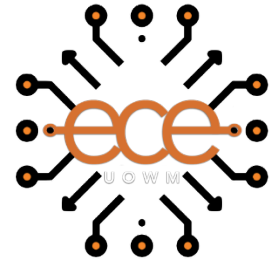




ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΓΡΑΦΕΝΙΟΥ ΓΙΑ ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΣΤΑΜΟΥΛΗ ΝΙΚΟΛΑΟΥ

Επιβλέπων: ΖΥΓΚΙΡΙΔΗΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ

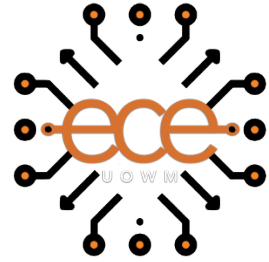
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΚΟΖΑΝΗ/ΙΟΥΛΙΟΣ/2022



HELLENIC DEMOCRACY
UNIVERSITY OF WESTERN MACEDONIA

FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL &
COMPUTER ENGINEERING



COMPUTATIONAL MODELING AND STUDY OF GRAPHENE CONFIGURATIONS FOR CONTEMPORARY COMMUNICATION SYSTEMS

THESIS

STAMOULIS NIKOLAOS

SUPERVISOR: ZYGIRIDIS THEODOROS

ASSOCIATE PROFESSOR

KOZANI/JULY/2022



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

ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο “Υπολογιστική μοντελοποίηση και μελέτη διατάξεων γραφείου για σύγχρονα συστήματα επικοινωνιών” καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του μέλους του Τμήματος κ.Ζυγκιρίδη Θεόδωρου αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και μόνο.

Copyright (C) Ονοματεπώνυμο Φοιτητή & Επιβλέποντα, Έτος, Πόλη

Copyright (C) Σταμούλης Νικόλαος, Ζυγκιρίδης Θεόδωρος, 2022, Κοζάνη

Υπογραφή Φοιτητή: _____

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται δύο διαφορετικοί τύποι μεταεπιφανειών όπου χρησιμοποιείται ως κύριο υλικό το γραφένιο. Αρχικά παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο των μεταϋλικών και των μεταεπιφανειών που είναι αναγκαίο για την καλύτερη κατανόηση της διπλωματικής. Στην συνέχεια αναφέρονται τα απαραίτητα στοιχεία τους για την εύρυθμη λειτουργία τους. Ακόμη παρουσιάζεται η τεχνολογία των THz αλλά και η εκμετάλλευσή τους στην σημερινή εποχή. Επιπροσθέτως αναφέρονται οι βασικές ιδιότητες του γραφενίου και η λειτουργία τους στην παρούσα διπλωματική. Πιο συγκεκριμένα σχεδιάζουμε δύο διατάξεις στο περιβάλλον του λογισμικού με διαφορετικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά αλλά έχοντας κοινό υλικό το γραφένιο. Απόρροια αυτού του γεγονότος είναι ότι το γραφένιο έχει μεταβαλλόμενη, επιφανειακή αγωγιμότητα στο THz φάσμα συχνοτήτων αλλά και πολύ μικρό μέγεθος στοιχείων (μm). Τέλος για την κατασκευή, σχεδίαση και ανάλυση των μεταεπιφανειών χρησιμοποιήθηκε το CST λογισμικό.

Abstract

In the present dissertation, two different types of metasurfaces are examined where graphene is used as the main material. First, the theoretical background of the metamaterials and metasurfaces that are necessary for a better understanding of this work is presented. The technology of THz is also presented, as well as its exploitation in the present era. In addition, the basic properties of graphene and their significance in this thesis are mentioned. More specifically, we design two devices in the software platform with different properties and characteristics having the graphene as common material. The consequence of this fact is that graphene has controllable, surface conductivity in the THz frequency range but also very small cell size (μm), without affecting the final result of the simulation. Finally, it is noteworthy that CST software was used for the modeling, design and analysis of the metasurfaces.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ζυγκιρίδη για την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα αλλά και να διευρύνω τους ορίζοντές μου επάνω στην λειτουργία του γραφενίου και των μεταεπιφανειών. Το σημαντικότερο ωστόσο ήταν οι συμβουλές και οι συνεχείς συζητήσεις στο γραφείο του όπου επηρέασαν σε μεγάλο βαθμό την μετέπειτα επιστημονική μου πορεία.

Περίληψη	7
Abstract	9
Ευχαριστίες	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΜΕΤΑΥΛΙΚΑ-ΜΕΤΑΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ	15
1.1 Εισαγωγή	15
1.2 Μεταύλικά	15
1.3 Βασικές ιδιότητες των μεταυλικών	17
1.4 Μεταεπιφάνειες	19
1.5 Ιστορική αναδρομή των μεταεπιφανειών	19
1.6 Εφαρμογές των μεταεπιφανειών	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΓΡΑΦΕΝΙΟ	22
2.1 Εισαγωγή	22
2.2 Δομή	22
2.3 Κύρια χαρακτηριστικά	23
2.4 Ιδιότητες και εφαρμογές	24
2.4.1) Εφαρμογή του γραφενίου στη βιο-μηχανική	27
2.4.2) Εφαρμογή του γραφενίου στην ηλεκτρονική	27
2.4.3) Εφαρμογή του γραφενίου στο φιλτράρισμα ουσιών	29
2.4.4) Εφαρμογή του γραφενίου στην κατασκευή αεροσκαφών	30
2.4.5) Εφαρμογή του γραφενίου στα φωτοβολταϊκά	30
2.4.6) Η εφαρμογή του γραφενίου κατά του covid-19	31
2.4.7) Εφαρμογή του γραφενίου σε κεραία ραδιοσυχνότητων	32
2.4.8) Εφαρμογή του γραφενίου σε νανο-κεραίες	33
2.5 Πηγή ενέργειας	34

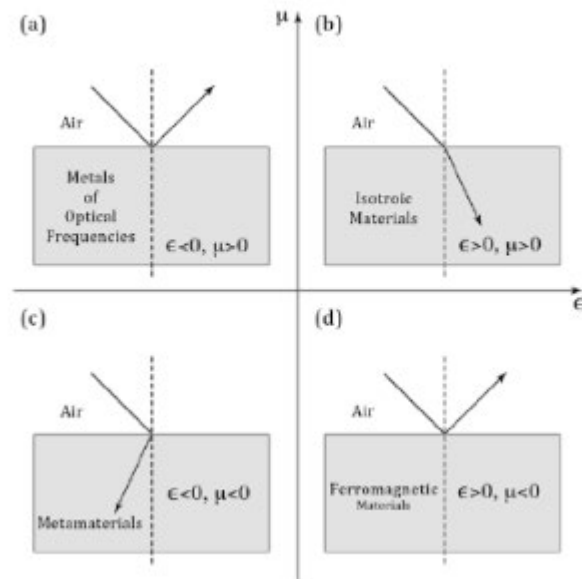
2.6 Η συχνοτική περιοχή του γραφενίου THz	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΟΥ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΗ	38
3.1 Εισαγωγή	38
3.2 Σχεδίαση της διάταξης στο λογισμικό	39
3.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΗ ΤΡΙΠΛΗΣ ΖΩΝΗΣ	50
4.1 Εισαγωγή	50
4.2 Σχεδίαση της διάταξης στο λογισμικό	51
4.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ	66
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	67

1.1 Εισαγωγή

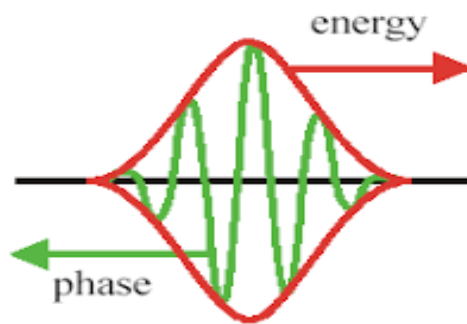
Τα μεταύλικά έχουν απασχολήσει σημαντικά τα τελευταία χρόνια την επιστημονική κοινότητα. Είναι τεχνητά υλικά με εντυπωσιακές και σπάνιες ιδιότητες οι οποίες δεν συναντώνται ελεύθερα στην φύση. Μια σημαντική και μεγάλη κατηγορία εφαρμογών των μεταύλικών είναι οι μεταεπιφάνειες.

1.2 Μεταύλικά

Ο προσδιορισμός «μεταύλικά» ορίστηκε διότι χαρακτηρίζει μία διαφορετική κατηγορία υλικών τα οποία παρουσιάζουν ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες με τεχνητά μέσα και όχι με φυσικά όπως τα συνήθη απλά υλικά. Επιπλέον τα μεταύλικά χαρακτηρίζονται ως τεχνητές ισοδύναμα ομογενείς ηλεκτρομαγνητικές δομές με εξεζητημένες ιδιότητες. Πιο ιδιαίτερο ωστόσο χαρακτηριστικό των μεταύλικων είναι η δυνατότητα να διαμορφώνουν υλικά με αρνητικό δείκτη διάθλασης. Αυτός είναι και ένας από τους σημαντικότερους λόγους διαχωρισμού των μεταύλικών από τα φυσικά υλικά τα οποία χαρακτηρίζονται από θετικό δείκτη διάθλασης. Πιο συγκεκριμένα, τα συνήθη υλικά όπως το νερό και το γυαλί εμφανίζουν θετικές τιμές όσον αφορά την διηλεκτρική σταθερά ϵ και την μαγνητική διαπερατότητα μ [1]. Παρόλα αυτά συναντώνται όμως και φυσικά υλικά όπως ο χρυσός και το ασήμι που παρουσιάζουν αρνητική διηλεκτρική σταθερά $\epsilon < 0$ σε ορατά μήκη κύματος. Ουσιαστικά υπάρχουν υλικά όπου ή $\epsilon < 0$ (διηλεκτρική σταθερά) ή $\mu < 0$ (μαγνητική σταθερά) αλλά όχι και τα δύο ταυτόχρονα. Η πιο διαδεδομένη κατηγορία μεταύλικών είναι τα αριστερόστροφα υλικά τα οποία παρουσιάζουν ταυτόχρονα αρνητικές τιμές ($\epsilon, \mu < 0$) [11]. Επιπλέον παρατηρείται ότι στα μεταύλικά η ταχύτητα φάσης και η ταχύτητα ομάδας είναι αντιπαράλληλες ενώ ο δείκτης διάθλασης είναι αρνητικός πράγμα το οποίο έρχεται σε αντιπαράθεση με τα υπόλοιπα φυσικά υλικά [16].



Σχήμα 1.1: 4 διαφορετικές κατηγορίες διάθλασης υλικών α) μέταλλα οπτικών συχνοτήτων β) ισότροπα υλικά γ) μεταυλικά δ) σιδηρομαγνητικά υλικά [19].



Σχήμα 1.2: Αντίθετη κατεύθυνση φασικής ταχύτητας και ταχύτητας ομάδας μεταυλικών [20].

1.3 Βασικές ιδιότητες των μεταλλικών

Κάποιες από τις βασικές ιδιότητες των μεταλλικών που παρατηρούνται μέχρι και σήμερα είναι οι εξής:

- 1) Τα μεταλλικά παρουσιάζουν αρνητικό δείκτη διάθλασης.
- 2) Η φασική ταχύτητα διαδίδεται ανάποδα, δηλαδή με φορά προς την πηγή και σε αντίθετη κατεύθυνση από την ενέργεια της ταχύτητας ομάδας που διαδίδεται καθώς εγκαταλείπει την πηγή.
- 3) Η ένταση του ηλεκτρικού, μαγνητικού πεδίου (E,H) και το διάνυσμα του κύματος k δημιουργούν μια αριστερόστροφη τριάδα.

Κάποια από τα παραπάνω αποτελούν μια παραλλαγή του νόμου του Snell αλλά και στην αντιστροφή του φαινομένου Doppler καθώς και στην αντιστροφή της ακτινοβολίας Vavilov-Cerenkov [16].

Όπως είναι φανερό η σταθερά διάδοσης του μέσου προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$$k = n\left(\frac{\omega}{c}\right) \quad (1.1)$$

ο δείκτης διάθλασης του μεταλλικού είναι $n = \pm\sqrt{\epsilon_r\mu_r}$. Στα αριστερόστροφα μεταλλικά η σταθερά διάδοσης k έχει αρνητική τιμή καθώς και ο δείκτης διάθλασης (εφόσον η διηλεκτρική σταθερά και η μαγνητική διαπερατότητα έχουν αρνητικές τιμές) είναι αρνητικός, οπότε διαμορφώνεται ως εξής: $n = -\sqrt{\epsilon_r\epsilon_{\mu r}}$.

Μία ακόμη σημαντική ιδιότητα των μεταλλικών είναι η αντιστροφή του νόμου του Snell. Καθώς ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει από ένα απλό υλικό σε ένα μεταλλικό, το ένα τμήμα που προκύπτει από την πρόσπτωση ανακλάται ενώ το δεύτερο τμήμα διαθλάται στο δεύτερο υλικό [2]. Η μαθηματική διατύπωση του νόμου του Snell είναι:

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \quad (1.2)$$

όπου n_1, n_2 είναι οι δείκτες διάθλασης του μεταλλικού καθώς και του απλού υλικού. Όπου θ_1, θ_2 είναι οι γωνίες πρόσπτωσης και διάθλασης των δύο υλικών.

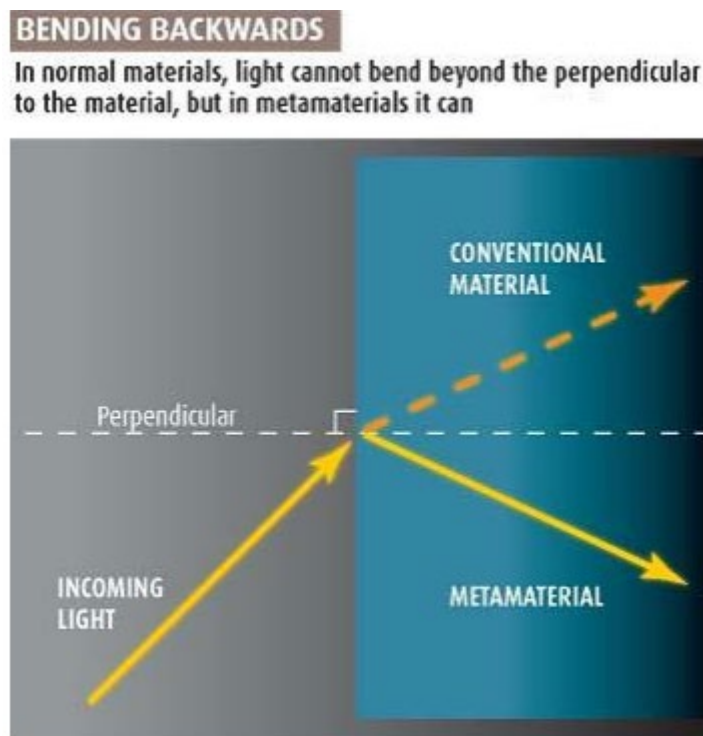
Ακόμη μία ιδιότητα των μεταλλικών είναι η αντιστροφή του φαινομένου Doppler. Υποθέτουμε ότι εάν έχουμε μία πηγή S η οποία κινείται με σταθερή ταχύτητα $U_s = \frac{z}{t}$ σε ένα άξονα z με γωνιακή συχνότητα ω , η φάση που καταλαβαίνει ο παρατηρητής είναι:

$$\Phi = \omega t - kz = \omega t - kU_s t = t = \omega t \left(1 - \frac{kU_s}{\omega}\right) = \omega t \left(1 - \frac{U_s}{U_p}\right) \quad (1.3)$$

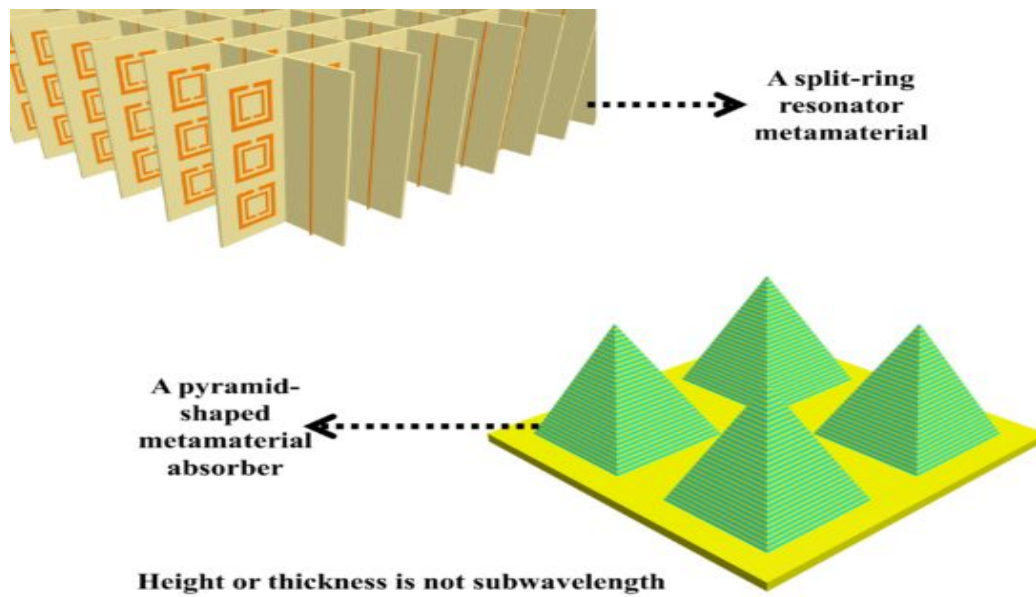
Ο συντελεστής του χρόνου t στην πραγματικότητα χαρακτηρίζει την συχνότητα Doppler η οποία είναι:

$$\omega_p = \omega \left(1 - \frac{U_s}{U_p}\right) = \omega - \omega \frac{U_s}{U_p} = \omega - \Delta\omega \quad (1.4)$$

όπου $U_p = \frac{\omega}{\kappa}$ είναι η ταχύτητα φάσης. Από την παραπάνω σχέση (1.4) προκύπτει η διαφορά της συχνότητας ω και της ολίσθησης Doppler $\Delta\omega$. Στην αντιστροφή του φαινομένου Doppler η πηγή κατευθύνεται προς τον παρατηρητή με αποτέλεσμα να αντιλαμβάνεται αρκετά μικρότερη συχνότητα κύματος από την πραγματική. Ακόμη όταν απομακρύνεται από την πηγή αντιλαμβάνεται μεγαλύτερη συχνότητα. Στην περίπτωση που έχουμε ένα φυσικό μέσο το φαινόμενο Doppler είναι $\Delta\omega > 0$ ενώ όταν αναφερόμαστε σε μεταϊλικά το φαινόμενο Doppler είναι $\Delta\omega < 0$ [11].



Σχήμα 1.3: Αρνητικός δείκτης διάθλασης [20].



Σχήμα 1.4: Μερικά τρισδιάστατα (3D) παραδείγματα μεταυλικών [21].

1.4 Μεταεπιφάνειες

Τα τελευταία χρόνια οι μεταεπιφάνειες έχουν επηρεάσει σημαντικά τον επιστημονικό κλάδο καθώς ασχολούνται με μονοδιάστατες και πλασματικές συστοιχίες. Μεταεπιφάνεια χαρακτηρίζεται οποιαδήποτε δισδιάστατη περιοδική δομή καθώς το πάχος και η περιοδικότητα της είναι αρκετά μικρότερα σε σύγκριση με το μήκος κύματος του εκάστοτε χώρου. Εξαιτίας του ασήμαντου πάχους τους σε σχέση με το μήκος κύματος λειτουργίας, οι μεταεπιφάνειες έχουν την δυνατότητα να χαρακτηριστούν ως διεπαφή ασυνεχείας που προκαλεί ακαριαία αλλαγή στο πλάτος και στη φάση του προσπίπτοντος κύματος. Στην ηλεκτρομαγνητική θεωρία οι μεταεπιφάνειες επηρεάζουν τη συμπεριφορά των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσω συγκεκριμένων συνοριακών συνθηκών [3].

