίες είναι πιθανό να υπάρχει και παραπάνω από ένας κύριος λοβός.

Οι *πλευρικοί λοβοί ακτινοβολίας* ορίζονται ως εκείνοι οι λοβοί που βρίσκονται σε οποιαδήποτε άλλη κατεύθυνση εκτός από αυτής του κύριου λοβού. Το πλάτος των πλευρικών αυτών λοβών εκφράζεται συναρτήσει του κύριου, συνήθως σε decibels.

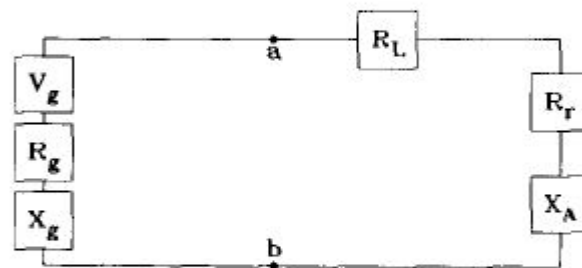
Πολλές φορές είναι χρήσιμο για να χαρακτηρίσουμε τη λειτουργία μιας κεραίας να χρησιμοποιήσουμε κυκλωματικά ισοδύναμα. Για την κεραία που ακολουθεί φαίνονται στο σχήμα 1.2 τα δύο πιο απλά ισοδύναμα Thevenin σε λειτουργία εκπομπής και λήψης. Η α-

ντίσταση R_r αναφέρεται ως η αντίσταση ακτινοβολίας και είναι η αντίσταση που αναπαριστά την ακτινοβολία μιας κεραίας ή τη διασπορά της. Η αντίσταση ακτινοβολίας είναι κομμάτι της σύνθετης εσωτερικής αντίστασης της κεραίας που το φανταστικό μέρος της αναπαριστάται από το X_A . Οι διηλεκτρικές απώλειες και οι απώλειες αγωγιμότητας υπολογίζονται μέσω της αντίστασης R_L ενώ η αντίσταση της γεννήτριας αλλά και του δέκτη (φορτίο) αναπαριστώνται αντίστοιχα από της παρακάτω εξισώσεις:

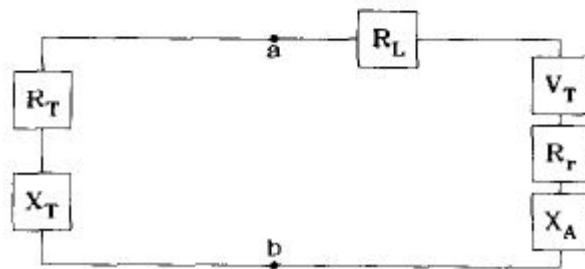
$$Z_g = R_g + jX_g \quad Z_T = R_T + jX_T$$



(a)



(b)



(c)

Σχήμα 2.2: Ισοδύναμο Thevenin (a) Η κεραία μας. (b) Ισοδύναμο Thevenin εκπομπής. (c) Ισοδύναμο Thevenin λήψης (Πηγή: [18])

Η αντίσταση εισόδου ορίζεται ως η αντίσταση που εμφανίζει μια κεραία στους ακροδέκτες της. Εκφράζεται συνήθως ως ο λόγος της τάσης στον ακροδέκτη προς το ρεύμα, ή αλλιώς ο λόγος μία συνιστώσας του ηλεκτρικού προς την αντίστοιχη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου και συνήθως είναι μιγαδικός αριθμός.

Η απόδοση ακτινοβολίας ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ισχύος που ακτινοβολείται από μια κεραία προς την ισχύ που λαμβάνει η κεραία από το δίκτυο. Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω ισοδύναμα κυκλώματα η απόδοση αυτή μπορεί να γραφτεί ως:

$$\frac{R_r}{R_r + R_L}$$

όπου R_r είναι η αντίσταση ακτινοβολίας και η R_L είναι η αντίσταση απωλειών.

Η πυκνότητα ισχύος S ορίζεται ως η πυκνότητα ισχύος των πεδίων που εκπέμπονται από την κεραία, έχει μονάδες W/m^2 και είναι συνήθως μιγαδικός αριθμός. Στο επαγωγικό κοντινό πεδίο, κυρίαρχο είναι το φανταστικό μέρος της ισχύος αυτής ενώ στο μακρινό πεδίο κυρίαρχο είναι το πραγματικό μέρος. Σε μορφή εξίσωσης η πυκνότητα ισχύος S μπορεί να εκφραστεί ως :

$$S = \frac{1}{2} E \times H^* = S_r + jS_i$$

όπου E και το H είναι τα πεδία που εκπέμπονται από την κεραία. Το πραγματικό μέρος συνήθως αναφέρεται και ως πυκνότητα ακτινοβολίας

Η ένταση ακτινοβολίας U ορίζεται ως η ισχύς που ακτινοβολείται από μια κεραία ανά μονάδα στερεάς γωνίας. Η ένταση ακτινοβολίας συνήθως υπολογίζεται στο μακρινό πεδίο και σχετίζεται με το πραγματικό μέρος της πυκνότητας ισχύος μέσα από τη σχέση:

$$U = r^2 S_r$$

όπου r είναι η σφαιρική ακτινική απόσταση.

Το εύρος δέσμης ορίζεται σαν ένα τόξο ανάμεσα σε δύο κατευθύνσεις όπου η ένταση ακτινοβολίας είναι μέγιστη, χωρίς κανένα ενδιάμεσο σημείο να έχει την ίδια τιμή. Όταν η ένταση ισχύος είναι στο μισό του μεγίστου, τότε αναφέρεται σαν εύρος δέσμης της μισής ισχύος.

Ο ομοιοκατευθυντικός πομπός ορίζεται ως μια υποθετική κεραία χωρίς απώλειες που έχει ίση ένταση ακτινοβολίας προς όλες της κατευθύνσεις. Παρόλο που μια τέτοια κεραία δεν είναι δυνατό να υπάρχει στην πραγματικότητα, χρησιμοποιείται πολλές φορές σαν βολική κεραία αναφοράς ώστε να προσδιοριστεί η κατευθυντικότητα των υπολοίπων κεραιών. Η πυκνότητα ακτινοβολίας S_{r0} και η ένταση U_0 ορίζονται αντίστοιχα ως εξής:

$$S_{r0} = \frac{P_r}{4\pi r^2}$$

$$U_0 = \frac{P_r}{4\pi}$$

όπου P_r είναι η ισχύς που εκπέμπονται από την κεραία.

Η κατευθυντικότητα είναι ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά μιας κεραίας, η οποία περιγράφει ταυτόχρονα και τον τρόπο λειτουργίας της. Ορίζεται ως ο λόγος της έντασης ακτινοβολίας σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση προς το μέσο όρο της έντασης ακτινοβολίας σε όλες τις κατευθύνσεις. Γράφεται ως :

$$D = \frac{U(\theta, \phi)}{U_0} = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_r}$$

Για να καταδείξουμε καλύτερα τη σημασία της κατευθυντικότητας θα εξετάσουμε την κατευθυντικότητα ενός διπόλου με $l = \lambda/2$ η οποία εκτιμάται να είναι $D = 1.67 \sin^3 \theta$ όπου η γωνία θ μετράται από τον άξονα κατά μήκος του διπόλου. Τις τιμές αυτής, αλλά και

μίας ιστροπικής κεραίας μπορούμε να τις δούμε σχεδιασμένες σε τρεις διαστάσεις στο παρακάτω σχήμα. Φυσικά είναι σχεδιασμένες μόνο οι μεγαλύτερες τιμές της κατευθυντικότητας κάθε κεραίας. Είναι εμφανές πως όταν βρισκόμαστε ανάμεσα στις γωνίες $57, 44^0$ και $122, 560^0$ το δίπολο έχει μεγαλύτερη κατευθυντικότητα από την ιστροπική κεραία. Εκτός των γωνιών αυτών βέβαια μεγαλύτερη κατευθυντικότητα έχει η ιστροπική κεραία. Η μέγιστη κατευθυντικότητα διπόλου είναι στη γωνία $\pi/2$ και έχει τιμή 1,67 (ή αλλιώς 2,23db). Το decibel σημαίνει ότι το δίπολο έχει κατά 2,23 φορές πιο μεγάλη κατευθυντικότητα από την ιστροπική κεραία [14].

Το κέρδος είναι ίσως το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό μια κεραίας. Ορίζεται ως ο λόγος της έντασης ακτινοβολίας σε μια δεδομένη κατεύθυνση προς την ένταση ακτινοβολίας που θα μπορούσε να υπάρχει εάν η ισχύς που έπαιρνε η κεραία ακτινοβολούταν προς όλες τις κατευθύνσεις. Το κέρδος εκφράζεται από τον παρακάτω μαθηματικό τύπο:

$$G = \frac{U(\theta, \phi)}{U_a} = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_a}$$

όπου P_a είναι η ισχύς που τροφοδοτεί την κεραία. Εάν πάλι η κατεύθυνση δεν προσδιορίζεται τότε αυτομάτως υπονοείται η κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας. Πιο απλά η διαφορά μεταξύ της κατευθυντικότητας και του κέρδους είναι ότι η κατευθυντικότητα έχει σαν αναφορά την εκπεμπόμενη από την κεραία ισχύ, ενώ το κέρδος έχει σαν αναφορά την ισχύ που τροφοδοτεί την κεραία. Από τη στιγμή που η κεραία δεν εκπέμπει όση ισχύ λαμβάνει (λογικό λόγω των απωλειών), ισχύει η σχέση:

$$P_r = e_r P_a$$

όπου e_r είναι η απόδοση ακτινοβολίας της κεραίας. Χρησιμοποιώντας και τις παρακάτω εξισώσεις τότε η εξίσωση μπορεί να γραφτεί ως:

$$G = e_r \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_r} = e_r D$$

Για μια κεραία χωρίς απώλειες το κέρδος είναι ίσο με την κατευθυντικότητα.

Το διάνυσμα αποδοτικού μήκους (αλλιώς ύψος) h_e για μία κεραία είναι ένα σύνθετο διάνυσμα που αναπαριστάται από τον τύπο:

$$h_e(\theta, \phi) = \hat{a}_\theta h_\theta(\theta, \phi) + \hat{a}_\phi h_\phi(\theta, \phi)$$

Το λεγόμενο αποδοτικό ύψος μια κεραίας είναι πολύ χρήσιμο για τον αλληλοσυσχετισμό των τάσεων ανοιχτοκυκλώσεως μιας κεραίας εκπομπής και μιας κεραίας λήψης. Δηλαδή ισχύει ο παρακάτω τύπος:

$$V_0 C = h_e$$

όπου $V_0 c$ είναι η τάση ανοιχτοκυκλώσεως στους ακροδέκτες της κεραίας, E είναι το ηλεκτρικό πεδίο και h_e είναι το διάνυσμα αποδοτικού μήκους.

Για το προηγούμενο δίπολο για παράδειγμα με μήκος $l < \lambda/10$, το πεδίο στην μακρινή περιοχή δίνεται από τον τύπο:

$$E = \hat{a}_\theta j\eta \frac{\beta I_0 l e^{-j\beta r}}{8\pi r} \sin\theta$$

και το αποδοτικό μήκος του είναι:

$$h_e = -\hat{a}_\theta \frac{l}{2} \sin\theta$$

Η μέγιστη τιμή του αποδοτικού μήκους αυτής της κεραίας είναι 50% του πραγματικού της μήκους. Η μέγιστη τιμή ενός διπόλου μισού μήκους κύματος είναι $200/\pi$ δηλαδή περίπου 63.66% του πραγματικού του μήκους. Το μέγιστο αποδοτικό μήκος μιας κεραίας με

ομοιόμορφη κατανομή ρεύματος είναι το 100% του πραγματικού του μήκους. Είναι προφανές ότι το αποδοτικό μήκος μιας κεραίας εξαρτάται κατά πολύ από την κατεύθυνση του κύματος και την κατανομή της πηγής.

Η πόλωση μιας κεραίας σε μια δεδομένη κατεύθυνση καθορίζεται από την πόλωση των πεδίων που εκπέμπει η κεραία. Η πόλωση μιας κεραίας μπορεί να χαρακτηριστεί ως γραμμική, σφαιρική, η ελλειπτική. Θεωρούνται διακριτές περιπτώσεις παρόλο που η γραμμική και η κυκλική, στην ουσία αποτελούν εξειδικευμένες περιπτώσεις ελλειπτικής πόλωσης. Η κυκλική και η ελλειπτική πόλωση ταξινομούνται ανάλογα και με την φορά περιστροφής τους. Την ωρολογιακή φορά δηλαδή και την αντιωρολογιακή φορά [10].

Η αποτελεσματικότητα της πόλωσης ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος που λαμβάνει η κεραία από ένα δεδομένο επίπεδο κύμα οποιασδήποτε πόλωσης, προς την ισχύ που θα λάμβανε η ίδια κεραία από ένα επίπεδο κύμα ίδιας ισχύος, αν όμως αυτό είχε την ροή πυκνότητας ισχύος στην ίδια κατεύθυνση με τη N πολικότητα κατά την οποία η προσλαμβανόμενη ισχύς είναι μέγιστη. Σε δεσιβελς η αποτελεσματικότητα της πόλωσης δίνεται από τον τύπο:

$$p(dB) = 10 \log_{10} \left[\frac{|h_e E^{inc}|^2}{|h_e|^2 |E^{inc}|^2} \right]$$

Η απόδοση διαφράγματος συνήθως εκφράζεται σε ποσοστό συνήθως και ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης απόδοσης διαφράγματος προς το φυσικό διάφραγμα, το οποίο βγαίνει από τον τύπο:

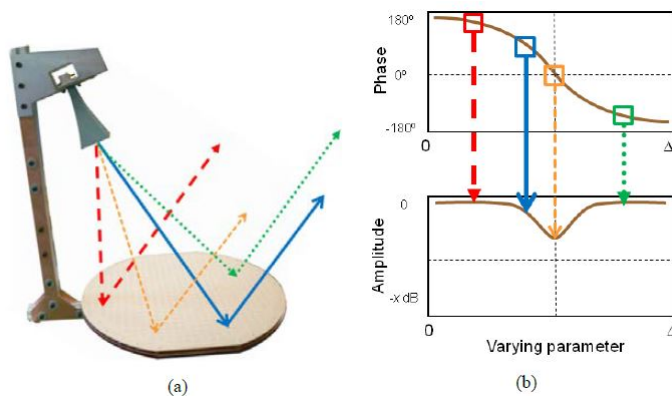
$$e_{ap} = \frac{A_{em}}{A_p} = \frac{D_0}{D_s}$$

2.2 REFLECTARRAYS

Ως reflectarray κεραία, ορίζουμε μια κεραία, η οποία αποτελείται από μια τροφοδοσία και μια σειρά ανακλαστικών στοιχείων, που είναι με τέτοιο τρόπο διατεταγμένα ώστε ο συνδυασμός τους να επιτυγχάνει την επιθυμητή μορφή ακτινοβολίας. Συνώνυμα αυτών των κεραίων μπορεί να είναι η κεραία ανακλαστικής συστοιχίας (reflective array antenna) και κεραία ανακλαστήρων (reactive reflector antenna)[16].

Τα τελευταία χρόνια αυξάνεται όλο και περισσότερο το ερευνητικό ενδιαφέρον για τις reflectarray κεραίες και αυτό συμβαίνει λόγω των μεγάλων πλεονεκτημάτων τους σε σύγκριση με τις phased-arrays και τους παραβολικούς ανακλαστήρες. Στο σχήμα 1.3 μπορούμε να δούμε την αρχιτεκτονική μιας reflectarray κεραίας και το πως αυτή εκπέμπει. Εδώ μια χοανοειδής κεραία χρησιμοποιείται σαν τροφοδοσία. Στην γενική περίπτωση η τροφοδοσία μπορεί να είναι πολλά διαφορετικά πράγματα. Καθώς η reflectarray βρίσκεται στο μακρινό πεδίο της κεραίας είναι ασφαλές να θεωρήσουμε το προσπίπτον ηλεκτρομαγνητικό κύμα σαν ένα επίπεδο κύμα που πέφτει με συγκεκριμένη γωνία. Αν εισάγουμε μια συγκεκριμένη φάση στα κύματα που πέφτουν τότε μπορούμε από τα ανακλώμενα κύματα να σχηματίσουμε μια πολύ λεπτή δέσμη προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε πως σε μια τέτοια κεραία το πλάτος του κύματος που πέφτει σε κάθε στοιχείο της εξαρτάται απόλυτα από την πηγή. Συνεπώς το μόνο πράγμα που μπορεί να αλλάξει από την reflectarray είναι η φάση

των κυμάτων. Αυτό γίνεται αλλάζοντας την γεωμετρία του καθενός στοιχείου της κεραίας. Ιδανικά θα έπρεπε οι κεραίες αυτές να δίνουν εύρος φάσματος 360° παρόλα αυτά κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί μόνο από πολύ λίγες κεραίες. Από τη στιγμή λοιπόν που υπολογίσαμε ποιά πρέπει να είναι η φάση του κάθε στοιχείου, αυτό που κάνουμε είναι να αλλάζουμε την γεωμετρία του στοιχείου αυτού ώστε να επιτύχουμε την επιθυμητή αυτή φάση, λαμβάνοντας φυσικά υπόψιν και τις αντίστοιχες απώλειες κάθε φορά. Πολλές κεραίες έχουν διαφορετική φάση ανάλογα με την γωνία πρόσπτωσης (άρα και διαφορετικές απώλειες) και αυτό είναι κάτι που πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν για τον ακριβή και σωστό σχεδιασμό μιας κεραίας. Ο συντελεστής ανάκλασης του πλάτους πρέπει να είναι κοντά στο ένα, εξασφαλίζοντας έτσι πάρα πολύ μικρές απώλειες [17]. Κάτι τέτοιο είναι εφικτό λόγω του επίπεδου κύματος.



Σχήμα 2.3: Reflectarray antenna (a) Αρχιτεκτονική (b) Φάση και Πλάτος του Συντελεστή Ανάκλασης (Πηγή: [19])

Υπάρχουν πολλά και διαφορετικά κριτήρια για να μπορέσουμε να ταξινομήσουμε τις κεραίες reflectarray. Κάποια από αυτά είναι ο αριθμός των υποστρωμάτων της κεραίας, ο αριθμός των ανακλαστικών επιφανειών, η πολικότητα, το είδος της δέσμης που εκπέμπεται και αν υπάρχει η δυνατότητα να αλλάξει κατεύθυνση η δέσμη ή όχι. Σύμφωνα με το τελευταίο αυτό κριτήριο οι κεραίες μπορούν να χωριστούν σε σταθερής δέσμης (fixed-beam ή passive) και σε αναπροσαρμοζόμενες κεραίες (reconfigurable reflectarrays). Σε μια κεραία σταθερής δέσμης, η δέσμη σχηματίζεται από την κατάλληλη προσαρμογή των διαστάσεων κάθε στοιχείου και δεν μπορεί να αλλάξει. Από την άλλη στις αναπροσαρμοζόμενες κεραίες η δέσμη μπορεί να αλλάξει κατεύθυνση αλλάζοντας την φάση των κυμάτων [19].

2.2.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ REFLECTARRAYS

Η ιδέα των reflectarray εισήχθη πρώτα το 1963. Τότε προτάθηκε η δημιουργία μιας επιφάνειας της οποίας η αντίσταση θα άλλαζε με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούνται διάφορα μοντέλα ακτινοβολίας. Η αρχή λειτουργίας των κεραιών αυτών μπορεί να εξηγηθεί αν φανταστούμε ότι η διέγερση είναι μια χοανοειδής κεραία η οποία βρίσκεται τοποθετημένη μακριά από την reflectarray και στο κέντρο της. Στην περίπτωση αυτή το ηλεκτρομαγνητικό κύμα που προσπίπτει σε κάθε στοιχείο της κεραίας μπορεί να θεωρηθεί σαν επίπεδο κύμα και με φάση που καθορίζεται από τη γωνία πρόσπτωσης. Από τη θεωρία για τις κεραιές-συστοιχίες η φάση που απαιτείται σε κάθε στοιχείο i της συστοιχίας ώστε να εστιαστεί το ανακλώμενο κύμα δημιουργώντας μία δέσμη στην κατεύθυνση (θ_b, ϕ_b) δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\phi(x_i, y_i) = -K_0 \sin\theta_b \cos\phi_b x_i - K_0 \sin\theta_b \sin\phi_b y_i$$

όπου K_0 είναι η σταθερά διάδοσης στο κενό και (x_i, y_i) είναι οι συντεταγμένες του στοιχείου i [20].

Οι κεραιές reflectarrays τροφοδοτούνται χωρικά. Αυτό σημαίνει πως εισάγεται διαφορετική φάση ανάλογα με τα διαφορετικά μονοπάτια που ακολουθεί η ακτινοβολία. Η μετατόπιση φάσης που υπάρχει σε κάθε στοιχείο της κεραίας είναι η διαφορά ανάμεσα στη φάση του προσπίπτοντος και τη φάση του ανακλώμενου κύματος και μπορεί να δοθεί από τον παρακάτω τύπο:

$$\phi_{Ri} = K_0(d_i - (x_i \cos\phi_b + y_i \sin\phi_b) \sin\theta_b)$$

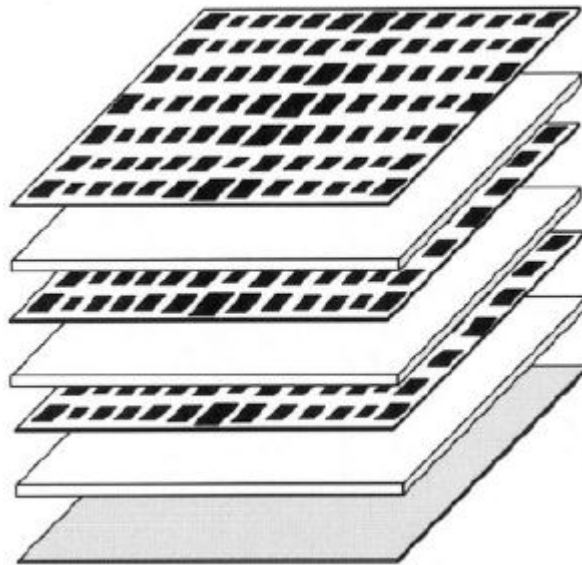
όπου d_i είναι η απόσταση από την χοανοκεραία που τροφοδοτεί.

2.2.2 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΤΙΣ REFLECTARRAYS

Η μετατόπιση φάσης που απαιτείται να υπάρχει σε κάθε στοιχείο ώστε να παραχθεί η προκαθορισμένη δέσμη μπορεί να δημιουργηθεί αν χρησιμοποιήσουμε διαφορετικά είδη στοιχείων. Ένας τρόπος δηλαδή για να δημιουργήσουμε την μετατόπιση φάσης είναι να χρησιμοποιήσουμε πανομοιότυπα στοιχεία, τα οποία όμως να έχουν διαφορετικό μήκος μεταξύ τους έτσι ώστε η καθυστέρηση φάσης να προκύπτει από τα διαφορετικά μονοπάτια που ακολουθεί η εκπεμπόμενη ακτινοβολία. Η μετατόπιση φάσης αυτή είναι ανάλογη με το διπλάσιο μήκος της γραμμής μεταφοράς. Παρότι ο τρόπος αυτός αρχικά είχε προταθεί για τις κεραιές σταθερής δέσμης, στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκε και στις αναπροσαρμοζόμενες κεραιές. Στο σχήμα 1.4 φαίνεται μια απλοποιημένη μορφή τόσο του στοιχείου όσο και του κυκλώματος ελέγχου [23].

Η προσαρμογή φάσης μέσω της ποικιλίας του μήκους είναι πολύ εύκολη χρησιμοποιώντας τυπωμένα κυκλώματα. Η αρχή λειτουργίας των reflectarrays που έχουν τυπωμένα στοιχεία διαφόρων μεγεθών βασίζεται στο γεγονός ότι η φάση των ανακλώμενων κυμάτων βασίζεται στο διαφορετικό μήκος των στοιχείων. Εάν αλλάξει το μέγεθος ενός patch σε ένα πίνακα από πολλά patches τα οποία είναι τυπωμένα πάνω σε ένα διηλεκτρικό υλικό τότε θα αλλάξει, όπως αναφέραμε προηγουμένως, και η φάση των κυμάτων. Μια μικρή αλλαγή δηλαδή στο μέγεθος μπορεί να προκαλέσει μια τεράστια αλλαγή στη φάση. Ο ακριβής σχεδιασμός

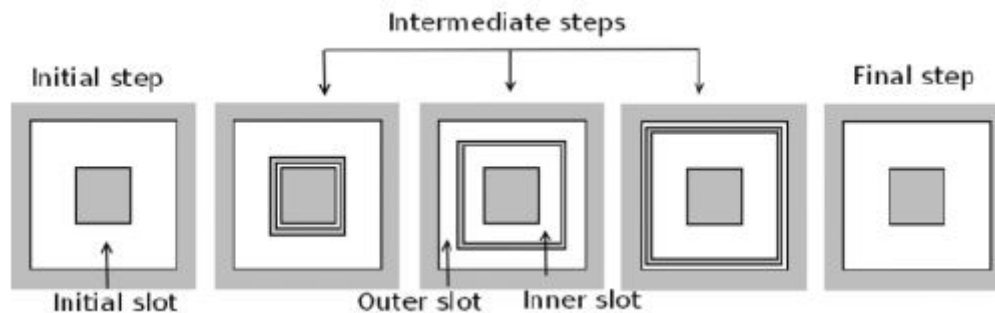
μιας κεραίας reflectarray απαιτεί να ληφθεί υπόψη και η αλληλοσυσχέτιση μεταξύ των στοιχείων της, όπως επίσης και η επίδραση που έχει το προσπίπτον κύμα σε κάθε ένα από αυτά. Το συνολικό εύρος φάσης που μπορεί να επιτευχθεί εξαρτάται από την διηλεκτρικότητα καθώς και το πάχος του υποστρώματος. Για πάχος μικρότερο από το ένα δέκατο του μήκους κύματος, ένα εύρος 330° είναι εφικτό, το οποίο είναι θεωρητικά αρκετό για τις πρακτικές εφαρμογές. Αν αυξηθεί το πάχος του υποστρώματος το εύρος μικραίνει κατά πολύ. Αυτός είναι άλλωστε και ο λόγος που χρησιμοποιούμε λεπτά υποστρώματα. Τα τελευταία χρόνια γίνεται μια τεράστια προσπάθεια για να ξεπεραστεί το μεγάλο πρόβλημα των reflectarrays που είναι το μικρό εύρος [24].