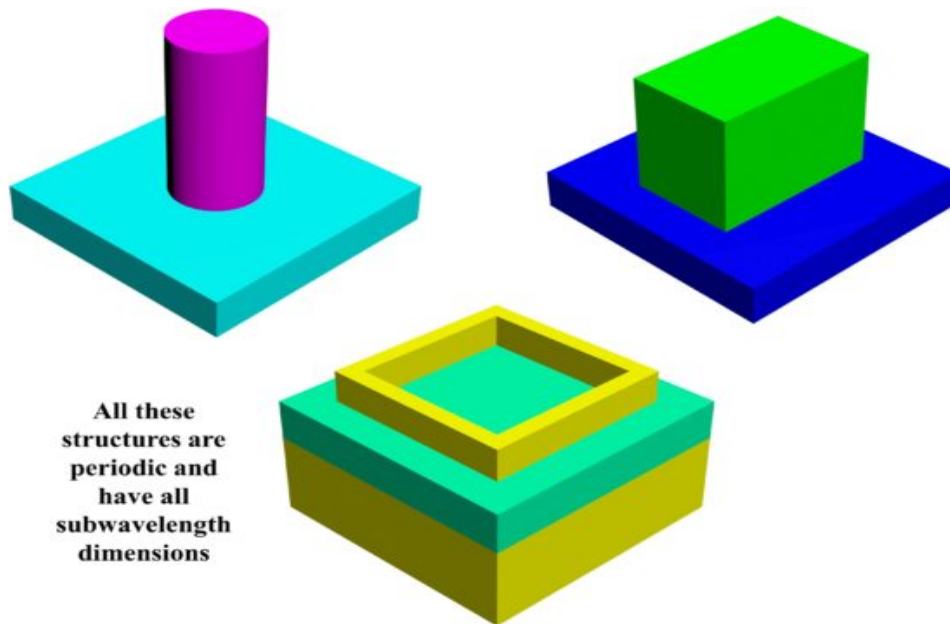
1.5 Ιστορική αναδρομή των μεταεπιφανειών

Το 1902 ο Robert W. Wood ανακάλυψε ότι τα φάσματα ανάκλασης του μεταλλικού πλέγματος υπομήκους κύματος παρουσιάζουν απόκρυφες περιοχές. Το περίεργο αυτό γεγονός χαρακτηρίστηκε ως ανωμαλία του Wood και καθοδήγησε στην εύρεση του επιφανειακού πλασματικού πολαριτόν (SPP), ενός ειδικού ηλεκτρομαγνητικού κύματος που διεγείρεται σε μεταλλικές επιφάνειες. Αργότερα ανακαλύφθηκε και η σχέση Levi-Civita η οποία αναφέρει ότι μία μεμβράνη πάχους υπομήκους κύματος έχει την δυνατότητα να προκαλέσει σημαντικές τροποποιήσεις στις ηλεκτρομαγνητικές οριακές συνθήκες [4]. Επιπλέον οι μεταεπιφάνειες βρίσκουν εφαρμογή και στο φάσμα μικροκυμάτων, όπως οι επιφάνειες επιλεκτικής συχνότητας (FSS), τα φύλλα σύνθετης αντίστασης και τα ωμικά φύλλα. Τελευταία ανακαλύφθηκαν κάποια νέα φαινόμενα, όπως η συνεκτική τέλεια απορρόφηση υπερευρυζωνικής ζώνης [13]. Ακόμη τα συμπεράσματα αναφέρουν ότι ένα φιλμ πάχους 0.3nm θα καθιστούσε δυνατή την εισχώρηση όλων των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στις συχνότητες RF, μικροκυμάτων καθώς ακόμη και σε terahertz

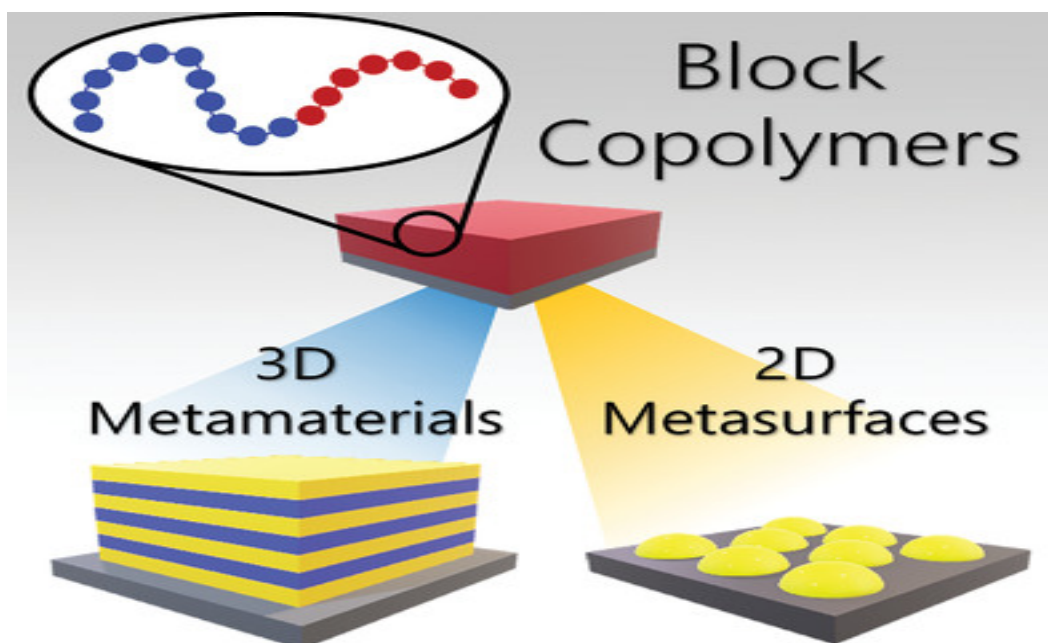
συχνότητες (THz). Στην κατηγορία με τις οπτικές εφαρμογές όπως και ανακαλύφθηκε από τον Λόρδο Rayleigh μία ανακλαστική επίστρωση θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως μία απλή μεταεπιφάνεια [5]. Το τελευταίο χρονικό διάστημα δημιουργήθηκαν νέες μεταεπιφάνειες όπως οι πλασματικές μεταεπιφάνειες, μεταεπιφάνειες που στηρίζονται κυρίως σε γεωμετρικές φάσεις αλλά και σε μεταεπιφάνειες που στηρίζονται σε φύλλα σύνθετης αντίστασης [17].

1.6 Εφαρμογές των μεταεπιφανειών

Μερικές ενδιαφέρουσες εφαρμογές των μεταεπιφανειών θα μπορούσαν να είναι ο επίπεδος φακός, το επίπεδο ολόγραμμα, η γεννήτρια δίνης καθώς και ο εκτροπέας δέσμης. Ακόμη οι υπερφακοί που στηρίζονται σε μεταεπιφάνεια προωθούν έναν άλλο βαθμό ελέγχου του μετώπου κύματος εκμεταλλεύοντας με αυτό τον τρόπο παροδικά κύματα. Επιπλέον με τα επιφανειακά πλασμόνια στα λεπτά μεταλλικά στρώματα, θα καθίστανται δυνατή η τέλεια απεικόνιση και η λιθογραφία υπερανάλυσης, η οποία ξεπερνάει την απλή υπόθεση ότι από την διάθλαση περιορίζονται όλα τα συστήματα οπτικών φακών [11]. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως όριο περίθλασης. Μία άλλη αρκετά σημαντική εφαρμογή των μεταεπιφανειών είναι στον τομέα της τεχνολογίας stealth [7]. Η διατομή ραντάρ ενός στόχου (RCS) μπορεί να ελαττωθεί σημαντικά είτε από κάποιο απορροφητικό υλικό ακτινοβολίας (RAM) είτε με την διαμόρφωση του στόχου, με αποτέλεσμα η ενέργεια που σκεδάζεται να μπορεί να ανακατευθυνθεί μακριά από την παρούσα πηγή [8]. Ως σημαντικό μειονέκτημα του RAM χαρακτηρίζεται το γεγονός ότι διακατέχεται από λειτουργικότητα στενής ζώνης συχνοτήτων. Ακόμη έχουν κατασκευαστεί μεταεπιφάνειες που ανακατευθύνουν τη σκεδαζόμενη ενέργεια μακριά από την πηγή χρησιμοποιώντας είτε τη θεωρία συστοιχιών είτε τον γενικευμένο νόμο του Snell. Το γεγονός αυτό επέφερε ευνοϊκά αεροδυναμικά σχήματα για τους στόχους με μικρό RCS [10]. Επιπλέον οι μεταεπιφάνειες συναντώνται και σε ηλεκτρομαγνητικούς απορροφητές, μετατροπείς πόλωσης και φασματικά φίλτρα. Τέλος στο παρασκήνιο ήρθαν και νέες συσκευές βιοαπεικόνισης και βιοαισθητήρα με την επιρροή των μεταεπιφανειών. Εξαιτίας όμως του μεγάλου αποτυπώματος και του φυσικού βάρους του, έχει μειωθεί αρκετά η χρήση των συσκευών βιοαπεικόνισης σε κλινικές συνθήκες [17].



Σχήμα 1.5: Μερικά τρισδιάστατα (3D) παραδείγματα μοναδιαίων κελιών μεταεπιφανειών [21].



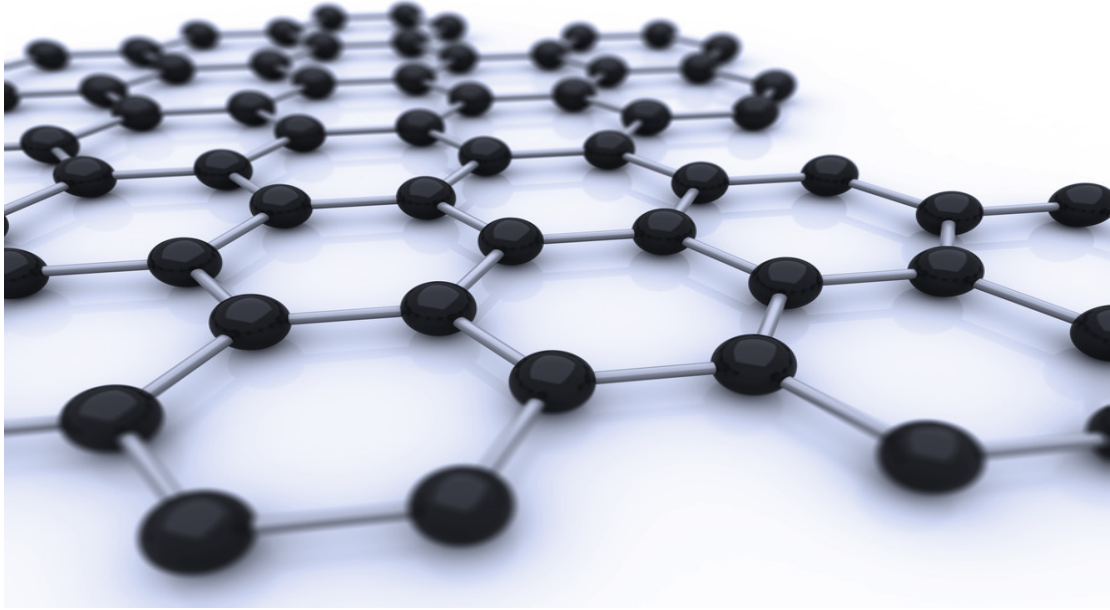
Σχήμα 1.6: Διαφορά ανάμεσα στα 3D μεταυλικά και στις 2D μεταεπιφάνειες [22].

2.1 Εισαγωγή

Η μελέτη για το γραφένιο έχει ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, στο κομμάτι της έρευνας και των υλοποιήσεων. Με μία γρήγορη σκέψη θα έλεγε κανείς ότι το γραφένιο δεν διαφέρει σημαντικά από τα υπόλοιπα απλά υλικά που συναντάμε στη φύση. Αυτό που το καθιστά ξεχωριστό από τα υπόλοιπα απλά υλικά είναι οι εντυπωσιακές ιδιότητες που διαθέτει. Το χαρακτηριστικό ότι είναι αρκετά ελαφρύ και ανθεκτικό υλικό σε συνδυασμό με την ικανότητά του να επιτρέπει τη διόδο της θερμοκρασίας και τον ηλεκτρισμό το μετατρέπουν σε ένα κατάλληλο υλικό για αρκετές διαφορετικές χρήσεις και εφαρμογές. Πιο συγκεκριμένα το τελευταίο χρονικό διάστημα άρχισε να αξιοποιείται ως υλικό για να βελτιώσει την απόδοση και αποτελεσματικότητα πολλών υλικών και ουσιών. Ακόμη στο κοντινό μέλλον θα είναι εφικτός ο συνδυασμός και η πρόσμιξη του γραφενίου και με άλλα δισδιάστατα υλικά με σκοπό να προκύψουν νέα μείγματα και κράματα με ακόμα περισσότερες εντυπωσιακές ιδιότητες. Για να κατανοήσουμε πλήρως το γραφένιο θα πρέπει πρώτα να μελετήσουμε τη δομή και τις βασικές ιδιότητες, όπου θα δούμε αναλυτικά στις επόμενες ενότητες [12].

2.2 Δομή

Το γραφένιο στην πραγματικότητα αποτελείται από ένα μονοατομικό στρώμα γραφίτη, δηλαδή από ένα φυσικό υλικό το οποίο συναντάται σε μεγάλο απόθεμα στην φύση και απαρτίζεται από άτομα άνθρακα τοποθετημένα το ένα δίπλα στο άλλο σε σχήμα εξαγωνικού πλέγματος. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του γραφενίου είναι το πολύ μικρό ατομικό πάχος (0.345nm). Εξαιτίας του μηδαμινού πάχους του πετυχαίνει αυτές τις εντυπωσιακές ιδιότητες [12].



Σχήμα 2.1: Η δομή του γραφενίου [23].

2.3 Κύρια χαρακτηριστικά

Το 2004 πριν ακόμη οι επιστήμονες κατορθώσουν να διαχωρίσουν μονατομικά φύλλα γραφενίου, επικρατούσε η αντίληψη ότι το γεγονός αυτό δεν θα ήταν εφικτό εξαιτίας της θερμικής αστάθειας που θα προκαλούνταν καθώς θα αποκολλούνταν τα φύλλα μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, όταν διαχωρίστηκαν τα πρώτα φύλλα γραφενίου, η επιστημονική κοινότητα ξεκίνησε να ερευνά τους πιθανούς λόγους από τους οποίους προέκυψε αυτός ο διαχωρισμός [6]. Έχοντας ερευνήσει τα αιωρούμενα φύλλα γραφενίου σε μικροσκόπια ηλεκτρονικά, ανακάλυψαν ότι εξαιτίας του μικρού κυματισμού που πραγματοποιούσαν τα φύλλα του γραφενίου, τροποποιούσαν με αυτό τον τρόπο την δομή του υλικού και το μετέτρεπαν έτσι σε πιο στιβαρό. Μετά από μερικά χρόνια η επιστημονική κοινότητα διαπίστωσε ότι το γραφένιο παρουσίαζε αυτή την εντυπωσιακή ιδιότητα όταν οι δεσμοί μεταξύ των ατόμων άνθρακα ήταν αρκετά ισχυροί και δεν άφηναν την αποσταθεροποίηση του υλικού εξαιτίας των έντονων θερμικών διακυμάνσεων [9].

Χαρακτηριστικό μέγεθος του γραφενίου είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η οποία μπορεί να εκφραστεί με τον τύπο Kubo ως εξής:

$$\sigma(\omega, E_f, \Gamma, T) = \sigma_{inter} + \sigma_{intra}$$

$$\sigma_{intra} = \frac{2K_b T e^2}{\pi h} \ln \left(2 \cosh \frac{E_f}{2K_b T} \right) \frac{i}{(\omega + i\Gamma)} = \frac{\alpha}{i\omega + \Gamma} \quad (2.1)$$

$$\sigma_{inter} = \frac{e^2}{4h} \left[H \left(\frac{\omega}{2} \right) + i \frac{4\omega}{\pi} \int_0^\infty \frac{H(\Omega) - H \left(\frac{\omega}{2} \right)}{\omega^2 - 4\Omega^2} d(\Omega) \right] \quad (2.2)$$

Για

$$H(\Omega) = \sinh\left(\frac{\hbar\Omega}{k_b T}\right) / [\cosh\left(\frac{\hbar\Omega}{k_b T}\right) + \cosh\left(\frac{E_f}{k_b T}\right)] \quad (2.3)$$

όπου e είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου, ω η συχνότητα και T είναι η θερμοκρασία με τιμή 300K. $\Gamma = \tau^{-1}$ είναι ο ρυθμός σκέδασης όπου τ είναι η σταθερά χρόνου σκέδασης η οποία στην παρούσα διπλωματική κυμαίνεται από 0 έως 3ps. Ακόμη το σύμβολο \hbar είναι η μειωμένη σταθερά του Planck και k_b είναι η σταθερά του Boltzman. Επιπλέον η ενέργεια Fermi E_f της μεμβράνης του γραφενίου μπορεί να μεταβληθεί από την εξωτερική τάση V_g στην δομή. Ο τύπος της ενέργειας Fermi είναι:

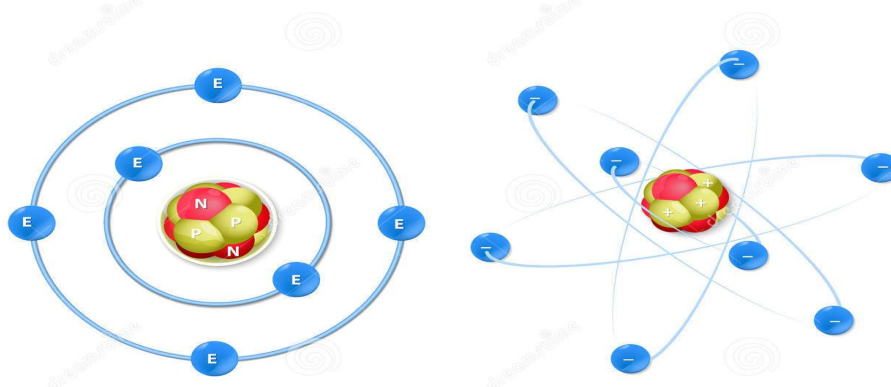
$$E_f = \hbar u_f \sqrt{\frac{\pi \epsilon_d e_0 V_g}{e t_2}} \quad (2.4)$$

όπου $u_f = 10^6 m/s$ είναι η ταχύτητα Fermi και V_g είναι το χημικό δυναμικό του γραφενίου καθώς έχει τιμές από 0 έως 0.8eV. Τέλος ϵ_d είναι η διηλεκτρική σταθερά του υποστρώματος [14].

2.4 Ιδιότητες και εφαρμογές

Μία από τις σημαντικές ιδιότητες του γραφενίου είναι η μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα του η οποία χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι το γραφένιο είναι θεωρητικά ένα ημιμέταλλο, δηλαδή αποτελείται από πολλές οπές και ηλεκτρόνια σαν φορείς φορτίου. Τα άτομα άνθρακα απαρτίζονται συνολικά από 6 ηλεκτρόνια, 2 συναντάμε στην εσωτερική στοιβάδα και άλλα 4 στην εξωτερική στοιβάδα. Τα ηλεκτρόνια που συναντάμε στην εξωτερική στοιβάδα είναι ικανά να δημιουργήσουν ισχυρούς χημικούς δεσμούς. Επιπλέον για να δημιουργηθεί το γραφένιο είναι απαραίτητα μόνο 3 ηλεκτρόνια για το σχηματισμό χημικών δεσμών. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια τα οποία διακατέχονται από μεγάλη κινητικότητα χαρακτηρίζονται ως π ηλεκτρόνια και συναντώνται κυρίως στο επάνω και κάτω τμήμα του γραφενίου. Ακόμη το γραφένιο είναι γνωστό και για τις υψηλές τιμές της ηλεκτρονικής κινητικότητας που παρουσιάζει οι οποίες ξεπερνάνε τα $15.000 cm^2 \cdot V \cdot s^{-1}$. Παράγοντες που περιορίζουν την ηλεκτρονική κινητικότητα είναι η ποσότητα του υποστρώματος που χρησιμοποιείται αλλά και η ποιότητα του εκάστοτε γραφενίου [12].

CARBON ATOM



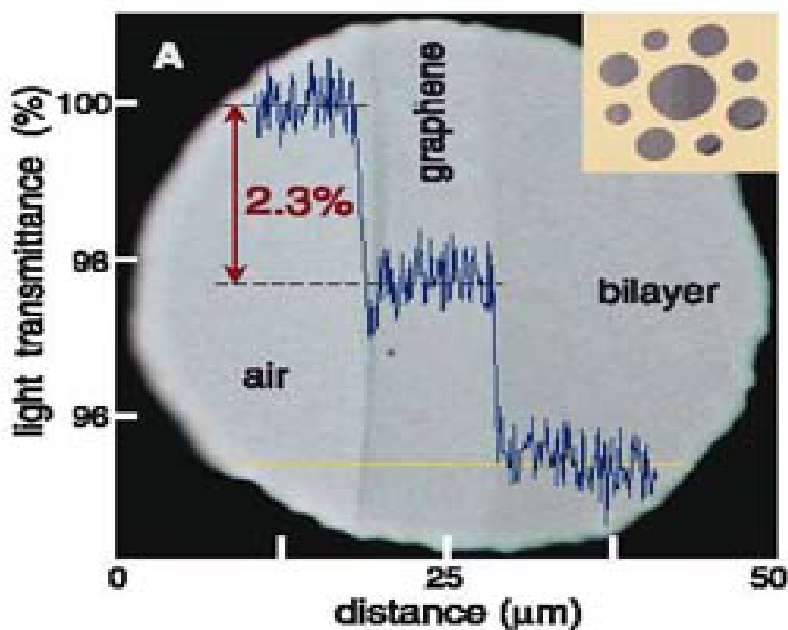
Σχήμα 2.2: Η δομή του ατόμου άνθρακα αποτελείται από πρωτόνια, νετρόνια και ηλεκτρόνια [24].

Μία ακόμη σημαντική ιδιότητα του γραφενίου είναι η μεγάλη μηχανική ανθεκτικότητα. Εξαιτίας των ισχυρών δεσμών άνθρακα που αναπτύσσει το γραφένιο χαρακτηρίζεται ως ένα από τα πιο ισχυρά υλικά που έχει εφευρεθεί τα τελευταία χρόνια με μεγάλη ανθεκτικότητα στον εφελκυσμό 130 gigapascals. Ακόμη δεν χαρακτηρίζεται μόνο για την ανθεκτικότητά του αλλά και για το βάρος του το οποίο είναι σχεδόν μηδαμινό 0,77 milli ανά τετραγωνικό μέτρο. Πιο συγκεκριμένα ένα φύλλο γραφενίου πάχους ενός ατόμου είναι ικανό να καλύψει ένα ολόκληρο γήπεδο ποδοσφαίρου με βάρος μόλις κάτω από 1 γραμμάριο [12]. Εκτός από την αντοχή, το γραφένιο διαθέτει και εντυπωσιακή ελαστικότητα, όσες φορές και να «τσαλακωθεί» επανέρχεται στην αρχική του μορφή χωρίς να παρατηρούνται σημαντικές υλικές επιπτώσεις.



Σχήμα 2.3: Εύκαμπτες οθόνες από γραφένιο [25].

Άλλη μία σημαντική ιδιότητα του γραφενίου είναι η ικανότητά του να απορροφάει ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό του λευκού φωτός (2,3%), πράγμα το οποίο το καθιστά αρκετά εντυπωσιακό εάν αναλογιστούμε ότι το ατομικό πάχος του είναι μόλις 1 άτομο. Αυτό το γεγονός οφείλεται στο ότι τα ηλεκτρόνια ανταποκρίνονται σαν φορείς φορτίου χωρίς μάζα με αρκετά υψηλή κινητικότητα. Σύμφωνα με έρευνες, ανακαλύφθηκε ότι αν προσθέσουμε ένα ακόμη φύλλο γραφενίου η απορροφούμενη ποσότητα λευκού φωτός διπλασιάζεται. Στον αντίποδα όμως έρχεται το γεγονός ότι όταν η απορρόφηση του φωτός φτάσει σε ένα υψηλό επίπεδο, δηλαδή στον κορεσμό τότε παρατηρείται σταδιακή μείωση της απορρόφησης του λευκού φωτός από το γραφένιο. Το φαινόμενο αυτό συναντάται κυρίως στον συγχρονισμό των σημερινών laser [12].



Σχήμα 2.4: Οπτική ιδιότητα απορρόφησης του γραφενίου και του στρώματός του [26].

Εφαρμογές του γραφενίου

2.4.1) Εφαρμογή του γραφενίου στη βιο-μηχανική

Μία από τις σημαντικότερες εφαρμογές που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το γραφένιο θα ήταν στον τομέα της βιο-μηχανικής. Σύμφωνα με έρευνες μέχρι το 2030 δεν θα συναντήσουμε το γραφένιο στις ιατρικές εφαρμογές καθώς δεν θα έχουμε προλάβει να σχηματίσουμε μία ολοκληρωμένη άποψη γύρω από την βιο-συμβατότητα του γραφενίου στον ιατρικό κλάδο. Πιο συγκεκριμένα το γραφένιο θα πρέπει να περάσει από πολυάριθμα στάδια και από πολλές κλινικές δοκιμές, οι οποίες χρειάζονται αρκετό χρόνο για να υλοποιηθούν με αποτέλεσμα όταν το γραφένιο χρησιμοποιηθεί στην ιατρική να μην δημιουργείται το αίσθημα αμφιβολίας και ανασφάλειας για την καταλληλότητά του. Ακόμη επειδή το γραφένιο είναι ικανό να επιφέρει μεγάλη επιφάνια με αρκετά υψηλή αγωγιμότητα και παράλληλα μεγάλη ανθεκτικότητα το καθιστά ως ένα απαραίτητο υλικό για εκμετάλλευση από πολυάριθμες εφαρμογές. Παράδειγμα αυτών των εφαρμογών μπορεί να είναι η ανάπτυξη γρήγορων και αποδοτικών βιοηλεκτρικών αισθητήρων, όπου θα αποκομίζουν δείγματα όπως τα επίπεδα αιμοσφαιρίνης, γλυκόζης καθώς θα είναι εφικτό με αυτό τον τρόπο η αναγνώριση της αλληλουχίας DNA του κάθε ατόμου. Ακόμη το γραφένιο θα ήταν εφικτό να χρησιμοποιηθεί και ως «τοξικό» υλικό για την κατασκευή ορισμένων φαρμάκων αλλά και για την δημιουργία ισχυρών αντιβίωσης καθώς ακόμη και για την καταπολέμηση του καρκίνου [12]. Το γραφένιο εξαιτίας της μοριακής σύνθεσής του και της δυνητικής βιο-συμβατότητάς του θα ήταν αρκετά ενδιαφέρον να το βλέπαμε να εφαρμόζεται και στην επεξεργασία ανοικοδόμησης των ανθρώπινων ιστών.

2.4.2) Εφαρμογή του γραφενίου στην ηλεκτρονική

Μία αξιοσημείωτη εφαρμογή του γραφενίου όπου θα δούμε στο κοντινό μέλλον θα είναι στον τομέα της ηλεκτρονικής. Πιο συγκεκριμένα θα αντικρίσουμε την εφαρμογή του σε οθόνες αφής υγρών κρυστάλλων (LCD) καθώς και σε οθόνες οργανικών φωτοδιόδων (OLEDs). Επιπλέον το γραφένιο επειδή είναι ένα αγωγίμο υλικό θα ήταν δυνατή η εφαρμογή του σε ηλεκτρικές συσκευές όπως είναι οι οθόνες για tablet και smartphones καθώς ακόμη σε τηλεοράσεις και σταθερούς υπολογιστές. Εξαιτίας της καλής ποιότητας και της μεγάλης ανθεκτικότητας του στην ευλυγισία το καθιστά ως το ιδανικό υλικό για την δημιουργία ηλεκτρονικού χαρτιού, διότι αποτελείται από ακτίνα κάμψης αρκετά ελάχιστη από τα 5-10mm που απαιτείται για την κατασκευή ρολών χαρτιού [12]. Πιο συγκεκριμένα το ηλεκτρονικό χαρτί είναι μία εντυπωσιακή εφεύρεση στον τομέα της ηλεκτρονικής καθώς αυτή η εν λόγω καινοτομία θα είναι ικανή να παρουσιάσει πληροφορίες αλλά και να τις ενημερώσει ταυτόχρονα σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή.



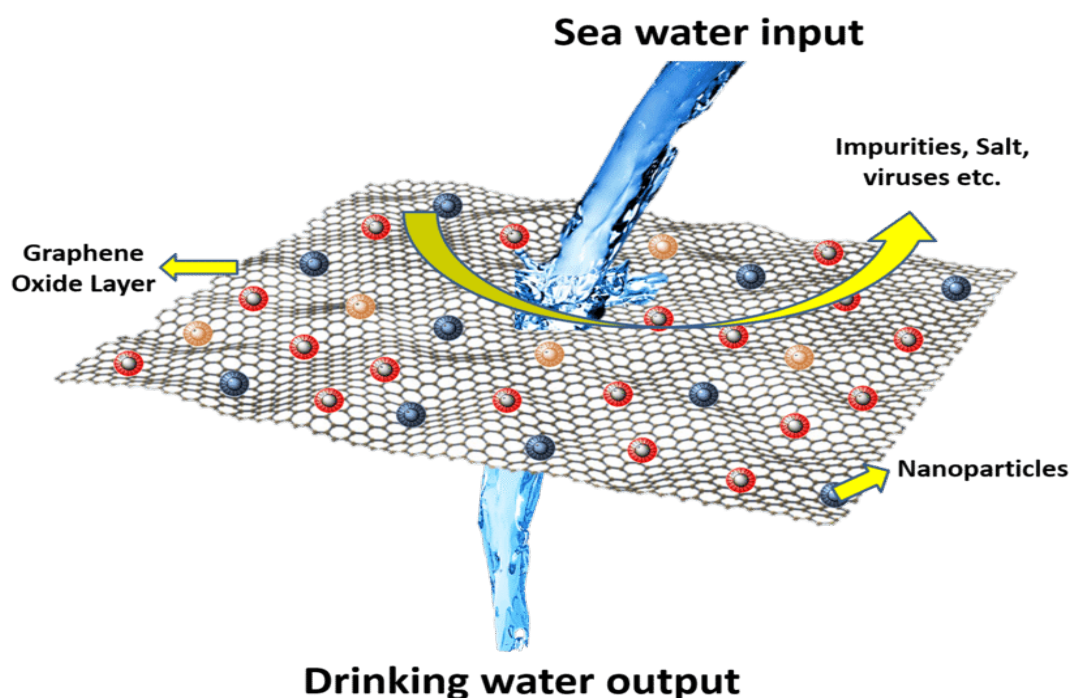
Σχήμα 2.5: Smartphone κατασκευασμένα από γραφένιο [27].



Σχήμα 2.6: Ηλεκτρονικό χαρτί κατασκευασμένο από γραφένιο [28].

2.4.3) Εφαρμογή του γραφενίου στο φιλτράρισμα ουσιών

Μία επιπλέον σημαντική εφαρμογή του γραφενίου είναι η χρήση του και ως φίλτρο καθώς επιτρέπει την διέλευση μόνο του νερού και όχι άλλων ουσιών. Το γεγονός αυτό χαρακτηρίζει το γραφένιο ως ένα υλικό το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν διαχωριστικό μεταξύ δύο διαφορετικών ουσιών (όπως νερού και άλατος). Παρόλα αυτά μία μικρή επιστημονική ομάδα κατασκεύασε φύλλα γραφενίου τα οποία αποτελούνται από μονά στρώματα και κατέχουν μέγεθος πόρου μικρότερο από 5nm. Στην σημερινή εποχή οι καινούργιες νανομεμβράνες διαθέτουν μεγέθη πόρων 30 έως 40 nm. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να σηματοδοτήσει την αρχή για την εφαρμογή του γραφενίου ως ένα νέο και καινοτόμο φίλτρο νερού, κρατώντας με αυτό τον τρόπο μακριά όχι μόνο τα άλατα αλλά και διάφορες βλαβερές για τον ανθρώπινο οργανισμό ουσίες που περιέχει το αφιλτράριστο νερό [12].



Σχήμα 2.7: Το θαλασσινό νερό μετατρέπεται σε φιλτραρισμένο χωρίς αλάτι νερό με την βοήθεια του φίλτρου-γραφενίου [29].

2.4.4) Εφαρμογή του γραφένιου στην κατασκευή αεροσκαφών

Όπως αναφέραμε σε προηγούμενες υποενότητες το γραφένιο χαρακτηρίζεται από εντυπωσιακές ιδιότητες οι οποίες είναι η ανθεκτικότητα, η σκληρότητα και το μηδαμινό βάρος. Οι επιστήμονες της αεροδιαστημικής επηρεασμένοι από αυτές τις ιδιότητες εισήγαγαν (ως πρώτο στάδιο) ίνες γραφένιου στην κατασκευή των αεροσκαφών. Πιο συγκεκριμένα, στο κοντινό μέλλον θα κατασκευαστεί από τους επιστήμονες ένα μείγμα υλικών όπου θα έχει ως κύριο υλικό το γραφένιο το οποίο θα πάρει την θέση του ατσάλινου σκελετού των αεροπλάνων, πετυχαίνοντας με αυτό τον τρόπο λιγότερο βάρος, ελάχιστα καύσιμα και μεγαλύτερη ακτίνα πτήσης. Ακόμη εξαιτίας της μεγάλης ηλεκτρικής αγωγιμότητας που διακατέχεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την πλήρη επιφανειακή κάλυψη του εκάστοτε αεροπλάνου αποφεύγοντας με αυτό τον τρόπο τις πιθανές ηλεκτρικές βλάβες σε αντίξοες καιρικές συνθήκες, όπως τους κεραυνούς. Με αυτή την επικάλυψη από γραφένιο θα είναι εφικτή η ενημέρωση του πιλοτηρίου (χρησιμοποιώντας κατάλληλους αισθητήρες) για την κατάσταση του σκελετού του αεροπλάνου αλλά και για τις σημαντικές μεταβολές των πιέσεων που θα παρατηρούνται κάτω από τα φτερά. Τέλος σημαντικό είναι να αναφέρουμε ότι το γραφένιο είναι σε μεγάλο βαθμό ανθεκτικό και ελαφρύτερο από το ανθρακόνημα [12].

2.4.5) Εφαρμογή του γραφένιου στα φωτοβολταϊκά

Επειδή το γραφένιο αποτελείται από ελάχιστα τμήματα απορρόφησης φωτός (δηλαδή 2.3% του λευκού φωτός), ενώ συγχρόνως αποδίδει μέγιστη κινητικότητα ηλεκτρονίων, θα ήταν ικανό να αντικαταστήσει το πυρίτιο ή το ΙΤΟ για την δημιουργία φωτοβολταϊκών κυττάρων. Πιο συγκεκριμένα εάν το γραφένιο αντικαταστήσει το πυρίτιο όσον αφορά την κατασκευή των φωτοβολταϊκών, θα μειώσει σημαντικά το κόστος κατασκευής καθώς το γραφένιο είναι αρκετά φθηνότερο από το πυρίτιο. Υλικά όπως το πυρίτιο όταν δημιουργούν το φως σε ηλεκτρισμό παρουσιάζουν αρκετές απώλειες καθώς μεγάλη ποσότητα ενέργειας απελευθερώνεται στο περιβάλλον με την μορφή θερμότητας, σε αντίθεση με το γραφένιο όπου δεν παρατηρούνται μεγάλες απώλειες. Επιπλέον το πυρίτιο μπορεί να παράγει ενέργεια από συγκεκριμένα μήκη κύματος του φωτός, ενώ το γραφένιο μπορεί να δημιουργήσει ενέργεια από όλα τα μήκη κύματος. Αυτό το γεγονός μπορεί στο κοντινό μέλλον να σηματοδοτήσει το τέλος του πυριτίου στην κατασκευή των φωτοβολταϊκών [12]. Τέλος εξαιτίας της ευλυγισίας και του μηδαμινού πάχους που διαθέτει το γραφένιο, θα μπορούσαμε να δούμε ευλύγιστα φωτοβολταϊκά επάνω σε ρούχα, για γρήγορη φόρτιση μικροσυσκευών όπως κινητά τηλέφωνα καθώς ακόμα και σε οικιακές κουρτίνες όπου θα προσέφεραν στο σπίτι δωρεάν ενέργεια.

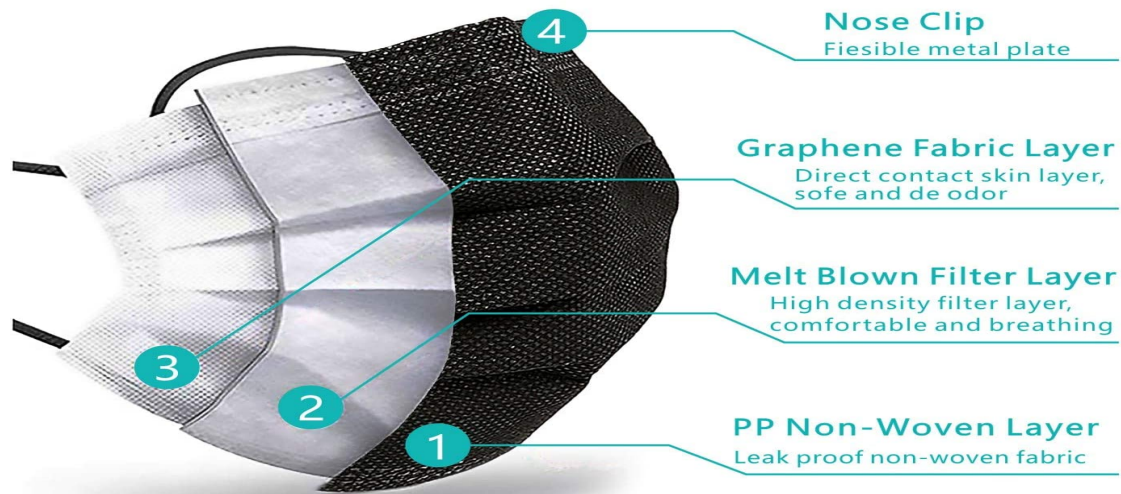


Σχήμα 2.8: Εφαρμογή του γραφενίου στα φωτοβολταϊκά πάνελ [30].

2.4.6) Η εφαρμογή του γραφενίου κατά του covid-19

Η πανδημία covid-19 έχει επηρεάσει σημαντικά την αγορά και την βιομηχανία γραφενίου. Πριν ακόμη κάνει την εμφάνισή της το γραφένιο είχε τραβήξει το ενδιαφέρον των επιστημόνων εξαιτίας των εκπληκτικών ιδιοτήτων του αλλά και της χρήσης του γραφενίου ως ένα αντιμικροβιακό υλικό. Μετά την εμφάνιση της πανδημίας covid-19 αρκετές εταιρίες άρχισαν να χρησιμοποιούν το γραφένιο για να κατασκευάσουν μάσκες προσώπου, γάντια μίας χρήσης, καθαριστικά, καθώς ακόμη και φίλτρα αέρα όπου θα εγκλωβίζουν τον covid-19. Ακόμη το γραφένιο σε συνδυασμό με την θερμότητα και το φως θα ήταν ικανό και για απολυμαντικό καθώς θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και σε υγρά απορρυπαντικά για την απομάκρυνση βλαβερών ουσιών από επιφάνειες και αντικείμενα [18].

3 LAYERS GRAPHENE PROTECTIVE MASK WITH NOSE BRIDGE



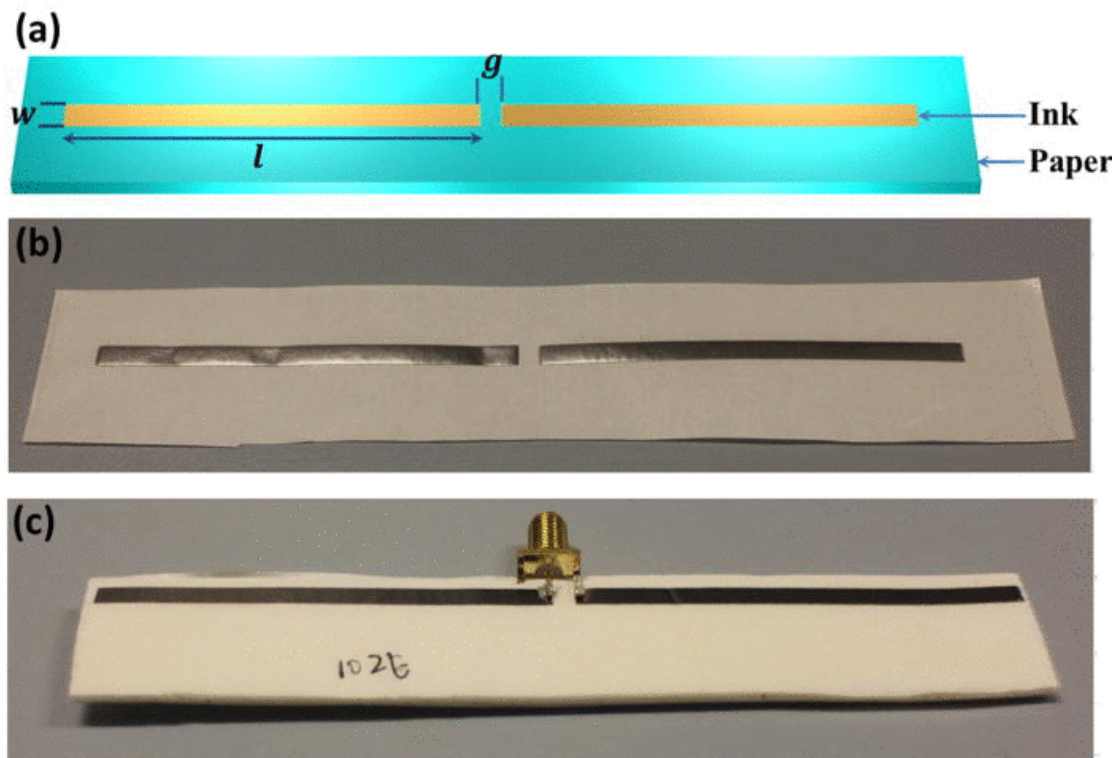
Σχήμα 2.9: Μάσκα αποτελούμενη από φίλτρο γραφενίου για την καταπολέμηση του covid-19 [31].

2.4.7) Εφαρμογή του γραφενίου σε κεραία ραδιοσυχνότητας

Το τελευταίο χρονικό διάστημα κυκλοφορεί στο εμπόριο στυλό με το οποίο μπορούμε να σχεδιάσουμε κυκλώματα. Το στυλό αυτό αποτελείται από αγωγίμο μελάνι, δηλαδή διάλυμα μετάλλου που στεγνώνει γρήγορα. Το πρόβλημα με αυτά τα στυλό είναι ότι τα μελάνια έχουν υψηλό κόστος. Ένα αρκετά οικονομικό υλικό για την δημιουργία αγωγίμου μελανιού είναι το γραφένιο.