Σχήμα 2.4: Reflectarray με πολλαπλά στρώματα διαφορετικού μεγέθους Πηγή: [56]

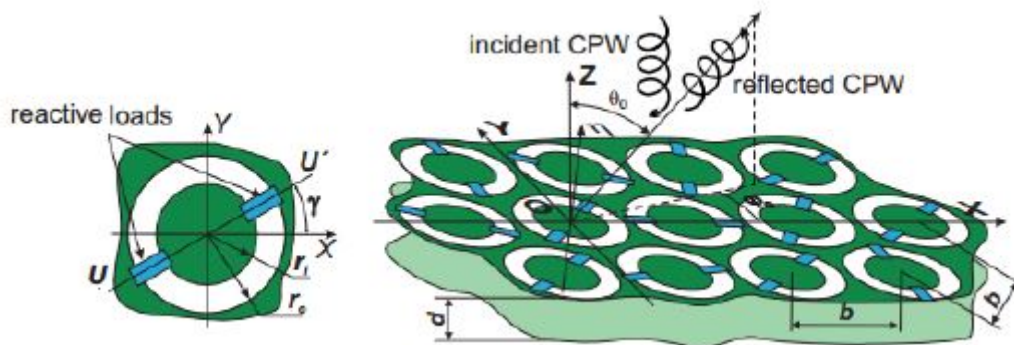
Μία συστοιχία από τετράγωνα μεταλλικά στοιχεία συμπεριφέρεται σαν ένα κύκλωμα, στο οποίο η φάση του ανακλώμενου κύματος ποικίλει ανάλογα με το μέγεθος των στοιχείων σε ένα εύρος 180° . Όταν το υπόστρωμα είναι γειωμένο, δεδομένου φυσικά ότι υπάρχει διαχωρισμός (μικρότερος κατά πολύ από ένα μήκος κύματος) μεταξύ της γείωσης και των στοιχείων, τότε το εύρος της μετατόπισης φάσης μπορεί να φτάσει μέχρι και 360° . Όταν χρησιμοποιούνται δύο ή περισσότερα στρώματα όπως φαίνεται στο σχήμα, κάθε ένα από αυτά συμπεριφέρεται σαν κύκλωμα και η φάση των ανακλώμενων κυμάτων αλλάζει όπως θα άλλαζε και σε μονοστρωματικές κεραίες αλλά η μετατόπιση φάσης μπορεί να είναι πολλαπλάσιο του 360° . Για το λόγο αυτό με πολλαπλά στρώματα, πολύ λεπτά υποστρώματα και μικρές διαφορές ανάμεσα στα μεγέθη των στοιχείων της στοιχειοκεραίας, μπορούμε να επιτύχουμε η συνάρτηση της φάσης με το μέγεθος των στοιχείων να είναι πολύ πιο ομαλή, σχεδόν γραμμική. Η μετατόπιση φάσης που βασίζεται στην διαδικασία που περιγράψαμε παραπάνω μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για γραμμική όσο και για κυκλική πολικότητα. Για να μελετήσουμε όμως οποιαδήποτε πολικότητα θα πρέπει να αναλύσουμε το πεδίο σε δύο συνιστώσες, μία παράλληλη προς τα στοιχεία και μια κάθετη.

Πρόσφατα προτάθηκε το λεγόμενο “Phoenix cell” σαν στοιχείο για την δημιουργία μονοστρωματικών reflectarrays. Η αρχική γεωμετρία αυτού αποτελείται από μία τετράγωνη δαχτυλίδοειδή σχισμή όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ένα άλλο μεταλλικό δαχτυλίδι μπαίνει μέσα στη σχισμή αυτή και έτσι το χωρίζει σε δύο μικρότερες σχισμές, την εσωτερική και την εξωτερική. Η φάση των ανακλώντων κυμάτων καθορίζεται από την θέση του μεταλλικού δαχτυλιδιού. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να έχουμε εύρος φάσης 360° .



Σχήμα 2.5: Phoenix cell Πηγή: [37]

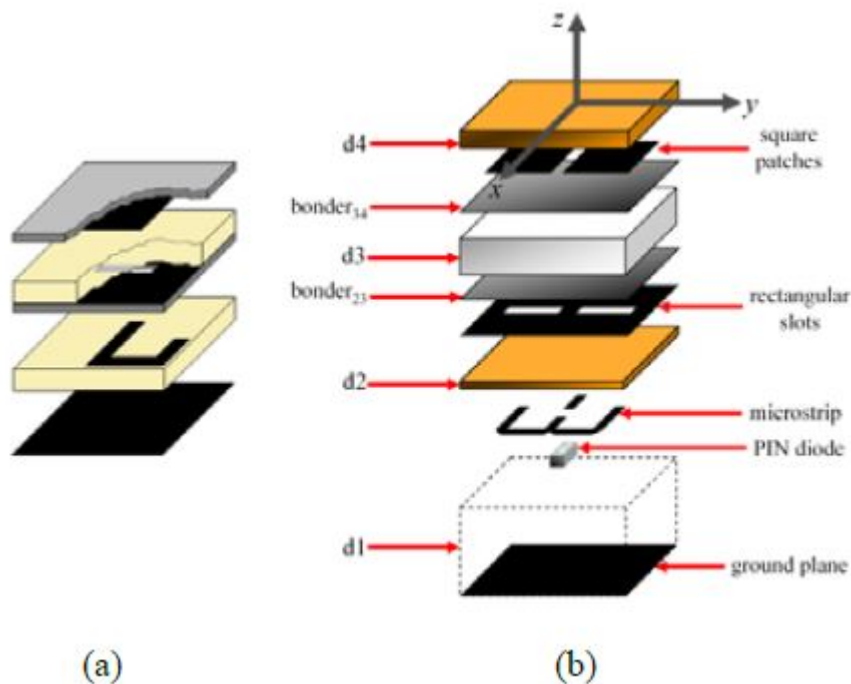
Ένα άλλο είδος στοιχείο από το οποίο μπορεί να αποτελείται μια reflectarray είναι το λεγόμενο spiraphase array. Αυτό αρχικά προτάθηκε για να προσφέρει μεγάλες δυνατότητες αναπροσαρμογής της κεραίας. Βασίζεται σε διπολικά στοιχεία μισού μήκους κύματος πολλών βραχιόνων τα οποία εναλλάσσονται ηλεκτρονικά. Η ηλεκτρονική αυτή εναλλαγή των βραχιόνων των διπόλων ισοδυναμεί με την περιστροφή των στοιχείων κατά γωνία γ το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την μετατόπιση φάσης κατά 2γ του ανακλώμενου, κυκλικά πολωμένου, κύματος. Αυτό το είδος κεραίας εμφανίζει καλύτερο εύρος και είναι πιο κατάλληλο για πιο ευρεία σάρωση.



Σχήμα 2.6: Spiraphrase Πηγή: [38]

Εκτός από τις κεραίες που αναφέραμε ήδη, έχει προταθεί και άλλη μια κεραία τύπου reflectarray. Η τεχνική της κατασκευής αυτής της κεραίας βασίζεται στη χρήση κατακερματισμένων στοιχείων με τέτοιο τρόπο ώστε να βελτιστοποιούν την συνολική κεραία. Αυτό σημαίνει ότι τα κομμάτια πρέπει να έχουν πολύ παρόμοια γεωμετρία μεταξύ τους. Η βασική ιδέα είναι πως κάθε στοιχείο της κεραίας θα μπορεί να “δει” ένα ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον το οποίο προσομοιάζει πολύ στο άπειρο.

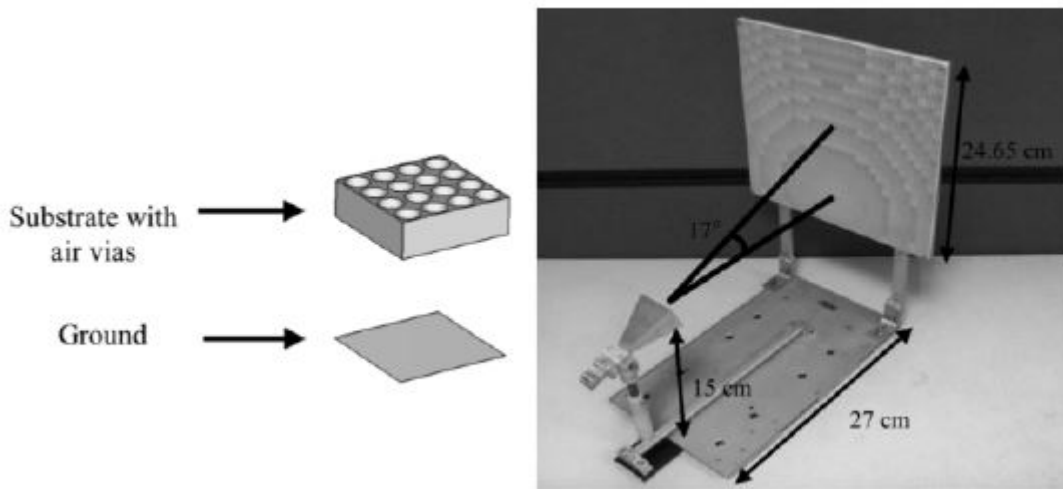
Παρά την πολυστρωματική διαμόρφωσή τους, τα στοιχεία που συνδέονται με τις διαδρομές καθυστέρησης έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες διαμορφώσεις. Μερικά από αυτά είναι η ικανότητά τους να αντισταθμίζουν τις επιδράσεις της χωρικής διαφορικής καθυστέρησης φάσης, οι χαμηλές απώλειες, τα χαμηλά επίπεδα αλληλοεπικαλυπτόμενης πόλωσης και μια πολύ γραμμική απόκριση φάσης. Το προτεινόμενο στοιχείο δηλαδή φαίνεται στο σχήμα 1.7 και αποτελείται από σταθερού μεγέθους τετράγωνα στοιχεία τυπωμένα πάνω σε διηλεκτρικό υλικό, από σταθερού μεγέθους τετράγωνα οπές πάνω σε ένα γειωμένο επίπεδο, και γραμμές καθυστέρησης που χωρίζονται μεταξύ τους από το υπόστρωμα. Από το κέντρο της οπής μπορούμε να δούμε ότι η γραμμή καθυστέρησης χωρίζεται σε δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα χρησιμοποιείται για να ρυθμίσει την αντίσταση εισόδου που βλέπει η γραμμή καθυστέρησης. Η φάση του ανακλώμενου κύματος ρυθμίζεται μεταβάλλοντας το μήκος της γραμμής καθυστέρησης. Στην ιδανική περίπτωση η φάση του ανακλώμενου κύματος είναι ανάλογη με το διπλάσιο του μήκους της γραμμής καθυστέρησης. Ένα γειωμένο επίπεδο εξαλείφει την διαρροή ενέργειας από το πίσω μέρος της κεραίας. Παρόλο που μια τέτοια διαμόρφωση κεραίας χρησιμοποιείται κυρίως για την απλή γραμμική πόλωση, μπορεί να επεκταθεί και σε διπλή γραμμική πόλωση.



Σχήμα 2.7: (a) Σταθερής δέσμης Reflectarray (b) Αναπροσαρμοζόμενη Reflectarray Πηγή: [45]

Υπάρχουν όμως και άλλες τεχνικές με τις οποίες μπορούν να ρυθμιστούν τα στοιχεία μιας reflectarray για να έχουν μετατόπιση φάσης πέρα από αυτές που αναφέραμε παραπάνω. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί μία μονοστρωματική reflectarray κεραία με διάτρητο διηλεκτρικό υπόστρωμα. Αυτή κατασκευάζεται τρυπώντας το διηλεκτρικό υλικό, δημιουργώντας

έτσι οπές αέρα. Με αυτό τον τρόπο αλλάζει τοπικά η διαπερατότητα του υλικού. Το σχήμα 1.8 παρακάτω εικόνα δείχνει μια υλοποίηση αυτής της κεραίας

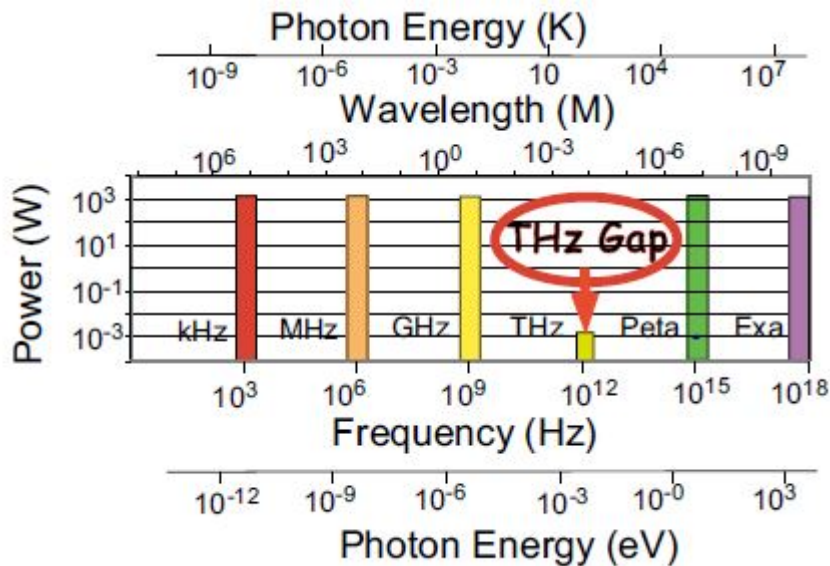


Σχήμα 2.8: Reflectarray με διάτρητο διηλεκτρικό υλικό Πηγή: [46]

Η κατάλληλη επιλογή κάθε κεραίας εξαρτάται από τα διαφορετικά χαρακτηριστικά της και τις απαιτήσεις που έχουμε κάθε φορά. Το κατάλληλο εύρος ζώνης, το προφίλ της κεραίας, η πολικότητα που χρειαζόμαστε, οι απώλειες, το κατά πόσο μπορούμε να ελέγξουμε τη φάση της κεραίας και το κόστος της, είναι μόνο μερικά από τα πράγματα που πρέπει να λαμβάνουμε κάθε φορά υπόψιν όταν καλούμαστε να σχεδιάσουμε μια κεραία.

2.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ THz

Τα τελευταία χρόνια μεγαλώνει όλο και περισσότερο το ερευνητικό ενδιαφέρον πάνω στην τεχνολογία THz. Παρόλα αυτά η χρήση και η εξερεύνηση ολόκληρου του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος δεν είναι κάτι καινούργιο για την ανθρωπότητα. Ήδη από τα πρώτα κιόλας χρόνια η ανθρώπινη επιβίωση εξαρτιόταν απόλυτα από τον ηλιακό φως ενώ ακόμα και οι άνθρωποι των σπηλαίων χρησιμοποιούσαν δαυλούς. Τα κεριά ανακαλύφθηκαν γύρω στο 1000 π.Χ. και αντικαταστάθηκαν λίγο αργότερα από το φωταέριο και τις λάμπες πυρακτώσεως που ανακαλύφθηκαν από τον Edison το 1879. Στη συνέχεια, δηλαδή στο τέλος του 18ου και στην αρχή του 19ου αιώνα, έγιναν μεγάλα τεχνολογικά άλματα, αποτέλεσμα των οποίων ήταν να ανακαλυφθούν τα ραδιοκύματα και άρα το ραδιόφωνο το 1986, οι ακτίνες X το 1895, η υπέρυθη ακτινοβολία (UV) το 1901 και το radar το 1936.



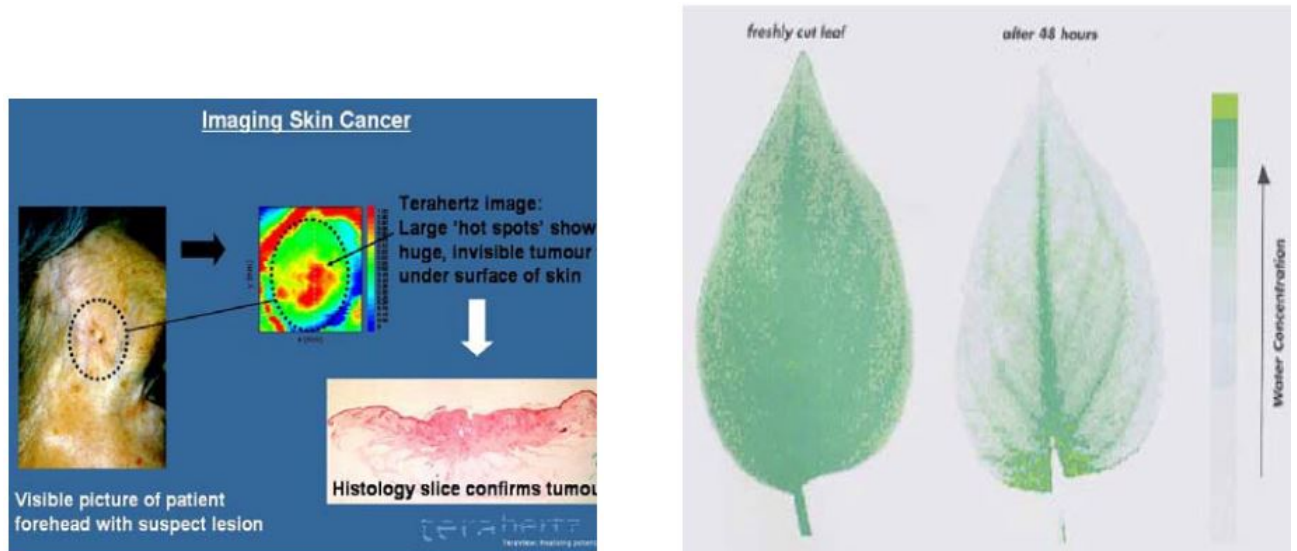
Σχήμα 2.9: THz Φάσμα συχνοτήτων Πηγή: [47]

Παρόλα αυτά το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα που κυμαίνεται από 10 μm μέχρι 1mm, το φάσμα δηλαδή που αντιστοιχεί σε συχνότητες από 300 GHz έως 30 THz, παραμένει ακόμη μέχρι και σήμερα μια πρόκληση για τους ερευνητές τόσο της ηλεκτρονικής όσο και της φωτονικής τεχνολογίας. Για παράδειγμα υπάρχει τεράστια δυσκολία να σχεδιαστούν lasers που να δουλεύουν στο THz φάσμα και να λειτουργούν σε θερμοκρασία δωματίου. Αυτό συμβαίνει καθώς οι πηγές THz μπορούν να παράγουν milliwatt ή και microwatt ενέργειας, με την εξαίρεση φυσικά των lasers ελεύθερων ηλεκτρονίων τα οποία μπορούν να φτάσουν ακόμα και τα kilowatt ενέργειας, όπως αυτό φαίνεται άλλωστε και στο διάγραμμα αριστερά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η ενέργεια των φωτονίων στην συχνότητα των ένα THz να είναι περίπου 4 meV, συγκριτικά δηλαδή πολύ μικρότερη από την θερμική ενέργεια των 26 meV που έχει κατά μέσο όρο ένα δωμάτιο και έτσι στην ουσία αυτή η ενέργεια να “χάνεται”. Δηλαδή να παραμένει ασήμαντη σε σχέση με την ενέργεια γύρω της. Αυτές οι δυσκολίες όμως δεν ήταν αρκετές

για να σταματήσουν το εκθετικά αυξανόμενο ενδιαφέρον στις τεχνολογίες terahertz. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω του τεράστιου αριθμού εφαρμογών που μπορεί να έχει στην απεικόνιση αντικειμένων, στην ιατρική, στην βιολογία, στην εξερεύνηση του διαστήματος στις τηλεπικοινωνίες, στα radar, στον βιομηχανικό έλεγχο, στην μικροσκοπία, στην τομογραφία, ακόμα και στην ασφάλεια μιας χώρας. Ακολούθως θα εξετάσουμε ορισμένα παραδείγματα [32].

2.3.1 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ THz

Οι πιο σημαντικές εφαρμογές της τεχνολογίας terahertz είναι αυτές που αφορούν στην απεικόνιση αντικειμένων στην ιατρική, στη βιολογία και στην παραγωγή.

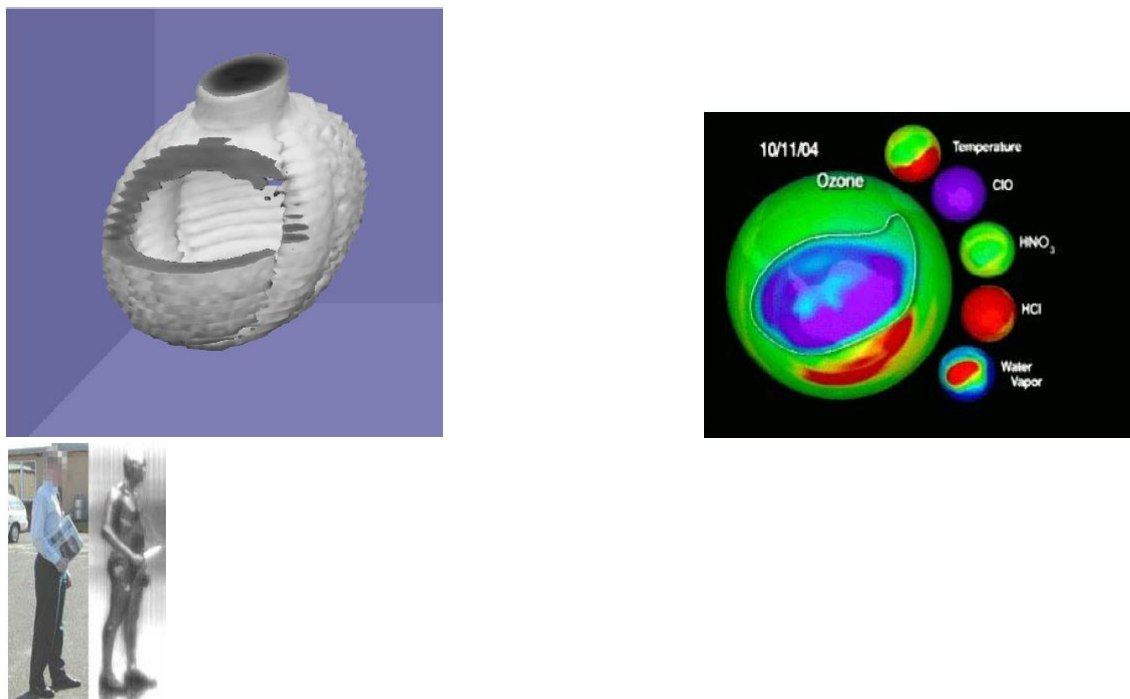


Σχήμα 2.10: (a) Απεικόνιση του καρκίνου του δέρματος (b) Απεικόνιση ενός φύλλου και του ίδιου φύλλου 48 ώρες μετά Πηγή: [49]

Σε αυτές τις εικόνες φαίνεται η χρήση του THz φάσματος για την απεικόνιση βιολογικών ιστών. Στο σχήμα 1.10(a) μπορούμε να δούμε την απεικόνιση ενός καρκίνου του δέρματος με τη χρήση της τεχνολογίας THz ενώ στο σχήμα 1.10(b) μπορούμε να δούμε την απεικόνιση ενός φύλλου και την απεικόνιση του ίδιου φύλλου 48 ώρες μετά.

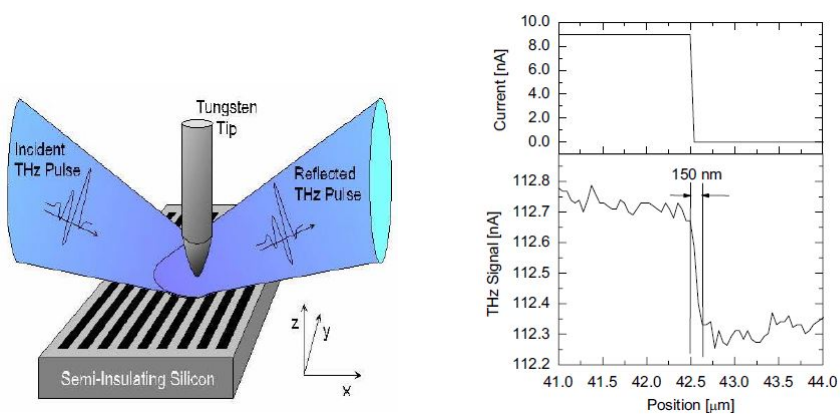
Στο σχήμα 1.11(b) μπορούμε να δούμε την τρύπα του όζοντος και στο σχήμα 1.11(a) την χρήση της THz απεικόνισης στην βιομηχανία παραγωγής καθώς έχουμε την απεικόνιση της κοιλότητας μια μπάλας του golf. Ενώ στο σχήμα 1.11(c) μπορούμε να δούμε την χρήση αυτής της τεχνολογίας στην ανίχνευση όπλων.

Τέλος πρέπει να αναφέρουμε πως τόσο οι τεχνικές εκπομπής terahertz όσο και οι τεχνικές λήψεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό εκρηκτικών καθώς, αξιοποιώντας το φαινόμενο της διάχυση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, δεν απαιτείται πια να έχουμε οπτική επαφή με το αντικείμενο.



Σχήμα 2.11: (a) Απεικόνιση της τομής μια μπάλας του golf (b) Τρύπα του όζοντος (c) Χρήση της THz ακτινοβολίας για την ανίχνευση όπλων Πηγή: [48]

Στο σχήμα 1.12 μπορούμε να δούμε πως χρησιμοποιείται η τεχνολογία εκπομπής terahertz για την ανίχνευση μεταλλικών γωνιών.