Ερευνητές υλοποίησαν την παραπάνω ιδέα και εκτύπωσαν σε χαρτί μία κεραία χρησιμοποιώντας ως μελάνι το γραφένιο. Η κεραία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία των RFID (Radio Frequency Identification), διαμέσου της οποίας πραγματοποιείται αυτόματη αναγνώριση αντικειμένων. Επιπλέον η κεραία από γραφένιο είναι ευλύγιστη και μπορεί να κατασκευαστεί μαζικά με μικρό κόστος. Το μήκος της κεραίας ανέρχεται στα 14cm και το πλάτος στα 3,5mm.

Στην σημερινή εποχή οι περισσότερες ετικέτες ραδιοσυχνότητας είναι κατασκευασμένες από αλουμίνιο και χαλκό, υλικά που έχουν υψηλό κόστος σε σχέση με το χαρτί. Σε αντίθεση με τις μελλοντικές ετικέτες από γραφένιο όπου θα έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής και περισσότερο ανταγωνισμό στο εμπόριο [37].



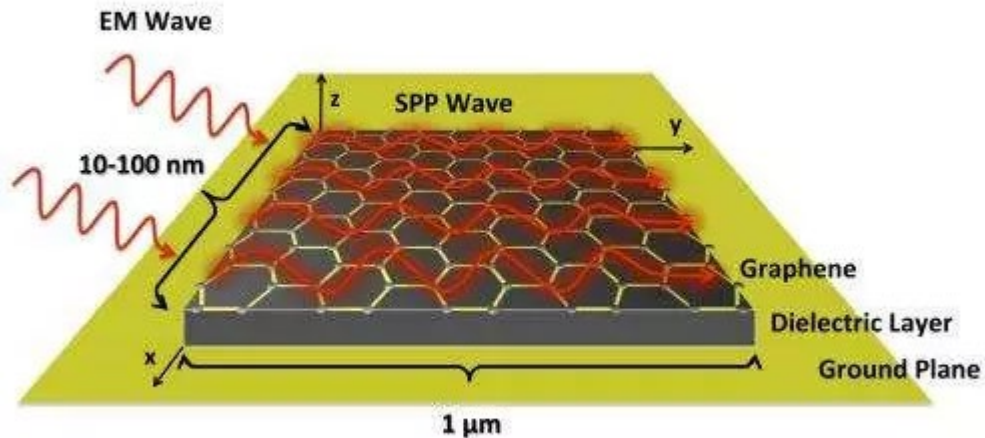
Σχήμα 2.10: Κεραία ραδιοσυχνοτήτων από γραφένιο [39].

2.4.8) Εφαρμογή του γραφενίου σε νανο-κεραίες

Κεραίες κατασκευασμένες από απλά υλικά όπως το μέταλλο και το χαλκό, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επικοινωνία μεταξύ νανο-μηχανών χαμηλής κατανάλωσης. Έτσι οι ερευνητές εκμεταλλευόμενοι τις ηλεκτρονικές ιδιότητες του γραφενίου υπολογίζουν ότι μπορούν να επιλύσουν το παραπάνω πρόβλημα.

Το γραφένιο θα ήταν ικανό να κατασκευάσει ένα διαφορετικό από το συνηθισμένο τύπο ηλεκτρονικών επιφανειακών κυμάτων, όπου θα αντικαθιστούσε εύκολα την δουλειά των αρκετά μεγάλων κεραιών με αυτές των νανο-κεραιών, οι οποίες αποτελούνται από πολύ μικρό πλάτος μόλις 10-11 νανόμετρα. Η ακτινοβολία των νανο-κεραιών περιορίζεται σε αρκετά χαμηλότερες συχνότητες σε σύγκριση με τις απλές μεταλλικές κεραιές του ίδιου μεγέθους. Επιπλέον οι νανο-κεραίες θα λειτουργούν σε χαμηλές συχνότητες terahertz (από 0,1 έως και 10 terahertz), αντί για 150 terahertz που ενδείκνυται από τις απλές κεραιές χαλκού σε νανο-μεγέθη.

Τέλος η επιστημονική κοινότητα υπολογίζει ότι εάν κατασκευαστή αυτή η κεραία, θα μειωθεί αρκετά η συχνότητα κατά δύο τάξεις μεγέθους και οι ανάγκες σε ενέργεια κατά τέσσερις τάξεις μεγέθους [38].



Σχήμα 2.11: Νανο-κεραία από γραφένιο [38].

2.5 Πηγή ενέργειας

Παρόλο που παρατηρείται μεγάλη πρόοδος τα τελευταία χρόνια στο κομμάτι της ηλεκτρονικής, η αποθήκευση ενέργειας σε μπαταρίες και κυρίως σε πυκνωτές δεν έχει προχωρήσει τεχνολογικά με αποτέλεσμα να φαντάζει ένα άλυτο πρόβλημα. Ο μεγάλος χρόνος πλήρης φόρτισης μίας μπαταρίας καθιστά άλυτο το παραπάνω πρόβλημα. Οι πυκνωτές σε αντίθεση με τις μπαταρίες φορτίζουν πλήρως σε ελάχιστο χρονικό διάστημα αλλά δεν διακρίνονται για την απόδοσή τους καθώς είναι αρκετά περιορισμένη. Μία σκέψη των επιστημόνων είναι να κατασκευάσουν μέσα αποθήκευσης όπου σε μικρό χρονικό διάστημα θα πραγματοποιείται πλήρης φόρτιση με μεγάλη απόδοση ενέργειας και αντοχή στο χρόνο. Πιο συγκεκριμένα οι επιστήμονες θα προσπαθήσουν να τοποθετήσουν μία ποσότητα γραφενίου στις μπαταρίες λιθίου με σκοπό να πετύχουν μεγαλύτερη αποθήκευση ενέργειας από τις κοινές μπαταρίες καθώς και φόρτιση σε ελάχιστο χρόνο. Μία ακόμη εφαρμογή αυτών των μπαταριών λιθίου με γραφένιο θα μπορούσαν να ήταν στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, όπου εξαιτίας των εντυπωσιακών ιδιοτήτων τους θα μείωναν δραστικά τον χρόνο αναμονής για την φόρτιση του αυτοκινήτου. Επιπλέον με αυτές τις μπαταρίες θα περιορίσουν το βάρος του αυτοκινήτου και θα εξοικονομήσουν περισσότερο χώρο εξαιτίας της λεπτότητας και του μικρού μεγέθους των μπαταριών. Τέλος το γραφένιο ερευνάται να αξιοποιηθεί και για την δημιουργία υπερ-πυκνωτών όπου θα έχουν την δυνατότητα να φορτίζουν τάχιστα και να συγκρατούν τεράστια ποσότητα ενέργειας. Αυτοί οι υπερ-πυκνωτές θα μπορούσαν να βρουν εφαρμογή στο μέλλον σε κινητά τηλέφωνα, power bank και tablet [13].

THE GRAPHENE AGE



Σχήμα 2.12: Αριστερά διακρίνουμε μία μελλοντική μπαταρία από γραφένιο για κινητά τηλέφωνα, ενώ από δεξιά διακρίνουμε μια σημερινή μπαταρία λιθίου επίσης για κινητά τηλέφωνα [32].

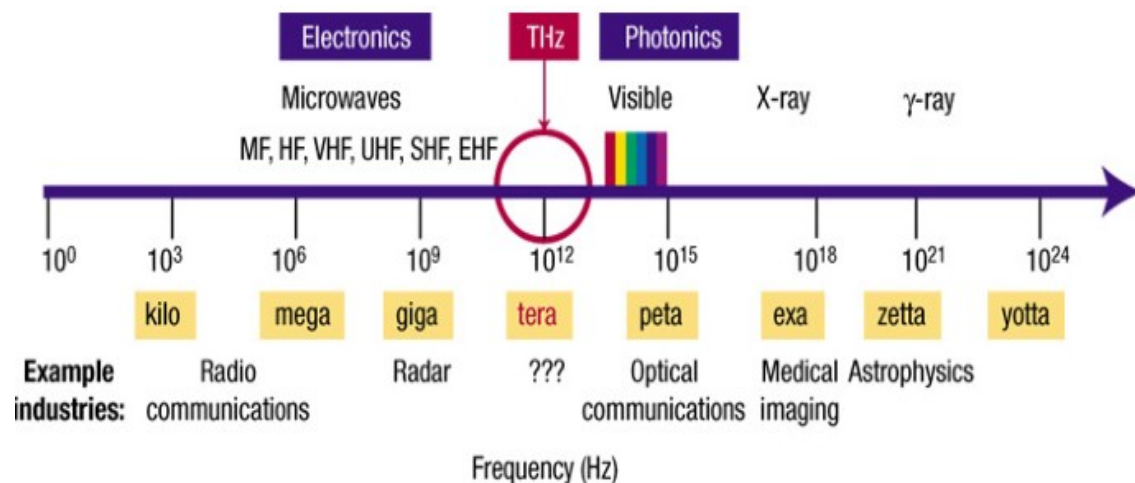


Σχήμα 2.13: Power bank με μπαταρία γραφενίου [33].

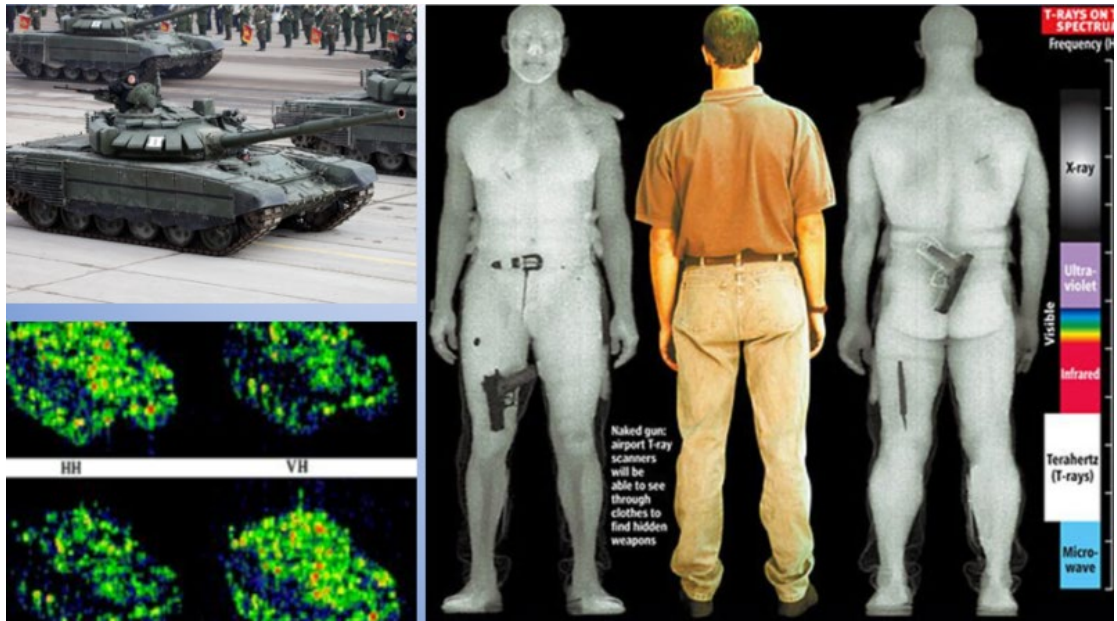
2.6 Η συχνοτική περιοχή του γραφενίου THz

Το τελευταίο χρονικό διάστημα οι επιστήμονες άρχισαν να ασχολούνται σε μεγάλο βαθμό με τη συχνοτική περιοχή THz. Μέχρι και σήμερα οι επιστήμονες της ηλεκτρονικής και όχι μόνο, δεν έχουν μελετήσει εξ ολοκλήρου το φάσμα συχνοτήτων από 300 GHz μέχρι και 30 THz. Πιο συγκεκριμένα δεν μπορούν να κατασκευάσουν laser σε THz συχνότητες καθώς οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι αρκετά υψηλές. Το γεγονός αυτό γίνεται διότι οι πηγές THz έχουν την ικανότητα να παράγουν milliwatt ενέργειας.

Το φάσμα συχνοτήτων THz συναντάται στην 10^{12} συχνότητα καθώς πριν από αυτή εμφανίζεται η kilo 10^3 , mega 10^6 , giga 10^9 και μετά από αυτή η peta 10^{15} , exa 10^{18} , zetta 10^{21} και η yotta 10^{24} . Μερικά παραδείγματα εφαρμογής των THz συχνοτήτων συναντώνται στον κλάδο της ιατρικής, στις τηλεπικοινωνίες, στην βιολογία καθώς και στα ραντάρ του στρατού, για τον εντοπισμό όπλων και οχημάτων επίθεσης [12].



Σχήμα 2.14: Φάσμα terahertz (THz) συχνοτήτων [34].



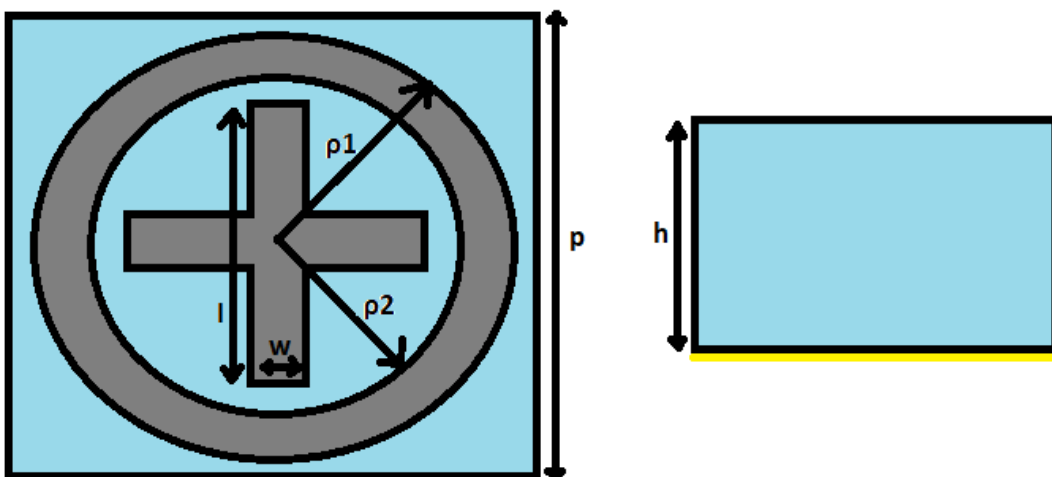
Σχήμα 2.15: Χρήση της terahertz (THz) ακτινοβολίας για τον εντοπισμό όπλων και στρατιωτικών οχημάτων [35].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΟΥ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΗ

3.1 Εισαγωγή

Οι απορροφητές ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων THz έχουν συνήθως εφαρμογή σε πολιτικούς και στρατιωτικούς τομείς. Αυτός εξάλλου είναι και ο κύριος λόγος για τον οποίο έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες παγκοσμίως για την ενίσχυση και απόδοση της λειτουργίας των απορροφητών. Ένα μειονέκτημα των απορροφητών στα εγκάρσια ηλεκτρικά και εγκάρσια μαγνητικά κύματα είναι ότι παρουσιάζουν απόκριση σε διαφορετική ζώνη συχνοτήτων. Ακόμη ένα συγκεκριμένο είδος εφαρμογής απαιτεί από τον απορροφητή η απόκρισή του να είναι στην ίδια ζώνη συχνοτήτων για εγκάρσια ηλεκτρικά, μαγνητικά κύματα με μεγάλη κλίση και γωνία πόλωσης του σήματος που εισέρχεται. Σε αυτό το κεφάλαιο θα συναντήσουμε ένα απορροφητή THz που στηρίζεται σε μία μεταεπιφάνεια με αρκετά βελτιωμένη λειτουργικότητα. Όπως θα δείξουμε, το κλασματικό εύρος ζώνης έχει τιμή 91,64% με κεντρική συχνότητα 1,9 THz και με απόδοση απορροφητικότητας κοντά στο 95%. Ακόμη για κλίσεις εισερχόμενων κυμάτων μέχρι και 60 μοίρες θα παρατηρήσουμε ότι η απορροφητικότητα κοντεύει περίπου το 80%.

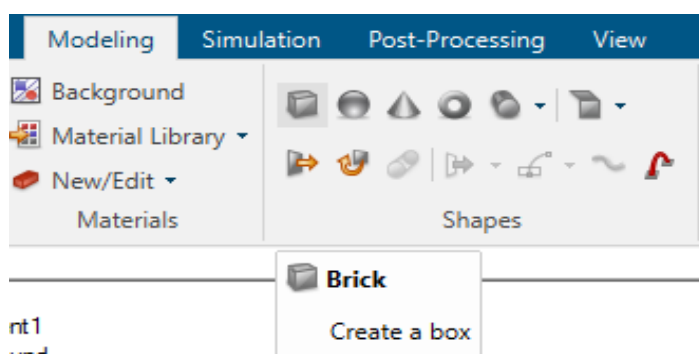
Η γεωμετρία που υλοποιήσαμε σε αυτή την ενότητα αποτελείται από δύο κύκλους με ακτίνες $\rho_1 = 9\mu m$ και $\rho_2 = 6\mu m$ και ένα σχήμα σταυρού με ύψος $l=11\mu m$ και πλάτος $w=2\mu m$ τα οποία αποτελούνται από ένα φιλμ γραφενίου. Τα παραπάνω σχέδια γραφενίου είναι τοποθετημένα σε υπόστρωμα από διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2), με πάχος $h=25,4\mu m$, διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r = 2,2$ και εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta = 0,001$. Τέλος η διάταξη τερματίζεται σε ένα μεταλλικό ανακλαστικό υπόστρωμα τον χρυσό, καθώς λειτουργεί και ως ηλεκτρόδιο για την πόλωση του στρώματος του γραφενίου με πάχος $0,5\mu m$ και αγωγιμότητα $4,56 \cdot 10^7 s/m$. Ακολουθεί η σχεδίαση και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο CST λογισμικό [14].



Σχήμα 3.1: Η γεωμετρία και οι διαστάσεις του ευρυζωνικού απορροφητή.

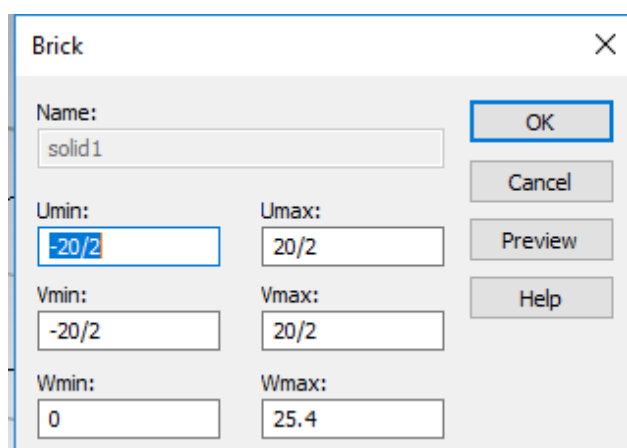
3.2 Σχεδίαση της διάταξης στο λογισμικό

Για τη διενέργεια των προσομοιώσεων χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα CST. Ανοίγουμε το πρόγραμμα και επιλέγουμε από το CST studio suite την κατηγορία periodic Structures και έπειτα την κατηγορία metamaterial-full structure (εφόσον θα ασχοληθούμε με μεταϋλικά). Μετά επιλέγουμε time domain και προσδιορίζουμε στην επόμενη ιδιότητα το συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε, δηλαδή από 0 έως 4 THz. Τέλος πιέζουμε το εικονίδιο finish και ξεκινάμε την δημιουργία της πρώτης διάταξης μας καθώς επιλέξουμε από την κατηγορία modeling το εικονίδιο brick.



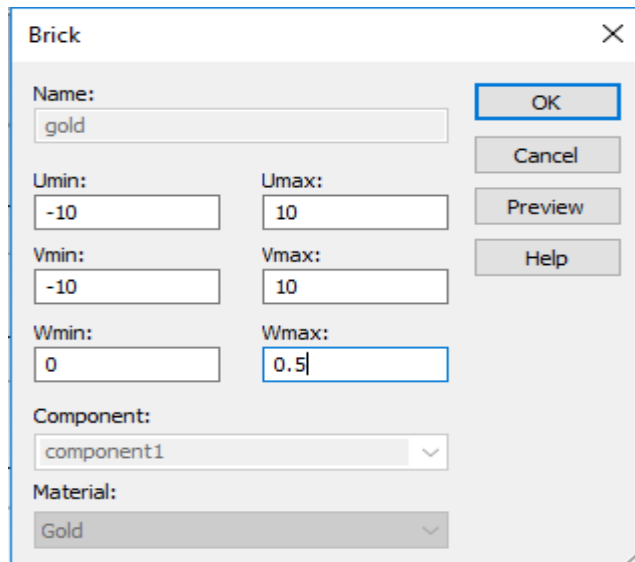
Σχήμα 3.2.1: Δημιουργία του Brick box.

Στην συνέχεια αφού δημιουργήσουμε ένα brick box τοποθετούμε στα κατάλληλα πεδία όνομα, μήκος, πλάτος, ύψος και το υλικό που χρειαζόμαστε για την κατασκευή της πρώτης προσομοίωσης. Στην συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήσαμε ως βάση το διοξείδιο του πυριτίου με πλάτος 25,4μm και μήκος, ύψος $p=20\mu\text{m}$.



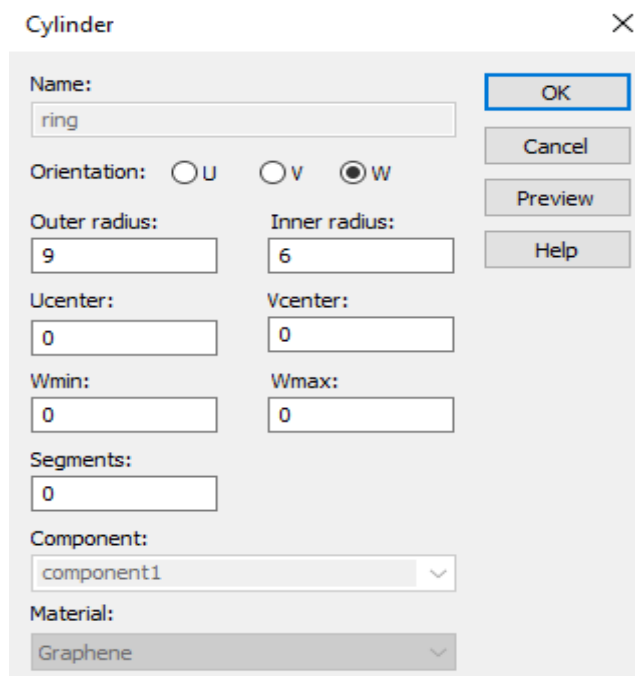
Σχήμα 3.2.2: Οι τιμές των διαστάσεων για brick box.

Επιπλέον για την σχεδίαση της πίσω πλευράς της βάσης, γνωστή και ως "καθρέπτη" πλευρά χρησιμοποιήσαμε ως υλικό τον χρυσό με μήκος και ύψος 20μm και πάχος 0,5 μm.



Σχήμα 3.2.3: Οι τιμές των διαστάσεων για την σχεδίαση του καθρέπτη χρυσού.

Ακόμη για την σχεδίαση της μπροστινής όψης της διάταξης η οποία αποτελείται από ένα εξωτερικό κύκλο και ένα εσωτερικό σχήμα σε σχέδιο σταυρού χρησιμοποιήθηκε το υλικό γραφένιο. Ο εξωτερικός κύκλος αποτελείται από δύο μικρότερους κύκλους με ακτίνες $\rho_1=9\mu\text{m}$ και $\rho_2=6\mu\text{m}$ και πάχος $0\mu\text{m}$. Το εσωτερικό σχήμα σταυρού αποτελείται από δύο ίδιους άξονες με ύψος $11\mu\text{m}$, πλάτος $2\mu\text{m}$ και πάχος $0\mu\text{m}$, καθώς είναι αντεστραμμένος ο ένας από τους δύο κατά 90 μοίρες.



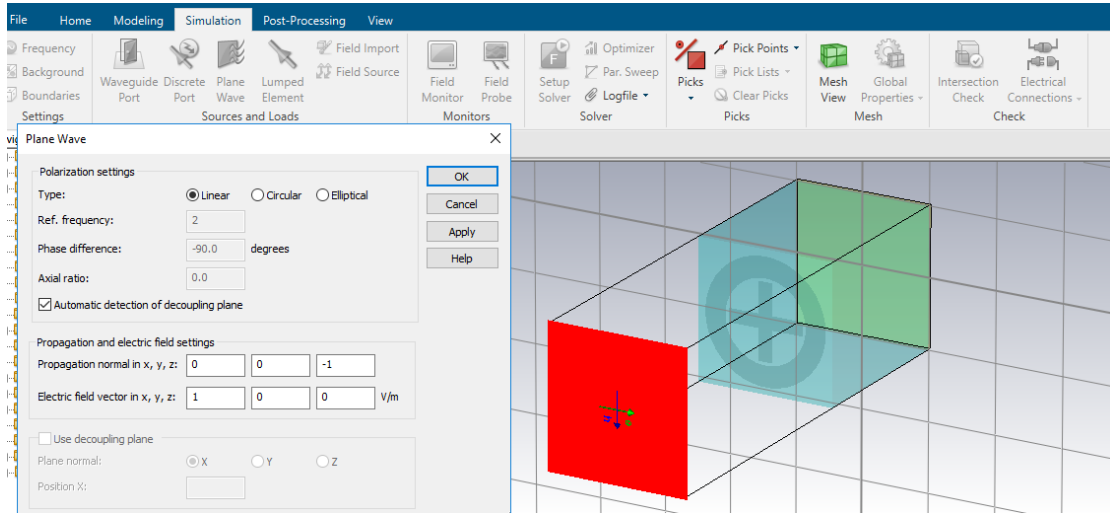
Σχήμα 3.2.4: Οι τιμές για τον κύκλο από γραφένιο.

Σχήμα 3.2.5: Οι τιμές για τον σταυρό από γραφένιο.

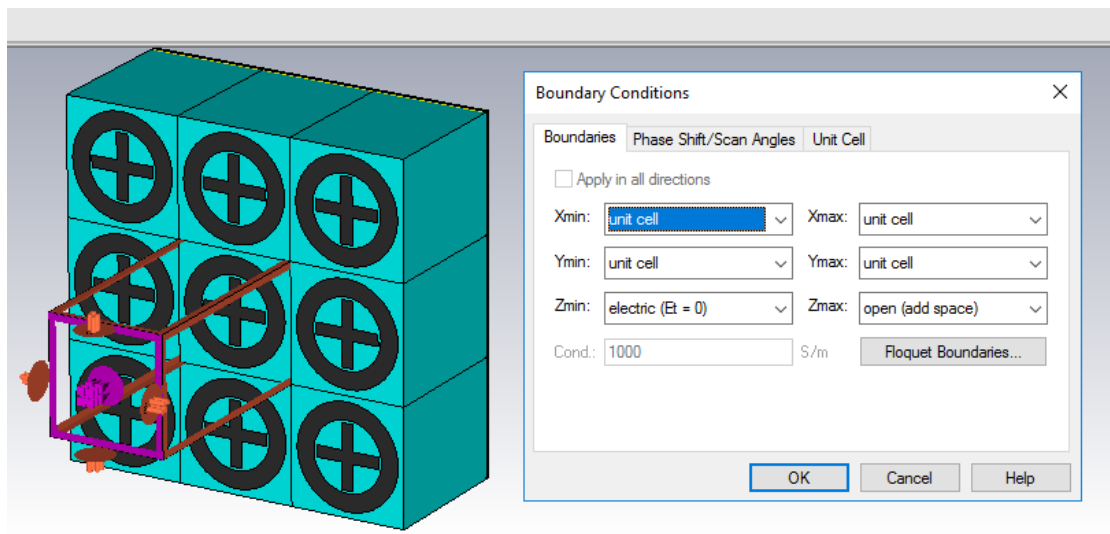
Για να εισάγουμε το γραφένιο στο project μας επιλέγουμε από το μενού τη κατηγορία macros, έπειτα material, και μετά create grapheme material for optical applications. Αφού κάνουμε τις παραπάνω ενέργειες εμφανίζεται το σχήμα 3.2.6 και τοποθετούμε τις κατάλληλες τιμές στα παρακάτω πεδία καθώς το γραφένιο πρέπει να χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένες ιδιότητες, δηλαδή Temperature 300K, Chemical potential 0.8eV, Relaxation time 0.2ps.

Σχήμα 3.2.6: Οι κατάλληλες ιδιότητες για την δημιουργία του γραφενίου στο cst λογισμικό.

Τέλος αφού έχουμε ολοκληρώσει την προετοιμασία μας ανατρέχουμε στο κεντρικό μενού του προγράμματος και πραγματοποιούμε τις τελευταίες αλλαγές στο plane wave για την εισαγωγή του προσπίπτοντος κύματος, τοποθετώντας την τιμή -1 στον άξονα z καθορίζοντας με αυτό τον τρόπο την κατεύθυνση, και στην κατηγορία boundaries επιλέγουμε το Zmin:electric ($E_t=0$) για τις μεταεπιφάνειες. Έπειτα επιλέγουμε το εικονίδιο start simulation για την εκκίνηση του προγράμματος.

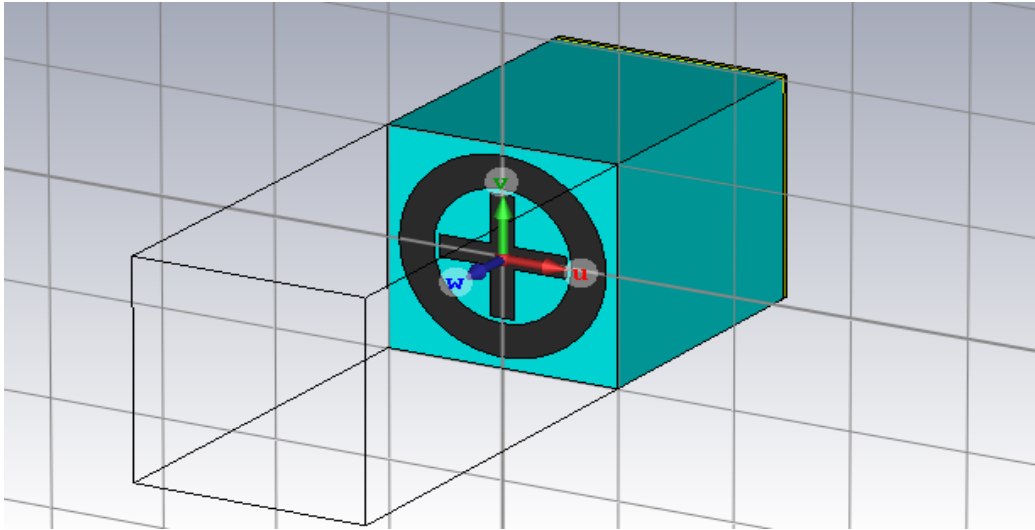


Σχήμα 3.2.7: Προσδιορισμός του προσπίπτοντος κύματος.

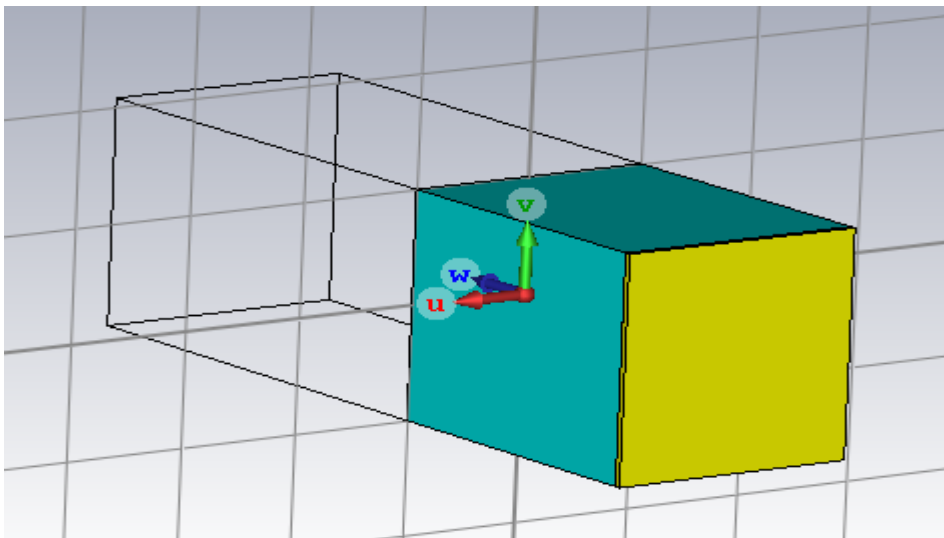


Σχήμα 3.2.8: Συνοριακές συνθήκες.

Στις επόμενες δύο εικόνες παρατηρούμε την ολοκληρωμένη υλοποίηση της διάταξης, δηλαδή την πρόσοψη και την πίσω όψη.



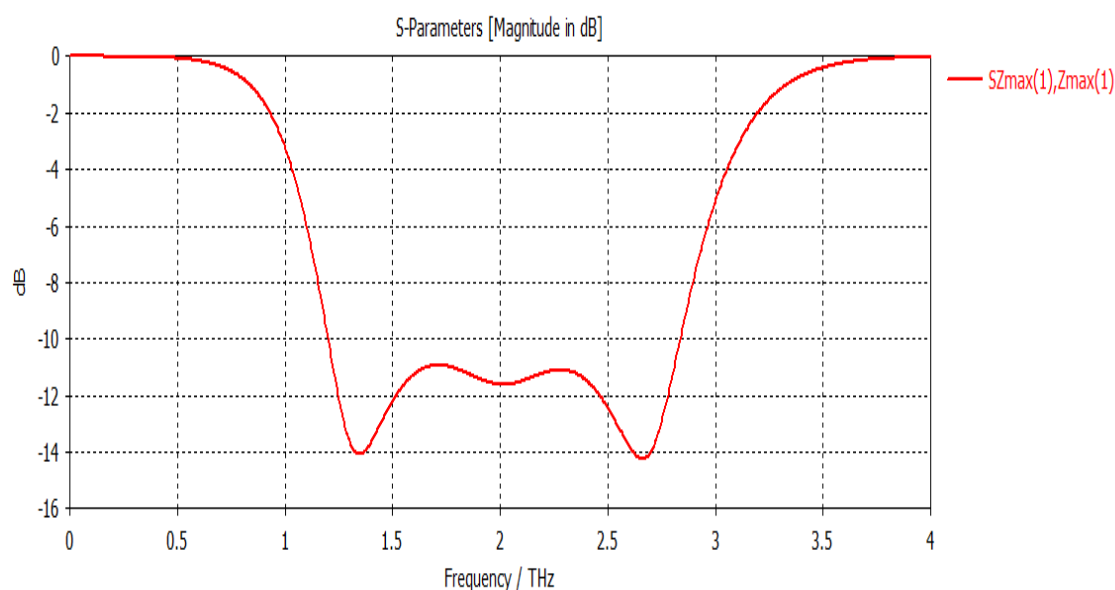
Σχήμα 3.2.9: Η ολοκληρωμένη 3D πρόσοψη.



Σχήμα 3.2.10: Η πίσω 3D όψη.

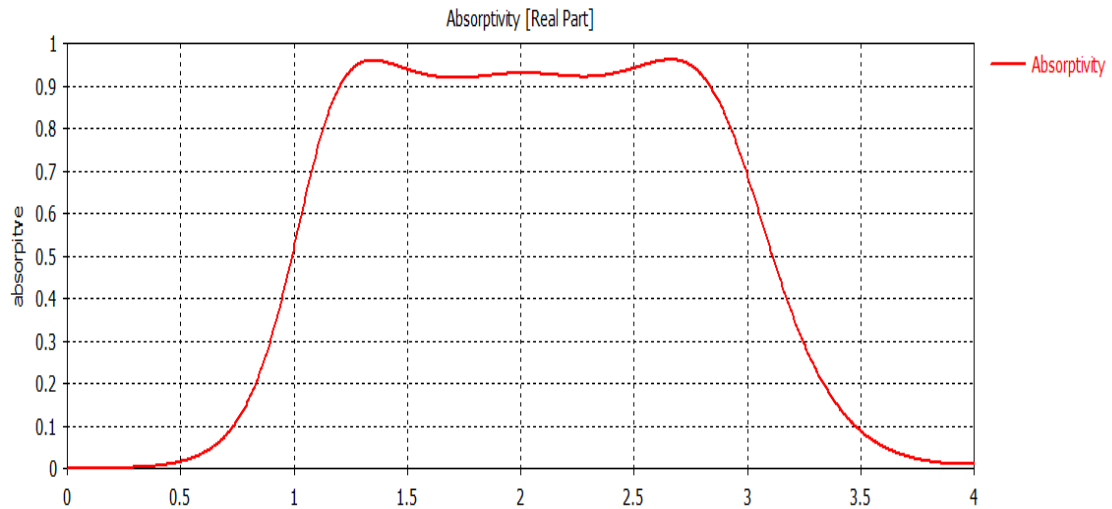
3.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Η προσομοίωση που ακολουθεί χρησιμοποιεί ως κύριο υλικό για τα αποτελέσματα το γραφένιο και υλικό καθρέπτη το χρυσό. Στα αποτελέσματα της προσομοίωσης θα παρατηρήσουμε την απορροφητικότητα του υλικού σε ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων THz δηλαδή από 0 έως 4 THz. Στην συνέχεια θα παρουσιάσουμε την κατανομή του επιφανειακού ρεύματος στο επάνω και κάτω στρώμα της διάταξης για συγκεκριμένο αριθμό συχνοτήτων όπου έχουμε επιλέξει στο πρόγραμμα. Ακόμη θα διακρίνουμε την απορροφητικότητα σε συχνότητες από 0 έως 4 THz για γωνίες πρόσπτωσης από 0 έως και 45 μοίρες. Τέλος θα δούμε και τα σχεδιαγράμματα απορρόφησης-συχνότητας με διάφορες τιμές στο ρυθμό σκέδασης, καθώς και διαφορετικό χημικό δυναμικό της μονοστρωματικής μεμβράνης γραφενίου.



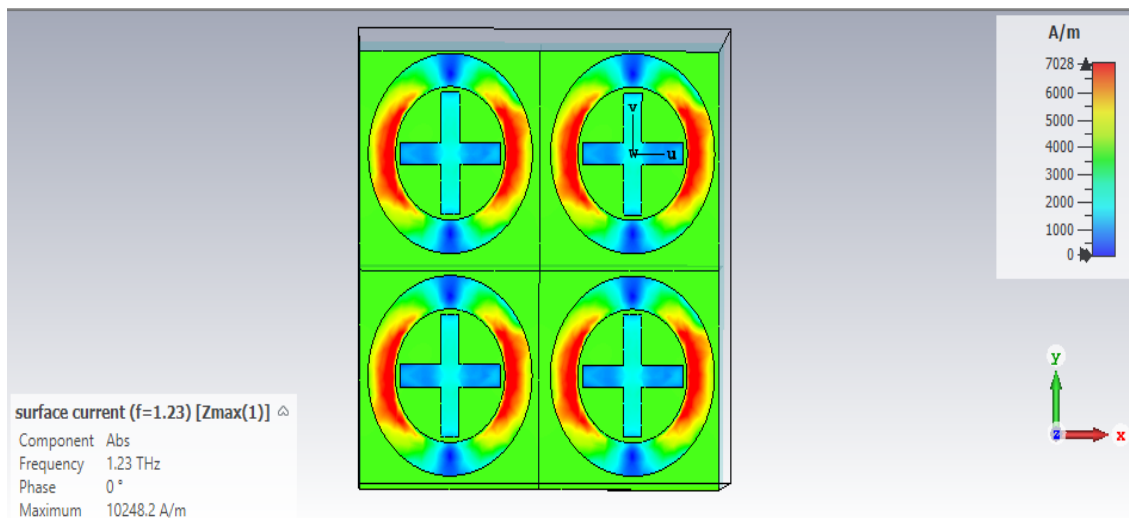
Σχήμα 3.3.1: S11-Parameters σχεδιάγραμμα db-THz.

Στο σχήμα 3.3.1 παρατηρούμε τα τοπικά ελάχιστα του συντελεστή ανάκλασης S11 τα οποία είναι: $f_1=1,23$, $f_2=2,65$ THz. Είναι οι τιμές τις οποίες θα τοποθετήσουμε στο field monitor για να πάρουμε τις κατάλληλες μετρήσεις.

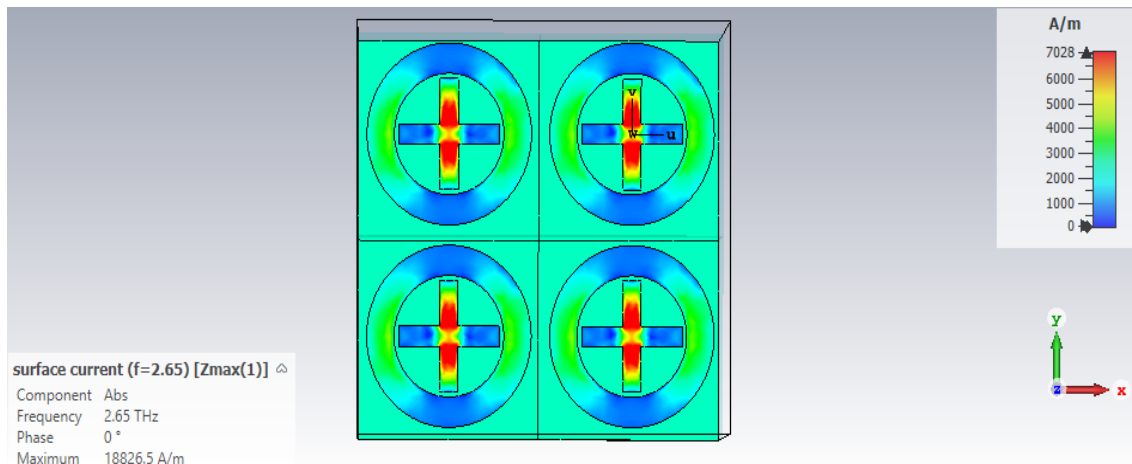


Σχήμα 3.3.2: Απορρόφηση (Absorptivity) του γραφενίου σε συχνότητα THz.