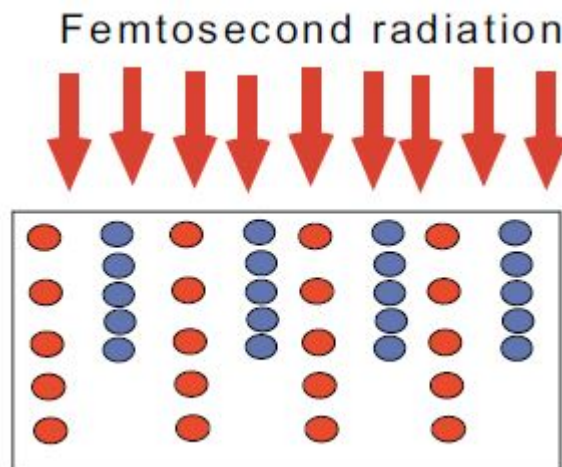


Σχήμα 2.12: Τεχνολογία Ανίχνευσης Μεταλλικών Γωνιών Πηγή: [58]

2.3.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΤΗΣΤΗz ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

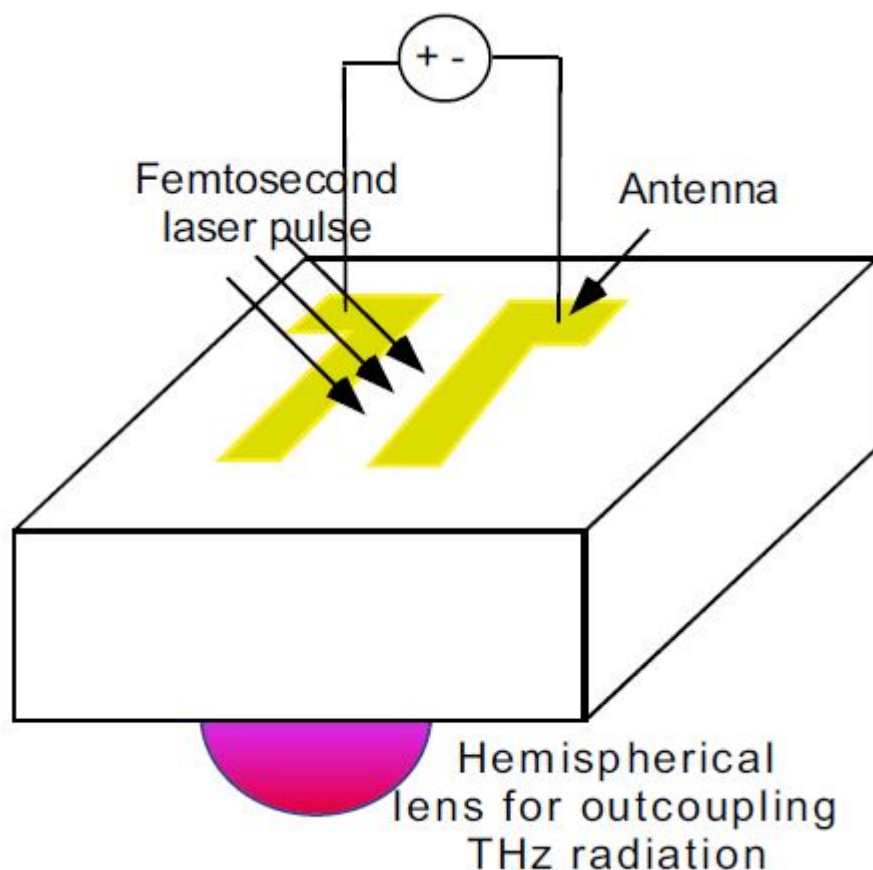
Οι ηλεκτρονικές πηγές της THz ακτινοβολίας λειτουργούν κυρίως στην χαμηλή ζώνη του εύρους των THz (δηλαδή από 300 GHz έως 1 THz). Για παράδειγμα οι διόδοι Gunn μαζί με πολλαπλασιαστές συχνοτήτων χρησιμοποιούνται ώστε να επιτύχουν ισχείς οι οποίες είναι λογικές και αναμενόμενες για συχνότητες THz. Συνήθως για την παραγωγή συχνοτήτων 200 ή 600 GHz χρησιμοποιείται μία δίοδος Gunn των 100 GHz με διπλασιαστή ή τριπλασιαστή αντίστοιχα. Η μέγιστη ισχύς που παράγεται από τις παραπάνω διόδους είναι γύρω στα 3mW για το σύστημα των 200 GHz και 0.3 mW για το σύστημα των 600 GHz αντίστοιχα. Σε πιο υψηλές συχνότητες επικρατούν κυρίως οι φωτονικές πηγές THz . Τα QCLs (Quantum Cascade Lasers) λειτουργούν σε θερμοκρασίες γύρω στα 164 K για να παράγουν παλμούς με συχνότητα 3 THz και γύρω στα 117 K για να παράγουν συνεχόμενη κυματομορφή με ανώτερη ισχύ 50 mw. Υπάρχουν διαθέσιμα στην αγορά QCL ακόμη και για πολύ μικρότερες κυματομορφές (δηλαδή με μήκος 5-12 μικρόμετρα), τα οποία χρησιμοποιούν θερμοηλεκτρική ψύξη [34].

Οι φωτονικές πηγές της THz ακτινοβολίας που παράγουν femtoseconds παλμούς laser χρησιμοποιούνται συχνά για εφαρμογές απεικόνισης. Υπάρχουν τουλάχιστον τρεις διαφορετικοί μηχανισμοί που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παράξουν THz ακτινοβολία με παλμούς femtoseconds. Ο πρώτος μηχανισμός χρησιμοποιεί το φαινόμενο Dember, κατά το οποίο η ακτινοβολία του laser δημιουργεί μεγάλη πυκνότητα από τρύπες ηλεκτρονίων κοντά στην επιφάνεια του ημιαγωγού. Τα ηλεκτρόνια (που φαίνονται με κόκκινο στο σχήμα 1.13) έχουν μεγαλύτερη κινητικότητα και για αυτό το λόγο μεγαλύτερο συντελεστή διάχυσης από τις οπές (που σημειώνονται με μπλε). Συνεπώς, αρχικά τα ηλεκτρόνια διαχέονται βαθύτερα μέσα στους ημιαγωγούς από ότι οι οπές και μετά επιστρέφουν ελκόμενα από το θετικό φορτίο των οπών. Αυτό δημιουργεί ένα παλμό THz.



Σχήμα 2.13: Το φαινόμενο Dember Πηγή: [59]

Ένας άλλος μηχανισμός για να δημιουργηθεί αυτός ο παλμός είναι με ένα διακόπτη Austin. Στο διακόπτη αυτόν δημιουργείται μια μεγάλη ηλεκτρονική οπή μεταξύ δύο ηλεκτροδίων σχηματίζοντας έτσι μια κεραία Grischkowsky. Μία σχεδόν ακαριαία αλλαγή στην αγωγιμότητα έχει σαν αποτέλεσμα την απότομη αλλαγή του ηλεκτρικού πεδίου το οποίο με τη σειρά του παράγει μια ευρέους ζώνης THz ακτινοβολία. Τέλος η μέθοδος της οπτικής παραμόρφωσης του laser femtosecond χρησιμοποιεί τις μη γραμμικές οπτικές ιδιότητες ενός κρυστάλλου ο οποίος επιτρέπει να δημιουργείται μεγαλύτερο εύρος ζώνης με πολύ μικρότερη ισχύ και ως συνέπεια αυτού ακτινοβολία THz.



Σχήμα 2.14: Ο διακόπτης Austin Πηγή: [54]

2.4 ΚΕΡΑΙΕΣ TERAHERTZ

Η κεραία αποτελεί σημαντικό κομμάτι των THz συστημάτων. Για να χρησιμοποιήσουμε την THz ακτινοβολία σε πρακτικές εφαρμογές, όπως είναι οι *in vivo* βιοϊατρικές μετρήσεις (όπου υπάρχει σημαντική απόσβεση λόγω ατμοσφαιρικών υδρατμών και αίματος αντίστοιχα) απαιτούνται κεραίες με ιδιαίτερα ενισχυμένο κέρδος και κατευθυντικότητα. Η εκπομπή THz ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων πραγματοποιείται με διάφορους τρόπους: με διηλεκτρικούς φακούς τοποθετημένους είτε απ' ευθείας στην πηγή είτε σε κάποια άλλη κεραία, με τυπωμένες ή άλλες κεραίες που αποτελούν σμικρύνσεις δημοφιλών σχεδίων κεραίων από τη μικροκυματική περιοχή λειτουργίας, με φωτοαγώγιμες κεραίες (THz photoconductive antennas, THz-PCAs) που παρέχουν τη δυνατότητα παραγωγής και εκπομπής THz ακτινοβολίας ή τέλος με κεραίες από γραφένιο, οι οποίες όμως βρίσκονται σε πρώιμο ερευνητικό στάδιο. Τις τελευταίες κεραίες θα μελετήσουμε παρακάτω.

Οι εκτεταμένοι ημισφαιρικοί φακοί σε συνδυασμό με κάποια κεραία αποτελούν την πιο δημοφιλή επιλογή σε THz εφαρμογές. Σε αυτήν την αρχιτεκτονική, η κεραία βρίσκεται σε επαφή με το πίσω μέρος του φακού. Συνήθεις κατηγορίες εκτεταμένων ημισφαιρικών φακών είναι ο φακός ευθυγράμμισης, όπου η επέκταση ισούται με $d_{coll} = \frac{R}{n-1}$, και ο υπερ-ημισφαιρικός φακός, όπου $d_{hyper} = \frac{R}{n}$, (με R συμβολίζεται η ακτίνα του φακού και με n ο δείκτης διάθλασης του διηλεκτρικού). Χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν την κατευθυντικότητα της κεραίας, η οποία εξαρτάται από το υλικό του φακού και αυξάνεται με την αύξηση του μήκους R της επέκτασης. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των φακών ως μέσα ακτινοβόλησης THz συχνοτήτων είναι η εύκολη χρήση τους σε συνδυασμό με πολλά είδη πηγών. Από την άλλη πλευρά, το μεγάλο μέγεθος περιορίζει τις πρακτικές εφαρμογές στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Επίσης, η αρκετά μεγάλη τιμή της διηλεκτρικής επιτρεπτότητας των υλικών των φακών στις THz συχνότητες, όπως $\epsilon_r = 11.9$ για το πυρίτιο, και συνεπώς η μεγάλη διαφορά μεταξύ διηλεκτρικού και αέρα, έχουν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία κρουστικών κυμάτων.

Οι σμικρύνσεις χοανοκεραίων σε μεγέθη της τάξης των χιλιοστών αποτελούν εξαιρετικά δαπανηρές λύσεις και συνεπώς ακατάλληλες για εκπομπή χαμηλών THz συχνοτήτων. Κωνική χοανοκεραία με διάμετρο ανοίγματος 1.8 mm έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί στα $0.8 - 1.1 \text{ THz}$. Επίσης, κεραία με διάμετρο 16 mm με περιοχή λειτουργίας $100 - 200 \text{ GHz}$ έχει κατασκευαστεί εξ ολοκλήρου από ηλεκτρομαγνητικό κρύσταλλο (EMXT). Τυπωμένη χοανοκεραία σε δύο πλακετίδια πυριτίου (wafers): στο επάνω wafer κατασκευάζεται η κοιλότητα της κεραίας με ένα δίπολο να τυπώνεται στο κέντρο, ενώ το δεύτερο wafer εξυπηρετεί ως ανακλαστική επιφάνεια.

Οι επίπεδες κεραίες (planar antennas) παρουσιάζουν ορισμένα σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους προαναφερθέντες ακτινοβολητές: το μικρό και εύχρηστο μέγεθος και η μη δαπανηρή κατασκευή. Συνήθως αυτές οι κεραίες αποτελούν σμικρύνσεις σχεδίων μικροκυματικών συχνοτήτων με ποικιλία σχημάτων που προσφέρουν συγκεκριμένη πολικότητα και εύρος λειτουργίας, κατάλληλα χαρακτηριστικά για τις απαιτήσεις κάθε εφαρμογής: δίπολα, τετραγωνικές, παπιγιόν (bow-tie), σπιράλ κ.α. Ωστόσο, η γραμμική σμίκρυνση μικροκυματικών κεραίων συνεπάγεται εύθραυστα υποστρώματα πολύ μικρού πάχους. Από την άλλη

πλευρά, η μεγέθυνση του πάχους του υποστρώματος σε λίγες δεκάδες μικρόμετρα οδηγεί σε μεγέθη συγκρίσιμα με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας σε THz συχνότητες και συνεπώς σε σημαντική απώλεια ισχύος σε substrate modes. Επιπλέον, το φαινόμενο της ανάπτυξης κρουστικών κυμάτων στη διαχωριστική επιφάνεια αέρα - διηλεκτρικού υποστρώματος, όπως αναφέρθηκε και στην περίπτωση των διηλεκτρικών φακών, προκαλείται από τη σημαντική διαφορά της διηλεκτρικής επιτρεπτότητας των δύο μέσων. Για την επίλυση αυτών των προβλημάτων έχει προταθεί η τεχνητή επιδιόρθωση ή μείωση της ηλεκτρικής επιτρεπτότητας του διηλεκτρικού υποστρώματος με διάφορους τρόπους: πολλαπλές στρώσεις διαφορετικών διηλεκτρικών με αντίστοιχα πάχη ή φωτονικούς κρυστάλλους στους οποίους έχουν εισαχθεί μικροδομές όπως σφαίρες αέρα διαμέτρου μερικών μικρομέτρων. Οι τεχνικές αυτές έχουν εφαρμοστεί για συχνότητες μέχρι 600 GHz. Οι τυπωμένες κεραίες έχουν το πλεονεκτήματα της εύκολης εφαρμογής τους σε συνδυασμό με άλλες τυπωμένες συσκευές και της κατασκευής μήτρας κεραιών. Προσομοίωση συστοιχίας 4x4 επίπεδων κεραιών στα 300GHz έδειξε κέρδος 18.1dBi.

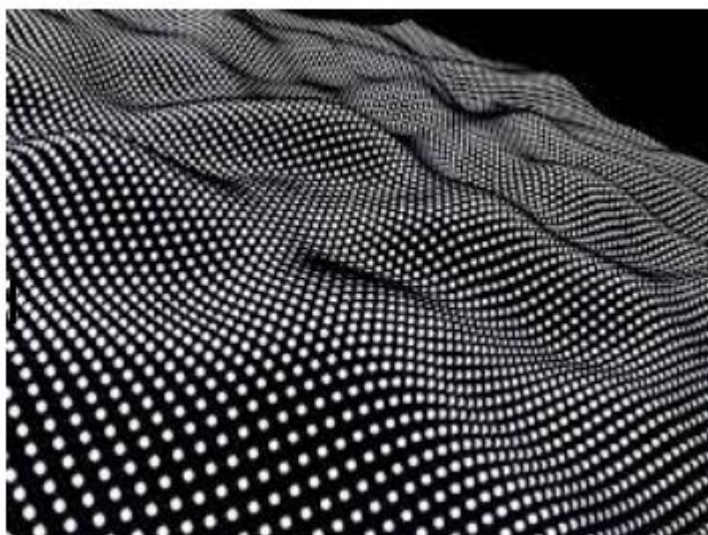
Οι φωτοαγώγιμες κεραίες (Photoconductive, PC, antennas) αποτελούν μία κατηγορία επίπεδων κεραιών, οι οποίες εκτός από ακτινοβολητές THz συχνοτήτων, αποτελούν και πηγές παραγωγής THz ακτινοβολίας. Αποτελούνται συνήθως από ένα δίπολο και δύο ηλεκτρόδια τυπωμένα σε ένα στρώμα GaAs. Ένας οπτικός παλμός στοχεύει στο διάκενο του διπόλου και ένας THz παλμός παράγεται και ακτινοβολείται από την πίσω πλευρά του υποστρώματος. Η αρχή λειτουργίας της φωτοαγώγιμης κεραίας βασίζεται στο φαινόμενο της φωτοαγωγιμότητας που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Για λειτουργία σε μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων, αντί για δίπολο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί παπιγιόν (bow-tie) κεραία ή λογαριθμική σπирάλ.

Το γραφένιο, διδιάστατο ατομικό πλέγμα άνθρακα ή διαφορετικά στρώμα γραφίτη με πάχος ενός ατόμου, παρουσιάζει μοναδικές ιδιότητες ανάλογα με τη μορφή του ατομικού πλέγματος, όπως μεταλλική συμπεριφορά σε ορισμένες συχνότητες. Οι THz κεραίες γραφενίου (γραφένες) βασίζονται στην ανάπτυξη επιφανειακών πλασμονίων-πολαριτονίων (surface plasmon polaritons, SPPs) THz συχνότητας όταν το γραφένιο διεγείρεται με οπτική ακτινοβολία και βρίσκουν πιθανή εφαρμογή σε νανο-συστήματα και οπτικούς νανο-μεταγωγείς

2.5 ΓΡΑΦΕΝΙΟ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

2.5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

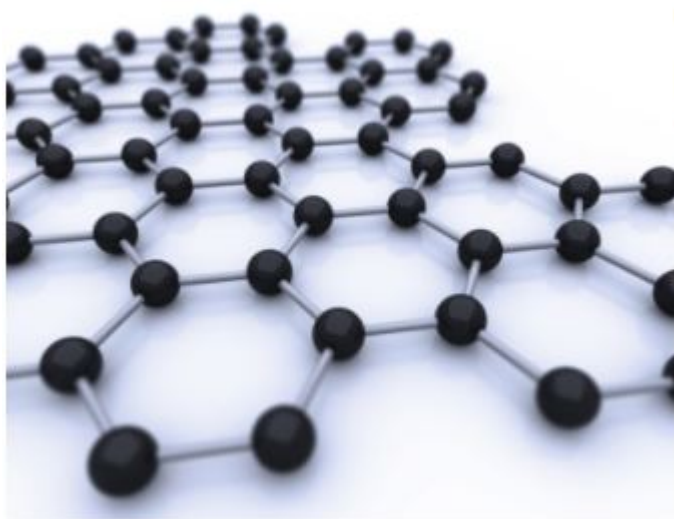
Το γραφένιο είναι ένα από τα πιο αναπτυσσόμενα υλικά , τόσο όσον αφορά την έρευνα όσο και τις εφαρμογές που έχει τα τελευταία χρόνια. Τι είναι όμως το γραφένιο; Με μια πρώτη επαφή θα έλεγε κανείς ότι είναι ένα υλικό σαν όλα τα υπόλοιπα που υπάρχουν και έχουμε ανακαλύψει στη γη. Αυτό όμως που το κάνει πραγματικά ιδιαίτερο είναι οι εκπληκτικές ιδιότητες που έχει. Το γεγονός δηλαδή ότι είναι πολύ ελαφρύ και ανθεκτικό υλικό σε συνδυασμό πάντα με την ικανότητά του να άγει καλά την θερμότητα και τον ηλεκτρισμό το καθιστούν κατάλληλο για πολλές διαφορετικές χρήσεις και εφαρμογές. Χρησιμοποιείται ήδη για να βελτιώσει την απόδοση και την αποτελεσματικότητα πολλών υπαρκτών υλικών και ουσιών και στο μέλλον υπάρχει η δυνατότητα να συνδυαστεί με τη μορφή προσμίξεων και με άλλα δισδιάστατα υλικά ώστε να δημιουργηθούν ακόμα καλύτερα μείγματα και κράματα με ακόμα πιο εντυπωσιακές ιδιότητες. Για να κατανοήσουμε καλύτερα όμως τις δυνατότητες που έχει το γραφένιο καθώς και σε ποιες εφαρμογές μπορεί αυτό να χρησιμοποιηθεί θα πρέπει πρώτα να εξετάσουμε ποια είναι η δομή του αλλά και οι βασικές ιδιότητές του [82].



Σχήμα 2.15: Γραφένιο Πηγή: [82]

2.5.2 ΔΟΜΗ

Το γραφένιο στην ουσία είναι ένα μονατομικό στρώμα γραφίτη, ενός υλικού δηλαδή το οποίο υπάρχει άφθονο στη φύση και αποτελείται από πολύ στενά συνδεδεμένα άτομα άνθρακα οργανωμένα σε εξαγωνικό πλέγμα. Αυτό βέβαια που δίνει στο γραφένιο τις εκπληκτικές ιδιότητές του είναι ότι έχει πολύ μικρό ατομικό πάχος ($0,345 \text{ nm}$).



Σχήμα 2.16: Δομή Γραφενίου Πηγή: [81]

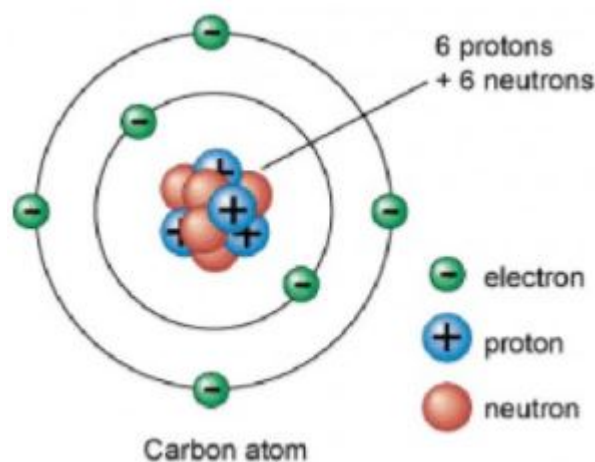
2.5.3 ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Πριν καταφέρουν οι επιστήμονες να απομονώσουν μονατομικά φύλλα γραφενίου (2004) υπήρχε θεωρητικά η άποψη ότι κάτι τέτοιο θα ήταν αδύνατο λόγω της θερμικής αστάθειας που θα δημιουργούνταν όταν τα διαχώριζαν. Παρόλα αυτά όταν απομονώθηκαν τα πρώτα φύλλα γραφενίου και ήταν πια πρακτικά αποδεδειγμένο ότι κάτι τέτοιο μπορεί να συμβεί, οι επιστήμονες άρχισαν να ερευνούν τους λόγους που κάτι τέτοιο ήταν δυνατό. Αφού λοιπόν μελέτησαν αιωρούμενα φύλλα γραφενίου σε ηλεκτρονικά μικροσκόπια κατέληξαν αρχικά στο συμπέρασμα ότι αυτό οφείλονταν στον ελαφρό κυματισμό που έκαναν τα φύλλα του γραφενίου τροποποιώντας έτσι την δομή του υλικού και καθιστώντας το πιο σταθερό. Αυτό που ανακάλυψαν όμως αργότερα οι επιστήμονες και πραγματικά ισχύει είναι ότι το γραφένιο είχε αυτή την ιδιότητα καθώς οι δεσμοί μεταξύ των ατόμων άνθρακα ήταν τόσο ισχυροί που δεν επέτρεπαν την αποσταθεροποίηση του υλικού λόγω των θερμικών διακυμάνσεων.

2.5.4 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Μία από τις πιο χρήσιμες ιδιότητες του γραφενίου είναι η υψηλή ηλεκτρική του αγωγιμότητα η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι το γραφένιο είναι ένα ημιμέταλλο (έχει δηλαδή και οπές και ηλεκτρόνια σαν φορείς φορτίου). Τα άτομα του άνθρακα έχουν συνολικά 6 ηλεκτρόνια, δύο στην εσωτερική στοιβάδα και 4 στην εξωτερική. Τα 4 ηλεκτρόνια που βρίσκονται στην εξωτερική στοιβάδα είναι αυτά που μπορούν να σχηματίσουν χημικούς δεσμούς. Κατά το σχηματισμό όμως του γραφενίου χρησιμοποιούνται μόνο 3 από αυτά στο σχηματισμό χημικών δεσμών αφήνοντας με αυτό τον τρόπο ένα ηλεκτρόνιο ελεύθερο (χωρίς δεσμό). Αυτά τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που είναι και ιδιαίτερα κινητικά ονομάζονται π (π) ηλεκτρόνια και βρίσκονται πάνω και κάτω από το φύλλο γραφενίου. Οι επικαλύψεις αυτών των περιφερικών π ηλεκτρονίων συμβάλλουν στην ενίσχυση μεταξύ των δεσμών άνθρακα. Συμπερασματικά, οι ηλεκτρονικές ιδιότητες του γραφενίου οφείλονται αποκλειστικά και μόνο στην κίνηση και την συμπεριφορά αυτών των ελεύθερων ηλεκτρονίων.

Διάφορες μετρήσεις έχουν δείξει ότι το γραφένιο έχει πολύ υψηλή ηλεκτρονική κινητικότητα με τιμές που φτάνουν πάνω από $15.000\text{cm}^2.V.S^{-1}$ και που θεωρητικά μπορούν να αγγίξουν ακόμα και τα $200.000\text{cm}^2.V.S^{-1}$ (και αυτό επειδή περιορίζεται από την διασπορά των ακουστικών φωτονίων του γραφενίου). Λέγεται πως τα ηλεκτρόνια του γραφενίου συμπεριφέρονται σαν φωτόνια όσον αφορά την κινητικότητα του εξαιτίας της έλλειψης μάζας. Αυτοί οι φορείς φορτίου μπορούν να ταξιδεύουν σε αποστάσεις μικρότερες του μικρόμετρου χωρίς διασπορά, το φαινόμενο αυτό λέγεται βαλλιστική μεταφορά. Παρόλα αυτά περιοριστικοί παράγοντες της ηλεκτρονικής κινητικότητας αποτελούν τόσο η ποιότητα του γραφενίου όσο και η ποιότητα του υποστρώματος που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα αν χρησιμοποιήσουμε διοξείδιο του πυριτίου σαν υπόστρωμα η κινητικότητα θεωρητικά μειώνεται σε $40.000\text{cm}^2.V.S^{-1}$ [85].