Στο σχήμα 3.3.2 βλέπουμε την μέγιστη απορρόφηση στα σημεία 1,23 και 2,65 THz. Στην αρχή η καμπύλη απορρόφησης ξεκινάει από 0 THz στην συνέχεια παρουσιάζει μεγάλη άνοδο μέχρι το 1,23 THz, μετά ελαττώνεται ελάχιστα μέχρι το επόμενο μέγιστο σημείο 2,65 THz. Αμέσως μετά βλέπουμε απότομη πτώση μέχρι τα 4 THz όπου έχουμε επιτρέψει στην αρχική κατάσταση το 0. Τέλος το συχνοτικό εύρος συναντάται μεταξύ των δύο μέγιστων τιμών δηλαδή από 1,23 έως 2,65 THz.

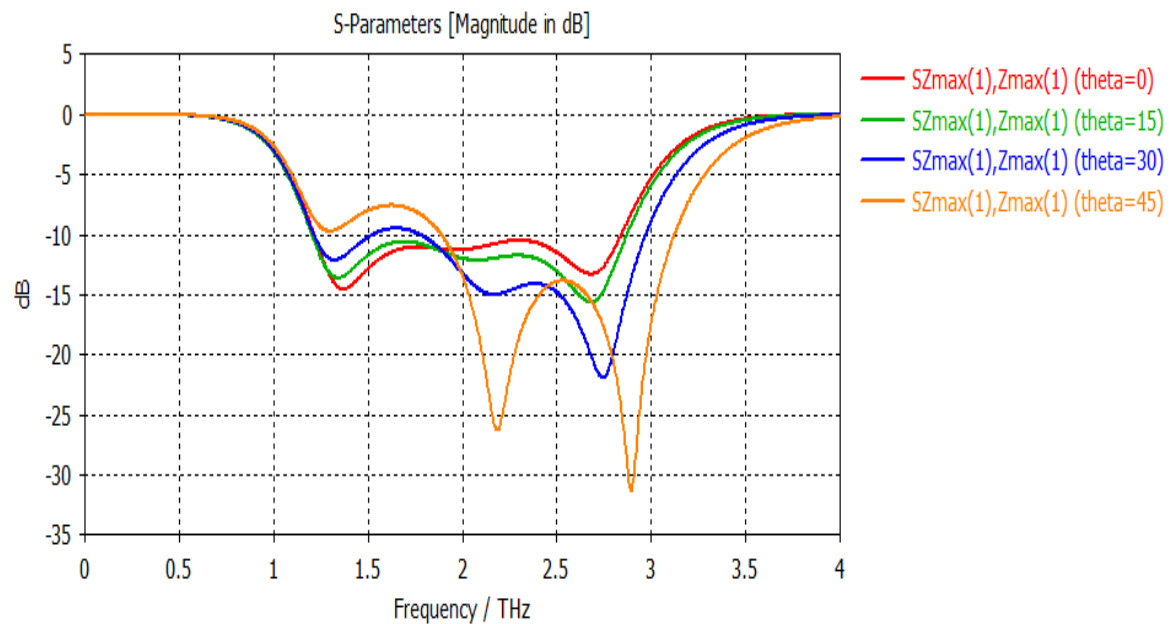


Σχήμα 3.3.3: Κατανομή επιφανειακού ρεύματος για τη συχνότητα $f=1,23$ THz.

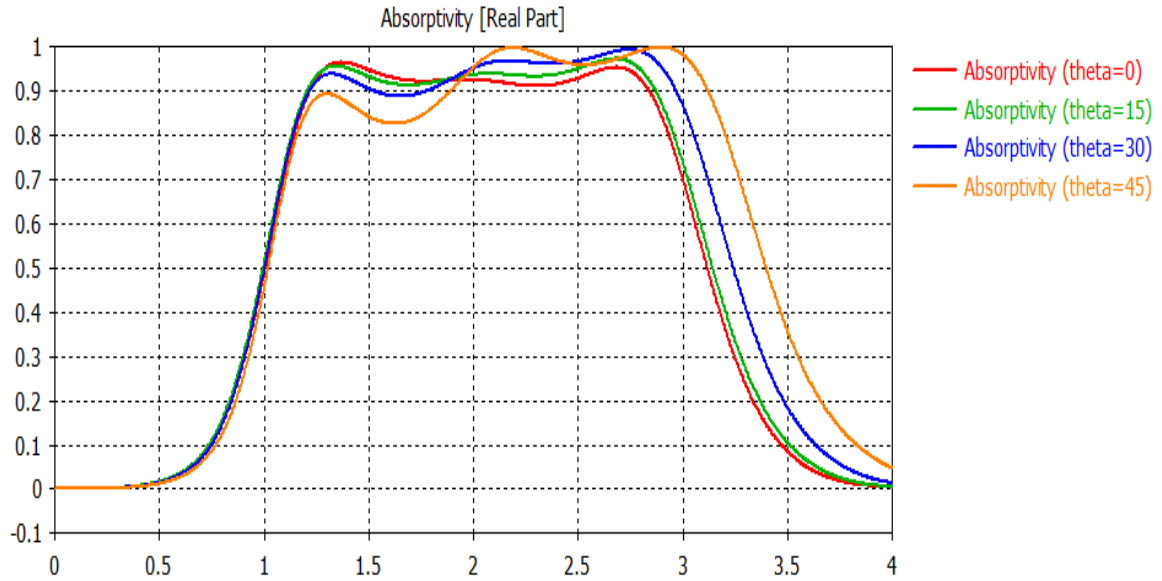


Σχήμα 3.3.4: Κατανομή επιφανειακού ρεύματος για συχνότητα $f=2,65$ THz.

Στα παραπάνω σχήματα παρατηρούμε πώς μεταβάλλεται η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου επάνω στην επιφάνεια του απορροφητή για τις συχνότητες 1,23 και 2,65 THz [11]. Στο σχήμα 3.3.3 το επιφανειακό ρεύμα για συχνότητα 1,23 THz παρατηρούμε ότι είναι μέγιστο στην αριστερή και δεξιά πλευρά του κύκλου. Σε αντίθεση με το σχήμα 3.3.4 όπου το επιφανειακό ρεύμα με συχνότητα 2,65 THz είναι μέγιστο στο κέντρο του σταυρού και ελάχιστο στην αριστερή και δεξιά πλευρά του κύκλου.

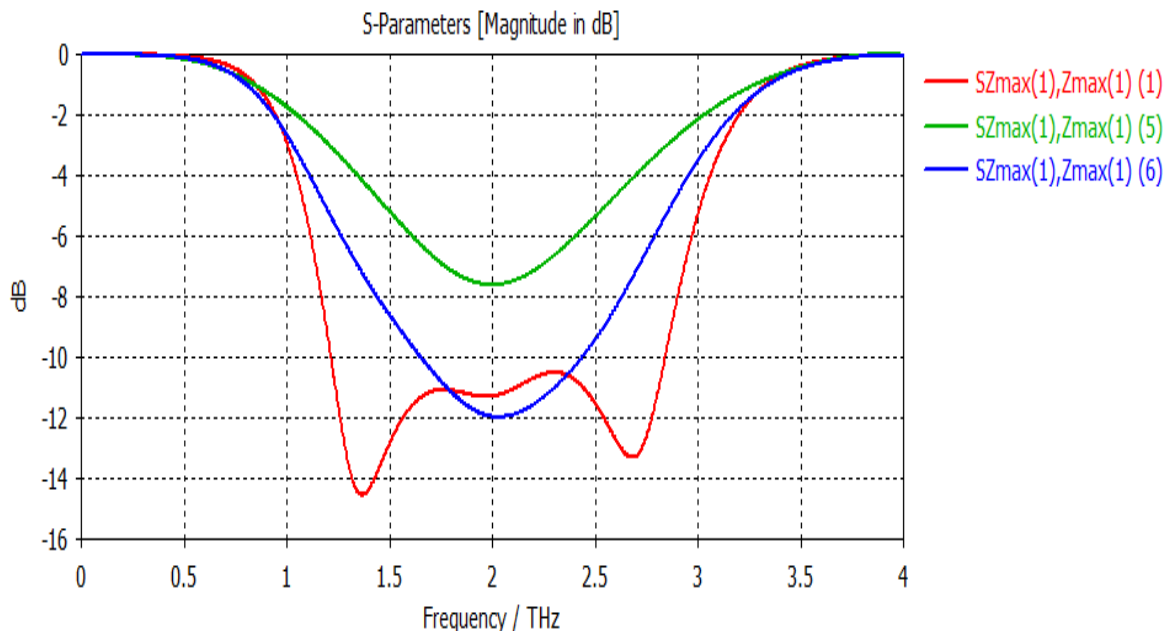


Σχήμα 3.3.5: S-parameters σε γωνία πρόσπτωσης από 0 έως 45 μοίρες.

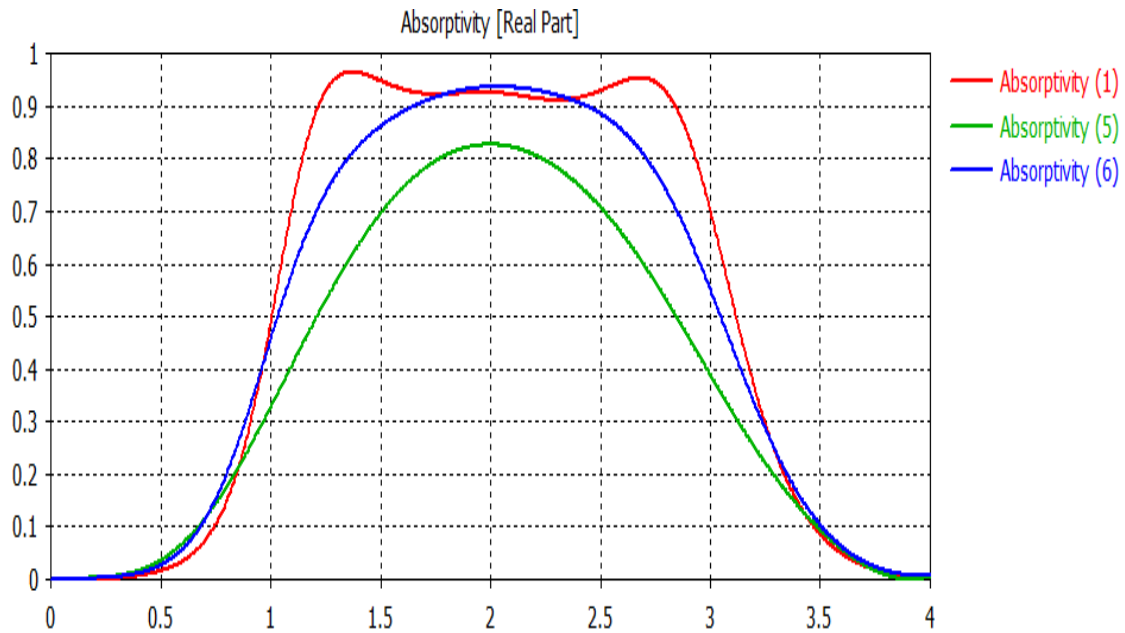


Σχήμα 3.3.6: Απορρόφηση με συχνότητα THz σε ευρεία γωνία πρόσπτωσης από 0 έως 45 μοίρες.

Στο σχήμα 3.3.5 παρατηρούμε την S11 παράμετρο σε γωνία πρόσπτωσης για τις τιμές 0, 15, 30, 45 μοίρες. Στις 45 μοίρες βλέπουμε την καμπύλη με συχνότητα 3,9 THz. Στο σχήμα 3.3.6 παρατηρούμε ότι ο απορροφητής παρουσιάζει μια μεγάλη ανοχή στην μεταβολή της γωνίας πρόσπτωσης και επιπλέον πετυχαίνει ικανοποιητική απορρόφηση ακόμα και στις 45 μοίρες. Επομένως, η απορροφητικότητα παραμένει σταθερή για γωνία πόλωσης από 0 έως 45 μοίρες, καθιστώντας με αυτό τον τρόπο την διάταξη ως μη ευαίσθητο απορροφητή.

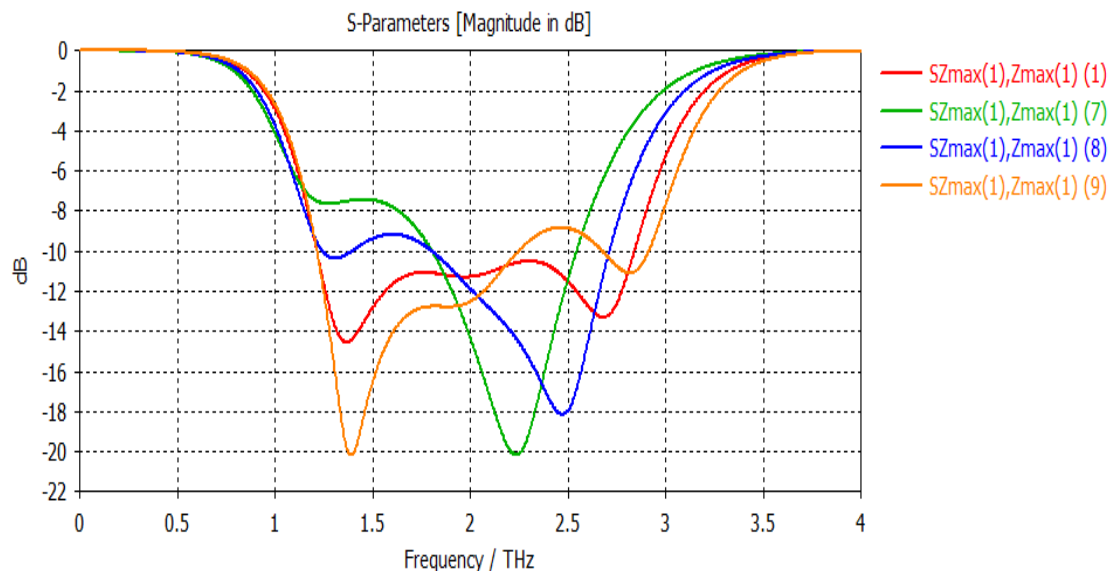


Σχήμα 3.3.7: S-parameters με συχνότητα THz με διαφορετικό χρόνο σκέδασης δηλαδή (1) $\tau=0.2\text{ps}$, (5) $\tau=0.05\text{ps}$, (6) $\tau=0.1\text{ps}$.

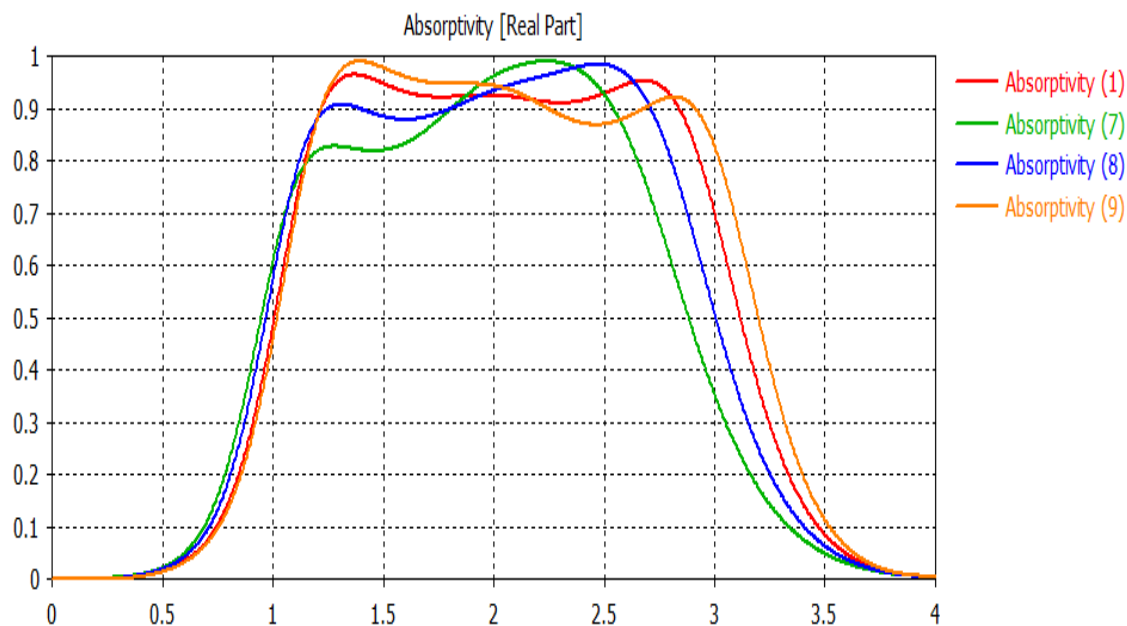


Σχήμα 3.3.8: Απορρόφηση σε συχνότητα THz με διαφορετικό ρυθμό σκέδασης δηλαδή (1) $\tau=0.2\text{ps}$, (5) $\tau=0.05\text{ps}$, (6) $\tau=0.1\text{ps}$.

Στο παραπάνω σχήματα διακρίνουμε ότι η απορροφητικότητα είναι περισσότερο από 90% στη ζώνη συχνοτήτων 1,07-2,88 THz για ρυθμό σκέδασης 0.2ps. Όταν ο ρυθμός σκέδασης είναι 0,1ps και 0.05ps η τιμή απορρόφησης είναι περίπου 80-90% Τέλος βλέπουμε ότι όταν ελαττώνεται ο ρυθμός σκέδασης μειώνεται και το ποσοστό απορρόφησης.



Σχήμα 3.3.9: S-parameters με διαφορετικό χημικό δυναμικό του φιλμ μονοστρωματικού γραφενίου με τιμές: (1) 0.8eV, (7) 0.6eV, (8) 0.7eV, (9) 0.9eV.



Σχήμα 3.3.10: Απορρόφηση σε συχνότητα THz με διαφορετικό χημικό δυναμικό του φιλμ μονοστρωματικού γραφενίου με τιμές: (1) 0.8eV, (7) 0.6eV, (8) 0.7eV, (9) 0.9eV.

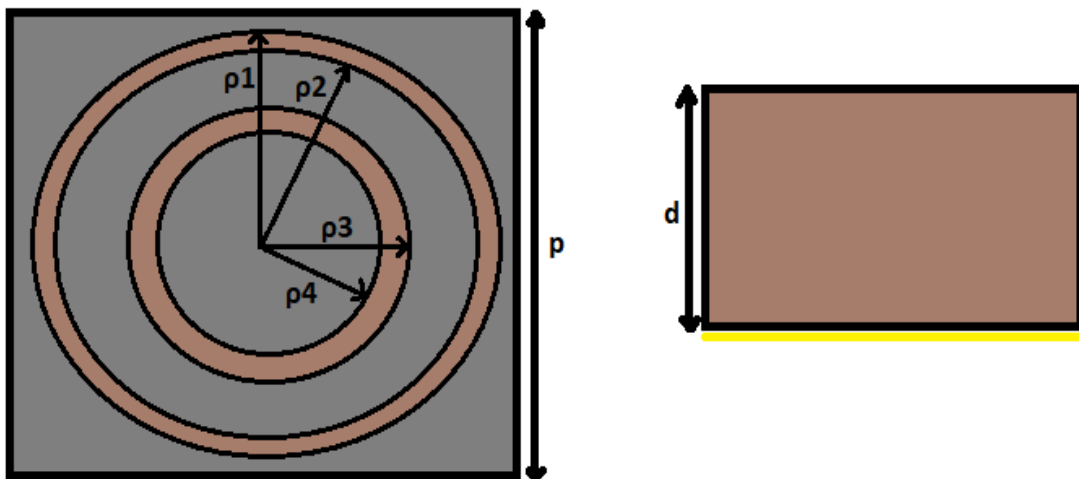
Στα παραπάνω σχήματα παρατηρούμε την επίδραση του χημικού δυναμικού σε όλη την δομή ως προς την απορροφητικότητα. Η αλλαγή της εφαρμοζόμενης ενέργειας Fermi οδηγεί σε αλλαγή της επιφανειακής αγωγιμότητας του γραφενίου που με την σειρά του οδηγεί σε αλλαγή της συχνότητας συντονισμού. Όταν το χημικό δυναμικό έχει τιμή 0.9eV παρατηρούμε ότι το ποσοστό απορρόφησης είναι 99% στην ζώνη συχνοτήτων 1-1,5 THz. Ενώ στο εύρος συχνοτήτων 2,5-3 THz παρατηρούμε ότι το ποσοστό απορρόφησης είναι 91%. Συμπερασματικά, όταν η τιμή του χημικού δυναμικού είναι υψηλή, για εύρος συχνοτήτων 1-1,5 THz το ποσοστό απορρόφησης είναι υψηλό. Ενώ όταν η τιμή του χημικού δυναμικού είναι χαμηλή, για εύρος συχνοτήτων 2-3 THz το ποσοστό απορρόφησης είναι υψηλό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΗ ΤΡΙΠΛΗΣ ΖΩΝΗΣ