Σχήμα 2.17: ΑΤΟΜΟ ΑΝΘΡΑΚΑ Πηγή: [83]

2.5.5 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ

Μία άλλη ιδιότητα του γραφενίου που ξεχωρίζει είναι η μεγάλη μηχανική αντοχή του. Χάρη τους ισχυρούς δεσμούς άνθρακα το γραφένιο είναι το πιο ανθεκτικό υλικό που έχει ανακαλυφθεί ποτέ με αντοχή στον εφελκυσμό 130.000.000.000 pascals (ή 130 gigapascals), σε σύγκριση με 400.000.000 pascals για το δομικό χάλυβα A36 ή 375.700.000 pascals για το Aramid (Kevlar). Δεν είναι όμως μόνο εξαιρετικά ανθεκτικό αλλά και εξαιρετικά ελαφρύ. Ζυγίζει μόλις 0.77 milligrams ανά τετραγωνικό μέτρο (για λόγους κατανόησης αξίζει να πούμε πως 1 τετραγωνικό μέτρο χαρτιού είναι περίπου 1000 φορές βαρύτερο από 1 τετραγωνικό μέτρο γραφενίου). Συχνά λέγεται ότι ένα φύλλο γραφενίου (πάχους 1 ατόμου), επαρκούς μεγέθους για να καλύψει ολόκληρο το γήπεδο ποδοσφαίρου, θα ζυγίζε κάτω από 1 γραμμάριο.

Πέρα όμως από την εξαιρετική αντοχή του το γραφένιο παρουσιάζει και εξαιρετική ελαστικότητα, επανέρχεται δηλαδή στην αρχική του μορφή μετά από εξαιρετικό εφελκυσμό. Το 2007 διεξήχθησαν δοκιμές μικροσκοπικών δυνάμεων (AFM) σε φύλλα γραφενίου που αιωρήθηκαν πάνω από κοιλότητες διοξειδίου του σιλικόνης. Αυτές οι δοκιμές έδειξαν ότι τα φύλλα γραφενίου (με πάχος μεταξύ 2 και 8 nm) είχαν σταθερές ελατηρίου στην περιοχή 1-5 N. Βέβαια αυτά τα εξαιρετικά αποτελέσματα βασίζονται σε πειράματα και μετρήσεις με ιδανικές συνθήκες, με γραφένιο δηλαδή το οποίο είναι ανόθευτο και χωρίς καμία ατέλεια, το οποίο όμως είναι προς το παρόν πολύ ακριβό να αναπαραχθεί τεχνητά. Βέβαια οι τεχνικές παραγωγής βελτιώνονται σταθερά, μειώνοντας ολοένα και περισσότερο το κόστος και την πολυπλοκότητα που χρειάζεται.

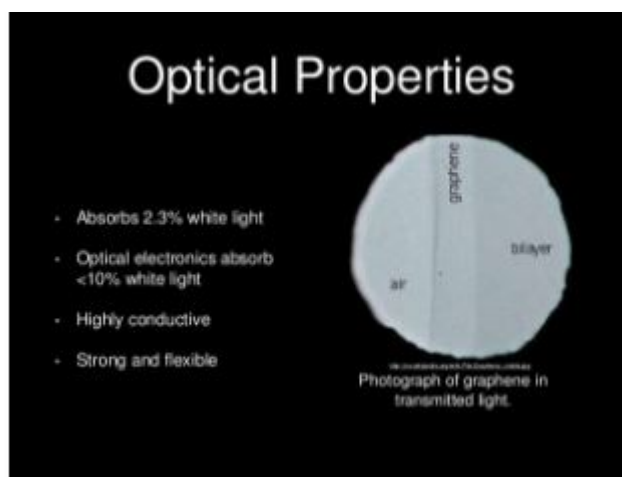


Σχήμα 2.18: Αντοχή Γραφενίου Πηγή: [84]

2.5.6 ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Η ικανότητα του γραφενίου να απορροφά ένα μεγάλο ποσοστό (2,3%) του λευκού φωτός είναι επίσης μια μοναδική και αρκετά ενδιαφέρουσα ιδιότητα ειδικά αν αναλογιστεί κανείς ότι το ατομικό πάχος του είναι μονό ένα άτομο. Αυτό οφείλεται στις προαναφερθείσες ηλεκτρονικές του ιδιότητες, ότι δηλαδή τα ηλεκτρόνια συμπεριφέρονται σαν άμαζοι φορείς φορτίου με πάρα πολύ υψηλή κινητικότητα. Πριν από μερικά χρόνια αποδείχθηκε μάλιστα ότι η ποσότητα του λευκού φωτός που απορροφάται διπλασιάζεται αν προσθέσουμε ακόμα ένα φύλλο γραφενίου [87].

Όταν όμως η οπτική απορρόφηση φτάσει σε ένα συγκεκριμένο κατώφλι (γνωστό και ως κατώφλι κορεσμού) τότε υπάρχει μείωση της απορρόφησης του φωτός. Αυτό ακριβώς το φαινόμενο βοηθά στο συγχρονισμό των laser. Έτσι ένα laser ερβίου μπορεί να επιτύχει συντονισμό του μήκους κύματος ακόμα και 30 nm.



Σχήμα 2.19: Οπτικές Ιδιότητες Πηγή: [86]

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Χάρη σε αυτές τις εκπληκτικές του ιδιότητες το γραφένιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αναρίθμητες εφαρμογές. Παρακάτω θα αναφέρουμε τις βασικότερες από αυτές

2.5.7 ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

Η βιο-μηχανική θα είναι σίγουρα ένας τομέας στον οποίο το γραφένιο θα παίζει ζωτικό ρόλο στο μέλλον, αν και πρώτα θα πρέπει να ξεπεραστούν αρκετά εμπόδια προτού αυτό χρησιμοποιηθεί. Οι εκτιμήσεις που υπάρχουν μέχρι στιγμής δείχνουν ότι πριν το 2030 δεν θα μπορούσαμε να δούμε το γραφένιο να χρησιμοποιείται ευρέως σε ιατρικές εφαρμογές. Αυτό συμβαίνει καθώς πρέπει να κατανοήσουμε πλήρως την βιο-συμβατότητα του γραφενίου πριν το χρησιμοποιήσουμε. Πρέπει δηλαδή να υποβληθεί σε πολυάριθμες κλινικές δοκιμές για να διαπιστώσουμε αν είναι ασφαλές να το χρησιμοποιούμε και οι οποίες απαιτούν πάρα πολύ χρόνο. Ωστόσο, οι ιδιότητες που εμφανίζει υποδηλώνουν ότι θα μπορούσε να φέρει την επανάσταση

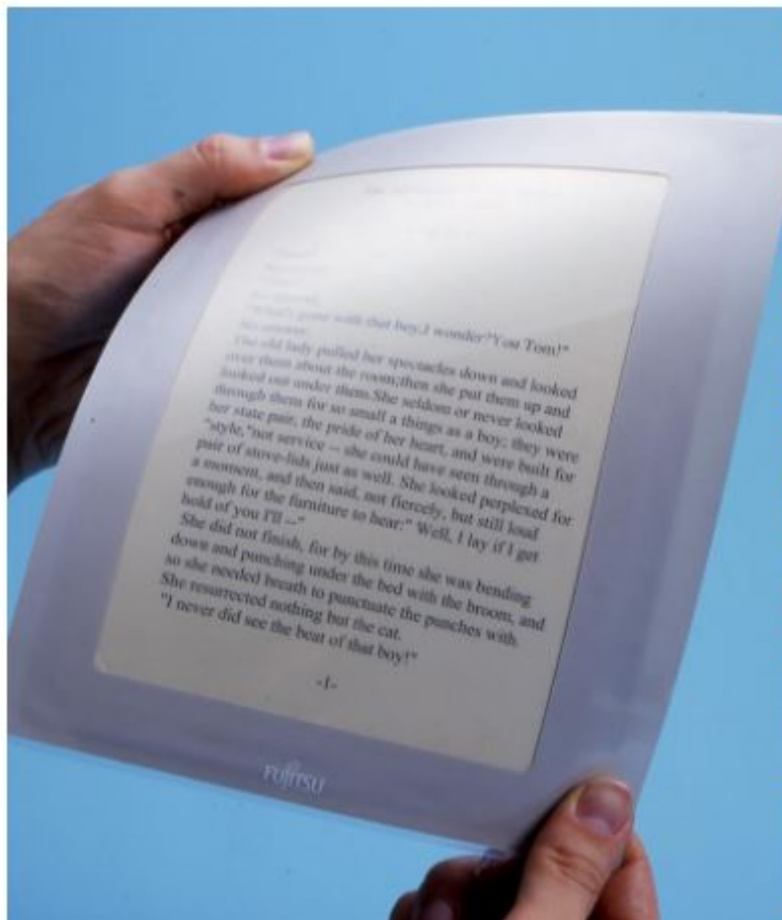
στον τομέα αυτό με πολλούς και διαφορετικούς τρόπους. Το γεγονός δηλαδή ότι το γραφένιο μπορεί να προσφέρει μεγάλη επιφάνεια με υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και τεράστια αντοχή αλλά ταυτόχρονα και πολύ μεγάλη λεπτότητα το καθιστά υποψήφιο για χρήση σε πολλές εφαρμογές. Τέτοιες είναι η ανάπτυξη γρήγορων και αποδοτικών βιοηλεκτρικών αισθητήριων, που θα έχουν παίρνουν μετρήσεις όπως τα επίπεδα γλυκόζης, τα επίπεδα αιμοσφαιρίνης, τη χοληστερόλη και θα μπορούν ακόμη και να αναγνωρίζουν την αλληλουχία DNA του ατόμου. Εν τέλει θα μπορούσε να δημιουργηθεί ακόμη και “τοξικό” γραφένιο το οποίο να χρησιμοποιηθεί σαν φάρμακο, σαν μια ισχυρή αντιβίωση δηλαδή ή ακόμα και σαν αντικαρκινική θεραπεία. Τέλος λόγω της μοριακής σύνθεσης του γραφενίου και της δυναμικής βιο-συμβατότητάς του θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μέχρι και στην διαδικασία της αναγέννησης των ιστών του ανθρώπου.

2.5.8 ΟΠΤΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ

Ένας από τους τομείς στον οποίο σύντομα θα αρχίσουμε να βλέπουμε το γραφένιο να χρησιμοποιείται σε εμπορική κλίμακα είναι εκείνος της οπτικής ηλεκτρονικής. Ειδικότερα θα χρησιμοποιηθεί σε οθόνες αφής, σε οθόνες υγρών κρυστάλλων (LCD) και σε οθόνες οργανικών φωτοδιόδων (OLEDs). Προκειμένου ένα υλικό να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οπτοηλεκτρονικές εφαρμογές, πρέπει να είναι σε θέση να εκπέμπει περισσότερο από το 90% του φωτός και επίσης να προσφέρει ηλεκτρικές αγωγιμότητες που υπερβαίνουν το $1 \times 10^6 \text{W}^{-1} \text{m}^{-1}$ και άρα συνεπώς να έχει χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση. Το γραφένιο είναι ένα τέτοιο υλικό και μάλιστα με το παραπάνω καθώς είναι ένα σχεδόν εντελώς διαφανές υλικό και είναι σε θέση να μεταδίδει οπτικά μέχρι 97,7% φωτός. Είναι επίσης εξαιρετικά αγωγίμο, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως και έτσι θα μπορούσε να λειτουργήσει πολύ καλά σε οπτοηλεκτρονικές εφαρμογές όπως είναι οι οθόνες αφής LCD για smartphones, οι υπολογιστές tablet, οι σταθεροί υπολογιστές καθώς και οι τηλεοράσεις.

Μέχρι σήμερα το πιο ευρέως διαδεδομένο υλικό είναι το ITO (indium tin oxide), και η ανάπτυξη αυτού του υλικού κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών το έκανε πολύ καλό για χρήση στον τομέα της οπτικής ηλεκτρονικής. Ωστόσο με δοκιμές που έγιναν πρόσφατα αποδείχθηκε ότι οι ιδιότητες του γραφενίου είναι ίδιες με αυτές του ITO ακόμα και σε αυτό το πρώιμο στάδιο που βρίσκεται η ανάπτυξή του. Επίσης έχει πρόσφατα αποδειχθεί ότι η οπτική απορρόφηση του γραφενίου μπορεί να αλλάξει ανάλογα με τα επίπεδα Fermi του. Και ενώ αυτό από μόνο του μπορεί να μην ακούγεται και σαν τόσο μεγάλη βελτίωση του ITO, οι επιπλέον ιδιότητες που εμφανίζει μπορούν να το κάνουν χρήσιμο στην ανάπτυξη πολύ έξυπνης τεχνολογίας όσον αφορά την οπτική ηλεκτρονική. Το γεγονός ότι το γραφένιο, όταν είναι πολύ καλής ποιότητας, έχει μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό και είναι εύκαμπτο, το κάνει κατάλληλο για την κατασκευή ηλεκτρονικού χαρτιού και αυτό γιατί έχει ακτίνα κάμψης μικρότερη από τα απαιτούμενα 5-10 mm που χρειάζεται ώστε να δημιουργηθούν ρολά χαρτιού. Το ηλεκτρονικό χαρτί είναι μια τεράστια καινοτομία στον τομέα της οπτοηλεκτρονικής, αφού θα έχει την δυνατότητα να προβάλλει διαδραστικές και ενημερωμένες πληροφορίες ανά πάσα στιγμή, όπως επίσης και να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή ευλύγιστων ηλεκτρονικών

συσκευών, συμπεριλαμβανομένων των φορητών υπολογιστών και των τηλεοράσεων [87].

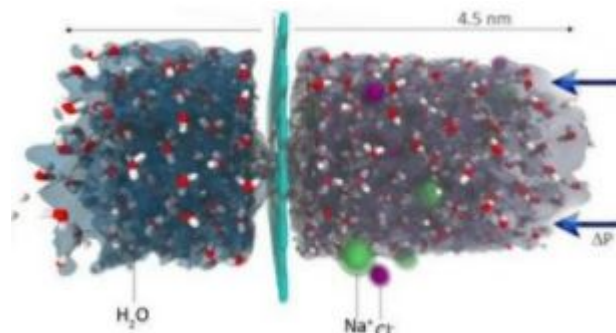


Σχήμα 2.20: Ηλεκτρονικό Χαρτί (e-paper) με βάση το γραφένιο Πηγή: [86]

2.5.9 ΥΠΕΡΦΙΛΤΡΑΡΙΣΜΑ

Μια άλλη εξαιρετική ιδιότητα του γραφενίου είναι ότι ενώ επιτρέπει στο νερό να διέλθει μέσω αυτού, είναι σχεδόν εντελώς αδιαπέραστο από υγρά και αέρια (ακόμη και σχετικά μικρά μόρια ηλίου). Αυτό σημαίνει ότι το γραφένιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσον υπερφιλτραρίσματος ή ακόμα και να λειτουργήσει ως φράγμα μεταξύ δύο ουσιών. Το πλεονέκτημα της χρήσης του γραφενίου ως φράγμα είναι ότι είναι ότι επειδή έχει ατομικό πλάτος ένα μπορεί να μετρά ηλεκτρονικά, μεταξύ πολλών άλλων μεταβλητών, και τις πιέσεις μεταξύ των δύο ουσιών. Μια ομάδα ερευνητών στο Πανεπιστήμιο της Κολούμπια κατάφερε να δημιουργήσει μονοστρωματικά φίλτρα γραφενίου με μέγεθος πόρου μικρότερο από 5nm (σήμερα, οι προχωρημένες νανό-μεμβράνες έχουν μεγέθη πόρων 30-40 nm). Παρόλο που αυτά τα μεγέθη πόρων είναι εξαιρετικά μικρά, καθώς το γραφένιο είναι πολύ λεπτό, η πίεση κατά την υπερδιήθηση μειώνεται. Συγχρόνως, το γραφένιο είναι πολύ ισχυρότερο και λιγότερο εύθραυστο από το οξειδίο του αργιλίου (που χρησιμοποιείται σήμερα σε εφαρμογές διήθησης κάτω από 100 nm). Αυτό θα μπορούσε να σημαίνει ότι θα μπορούσε να αναπτυχθεί γραφένιο για να χρησιμοποιη-

θεί σε συστήματα φιλτραρίσματος νερού, συστήματα αφαλάτωσης και σε μια αποτελεσματική και οικονομικά πιο βιώσιμη δημιουργία βιοκαυσίμων [88].



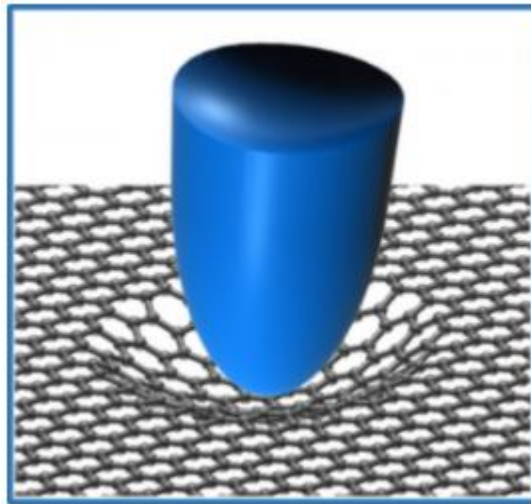
Σχήμα 2.21: Υπερφιλτράρισμα - Διαχωρισμός νερού από αλάτι Πηγή: [85]

2.5.10 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Το γραφένιο, όπως είπαμε παραπάνω, είναι ανθεκτικό, σκληρό και πολύ ελαφρύ. Σήμερα, οι μηχανικοί που ασχολούνται με την αεροδιαστημική τεχνολογία έχουν ενσωματώσει τις ίνες άνθρακα στην παραγωγή αεροσκαφών αφού είναι και πολύ ισχυρές και ελαφρές. Ωστόσο, το γραφένιο είναι συγκριτικά και πολύ ισχυρότερο και πολύ ελαφρύτερο από τα ανθρακονήματα. Αναμένεται ότι σε λίγα χρόνια θα δημιουργηθεί ένα υλικό από το γραφένιο (πιθανώς αναμειγμένο και ενσωματωμένο σε πλαστικά όπως το epoxy) που θα αντικαταστήσει το ατσάλι στο σκελετό των αεροσκαφών, βελτιώνοντας έτσι την απόδοσή τους σε καυσίμο, την εμβέλεια πτήσης τους και μειώνοντας δραστικά το βάρος τους. Λόγω της ηλεκτρικής αγωγιμότητάς του, μπορεί ακόμη να χρησιμοποιηθεί και για την επικάλυψη του επιφανειακού υλικού του αεροσκάφους ώστε να αποφευχθεί η ηλεκτρική βλάβη που προκαλείται από τις αστραπές. Σε αυτό το παράδειγμα, η ίδια επίστρωση με γραφένιο θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση του ρυθμού καταπόνησης του σκελετού, ενημερώνοντας τον πιλότο για οποιοδήποτε μεταβολές στα επίπεδα πίεσης που βρίσκονται κάτω από τα φτερά του αεροσκάφους. Τέλος αυτά τα φυσικά χαρακτηριστικά του γραφενίου μπορούν να βοηθήσουν και στην ανάπτυξη προϊόντων υψηλής αντοχής, όπως είναι τα αλεξίσφαιρα γιλέκα ή για θωράχιση σε στρατιωτικά οχήματα [88].

2.5.11 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ

Επειδή το γραφένιο προσφέρει πολύ χαμηλά επίπεδα απορρόφησης φωτός (γύρω στο 2,7% του λευκού φωτός) ενώ παράλληλα προσφέρει υψηλή κινητικότητα ηλεκτρονίων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτική λύση στο πυρίτιο ή στο ITO όσον αφορά στην κατασκευή φωτοβολταϊκών κυττάρων. Το πυρίτιο χρησιμοποιείται σήμερα ευρέως στην παραγωγή φωτοβολταϊκών κυττάρων. Αυτό όμως κάνει πολύ ακριβή την παραγωγή. Αντιθέτως τα κύτταρα που αντί για πυρίτιο θα χρησιμοποιούν γραφένιο θα είναι δυνητικά πολύ φθηνότερα να κατασκευαστούν. Όταν υλικά όπως το πυρίτιο μετατρέπουν το φως σε ηλεκτρισμό, για



Σχήμα 2.22: Αντοχή Γραφενίου σε Σφαίρες Πηγή: [87]

κάθε ένα φωτόνιο που προσπίπτει στο υλικό προκύπτει ένα παραγόμενο ηλεκτρόνιο, πράγμα που σημαίνει ότι πολύ ενέργεια χάνεται στο περιβάλλον με τη μορφή θερμότητας. Πρόσφατα δημοσιευμένη έρευνα έχει αποδείξει πως όταν το γραφένιο απορροφά ένα φωτόνιο, στην πραγματικότητα αντί για ένα δημιουργούνται πολλαπλά ηλεκτρόνια. Ακόμη, ενώ το πυρίτιο είναι ικανό να παράγει ηλεκτρική ενέργεια από ορισμένα μήκη κύματος του φωτός, το γραφένιο είναι σε θέση να παράγει ηλεκτρική ενέργεια από όλα τα μήκη κύματος. Αυτό με τη σειρά του σημαίνει ότι το γραφένιο έχει την δυνατότητα να είναι εξίσου αποτελεσματικό, αν όχι και πιο αποτελεσματικό, από το πυρίτιο και το αρσενικό γάλλιο. Ταυτόχρονα η ευελιξία και η λεπτότητα που έχει το γραφένιο σημαίνει ότι τα φωτοβολταϊκά κύτταρα, που έχουν σαν βάση αυτό το υλικό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ρούχα (σαν φορητό φορτιστή για το κινητό τηλέφωνο) ή ακόμα και ως φωτοβολταϊκές οθόνες ή κουρτίνες που θα παρέχουν δωρεάν ενέργεια στο σπίτι.

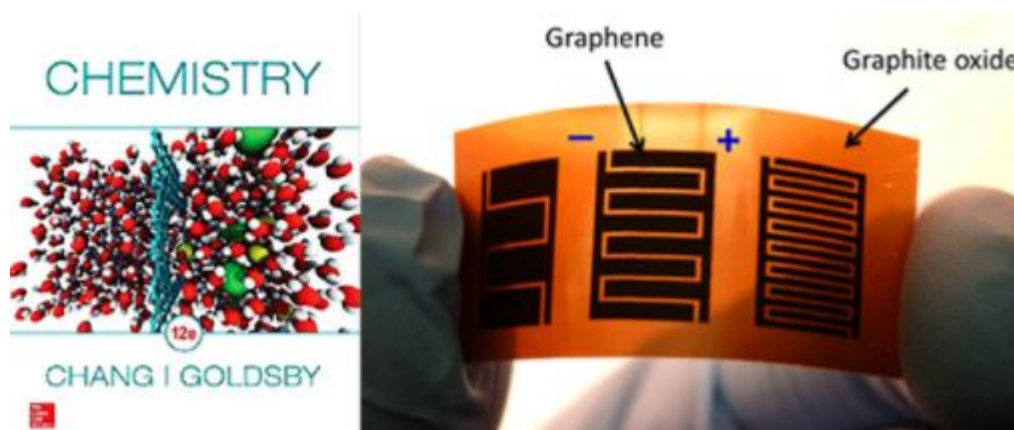


Σχήμα 2.23: Φωτοβολταϊκά από Γραφένιο Πηγή: [85]

2.5.12 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ένας τομέας της τεχνολογίας που έχει μελετηθεί πολύ από τους ερευνητές είναι η αποθήκευση ενέργειας. Ενώ όλες οι ερευνητικές περιοχές της ηλεκτρονικής παρουσιάζουν εξαιρετικά σημαντική πρόοδο τις τελευταίες δεκαετίες (ειδικά αν αναλογιστούμε το νόμο του Moore που δηλώνει ότι ο αριθμός των τρανζίστορ που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρονικά κυκλώματα θα διπλασιάζεται κάθε 2 χρόνια), το πρόβλημα της αποθήκευσης της ενέργειας σε μπαταρίες και πυκνωτές, παραμένει αρκετά δύσκολο να επιλυθεί. Αυτό συμβαίνει καθώς εάν μια μπαταρία είναι ικανή να κρατήσει πολύ ενέργεια, αυτομάτως σημαίνει και ότι χρειάζεται πολύς χρόνος για να φορτιστεί. Αντιθέτως, ένας πυκνωτής μπορεί να έχει πολύ μικρό χρόνο φόρτισης, αλλά το μειονέκτημά του είναι ότι δεν μπορεί να αποθηκεύσει τόσο πολύ ενέργεια όσο μια μπαταρία. Η λύση λοιπόν είναι να αναπτυχθούν τέτοια μέσα αποθήκευσης ενέργειας, όπως είναι είτε ένας σούπερ-πυκνωτής είτε μια μπαταρία, που να είναι σε θέση να παρέχουν και μεγάλη χωρητικότητα (σε ενέργεια) και μεγάλη ταχύτητα φόρτισης.

Ήδη οι ερευνητές εργάζονται πάνω στην ενίσχυση των δυνατοτήτων των μπαταριών ιόντων λιθίου (ενσωματώνοντας κυρίως το γραφένιο ως άνοδο της μπαταρίας), ώστε να είναι ικανές να προσφέρουν πολύ μεγαλύτερες χωρητικότητες αλλά ταυτόχρονα να έχουν μακροζωία και πολύ γρήγορο ρυθμό φόρτισης. Επιπροσθέτως, το γραφένιο μελετάται και αναπτύσσεται με σκοπό να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή υπερπυκνωτών που θα μπορούν από τη μία να φορτίσουν πολύ γρήγορα και από την άλλη να αποθηκεύσουν μεγάλη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μικρο-υπερπυκνωτές με γραφένιο μπορούν πιθανώς να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, όπως τα έξυπνα τηλέφωνα και οι φορητές υπολογιστικές συσκευές, και θα μπορούσαν ενδεχομένως να διατεθούν στο εμπόριο μέσα στα επόμενα 5-10 χρόνια. Από την άλλη οι μπαταρίες ιόντων λιθίου, ενισχυμένες με γραφένιο, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές πολύ υψηλότερης κατανάλωσης ενέργειας όπως είναι τα ηλεκτρικά οχήματα ή θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ακόμη ως αντικαταστάτες των μπαταριών ιόντων λιθίου που υπάρχουν ήδη σε smartphones, φορητούς υπολογιστές, tablet και PC, προσφέροντας όμως ταυτόχρονα και σημαντικά χαμηλότερο μέγεθος και βάρος της μπαταρίας [86].