4.1 Εισαγωγή

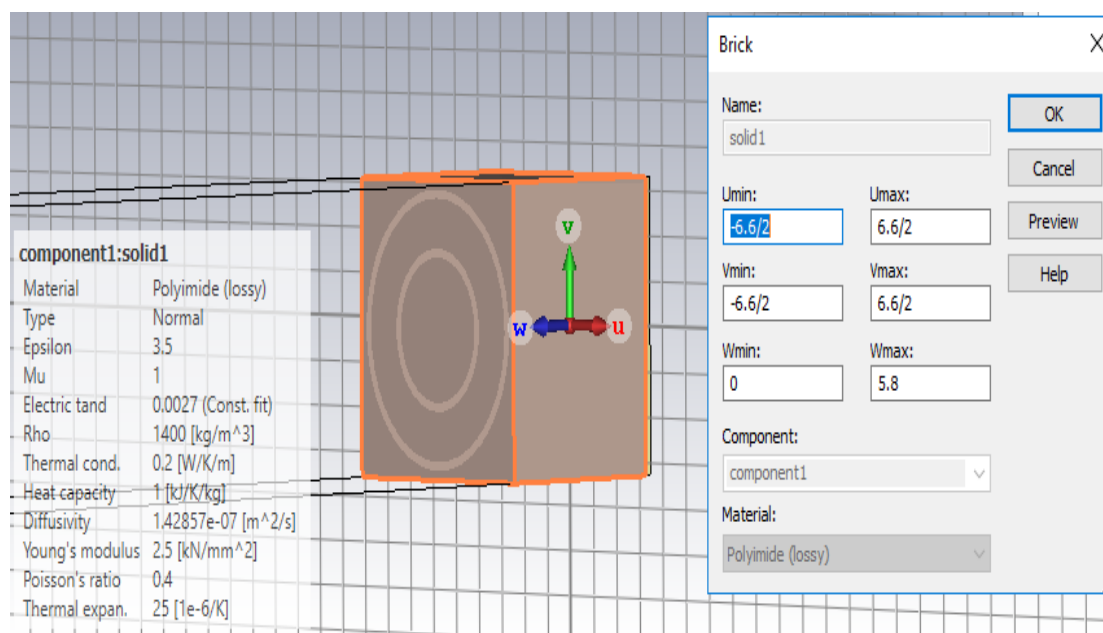
Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετήσουμε ένα ρυθμιζόμενο απορροφητή τριπλής ζώνης με βάση το υλικό γραφένιο σε THz συχνότητες. Η διάταξη απαρτίζεται από ένα φύλλο γραφενίου με υποδοχές διπλού δακτυλίου και από ένα διηλεκτρικό στρώμα πάνω σε πλήρως ανακλαστικό υλικό κατασκευασμένο από χρυσό. Όπως θα δούμε στη συνέχεια, παρατηρείται υψηλή απορρόφηση στα 4,4 THz με ποσοστό κοντά στο 90%. Ακόμη και για γωνία πρόσπτωσης ίση με 80 μοίρες θα δούμε την απορρόφηση να κυμαίνεται κοντά στο 80%. Με χημικό δυναμικό του φιλμ μονοστρωματικού γραφενίου 0,75eV στα 4,4 THz θα παρατηρήσουμε ότι η απορρόφηση θα είναι περίπου 90%. Η γεωμετρία που υλοποιήσαμε στην παρούσα ενότητα αποτελείται από δύο κύκλους, ένας εξωτερικός (με ακτίνες $\rho_1 = 3,1\mu m, \rho_2 = 2,9\mu m$ και πάχος 0,2 μm) και ένας εσωτερικός (με ακτίνες $\rho_3 = 1,8\mu m, \rho_4 = 1,6\mu m$ και πάχος 0,2 μm). Από τους δύο κύκλους έχει αφαιρεθεί το γραφένιο, καθώς είναι το υλικό του πρώτου επιπέδου της υλοποίησης. Οι δύο παραπάνω κύκλοι είναι τοποθετημένοι σε πολυιμίδιο (Polyimide) με πάχος $d=5,8\mu m$ και διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r = 3,5$. Τέλος η γεωμετρία τερματίζεται σε ένα μεταλλικό ανακλαστικό υπόστρωμα τον χρυσό με πάχος 0,2 μm [15]. Στις επόμενες ενότητες θα παρακολουθήσουμε πιο αναλυτικά την σχεδίαση της διάταξης στο λογισμικό CST και τα αποτελέσματα της παρούσας προσομοίωσης.



Σχήμα 4.1: Η γεωμετρία και οι διαστάσεις του απορροφητή τριπλής ζώνης.

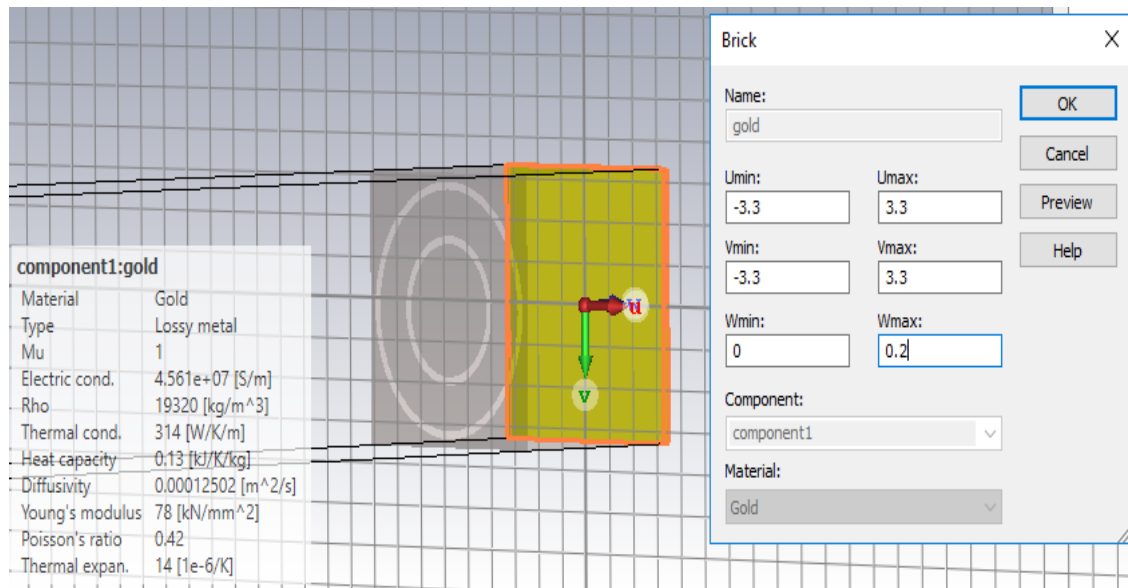
4.2 Σχεδίαση της διάταξης στο λογισμικό

Για να ξεκινήσουμε το CST πρόγραμμα επιλέγουμε από το μενού την κατηγορία periodic structures και μετά metamaterial-full structure. Εφόσον περάσουμε στο τρίτο στάδιο διαλέγουμε την κατηγορία time domain και τοποθετούμε στην επόμενη κατηγορία το συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε, δηλαδή από 0 έως 6 THz και επιλέγουμε το εικονίδιο finish. Τέλος όπως αναφέραμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο επιλέγουμε από το μενού το brick box για την σχεδίαση της προσομοίωσης με βάση το υλικό polyimide με πλάτος 5,8 μm και μήκος, ύψος $p=6,6\mu\text{m}$.



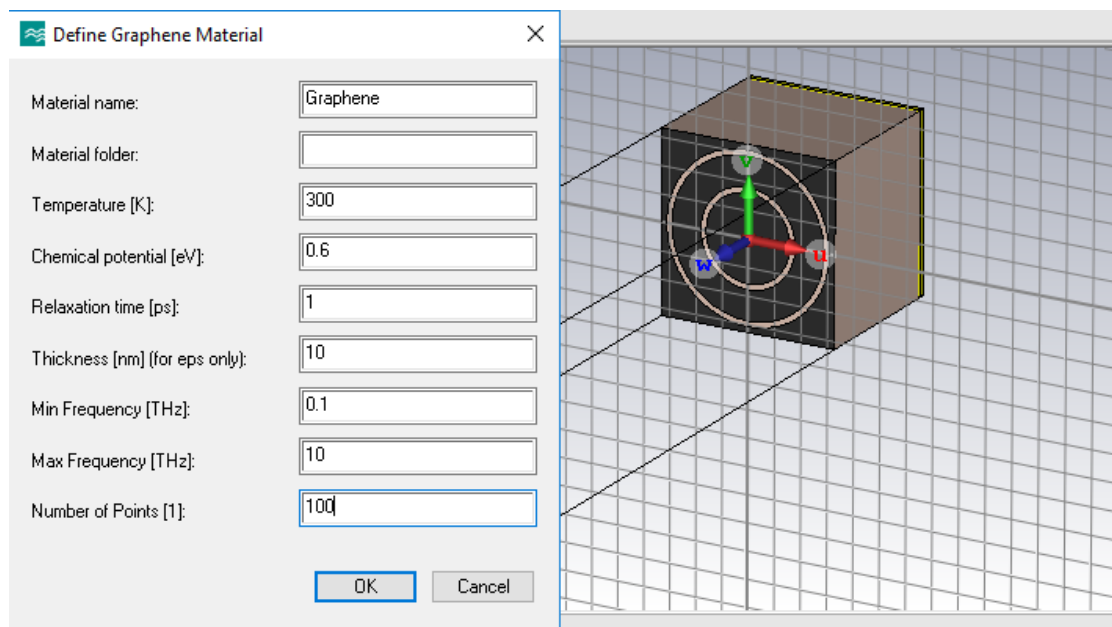
Σχήμα 4.2.1: Οι τιμές των διαστάσεων στο brick box.

Στην συνέχεια για την σχεδίαση της πίσω όψης γνωστή και ως πλευρά καθρέπτη, χρησιμοποιήσαμε ως υλικό τον χρυσό με μήκος, ύψος 3,3μm και πάχος 0,2μm.



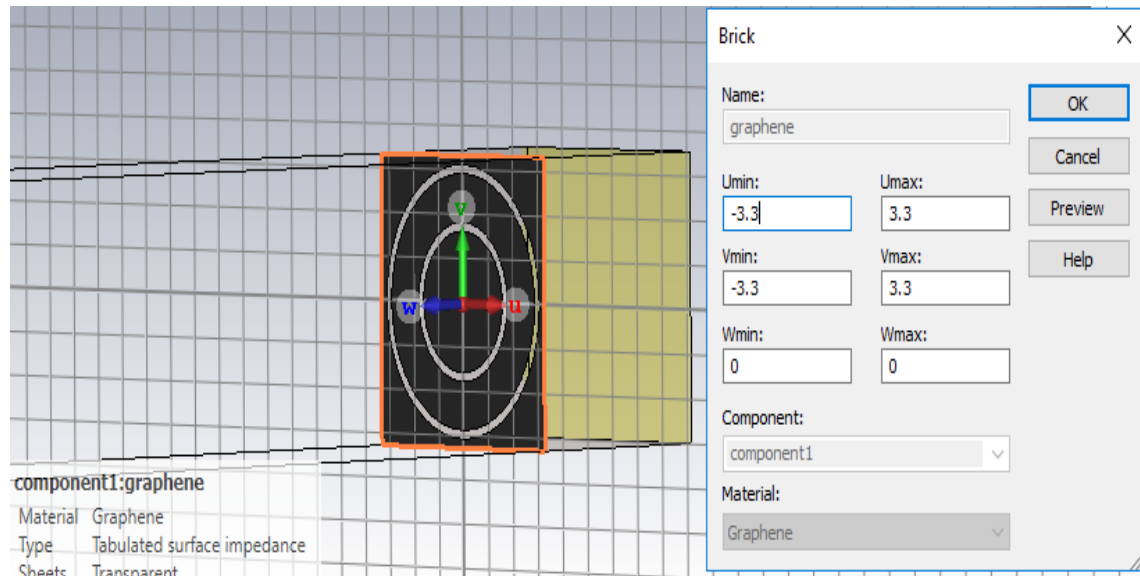
Σχήμα 4.2.2: Οι τιμές των διαστάσεων στο brick box για την σχεδίαση του καθρέπτη χρυσού.

Όπως αναφέραμε και στην προηγούμενη ενότητα τοποθετήσαμε στο project μας το υλικό γραφένιο από το μενού του προγράμματος. Για να προκύψουν τα επιθυμητά αποτελέσματα επιλέγουμε συγκεκριμένες τιμές στα πεδία του γραφενίου, δηλαδή Temperature 300k, Chemical potential 0,6eV και Relaxation time 1ps.



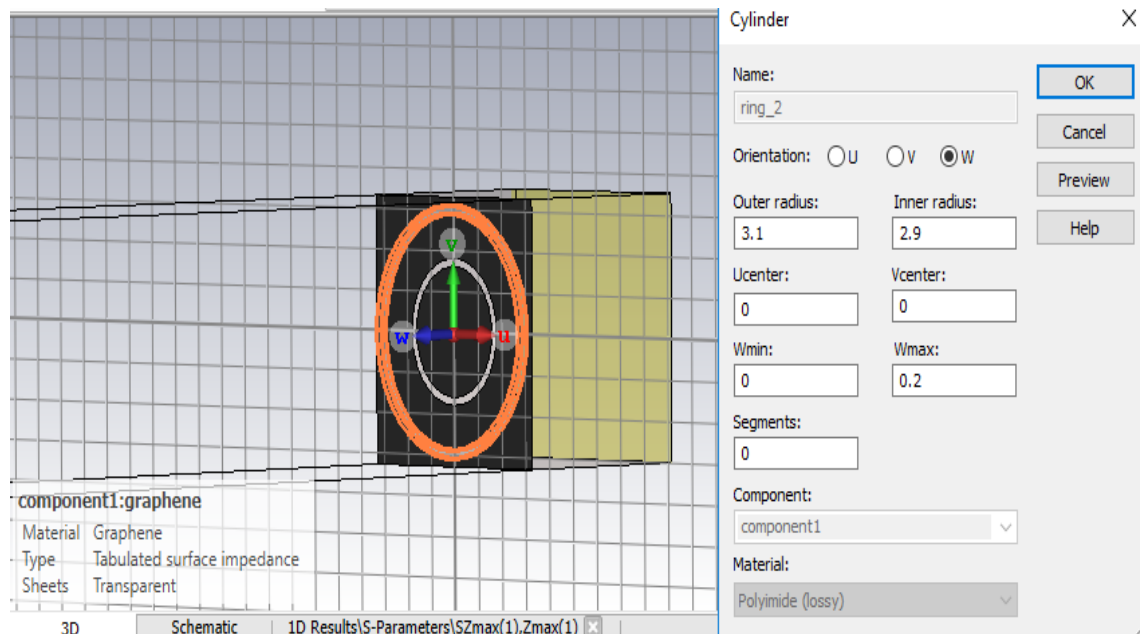
Σχήμα 4.2.3: Ιδιότητες του γραφενίου όσον αφορά την σχεδίαση του υλικού στο πρόγραμμα προσομοίωσης CST.

Για την σχεδίαση της εμπρόσθιας όψης της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε το γραφένιο ως υλικό επικάλυψης με τιμές 3,3μm πλάτους και ύψους.

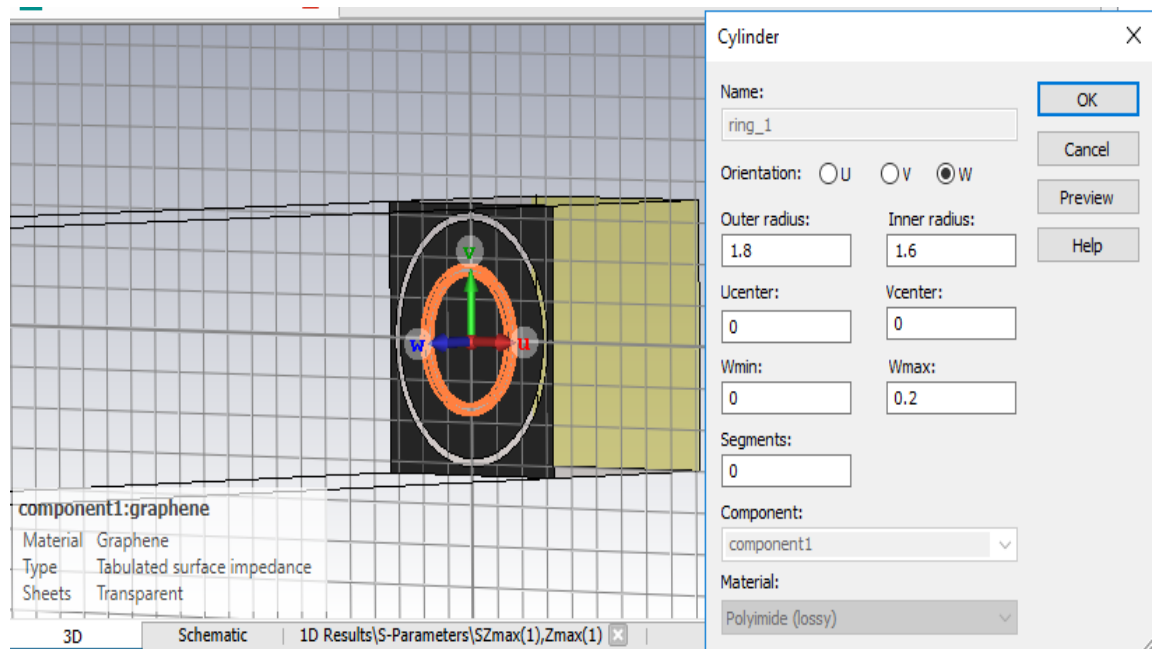


Σχήμα 4.2.4: Ιδιότητες του γραφενίου στο brick box.

Επάνω στην επικάλυψη του γραφενίου δημιουργήθηκαν δύο κύκλοι ένας εξωτερικός (με εξωτερική ακτίνα $\rho_1 = 3,1\mu m$ και εσωτερική ακτίνα $\rho_2 = 2,9\mu m$, πάχους 0,2μm) και ένας εσωτερικός (με εξωτερική ακτίνα $\rho_3 = 1,8\mu m$ και εσωτερική ακτίνα $\rho_4 = 1,6\mu m$, πάχους 0,2μm), καθώς και από τους δύο κύκλους αφαιρέθηκε το υλικό του γραφενίου. Στις παρακάτω εικόνες είναι εμφανές το αποτέλεσμα καθώς και οι ιδιότητες για τον κάθε κύκλο ξεχωριστά.

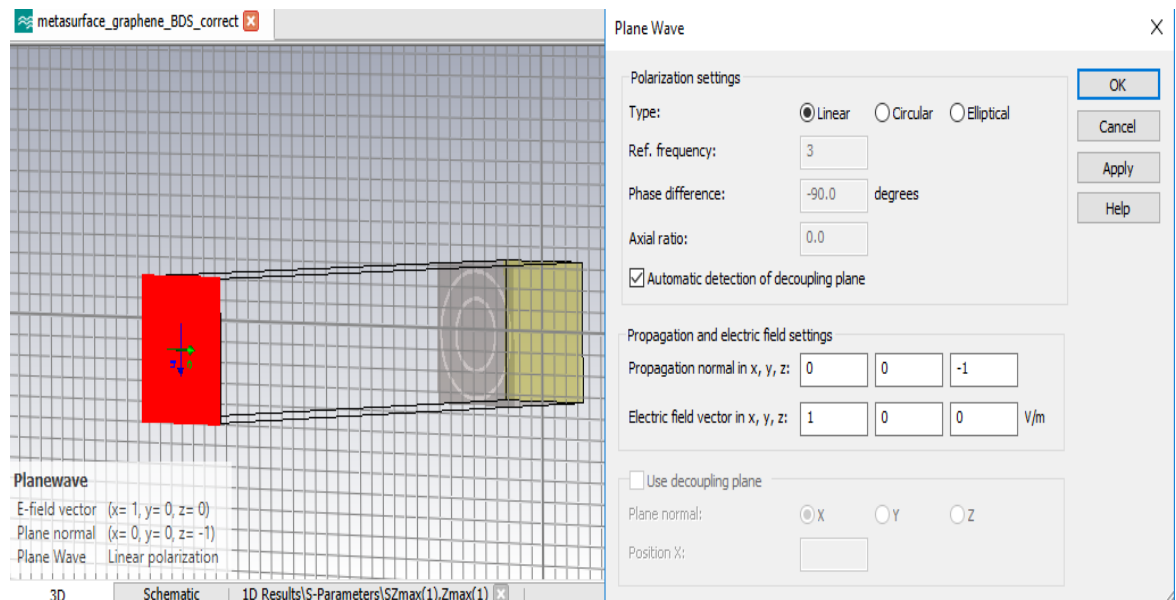


Σχήμα 4.2.5: Οι ιδιότητες για τον εξωτερικό κύκλο.