Σχήμα 2.24: Λειτουργία γραφενίου σαν πηγή ενέργειας Πηγή: [87]

Κεφάλαιο 3

ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγράψουμε με ακριβή τρόπο, την θεωρητική ανάλυση της κεραίας, την σχεδιάσή της, την υλοποίηση της και εν τέλει τα αποτελέσματα που εμείς πήραμε.

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως αναφέραμε και παραπάνω, οι τεράστιες εφαρμογές που μπορεί να έχει η τεχνολογία THz, ιδίως στους τομείς της απεικόνισης και της ραδιοαστρονομίας, σε συνδυασμό φυσικά με τις πρόσφατες εξελίξεις όσον αφορά τις πηγές και τους ανιχνευτές αυτού του φάσματος, έχουν σαν αποτέλεσμα να αυξάνεται ολοένα και περισσότερο το ενδιαφέρον των ερευνητών στον τομέα αυτό.

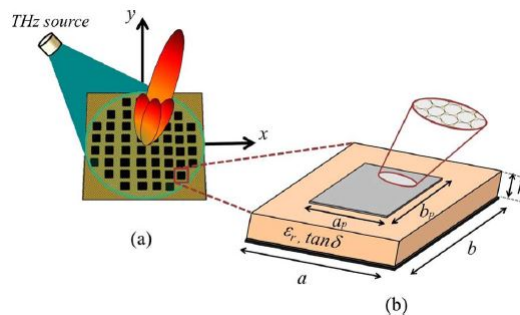
Οι επίπεδες κεραίες reflectarrays (ανακλαστήρες), χρησιμοποιούνται όλο και πιο πολύ τελευταία και αυτό γιατί συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα τόσο των παραβολικών ανακλαστήρων (parabolic reflectors) όσο και των συστοιχιών φάσης (phased arrays). Έχουν δηλαδή πολύ λίγες απώλειες, πολύ λίγη αλληλοπόλωση, εύκολη κατασκευή και υψηλή απόδοση. Οι κεραίες αυτές αποτελούνται από συστοιχίες ανακλαστικών στοιχείων οι οποίες εισάγουν μια μετατόπιση φάσης στο ανακλώμενο κύμα. Με τον τρόπο αυτό δεν χρειάζεται, για να σχηματίσουμε δέσμη, να βάλουμε στο σύστημά μας ογκώδη και γεμάτα απώλειες δίκτυα. Αντιθέτως η κατανομή φάσης στα στοιχεία οδηγεί, στο μακρινό πεδίο, στο σχηματισμό δέσμης. Αυτό το είδος κεραίας έχει μελετηθεί διεξοδικώς στο μήκος κύματος των μικρομέτρων και των millimeter ενώ πολύ πρόσφατα άρχισε να μελετάται και για το εύρος των THz. Σε κάθε περίπτωση όμως η μελέτη έχει γίνει με κεραίες που είναι κατασκευασμένες από κάποιον μεταλλικό αγωγό.

Η κεραία που κατασκευάστηκε για αυτή την διπλωματική, αποτελεί μία τεχνολογική καινοτομία καθώς αντί για μέταλλο χρησιμοποιεί το υλικό γραφένιο. Αφού την κατασκευάσαμε, θα συγκρίναμε τα αποτελέσματά της με μια κεραία κατασκευασμένη από χρυσό. Η κεραία αυτή λειτουργεί στα 1.3THz και εμπεριέχει 25.448 στοιχεία. Θεωρητικά αν συγκρίνουμε αυτή τη κεραία με την κεραία από χρυσό περιμένουμε να έχει καλύτερο εύρος λειτουργίας ελαφρώς καλύτερη αλληλοπόλωση και πολύ πιο εύκολο σχεδιασμό, και αυτό χάρη στην χαμηλή ευαισθησία των στοιχείων σε αλλαγές στη γωνία πρόσπτωσης των κυμάτων.

3.2 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ

3.2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Η κεραία που σχεδιάσαμε φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Αυτή αποτελείται από ένα τετράγωνο κομμάτι από γραφένιο που είναι τοποθετημένο πάνω σε ένα γειωμένο υπόστρωμα από quartz. Οι διαστάσεις του υποστρώματος είναι $a = b = 14\mu m$ έχει πάχος $25\mu m$. Χάρη στο μονοατομικό του πάχος το γραφένιο μπορεί με αρκετή ακρίβεια να αναπαρασταθεί σαν μια απείρως λεπτή επιφάνεια με σύνθετη αγωγιμότητα σ . Η αγωγιμότητα αυτή μπορεί να εκφραστεί από τον τύπο του Kubo και εξαρτάται από τη συχνότητα f , την απόλυτη θερμοκρασία T και από τις χημικές προσμίξεις του γραφενίου, δηλαδή από το μ_c . Πιο συγκεκριμένα εδώ εξετάζουμε την κεραία για θερμοκρασία $T = 300K$, $\tau = 1ps$, $\mu_c = 0,19eV$.

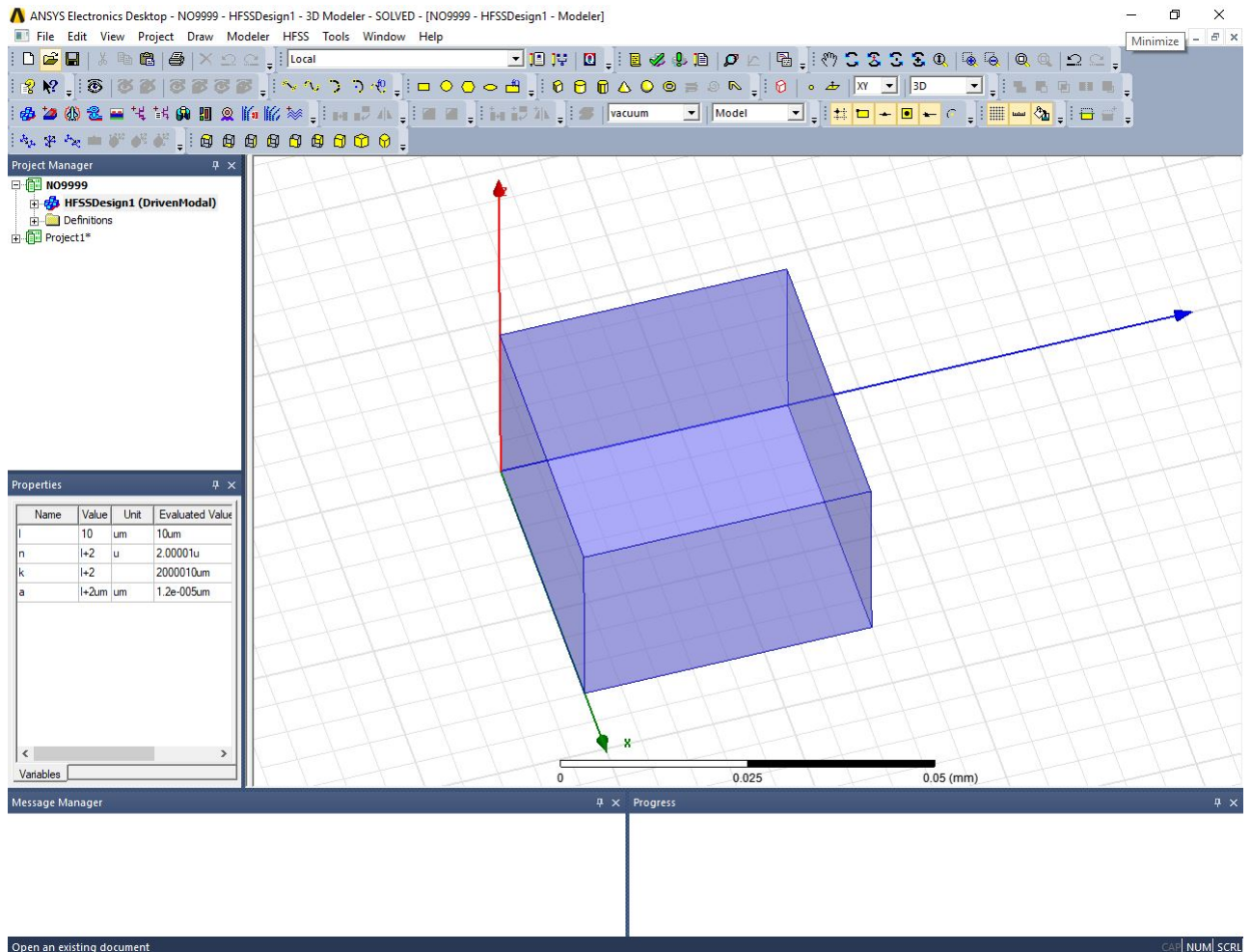


Σχήμα 3.1: a Αρχιτεκτονική όλης της Reflectarray b Αρχιτεκτονική του στοιχείου της κεραίας
Πηγή: [85]

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήσαμε για το σχεδιασμό της κεραίας μας είναι το ANSYS HFSS. Το πρόγραμμα αυτό είναι προσομοιώνει με μεγάλη ακρίβεια τη συμπεριφορά και τη λειτουργία των υψίσυχνων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η ακρίβειά του σε πολύπλοκα προβλήματα, η ευκολία του στη χρήση και η ταχύτητά του ήταν ορισμένοι μόνο από τους λόγους που επιλέχθηκε για το σχεδιασμό της κεραίας. Έχει ακόμη τη δυνατότητα να δημιουργεί 3D μοντέλα και μια τεράστια ποικιλία από υλικά. Ταυτόχρονα όμως σου δίνει και την επιλογή να διαμορφώσεις τα δικά σου υλικά και τις δικές σου συνθήκες ώστε να είναι η προσομοίωση που εκτελεί όσο το δυνατόν πιο ακριβής γίνεται. Η άδεια για την χρήση αυτού το λογισμικού δόθηκε από το Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο και μόνο για ερευνητικούς ή διδακτικούς σκοπούς. Παρακάτω θα εξηγήσουμε βήμα προς βήμα το σχεδιασμό αυτής της κεραίας.

3.2.2 ΣΧΕΔΙΑΣΗ

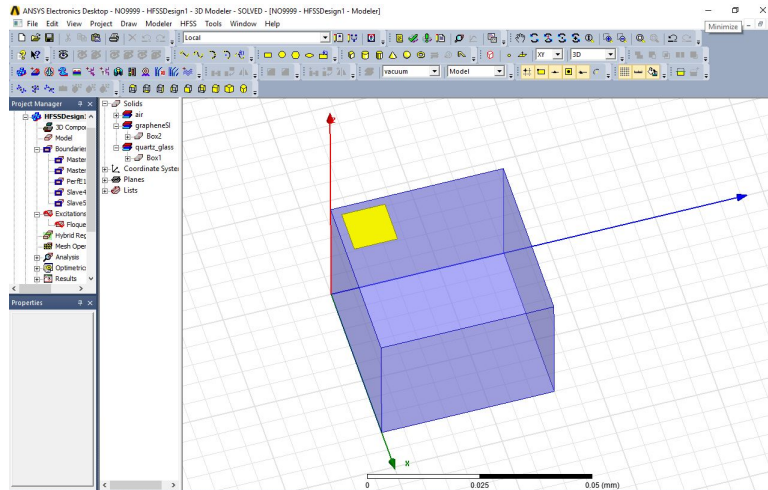
Αρχικά σχεδιάσαμε το υπόστρωμα της κεραίας σύμφωνα με τις προδιαγραφές. Δηλαδή $a = b = 14\mu m$ και ύψος $25\mu m$, με το quartz glass σαν υλικό όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2.



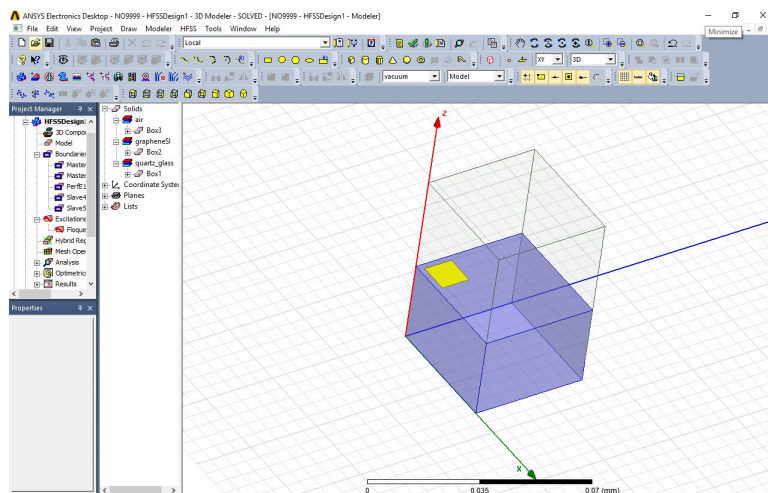
Σχήμα 3.2: Υπόστρωμα της κεραίας

Στη συνέχεια προσθέσαμε το γραφένιο (κίτρινο χρώμα). Επειδή δεν υπήρχε το υλικό έτοιμο, βάλαμε τις παραμέτρους ώστε να δημιουργήσουμε εξ αρχής το υλικό αυτό με την κατάλληλη αγωγιμότητα, πυκνότητα, βάρος κ.τ.λ.

Τέλος προσθέσαμε ένα κουτί με αέρα γύρω από την κεραία ώστε να εφαρμόσουμε τις οριακές συνθήκες που είναι απαραίτητες για την προσομοίωση. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 2.4

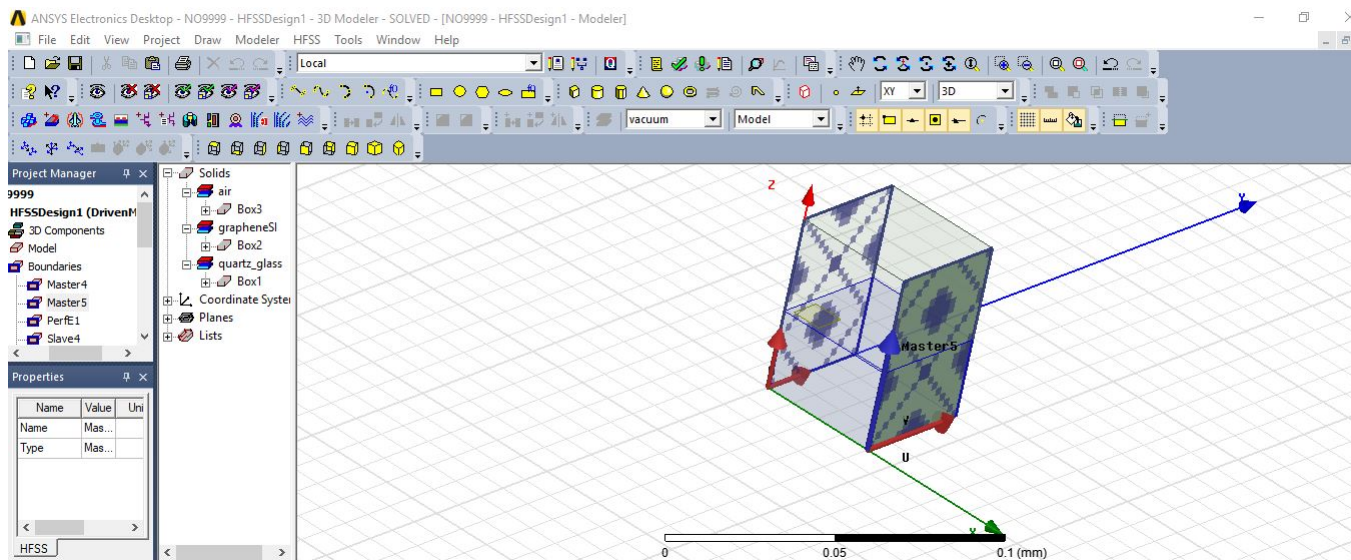


Σχήμα 3.3: Το υπόστρωμα πάνω στο γραφένιο της κεραίας

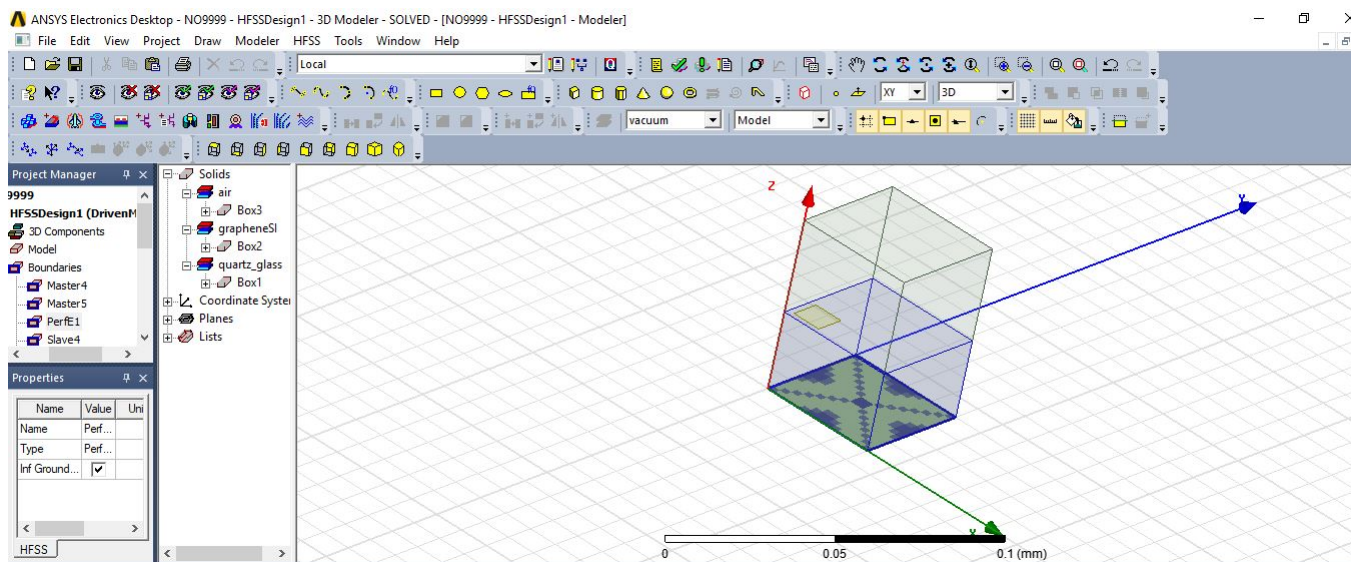


Σχήμα 3.4: Υπόστρωμα της κεραίας

Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήσαμε είναι τύπου master-slave, και είναι εφαρμοσμένες πάνω στο κουτί αέρα γύρω από την κεραία μας. Στην επιφάνεια που ανήκει ο άξονας ψ είναι το master1 ενώ το όριο slave1 βρίσκεται ακριβώς στην απέναντι επιφάνεια. Αντιστοίχως το master2 βρίσκεται στην επιφάνεια που ανήκει ο χ ενώ το όριο slave2 βρίσκεται ακριβώς απέναντι. Τέλος στην κάτω επιφάνεια του κουτιού εφαρμόστηκε perfE καθώς είναι γειωμένη.



Σχήμα 3.5: Master-Slave όρια



Σχήμα 3.6: Όριο στη γείωση

Στη συνέχεια προσθέσαμε το βασικότερο κομμάτι στην κεραία αυτή, που δεν είναι άλλο από τη διέγερση. Πιο συγκεκριμένα η διέγερση αυτή θα είναι ένα επίπεδο κύμα που θα προσπίπτει στο μέσο της κεραίας. Για να το πετύχουμε αυτό χρησιμοποιήσαμε μία floquetport με κεντρική συχνότητα 1.3 THz. Η πηγή αυτή τοποθετήθηκε στο πάνω μέρος του κουτιού όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.7

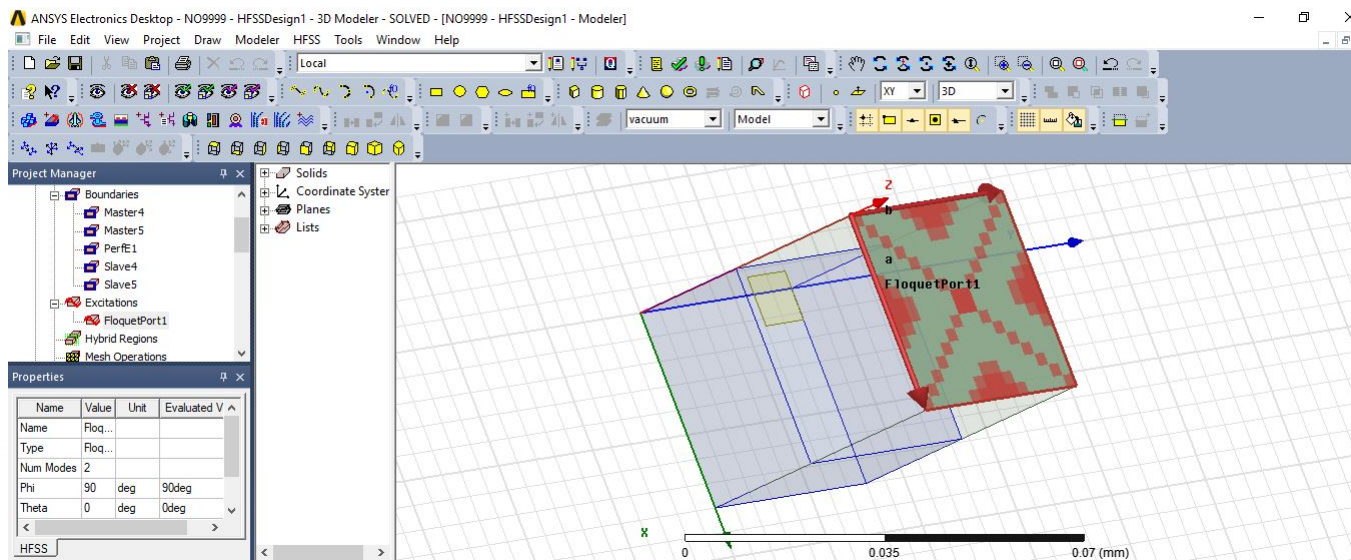
Floquet Ports

Εδώ αξίζει να αναφέρουμε ορισμένα στοιχεία για τις floquet's ports και το HFSS, ώστε να γίνει κατανοητό γιατί χρησιμοποιήσαμε αυτού του είδους τη διέγερση στο πείραμά μας.

Για αρχή πρέπει να πούμε ότι οι floquet's ports χρησιμοποιούνται στο HFSS αποκλειστικά και μόνο με επίπεδες περιοδικές δομές. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης αποτελεί η συγκεκριμένη κεραία που κατασκευάζουμε καθώς αποτελεί μια επίπεδη κεραία, θεωρητικά άπειρης επιφάνειας, στην οποία μπορούμε να μεταβάλλουμε την φάση της. Το λογισμικό αυτό μας δίνει την δυνατότητα να αναλύσουμε με αρκετή ακρίβεια μία θεωρητικά άπειρη κεραία, αναλύοντας μόνο ένα στοιχείο της. Ακόμη πρέπει να αναφέρουμε πως η διέγερση floquet port για να λειτουργήσει ορθά πρέπει να οριστούν οι κατάλληλες οριακές συνθήκες στα τοιχώματα του στοιχείου.

Ένας άλλος λόγος που κάνουν τις floquet ports κατάλληλες για χρήση στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι πως μπορούν να αναπαραστήσουν με τεράστια ακρίβεια ένα επίπεδο κύμα, το οποίο ακριβώς είναι και το ζητούμενό μας εδώ. Πιο συγκεκριμένα, τόσο στο επίπεδο κύμα όσο και στο κύμα που δημιουργεί το floquet port τα modes που έχουν αναπαριστούν τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Τα floquet modes δηλαδή είναι επίπεδα κύματα με κατεύθυνση διάδοσης που ορίζεται από τη συχνότητα, τη φάση και την γεωμετρία των περιοδικών στοιχείων.

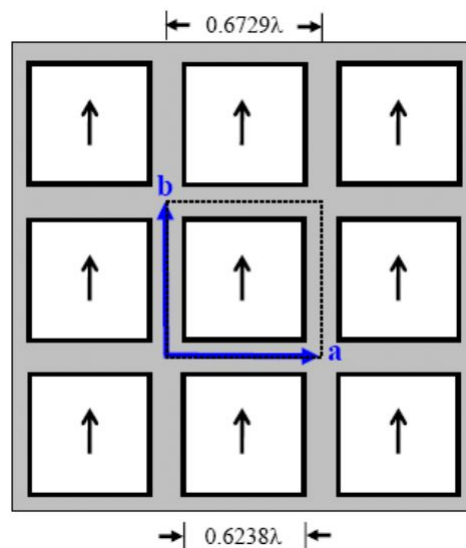
Όταν το λογισμικό HFSS αναγνωρίζει μία floquet port τότε από την ανάλυση που κάνει στην στοιχειοκεραία προκύπτει ένας πίνακας που αλληλοσχετίζει τις S-παραμέτρους μεταξύ τους. Αυτόν ακριβώς τον πίνακα χρησιμοποιούμε για να δημιουργήσουμε και τα αποτελέσματα που έχουμε πάρει.



Σχήμα 3.7: Η διεγερση της κεραίας

Τέλος για να τρέξουμε την προσομοίωση ρυθμίσαμε τις κατάλληλες παραμέτρους ώστε να σκανάρει κατάλληλα και να βγάλει αποτελέσματα για όλες τις συχνότητες από 1 THz μέχρι 3 THz και για όλα τα μεγέθη του γραφενίου από 4 έως 14 μm .

Πιο συγκεκριμένα όταν όλα τα στοιχεία της κεραίας διεγείρονται με τέτοιο τρόπο ώστε συνολικά η στοιχειοκεραία να εκπέμπει προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση τότε τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που βρίσκονται από πάνω της είναι περιοδικά. Οι σχετικές θέσεις των σημείων (που επαναλαμβάνονται περιοδικά) στις οποίες τα πεδία έχουν την ίδια τιμή φαίνονται από το ζεύγος διανυσμάτων a , b στο Σχήμα 2.8. Αυτά τα διανύσματα μπορεί να περιγράψουν την γεωμετρία του σχήματος αλλά είναι ανεξάρτητα από τη φύση των στοιχείων.



Κεφάλαιο 4

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

Οι προσομοιώσεις που ακολουθούν παρακάτω έγιναν τόσο για κεραία από χρυσό όσο και για κεραία από γραφένιο. Πιο συγκεκριμένα στα διαγράμματα 4.8 και 4.9 φαίνεται το πλάτος του ανακλώμενου κύματος συναρτήσει του μεγέθους του γραφενίου και του χρυσού αντίστοιχα. Ακόμη στα διαγράμματα 4.10 και 4.11 φαίνεται η φάση του ανακλώμενου κύματος. Η καλύτερη ανάκλαση του κύματος γίνεται όταν το μεγεθός του γραφενίου είναι γύρω στο $\lambda_{a0}/24$ και βρίσκεται μέσα σε υπόστρωμα $\lambda_{a0}/16$. Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει λόγω της γνωστής αργής διάδοσης του κύματος και οφείλεται στα χαρακτηριστικά του γραφενίου. Και ενώ το γραφένιο αντανακλά καλά όταν το μήκος του είναι το μισό από το πλάτος ενός κύματος που διαδίδεται μέσα σε κυματοδηγό, η προαναφερθείσα υψηλή επαγωγικότητα του γραφενίου έχει σαν αποτέλεσμα πολύ μικρό κυματοδηγούμενο πλάτος. Αξίζει ακόμη να αναφέρουμε πως η χρήση στοιχείων με μήκος μικρότερο από το πλάτος κύματος γίνεται με σκοπό να πετύχουν αύξηση του εύρους λειτουργίας των ανακλαστικών στοιχειοκεραιών (reflectarrays). Αυτό συμβαίνει καθώς αν τα στοιχεία απέχουν μεταξύ τους λιγότερο τότε θα έχουν μικρότερη απόκλιση φάσης και άρα μειωμένο λάθος στη φάση της συχνότητας.

Σε όλο το εύρος των συχνοτήτων, δηλαδή από 1 THz έως 1,6THz, το εύρος της φάσης είναι 290° . Το εύρος αυτό είναι αρκετό ώστε να είναι δυνατός ο σχηματισμός μιας δέσμης. Αν χρειαστεί αυτό το εύρος της φάσης μπορεί να μεγαλώσει κι άλλο διατηρώντας φυσικά το εύρος συχνοτήτων αν χρησιμοποιήσουμε διαφορετικά είδη στοιχείων.

Η κύρια αιτία για τις απώλειες που έχουμε σε αυτή τη κεραία είναι η περιορισμένη επιφανειακή πυκνότητα του γραφενίου. Οι απώλειες αυτές κυμαίνονται από 0.5 έως 8 db το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνεται το κέρδος της κεραίας κατά 2,3 db. Αυτό είναι πολύ χαμηλότερο από το κέρδος που έχουμε σε κεραίες με μέταλλο καθώς οι απώλειες που έχουμε τότε στη συχνότητα των 1 THz είναι γύρω στο 1,2db. Φυσικά το κόστος των απωλειών αυτών εξισορροπείται από τα οφέλη που έχει η κεραία γραφενίου καθώς τα στοιχεία αυτής της κεραίας είναι πολύ μικρότερα από τα αντίστοιχα στοιχεία μιας μεταλλικής κεραίας. Ακόμη το γραφένιο

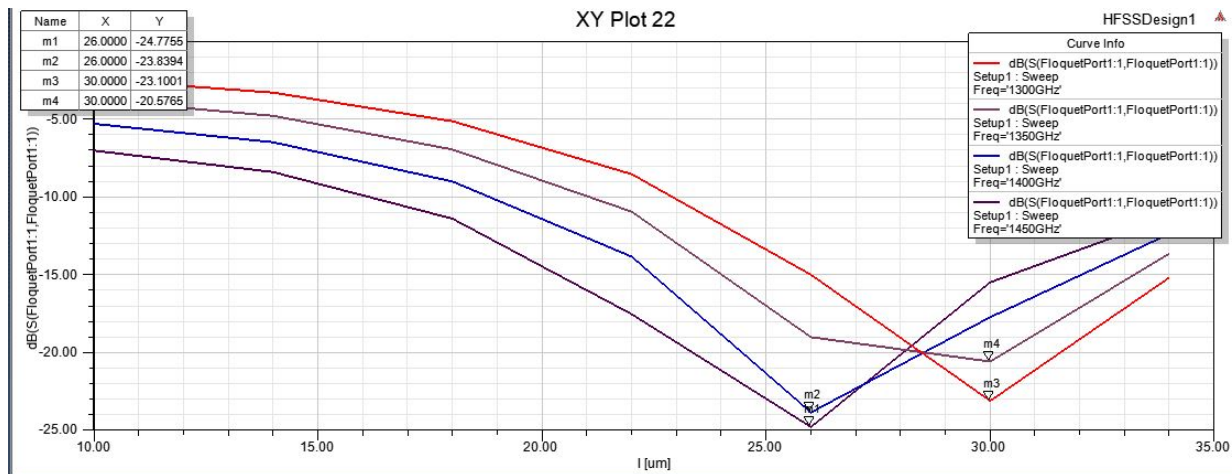
είναι πολύ δημοφιλές καθώς μπορεί να αλλάξει την κατεύθυνση της δέσμης της κεραίας και μάλιστα με πολύ μικρότερες απώλειες σε σχέση με άλλες τεχνολογίες σε αντίστοιχες φυσικά συχνότητες.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των κεραιών αυτών που το διαπιστώνουμε πειραματικά είναι πως η φάση του ανακλώμενο κύματος εξαρτάται πολύ λίγο από τη γωνία πρόσπτωσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μας δίνει την δυνατότητα να μπορούμε να σχεδιάσουμε πολύ μικρά στοιχεία.

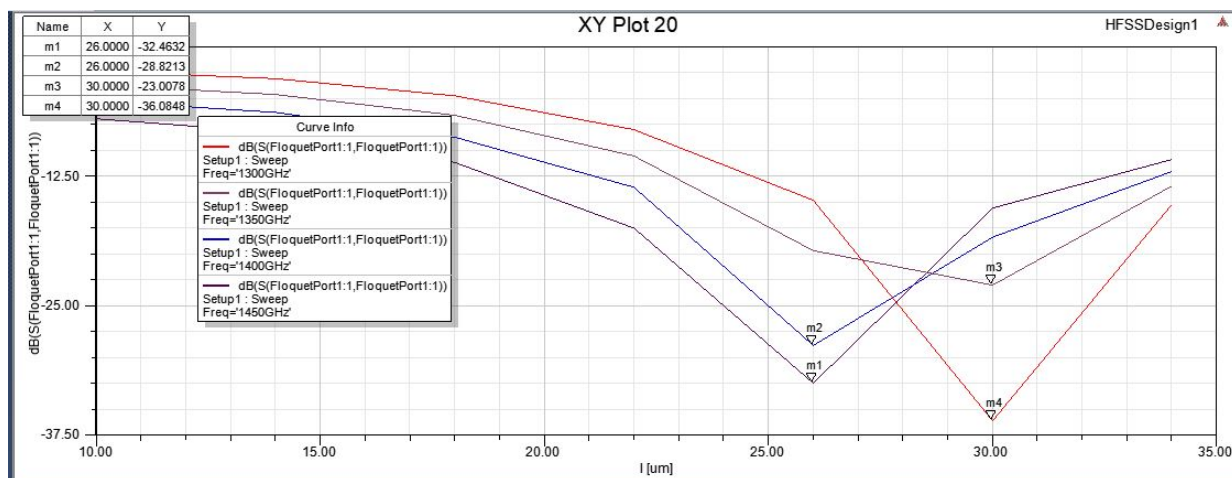
Τέλος από το διάγραμμα της φάσης μπορούμε να δούμε πως μπορούμε να επιτύχουμε 264° ($\mu 1$ - $\mu 3$) απόκλιση φάσης και μάλιστα με πολύ απότομη αλλαγή καθώς τόσο το γραφένιο όσο και ο χρυσός συμπεριφέρονται σαν αγωγοί σε χαμηλές συχνότητες THz.

Παρακάτω ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΛΑΤΟΥΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΤΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

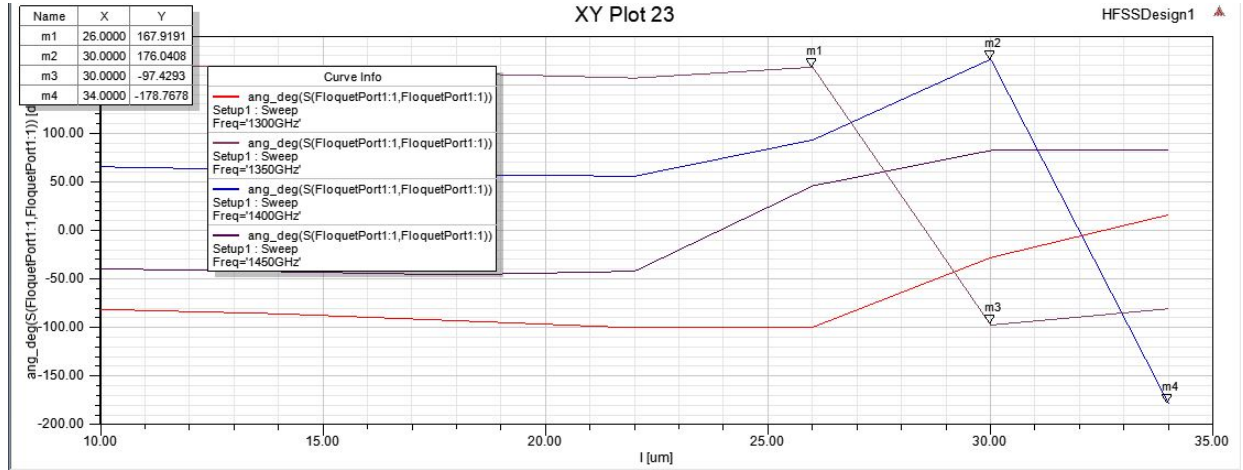


Σχήμα 4.1: Για το χρυσό

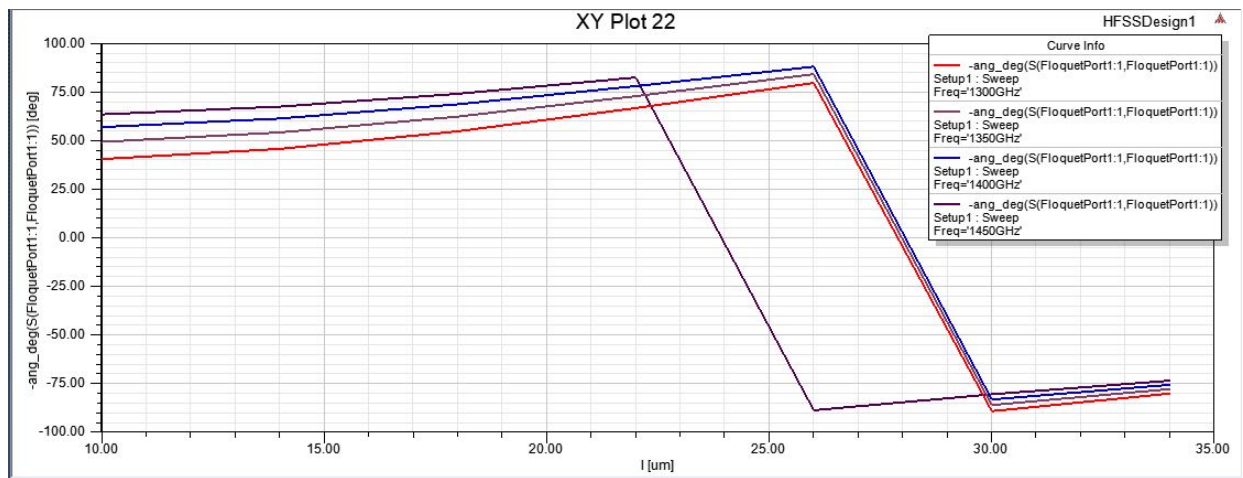


Σχήμα 4.2: Για το γραφένιο

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΤΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

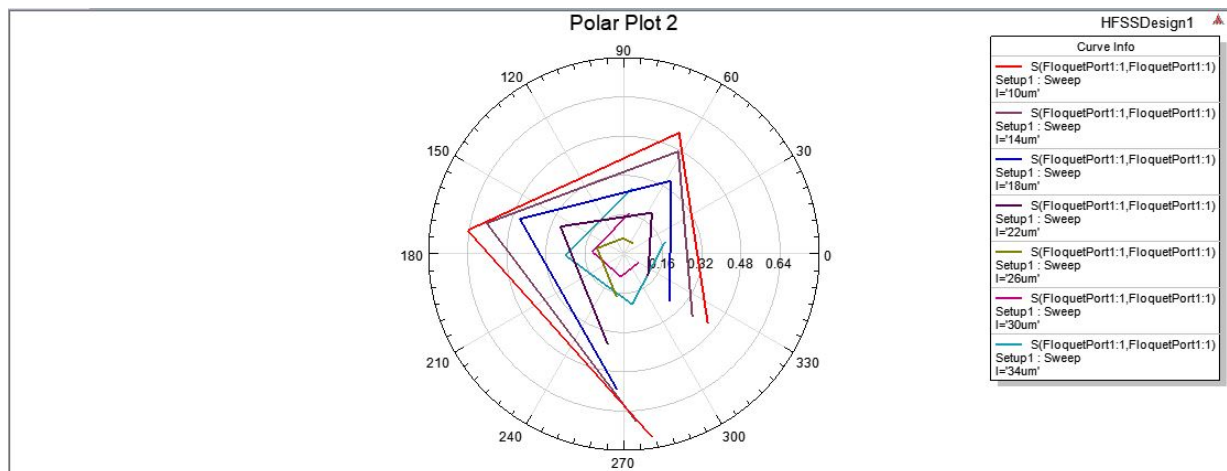


Σχήμα 4.3: Για το χρυσό

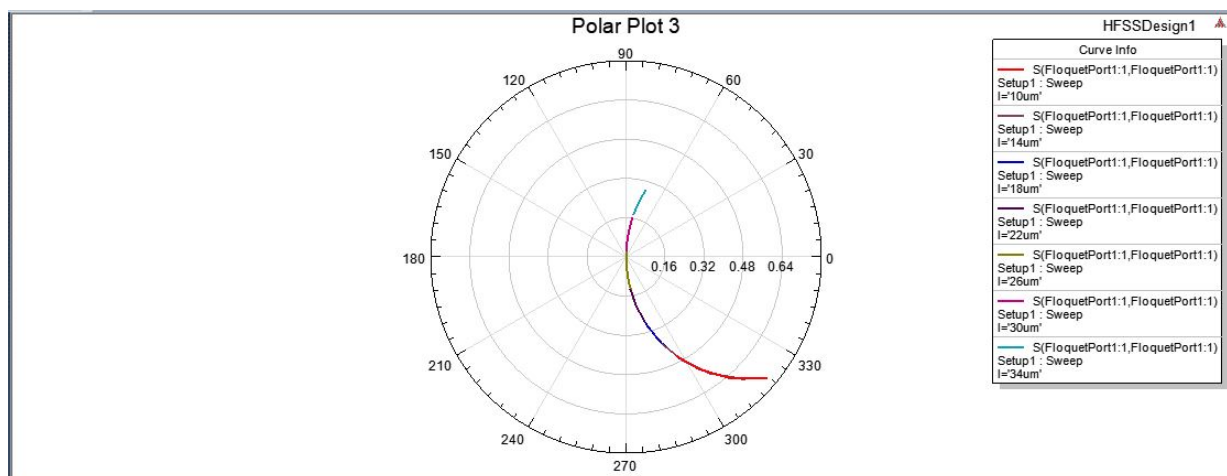


Σχήμα 4.4: Για το γραφένιο

ΠΟΛΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΗΣ S ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ

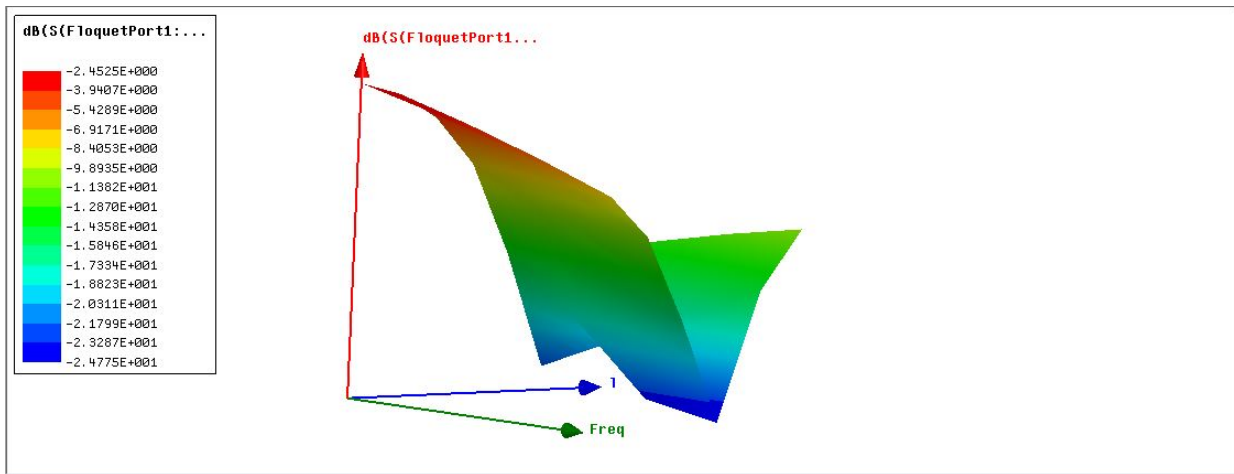


Σχήμα 4.5: Για το χρυσό

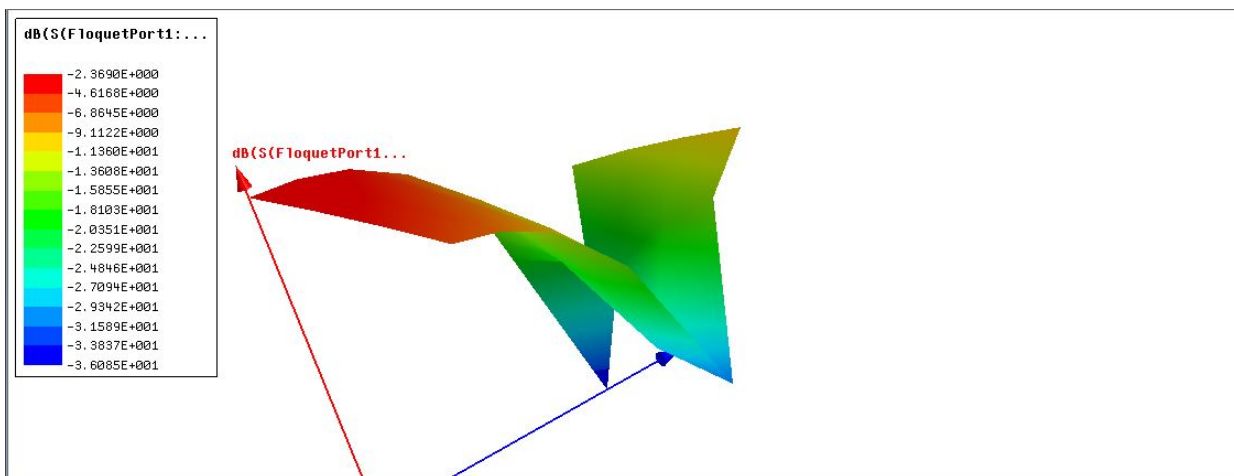


Σχήμα 4.6: Για το γραφένιο

3D ΠΟΛΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΤΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ

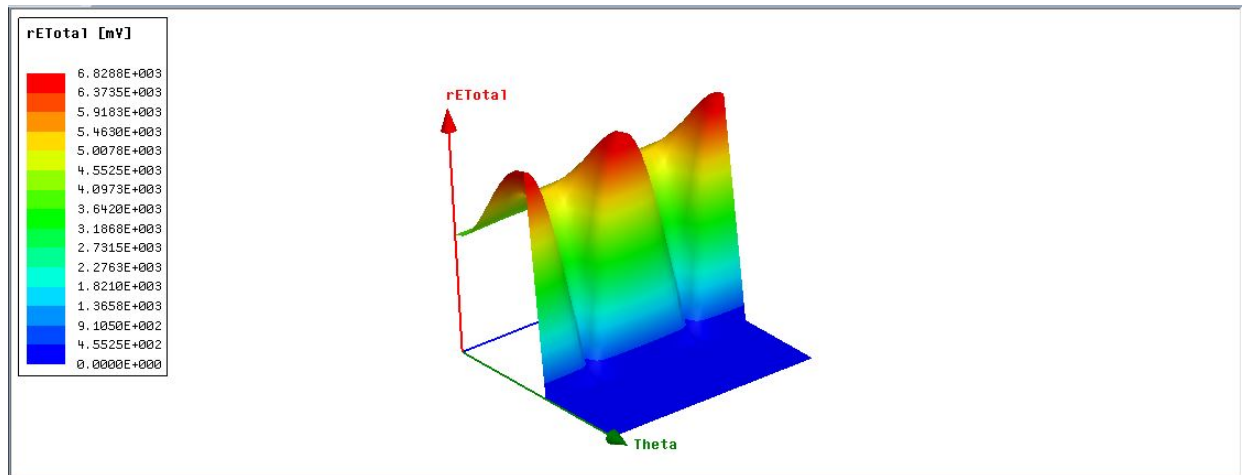


Σχήμα 4.7: Για το χρυσό

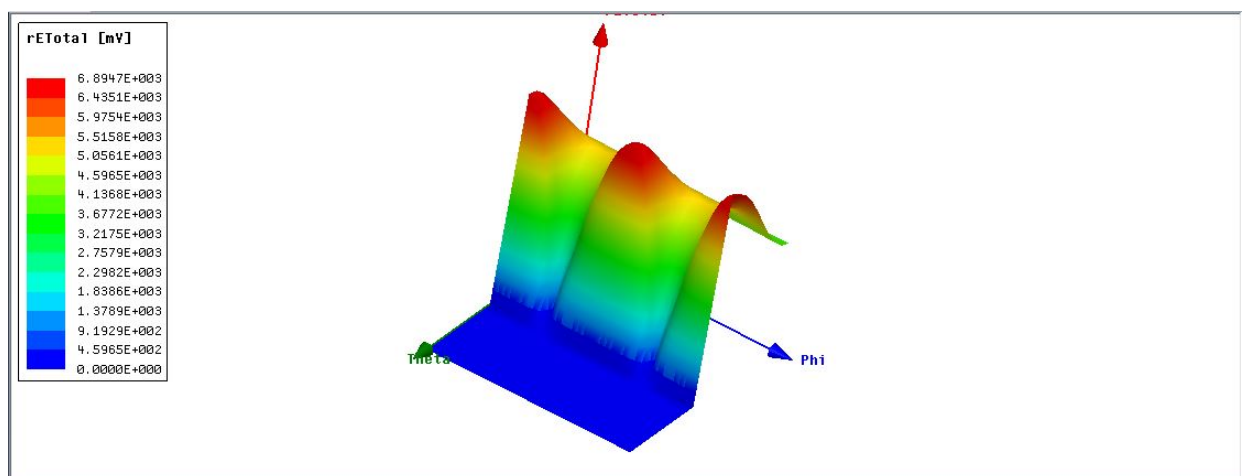


Σχήμα 4.8: Για το γραφένιο

3D ΚΑΡΤΕΣΙΑΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ ΣΤΟ ΜΑΚΡΙΝΟ ΠΕΔΙΟ

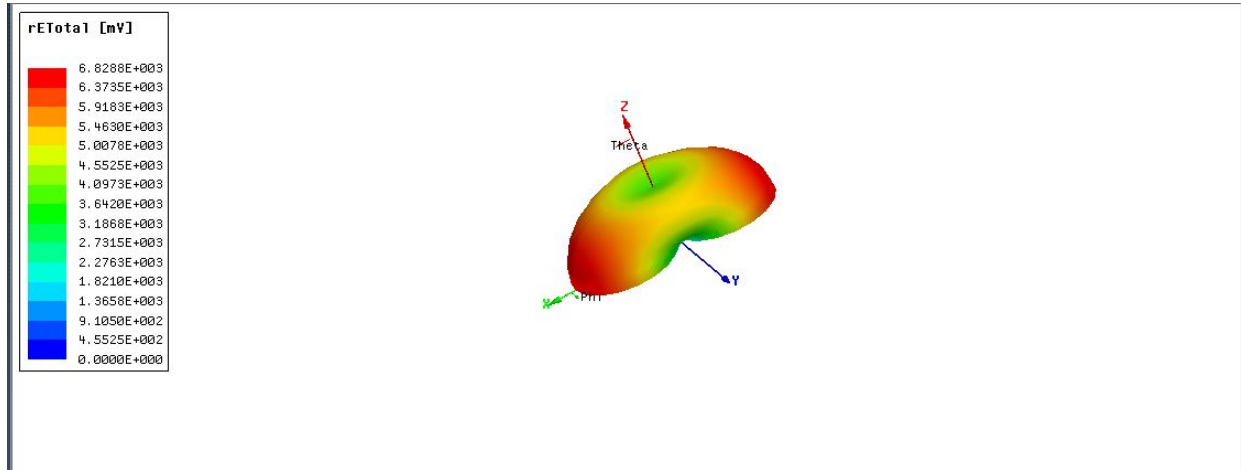


Σχήμα 4.9: Για το χρυσό

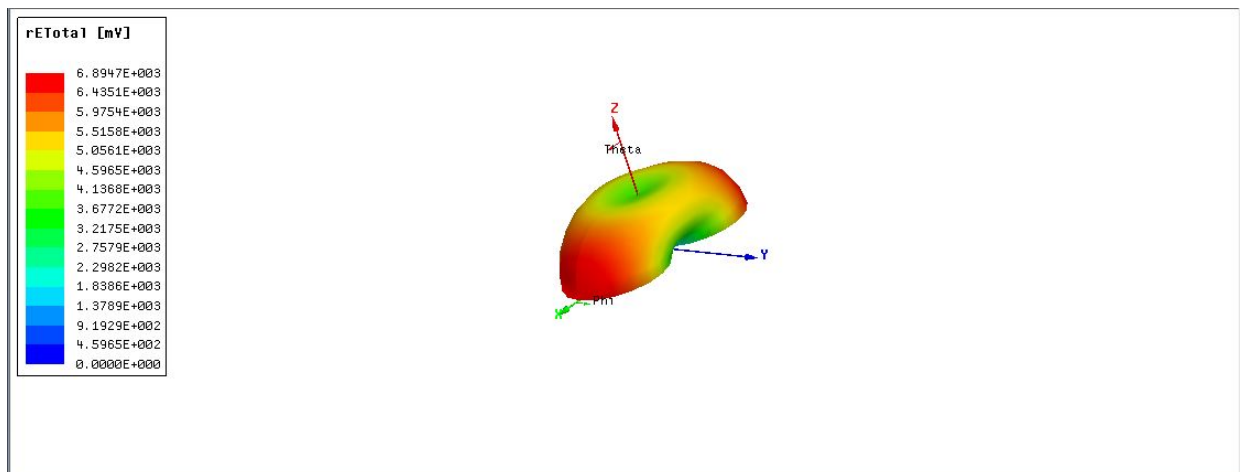


Σχήμα 4.10: Για το γραφένιο

3D ΠΟΛΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ ΣΤΟ ΜΑΚΡΙΝΟ ΠΕΔΙΟ

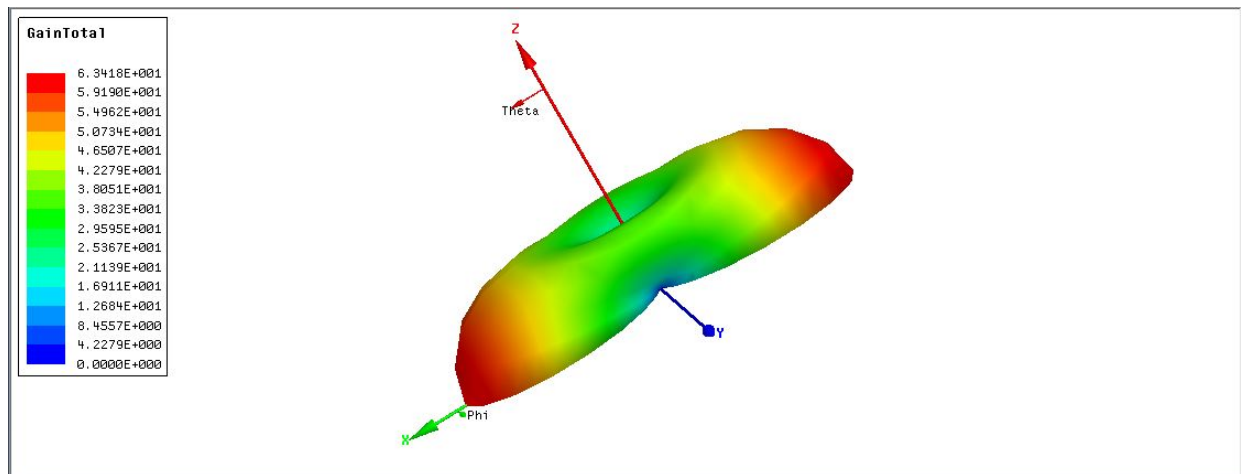


Σχήμα 4.11: Για το χρυσό

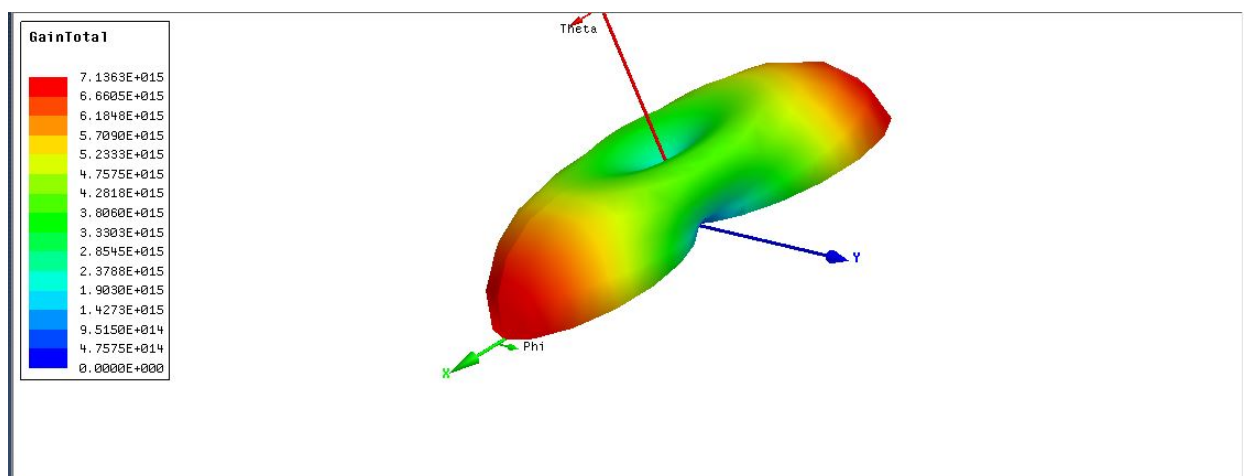


Σχήμα 4.12: Για το γραφένιο

3D ΠΟΛΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΚΕΡΔΟΥΣ ΣΤΟ ΜΑΚΡΙΝΟ ΠΕΔΙΟ

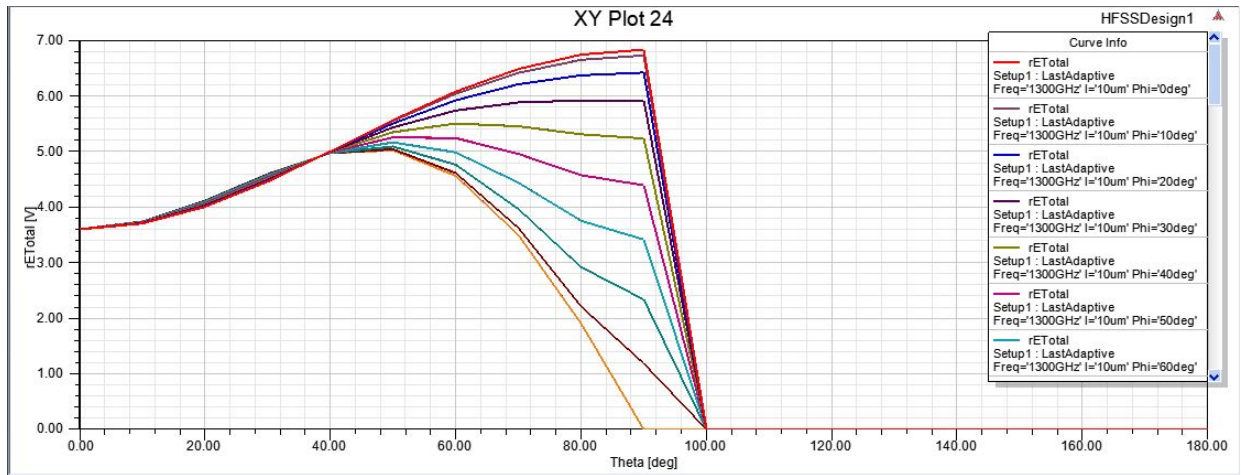


Σχήμα 4.13: Για το χρυσό

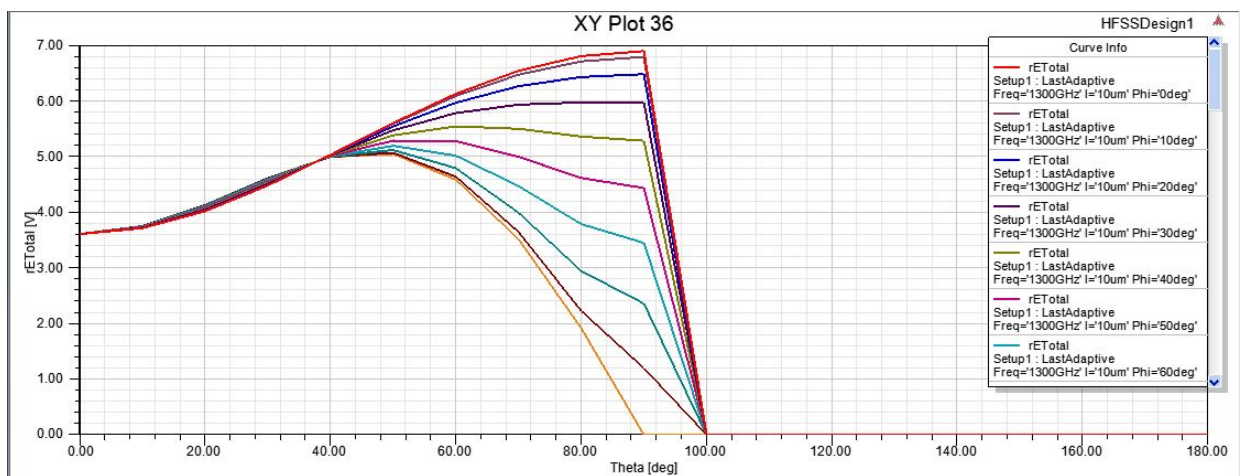


Σχήμα 4.14: Για το γραφένιο

ΚΑΡΤΕΣΙΑΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ ΣΤΟ ΜΑΚΡΙΝΟ ΠΕΔΙΟ

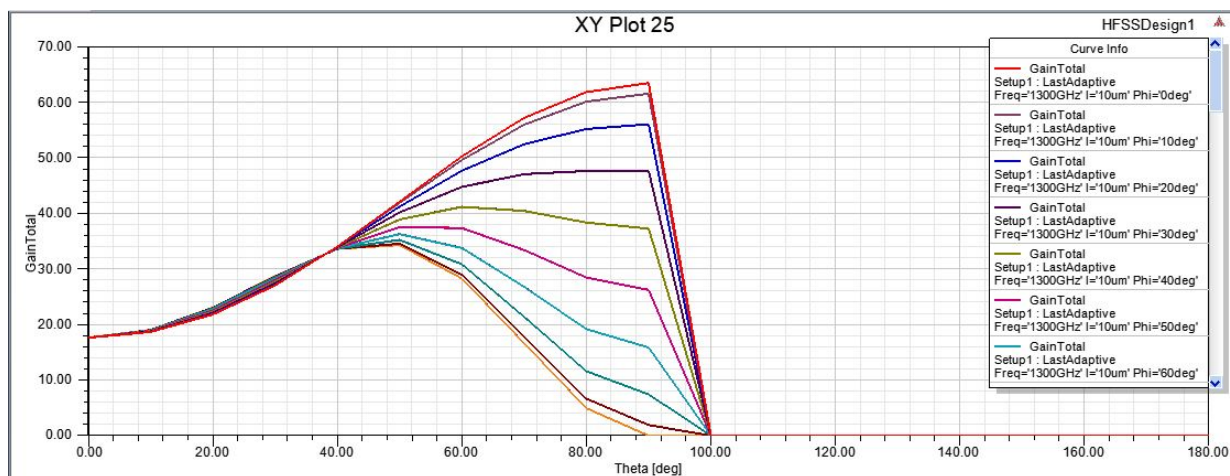


Σχήμα 4.15: Για το χρυσό

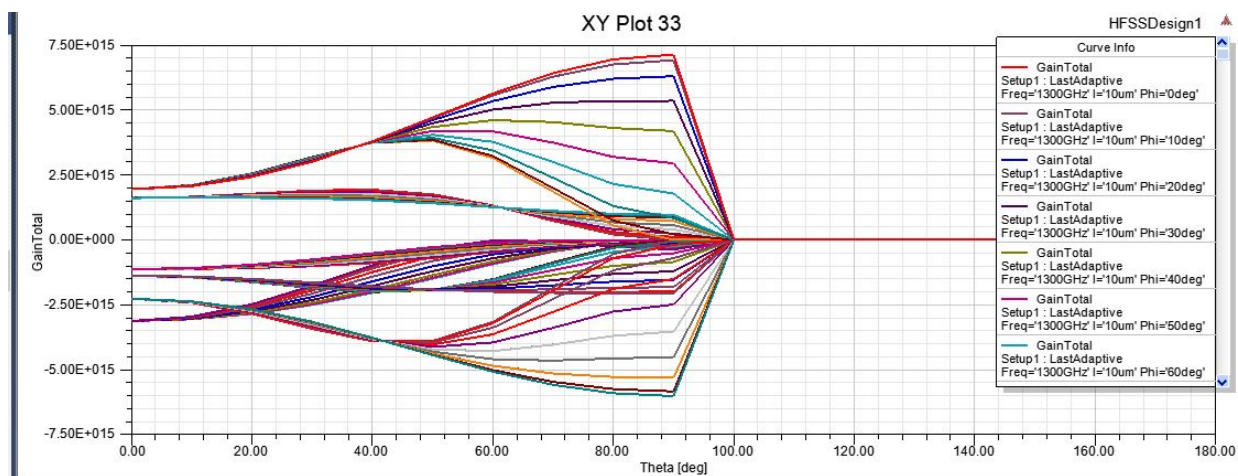


Σχήμα 4.16: Για το γραφένιο

ΚΑΡΤΕΣΙΑΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΚΕΡΔΟΥΣ ΣΤΟ ΜΑΚΡΙΝΟ ΠΕΔΙΟ

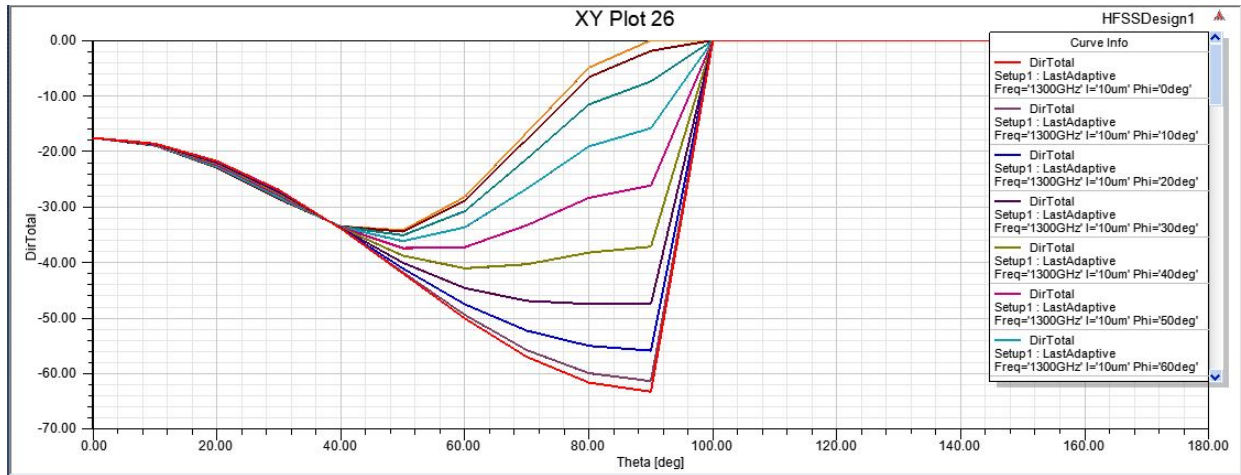


Σχήμα 4.17: Για το χρυσό

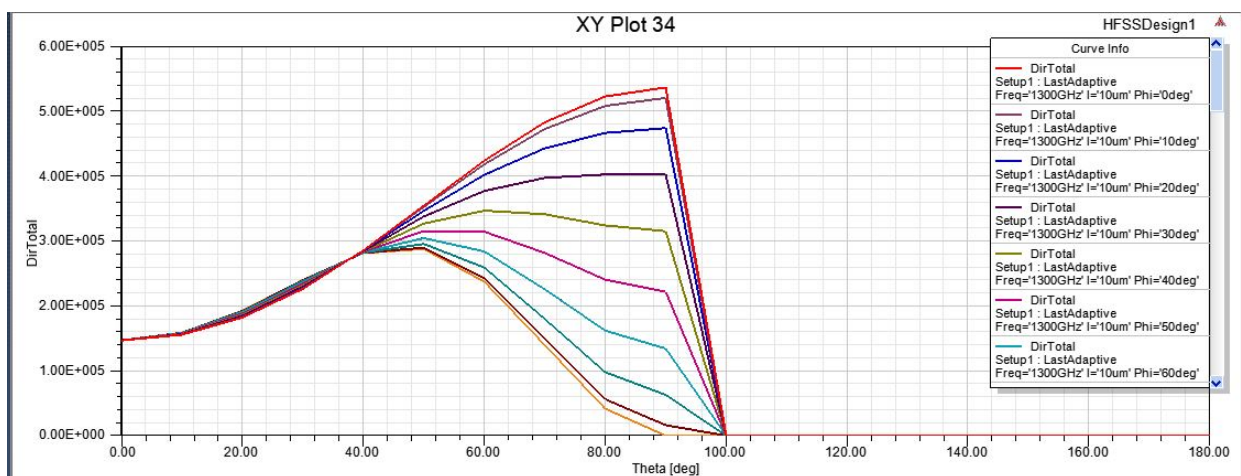


Σχήμα 4.18: Για το γραφένιο

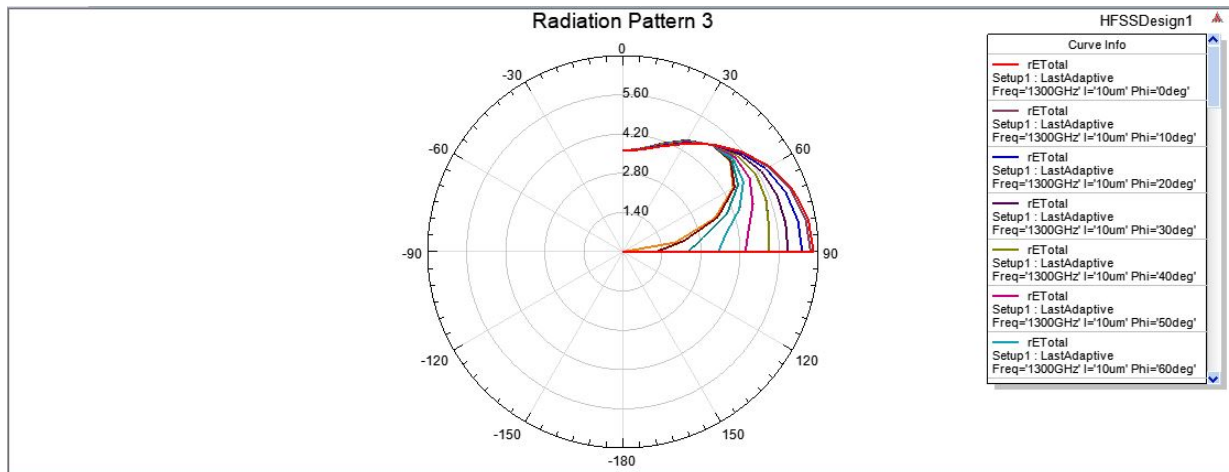
ΚΑΡΤΕΣΙΑΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΗΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟ ΜΑΚΡΙ- ΝΟ ΠΕΔΙΟ



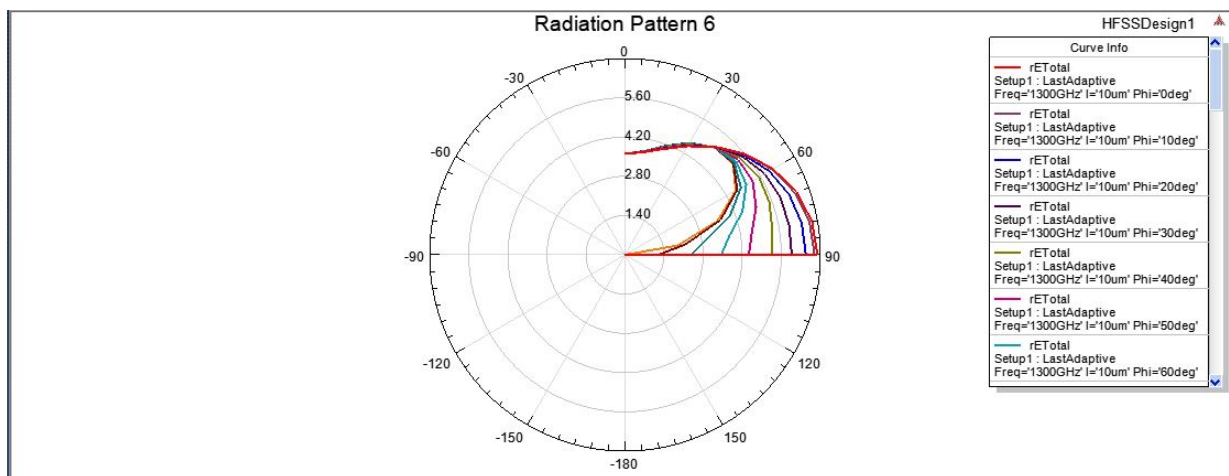
Σχήμα 4.19: Για το χρυσό



Σχήμα 4.20: Για το γραφένιο

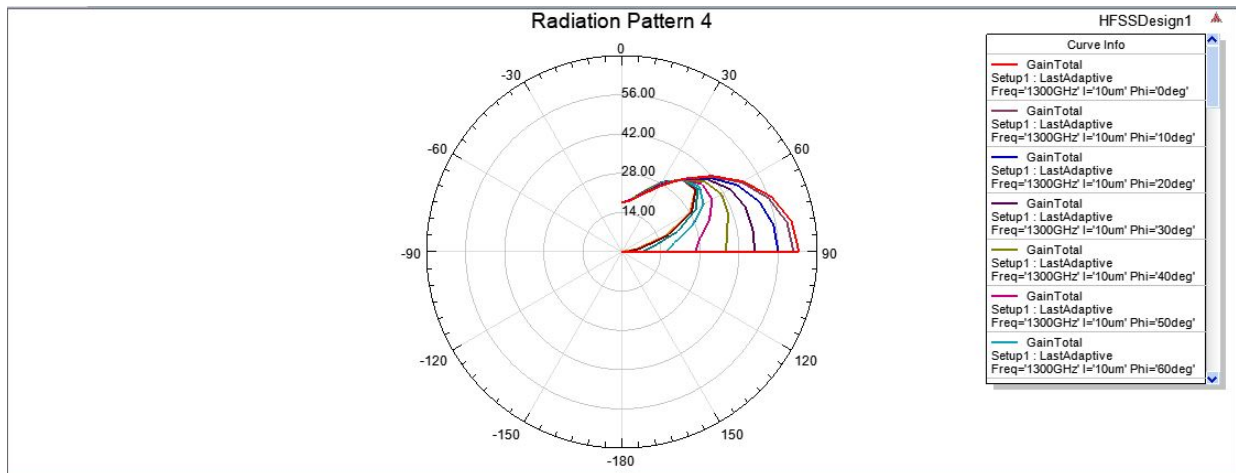
ΚΑΡΤΕΣΙΑΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΗΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟ ΜΑΚΡΙ-
ΝΟ ΠΕΔΙΟ

Σχήμα 4.21: Για το χρυσό

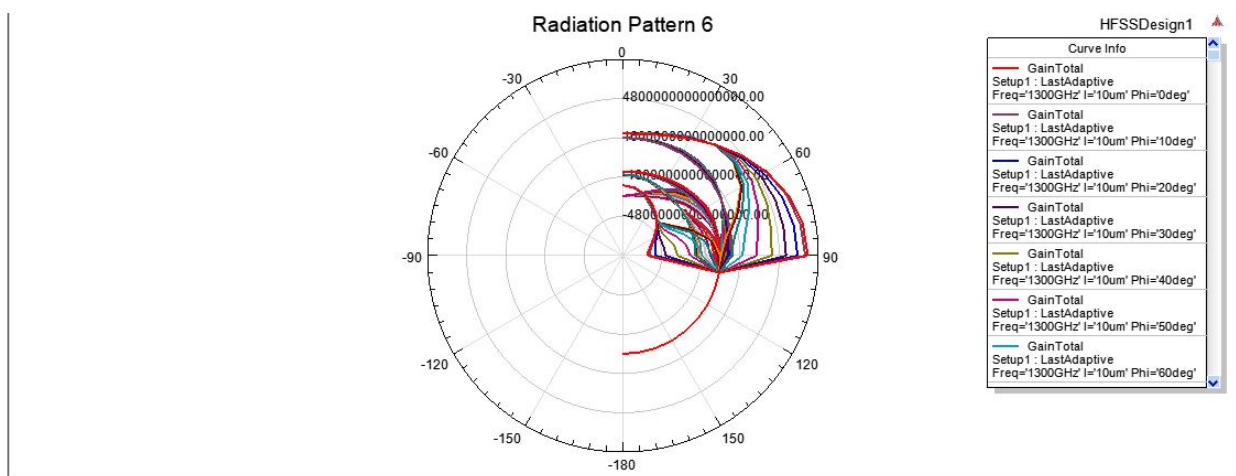


Σχήμα 4.22: Για το αργένιο

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΤΟΥ ΚΕΡΔΟΥΣ



Σχήμα 4.23: Για το χρυσό



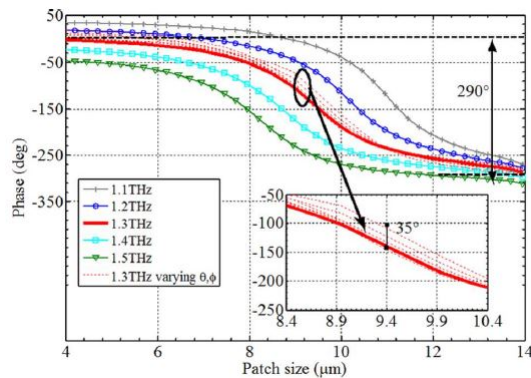
Σχήμα 4.24: Για το γραφένιο

4.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Από τα παραπάνω αποτελέσματα των προσομοιώσεων έχουμε να κάνουμε τις εξής παρατηρήσεις:

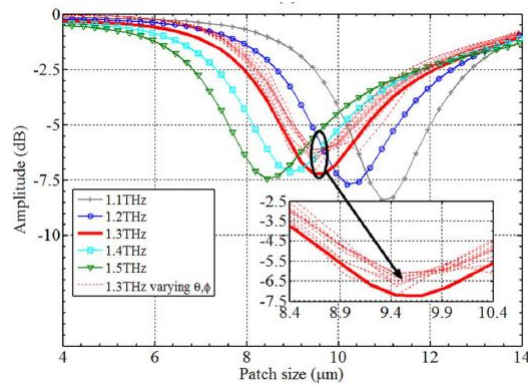
Όσον αφορά τη φάση του ανακλώμενου κύματος (Σχήμα 4.10, 4.11): Η μετατόπιση φάσης είναι ίδια με αυτή της θεωρητικής προσέγγισης [45] που φαίνεται στο σχήμα 4.25. Είναι, δηλαδή, 290° όσον αφορά το χρυσό, για όλες τις συχνότητες που το δοκιμάσαμε, οι οποίες ήταν κοντά στα 1.3 THz. Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει και στο γραφένιο, με τη διαφορά ότι στο γραφένιο οι φάσεις από διαφορετικές συχνότητες μειώνονται περίπου στα ίδια μήκη κύματος. Αυτό βέβαια που οφείλουμε να παρατηρήσουμε είναι ότι η πτώση αυτή, δηλαδή ο συντονισμός αυτής κεραίας, είναι μετατοπισμένος προς τα δεξιά σε σχέση με τα θεωρητικά μοντέλα. Συμβαίνει, δηλαδή, όταν το μήκος του γραφενίου (ή αντίστοιχα του χρυσού) είναι 26 nanometer και όχι 4 nanometer όπως φαίνεται στο θεωρητικό διάγραμμα 4.25 [45]

Όσον αφορά το πλάτος του ανακλώμενου κύματος (Σχήμα 4.8, 4.9): Παρατηρούμε πως, όπως και στη βιβλιογραφία [45], υπάρχει μία μείωση όταν το γραφένιο (ή ο χρυσός αντίστοιχα) έχουν ένα συγκεκριμένο μέγεθος. Αυτό δείχνει πως υπάρχει συντονισμός της κεραίας αυτής, όπως άλλωστε είχαμε προβλέψει, και επιβεβαιώνεται και από τη βιβλιογραφία. Βέβαια, αντίστοιχα με το διάγραμμα της φάσης, το σημείο μείωσης του πλάτους είναι και αυτό μετατοπισμένο σε σχέση με το διάγραμμα 4.26 [45]. Είναι δηλαδή 26 nanometer αντί να είναι 4 nanometer. Οι λόγοι που συμβαίνει αυτό είναι πολλοί και θα μιλήσουμε παρακάτω για αυτό.



Σχήμα 4.25: Το διάγραμμα φάσης του ανακλώμενου κύματος συναρτήσει του μέγεθους του γραφενίου [45]

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε τα πολικά διαγράμματα τόσο για την κεραία από γραφένιο όσο και για την κεραία από χρυσό (Σχήμα 4.12, 4.13). Παρατηρούμε ότι για το χρυσό τα πολικά διαγράμματα είναι διαφορετικά για κάθε συχνότητα, πράγμα που μπορούμε να το διαπιστώσουμε και από το γεγονός ότι υπάρχουν και πολύ διαφορετικές φάσεις ανά συχνότητα. Αντιθέτως, στο γραφένιο το πολικό διάγραμμα είναι ίδιο για όλες τις συχνότητες πράγμα που το καθιστά και καλύτερη επιλογή για αυτήν τη κεραία.



Σχήμα 4.26: Το διάγραμμα πλάτους του ανακλώμενου κύματος συναρτήσει του μέγθους του γραφενίου [45]

Πριν αναφερθούμε στα παρακάτω διαγράμματα θα πρέπει να εξηγήσουμε τι είναι οι S παράμετροι μιας κεραίας.

Οι S παράμετροι μιας κεραίας περιγράφουν τις σχέσεις εισόδου-εξόδου ανάμεσα στις θύρες μίας κεραίας. Για παράδειγμα εαν μια κεραία έχει δύο θύρες (θύρα1, θύρα2) τότε η παράμετρος S_{12} αναπαριστά την ισχύ που μεταφέρεται από τη θύρα 2 στην θύρα 1. Αντιθέτως η παράμετρος S_{21} αναπαριστά την ισχύ που μεταφέρεται από τη θύρα 1 στη θύρα 2. Στη γενική περίπτωση δηλαδή η παράμετρος S_{nm} αναπαριστά σε ένα σύστημα πολλών θυρών τη μεταφορά ισχύος από την κεραία m στην κεραία n .

Με τον όρο θύρα ενός συστήματος εννοούμε οποιοδήποτε μέρος το οποίο έχει είτε τάση είτε ροή ρεύματος. Επί του πρακτέου η παράμετρος που χρησιμοποιείται περισσότερο είναι η S_{11} . Η παράμετρος αυτή αναπαριστά πόση ισχύ ανακλάται από την κεραία και για το λόγο αυτό είναι και γνωστή ως συντελεστής ανάκλασης της κεραίας. Εάν για παράδειγμα ισχύει ότι $S_{11} = 0db$ αυτό σημαίνει ότι όλη η ισχύς ανακλάται από την κεραία η οποία όμως δεν ακτινοβολεί. Εάν ακόμη ισχύει πως $S_{11} = -10db$ αυτό σημαίνει πως όταν για παράδειγμα η κεραία τροφοδοτείται από $3db$ ισχύος τότε η ανακλώμενη ισχύς είναι $-7db$.

Στα Σχήματα 4.12, 4.13 παρουσιάζουμε τα τρισδιάστατα πολικά διαγράμματα της S παραμέτρου των κεραίων. Παρατηρούμε ότι τόσο στο γραφένιο όσο και στο χρυσό αυτά είναι σχεδόν πανομοιότυπα, με τη διαφορά ότι η παράμετρος S_{11} του γραφενίου έχει μέγιστη τιμή πολύ μεγαλύτερη από αυτή του χρυσού. Αυτό αποδεικνύει πως το γραφένιο είναι πολύ πιο κατάλληλο υλικό για να χρησιμοποιηθεί σε αυτές τις κεραίες σε σχέση με το χρυσό.

Στα Σχήματα 4.16, 4.17 φαίνονται τα τρισδιάστατα ορθογώνια διαγράμματα της r_e παραμέτρου των κεραίων. Τα διαγράμματα αυτά απεικονίζουν την κυματομορφή που εκπέμπει η κεραία στο κοντινό επίπεδο ακτινοβολίας. Μοιάζουν πάρα πολύ μεταξύ τους και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι και οι δύο κεραίες έχουν κατασκευαστεί με τις ίδιες προδιαγραφές και άρα είναι λογικό να εκπέμπουν και την ίδια ακτινοβολία.

Στα Σχήματα 4.18, 4.19 μπορούμε να δούμε τα τρισδιάστατα ορθογώνια διαγράμματα

της ακτινοβολίας των σχεδιασμένων κεραιών στο μακρινό πεδίο. Παρατηρούμε ακόμη ότι είναι πολύ όμοια μεταξύ τους και αυτό οφείλεται στο λόγο που εξηγήσαμε και παραπάνω.

Στα Σχήματα 4.20, 4.21 μπορούμε να δούμε σε τρισδιάστατο πολικό διάγραμμα το κέρδος και των δύο κεραιών στο μακρινό πεδίο. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι και στις δύο κεραιές επί του άξονα θ έχουμε την χαμηλότερη τιμή, (σχεδόν μηδέν). Ακόμη έχουν τις ίδιες αυξομειώσεις στο κέρδος με τη διαφορά όμως ότι το κέρδος του γραφενίου έχει μέγιστη τιμή μεγαλύτερη από τη μέγιστη τιμή του κέρδους του χρυσού.

Στα Διαγράμματα 4.22, 4.23 μπορούμε να δούμε τα ορθογώνια διαγράμματα της r_e παραμέτρου των κεραιών. Όπως και στα τρισδιάστα διαγράμματα η ακτινοβολία αυτή είναι ίδια και μάλιστα για τους λόγους που εξηγήσαμε παραπάνω.

Στα Διαγράμματα 4.24, 4.25 μπορούμε να δούμε τα ορθογώνια διαγράμματα του κέρδους των κεραιών. Όπως και στα τρισδιάστα διαγράμματα το κέρδος του γραφενίου είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό του χρυσού και αυτό φαίνεται και σε αυτό το διάγραμμα.

Στα Διαγράμματα 4.26, 4.27 μπορούμε να δούμε το ορθογώνιο διάγραμμα της κατευθυντικότητας των κεραιών αυτών. Η κατευθυντικότητα ορίζεται, όπως έχουμε πεί και παραπάνω, ως ο λόγος της έντασης ακτινοβολίας σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση προς το μέσο όρο της έντασης ακτινοβολίας σε όλες τις κατευθύνσεις. Παρατηρούμε ότι η κατευθυντικότητα του γραφενίου είναι πολύ καλύτερη από αυτή του χρυσού.

Τέλος στα Διαγράμματα 4.28 - 4.31 μπορούμε να δούμε την κατευθυντικότητα αλλά και το κέρδος των δύο κεραιών σε κυκλικό διάγραμμα. Και τα δύο αυτά χαρακτηριστικά παρουσιάζουν τις ιδιαιτερότητες που έχουμε αναφέρει και στα παραπάνω διαγράμματα.

Βιβλιογραφία

- [1] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*. New York: Wiley, 1982., .
- [2] J. D. Kraus, "Antennas since Hertz and Marconi," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-33, pp. 131-137, Feb. 1985..
- [3] J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity und Magnetism*. London, U.K.: Oxford Univ. Press, 1873, 1904.
- [4] S. Silver, Ed., *Microwave Antenna Theory and Design*. MIT Radiation Lab. Series, vol. 12. New York: McGraw-Hill, 1949..
- [5] J. D. Kraus, *Antennas*. New York: McGraw-Hill, 1950 (first edition), 1988 (second edition)..
- [6] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*. New York: Wiley, 1981..
- [7] R. S. Elliott, *Antenna Theory and Design*. New York: Prentice- Hall, 1981..
- [8] R. E. Collin, *Antennas and Radiowave Propagation*. New York: McGraw-Hill, 1985.
- [9] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*. New York: Wiley, 1989.
- [10] E. K. Miller and J. A. Landt, "Direct time-domain techniques for transient radiation and scattering from wires," *Proc. IEEE*, vol. 68, pp. 1396-1423, Nov. 1980..
- [11] C. H. Walter, *Traveling WaveAntennas*. New York: McGraw- Hill, 1965..
- [12] "IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas," *IEEE Standard 145-1983*, *IEEE Trans. Antenna Propagat.*, vol. AP- 31, Part I1 of two parts, pp. 5-29, Nov. 1983..
- [13] E. Wolff, *Antenna Analysis*. New York: Wiley, 1966 (first edition), Norwood, MA: Artech House, 1988 (second edition)..
- [14] L. V. Blake, *Anfennas*. New York: Wiley, 1966 (first edition), Norwood, MA: Artech House, 1987 (second edition)..
- [15] CR. E. Collin and F. J. Zucker, Eds., *Antenna Theory*, pts. 1 and 2. New York: McGraw-Hill, 1969.

- [16] W. V. T. Rusch and P. D. Potter, Analysis of ReJector Antennas. New York: Academic, 1970..
- [17] K. Chang (Ed.), Handbook of Microwave and Optical Components. New York: Wiley-Interscience, 1989, vol. I, chs. 10-13 .
- [18] C. A. Balanis, Antenna Theory: A Review New York: Wiley, Jan 1992
- [19] IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas. IEEE Std 145-2013 (Revision of IEEE Std 145-1993). 2014. .
- [20] J. Huang and J. A. Encinar. Reflectarray Antennas. Piscataway, N.J.; Hoboken, N.J.: IEEE Press; Wiley-Interscience, 2008..
- [21] M. E. Bialkowski and H. J. Song. "Investigations into a Power-Combining Structure using a Reflectarray of Dual-Feed Aperture-Coupled Microstrip Patch Antennas." IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 50, No. 6, 841-849; June 2002.
- [22] K. K. Kishor and S. V. Hum, "An Amplifying Reconfigurable Reflectarray Antenna." IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 60, No. 1, 197-205, Jan. 2012..
- [23] H. Kamoda, T. Iwasaki, J. Tsumochi, T. Kuki, and O. Hashimoto. "60-GHz Electronically Reconfigurable Large Reflectarray using Single-Bit Phase Shifters." IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 59, No. 7, 2524-2531, July 2011..
- [24] R. S. Malfajani and Z. Atlasbaf. "Design and Implementation of a Broadband Single Layer Circularly Polarized Reflectarray Antenna." IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 11, 973-976, Nov 2012..
- [25] T. Metzler and D. Schaubert, "Scattering from a stub loaded microstrip antenna," in Proc. Antennas Propag. Soc. Int. Symp. Dig., June 1989..
- [26] D.-C Chang and M.-C Huang, "Microstrip reflectarray antenna with offset feed," Electron. Lett., Vol. 28, No. 16, 1489 – 1491, July 1992..
- [27] D. M. Pozar and T. A. Metzler. "Analysis of a Reflectarray Antenna using Microstrip Patches of Variable Size." Electronics Letters Vol. 29, No. 8, 657-658, 1993.
- [28] J. A. Encinar, "Design of Two-Layer Printed Reflectarrays using Patches of Variable Size." IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 49, No. 10, 1403-1410, Oct. 2001..
- [29] J. A. Encinar, "Design of Two-Layer Printed Reflectarrays using Patches of Variable Size." IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 49, No. 10, 1403-1410, Oct. 2001..
- [30] J. Huang and R. J. Pogorzelski. "A Ka-Band Microstrip Reflectarray with Elements having Variable Rotation Angles." IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 46, No. 5, 650-656, May 1998..

- [31] R. Florencio, J. A. Encinar, R. R. Boix, and G. Perez-Palomino. "Dual-Polarisation Reflectarray made of Cells with Two Orthogonal Sets of Parallel Dipoles for Bandwidth and Cross-Polarisation Improvement." *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, Vol. 8, No. 15, 389-1397, 2014..
- [32] L. Long, Q. Chen, Q. Yuan, K. Sawaya, T. Maruyama, T. Furuno, and S. Uebayashi. "Novel Broadband Planar Reflectarray with Parasitic Dipoles for Wireless Communication Applications." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 8, 881-885, 2009..
- [33] M. R. Chaharmir, J. Shaker, and H. Legay. "Broadband Design of a Single Layer Large Reflectarray using Multi Cross Loop Elements." *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 57, No. 10, 3363-3366, Oct. 2009.
- [34] M. R. Chaharmir, J. Shaker, and H. Legay. "Dual-Band Ka/X Reflectarray with Broadband Loop Elements." *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, Vol. 4, No. 2, 225-231, 2010..
- [35] P. De Vita, A. Freni, G. L. Dassano, P. Pirinoli, and R. E. Zich. "Broadband Element for High-Gain Single-Layer Printed Reflectarray Antenna." *Electronics Letters* Vol. 43, No. 23, 2007..
- [36] S. Costanzo and F. Venneri. "Miniaturized Fractal Reflectarray Element using Fixed-Size Patch." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 13, 1437-1440, 2014.
- [37] L. Moustafa, R. Gillard, F. Peris, R. Loison, H. Legay, and E. Girard. "The Phoenix Cell: A New Reflectarray Cell with Large Bandwidth and Rebirth Capabilities." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 10, 71-74, 2011..
- [38] J. Silva-Montero, J. I. Martinez-Lopez, J. Rodriguez-Cuevas, A. Martynyuk, "Spiraphase-Type Reflectarray for Large Reflection Elevation Angles", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, early access IEEE Xplore, 2015..
- [39] J. L. T. Ethier, D. A. McNamara, M. R. Chaharmir, and J. Shaker. "Reflectarray Design with Similarity-Shaped Fragmented Sub-Wavelength Elements" *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol 62, No. 9, 4498-4509, Sept 2014.
- [40] M. Abd-Elhady, W. Hong, and Y. Zhang. "A Ka-Band Reflectarray Implemented with a Single-Layer Perforated Dielectric Substrate." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett.*, Vol. 11, 600-603, 2012..
- [41] S.V. Hum, M. Okoniewski, and R. J. Davies, "Realizing an electronically tunable reflectarray using varactor diode-tuned elements," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.* , Vol. 15, No. 6, 422-424, June 2005..

- [42] S. V. Hum et M. Okoniewski, R. J. Davies, "Modeling and Design of Electronically Tunable Reflectarrays," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 55, No. 8, Aug. 2007..
- [43] J. Perruisseau-Carrier and A. K. Skriverviky, "Monolithic MEMS based reflectarray cell digitally reconfigurable over a 360 phase range," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, Vol. 7, 138–141, 2008..
- [44] N. Misran, R. Cahill and V. F. Fusco. "Design optimisation of ring elements for broadband reflectarray antennas," *IEE Proc, Microwaves, Antennas and Propagation*, Vol.150, No.6, 440,444, Dec 2003..
- [45] Carrasco, E. and Perruisseau-Carrier, J. (2013). Reflectarray Antenna at Terahertz Using Graphene. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 12, pp.253-256.
- [46] M. Abd-Elhady, W. Hong, and Y. Zhang. "A Ka-Band Reflectarray Implemented with a Single-Layer Perforated Dielectric Substrate." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett.*, Vol. 11, 600-603, 2012..
- [47] M. S. Shur and L. F. Eastman, Ballistic Transport in Semiconductors at Low-Temperatures for Low Power High Speed Logic, *IEEE Transactions Electron Devices*, Vol. ED-26, No. 11, pp. 1677-1683, November (1979).
- [48] From:[http://www.jpl.nasa.gov/news/news.cfm? release=2004-291](http://www.jpl.nasa.gov/news/news.cfm?release=2004-291)
- [49] From <http://www.teraview.com/ab;imageLibrary.asp>
- [50] From *Science* Vol. 297, 2 Aug. 2002.
- [51] Yunqing Chen, Haibo Liu, Michael J. Fitch, Robert Osiander, James B. Spicer, Michael Shur, X.-C. Zhang, THz diffuse reflectance spectra of selected explosives and related compounds, *Proceedings of SPIE Volume: 5790, Terahertz for Military and Security Applications III*, Editor(s): R. Jennifer Hwu, Dwight L. Woolard, and Mark J. Rosker, to be published.
- [52] www.virginiadiodes.com.
- [53] W. Knap, F. Teppe, Y. Meziani, N. Dyakonova, J. Lusakowski, F. Bouef, T. Skotnicki, D. Maude, S. Rumyantsev and M. S. Shur, Plasma Wave Detection of Millimeter Wave Radiation by Silicon Field Effect Transistors, *Appl. Phys. Lett*, Vol. 85, No 4, pp. 675-677 26 July (2004).
- [54] D. H. Auston, K.P. Cheung, J.A. Valdmanis, and D.A. Kleinman, *D.A. Phys. Rev. Lett.* 53, 1555–1558 (1984).
- [55] E. Carrasco, M. Barba, and J. A. Encinar. "Aperture-Coupled Reflectarray Element with Wide Range of Phase Delay." *Electronics Letters* Vol. 42, No. 12, 667-668, 2006.

- [56] G. Dehlinger, L. Diehl, U. Gennser, H. Sigg, J. Faist, K. Ensslin, D. Grützmacher, E. Müller, *Science* 290, 2277 (2000).
- [57] www.CoherentInc.com.
- [58] H.-T. Chen, G.C. Cho, and R. Kersting. *Appl. Phys. Lett.* 83, 3009 (2003).
- [59] R. Kohler, A. Tredicucci, F. Beltram, H. E. Beere, E. H. Linfield, A. G. Davies, D. A. Ritchie, R. C. Iotti, and F. Rossi, *Nature* 417, 156–159 (2002).
- [60] J. Van Rudd and D. M. Mittleman, “Influence of substrate-lens design in terahertz time-domain spectroscopy,” *JOSA B*, vol. 19, no. 2, pp. 319–329, 2002..
- [61] N. Llombart, C. Lee, M. Alonso-delPino, G. Chattopadhyay, C. Jung-Kubiak, L. Jofre, and I. Mehdi, “Silicon micromachined lens antenna for THz integrated heterodyne arrays,” 2013.
- [62] K. R. Jha and G. Singh, “Terahertz planar antennas for future wireless communication: a technical review,” *Infrared Phys. Technol.*, vol. 60, pp. 71–80, 2013.
- [63] M. Tani, M. Herrmann, and K. Sakai, “Generation and detection of terahertz pulsed radiation with photoconductive antennas and its application to imaging,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 13, no. 11, p. 1739, 2002.
- [64] M. Tani, Y. Hirota, C. T. Que, S. Tanaka, R. Hattori, M. Yamaguchi, S. Nishizawa, and M. Hangyo, “Novel terahertz photoconductive antennas,” *Int. J. Infrared Millim. Waves*, vol. 27, no. 4, pp. 531–546, 2006..
- [65] C. W. Berry and M. Jarrahi, “Principles of impedance matching in photoconductive antennas,” *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, vol. 33, no. 12, pp. 1182–1189, 2012..
- [66] I. Llatser, C. Kremers, D. N. Chigrin, J. M. Jornet, M. C. Lemme, A. Cabellos-Aparicio, and E. A. ON, “Radiation characteristics of tunable graphennas in the terahertz band,” *Radioengineering*, vol. 21, no. 4, pp. 946–953, 2012.
- [67] Y.-S. Lee, *Principles of Terahertz Science and Technology: Proceedings of the International Conference, Held in Mainz, Germany, June 5-9, 1979*, vol. 170. Springer, 2009.
- [68] P. Mukherjee and B. Gupta, “Terahertz (THz) frequency sources and antennas-A brief review,” *Int. J. Infrared Millim. Waves*, vol. 29, no. 12, pp. 1091–1102, 2008..
- [69] NA. Gaponov, L. Ostrovskii, and G. Freidman, “Electromagnetic shock waves,” *Radiophys. Quantum Electron.*, vol. 10, no. 9, pp. 772–793, 1967..
- [70] Z. Wu, M. Liang, W.-R. Ng, M. Gehm, and H. Xin, “Terahertz horn antenna based on hollow-core electromagnetic crystal (EMXT) structure,” *Antennas Propag. IEEE Trans. On*, vol. 60, no. 12, pp. 5557–5563, 2012.

- [71] D. Li, Y. Huang, and Y.-C. Shen, "Terahertz conical horn antenna," in *Antennas and Propagation, 2009. EuCAP 2009. 3rd European Conference on*, 2009, pp. 989–993.
- [72] M. Koch, "Terahertz communications: A 2020 vision," in *Terahertz Frequency Detection and Identification of Materials and Objects*, Springer, 2007, pp. 325–338.
- [73] K. R. Jha and G. Singh, "Analysis and design of rectangular microstrip antenna on two-layer substrate materials at terahertz frequency," *J. Comput. Electron.*, vol. 9, no. 2, pp. 68–78, 2010.
- [74] K. R. Jha and G. Singh, "Microstrip patch antenna on photonic crystal substrate at terahertz frequency," in *Applied Electromagnetics Conference (AEMC)*, 2009, 2009, pp. 1–4.
- [75] K. R. Jha and G. Singh, "Analysis and design of terahertz microstrip antenna on photonic bandgap material," *J. Comput. Electron.*, vol. 11, no. 4, pp. 364–373, 2012.
- [76] I. Llatser, C. Kremers, D. N. Chigrin, J. M. Jornet, M. C. Lemme, A. Cabellos-Aparicio, and E. A. ON, "Radiation characteristics of tunable graphennas in the terahertz band," *Radioengineering*, vol. 21, no. 4, pp. 946–953, 2012.
- [77] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, and A. A. Firsov, *Science Mag*, Vol. 306, 666 (2004)
- [78] Lee, C., Wei, X. D., Kysar, J. W., Hone, J. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer Graphene. *Science* 321, 385–388 (2008). S. Zhang, C. Zhu, J. K. O. Sin, and P. K. T. Mok, "A novel ultrathin elevated channel low-temperature poly-Si TFT," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 20, pp. 569–571, Nov. 1999.
- [79] Geim A. K. and K. S. Novoselov, *The Rise of Graphene*, pp: 183-191, 2007 .
- [80] Liu, Z., J. T. Robinson, X. M. Sun and H. J. Dai, PEGylated nanographene oxide for delivery of waterinsoluble cancer drug. *J. Am. Chem. Soc.* 130: 10876- 10877, 2008
- [81] <https://investorintel.com/sectors/technology/technology-intel/the-future-of-graphene/>.
- [82] <https://nusteelfab.com/anti-corrosive-coating-being-developed-with-graphene/>
- [83] <https://socratic.org/questions/what-makes-an-oxygen-atom-different-from-a-carbon-atom-a-a-the-number-of-neutron>.
- [84] <https://www.extremetech.com/extreme/147456-researchers-successfully-grow-defect-free-graphene-commercial-uses-now-in-sight> .
- [85] <https://en.wikipedia.org/wiki/Graphene>

[86] <http://epapier.pl/informacje/>.

[87] <http://www.mse.mtu.edu/yunhangh/research.html>

[88] <http://www.redorbit.com/news/science/1113289344/graphene-could-build-better-bulletproof-vests-112914/>