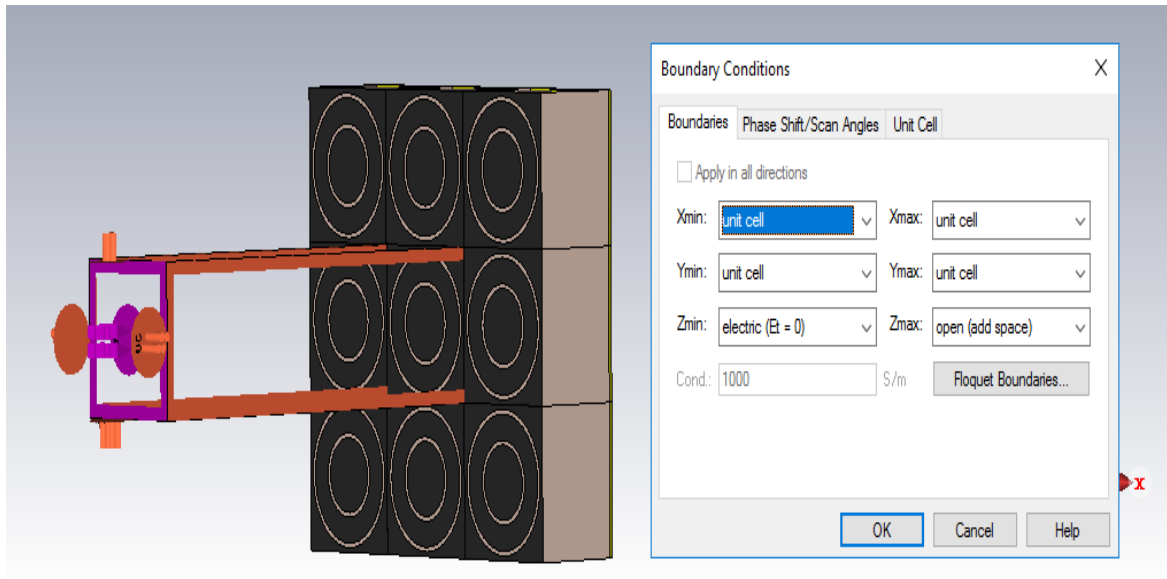


Σχήμα 4.2.6: Οι ιδιότητες για τον εσωτερικό κύκλο.

Τέλος όπως αναφέραμε και στην προηγούμενη ενότητα, αφού τελειώσουμε την προετοιμασία μας πηγαίνουμε στο κεντρικό μενού του προγράμματος και τοποθετούμε στο plane wave την τιμή -1 στον άξονα z για να καθορίσουμε την κατεύθυνση διάδοσης του προσπίπτοντος κύματος. Ακόμη ανατρέχουμε στην κατηγορία των συνοριακών συνθηκών (boundaries conditions) και επιλέγουμε το Z_{min} : electric ($E_t=0$) για την κατηγορία των μεταεπιφανειών, και στην συνέχεια επιλέγουμε το εικονίδιο start simulation για την εκκίνηση της προσομοίωσης.

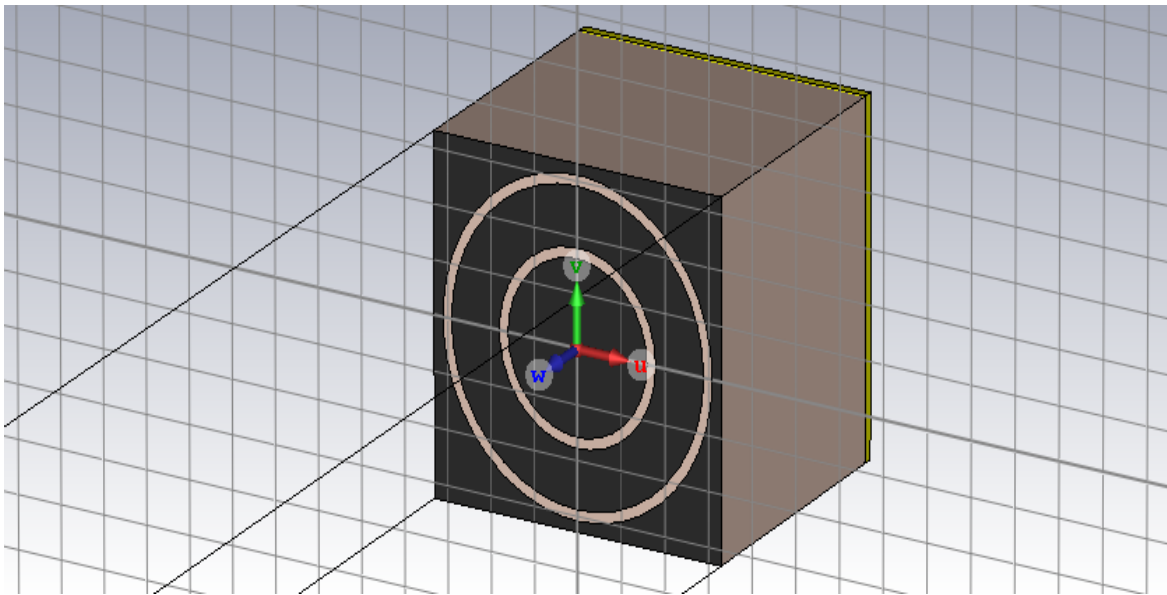


Σχήμα 4.2.7: Ιδιότητες του προσπίπτοντος κύματος.

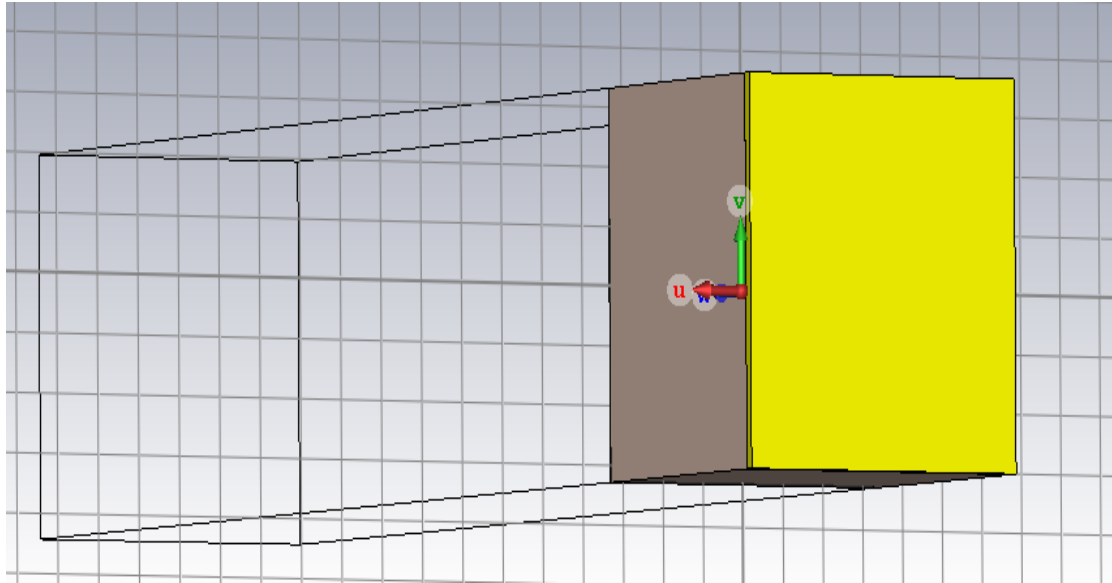


Σχήμα 4.2.8: Συνοριακές συνθήκες.

Στις δύο παρακάτω εικόνες βλέπουμε την ολοκληρωμένη υλοποίηση μας, δηλαδή την πρόσοψη και την πίσω όψη.



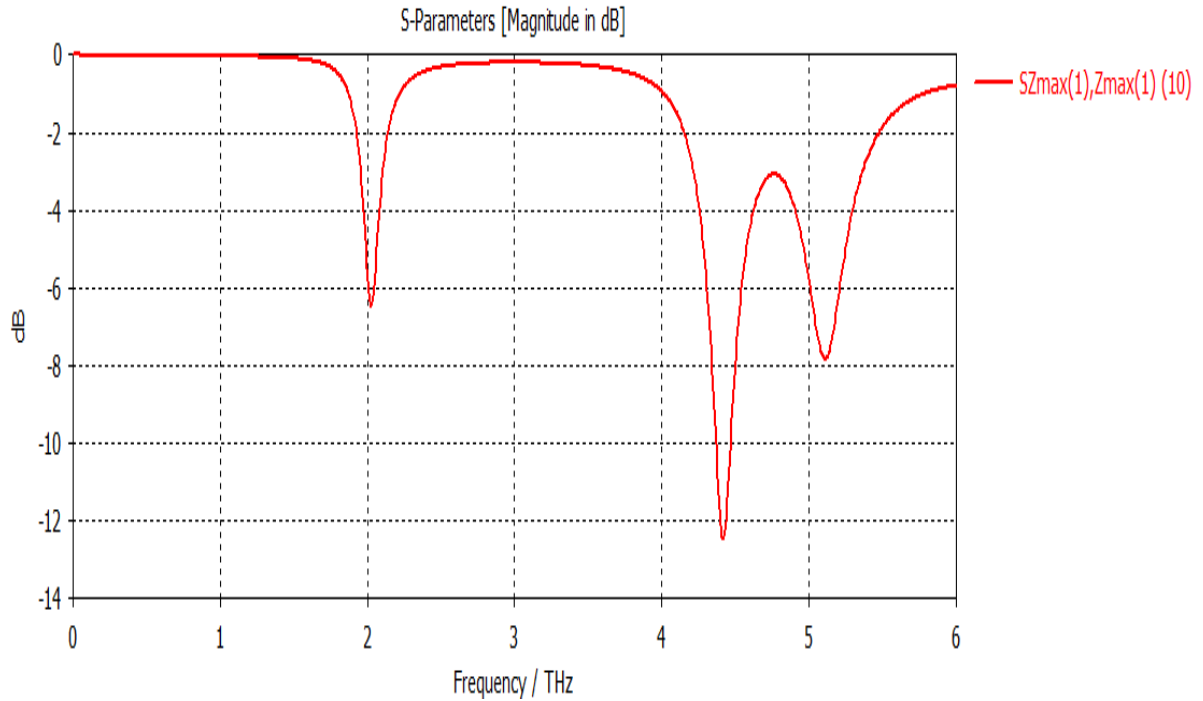
Σχήμα 4.2.9: Η ολοκληρωμένη 3D πρόσοψη.



Σχήμα 4.2.10: Η ολοκληρωμένη 3D πίσω όψη.

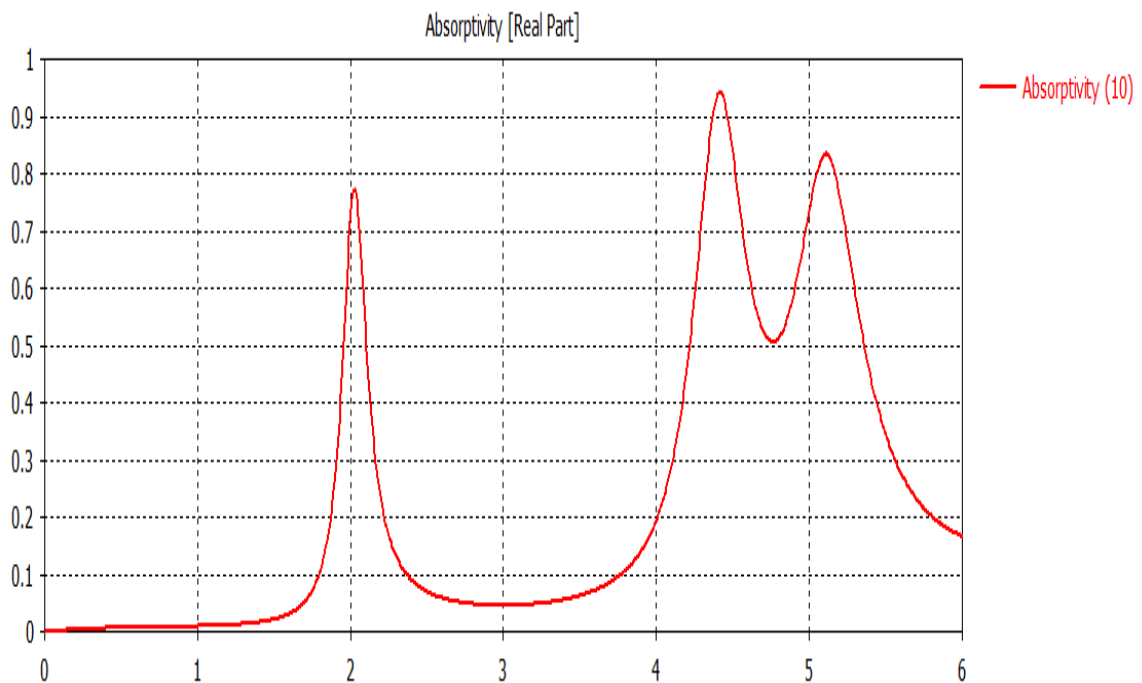
4.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στην παρούσα προσομοίωση χρησιμοποιούμε ως κύριο υλικό το γραφένιο και ως υλικό καθρέπτη το χρυσό. Στα παρακάτω σχεδιαγράμματα θα δούμε την απορροφητικότητα του γραφενίου σε συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων, (0 έως 6 THz). Ακόμη θα παρατηρήσουμε την κατανομή του επιφανειακού ρεύματος στο επάνω και κάτω στρώμα της προσομοίωσης για συγκεκριμένο αριθμό συχνοτήτων ($f_1=2\text{THz}$, $f_2=4,4\text{THz}$, $f_3=5,1\text{THz}$). Στην συνέχεια θα υπολογίσουμε την απορροφητικότητα σε συχνότητες από 0 έως 6 THz για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης από 0 έως 80 μοίρες, καθώς θα δούμε και μία σύγκριση της προσομοίωσης μας από γραφένιο ως κύριο υλικό με μία ίδια προσομοίωση έχοντας όμως ως κύριο υλικό το BDS film. Τέλος θα εξαχθούν τα σχεδιαγράμματα απορρόφησης-συχνότητας με διαφορετικές κάθε φορά τιμές στο χημικό δυναμικό της μονοστρωματικής μεμβράνης γραφενίου [15].



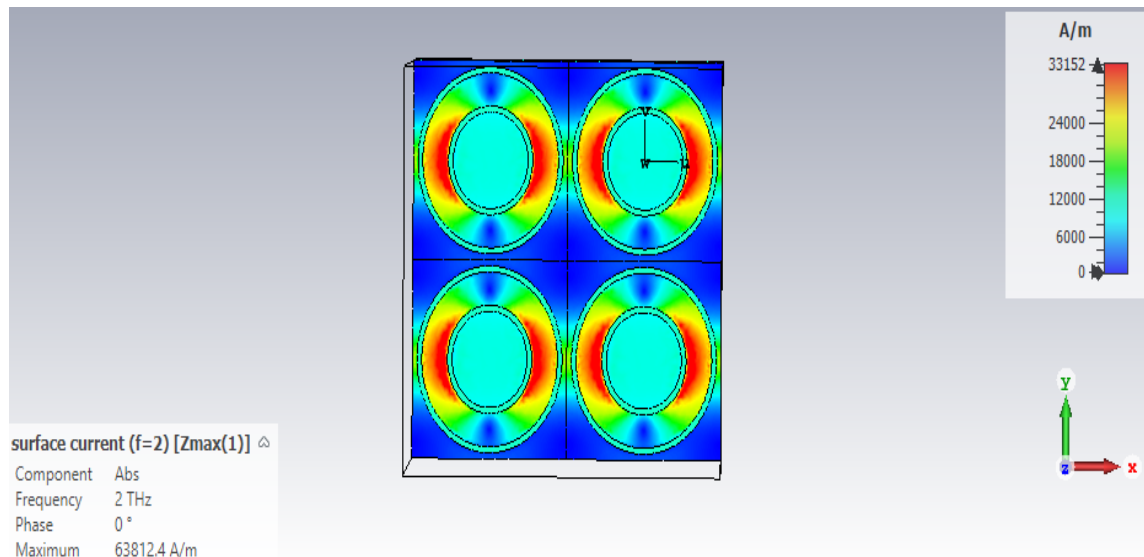
Σχήμα 4.3.1: S11-Parameters σχεδιάγραμμα db-THz.

Στην παραπάνω εικόνα παρατηρούμε τα τοπικά ελάχιστα τα οποία είναι: $f_1=2$, $f_2=4,4$, $f_3=5,1$ THz. Είναι οι τιμές τις οποίες θα τοποθετήσουμε στο field monitor για να πάρουμε τις κατάλληλες μετρήσεις.

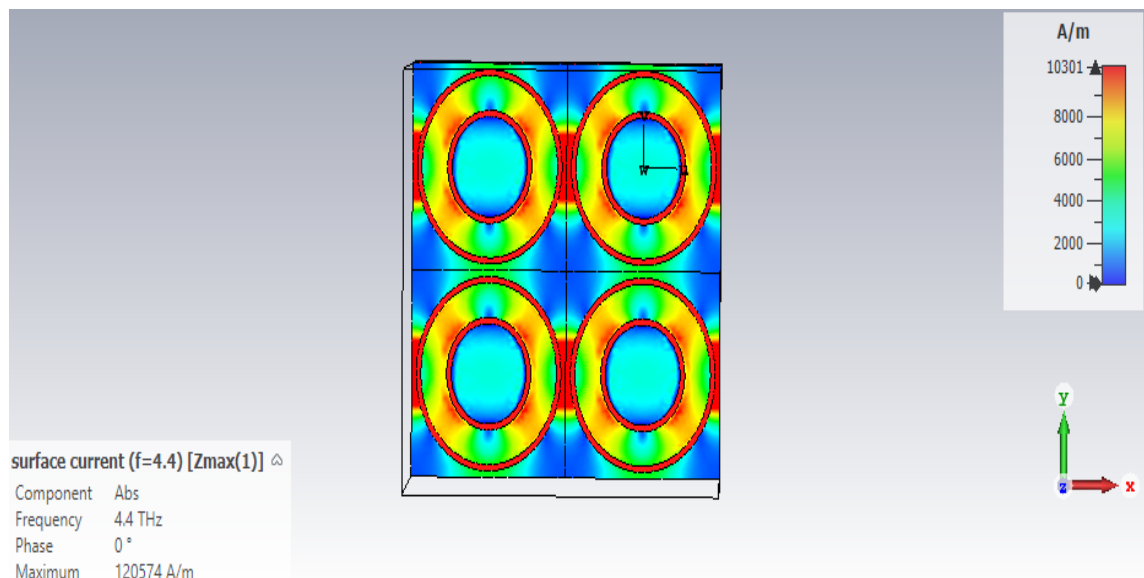


Σχήμα 4.3.2: Απορρόφηση (Absorptivity) του γραφενίου σε συχνότητα 0 έως 6 THz.

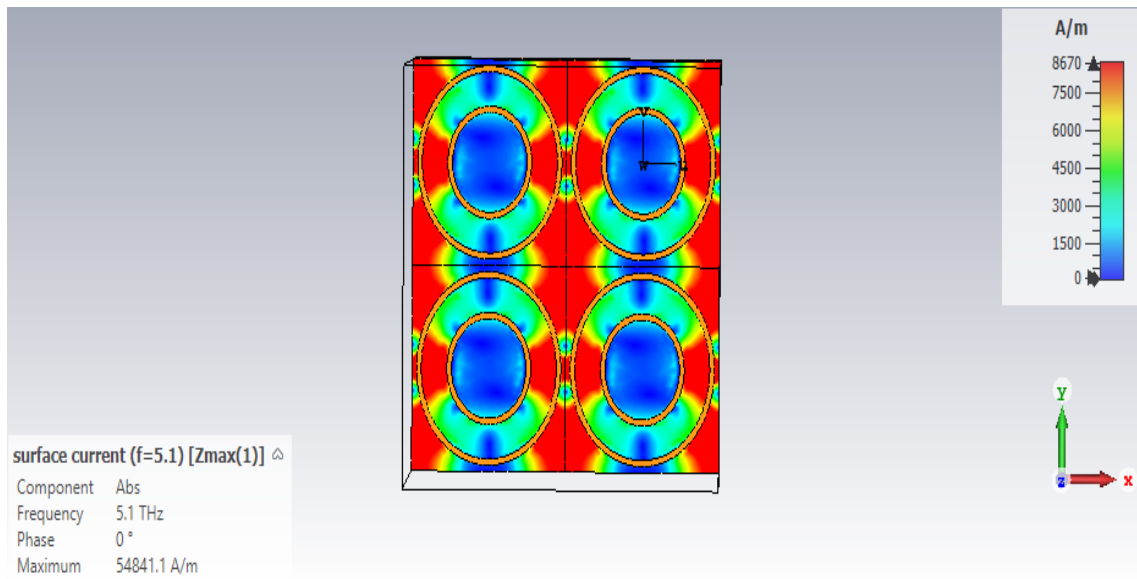
Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε ότι για συχνότητα 2 THz το ποσοστό απορρόφησης είναι περίπου 79%. Για τις επόμενες δύο συχνότητες 4,4 και 5,1 THz έχουμε ποσοστό απορρόφησης 92% και 81%. Στην αρχή η καμπύλη απορρόφησης είναι μηδενική μέχρι 2 THz, μετά ελαττώνεται από 2 έως 4 THz με ποσοστό απορρόφησης 5%. Στην συνέχεια παρατηρούμε την μέγιστη απορρόφηση στα 4,4 THz με ποσοστό 92%, έπειτα ακολουθεί μία μικρή μείωση μέχρι το επόμενο δεύτερο σημείο στα 5,1 THz με ποσοστό 81%. Τέλος μετά το τελευταίο σημείο η καμπύλη απορρόφησης μειώνεται συνεχώς μέχρι να επιτρέψει στην αρχική της τιμή.



Σχήμα 4.3.3: Κατανομή επιφανειακού ρεύματος για συχνότητα $f=2$ THz.

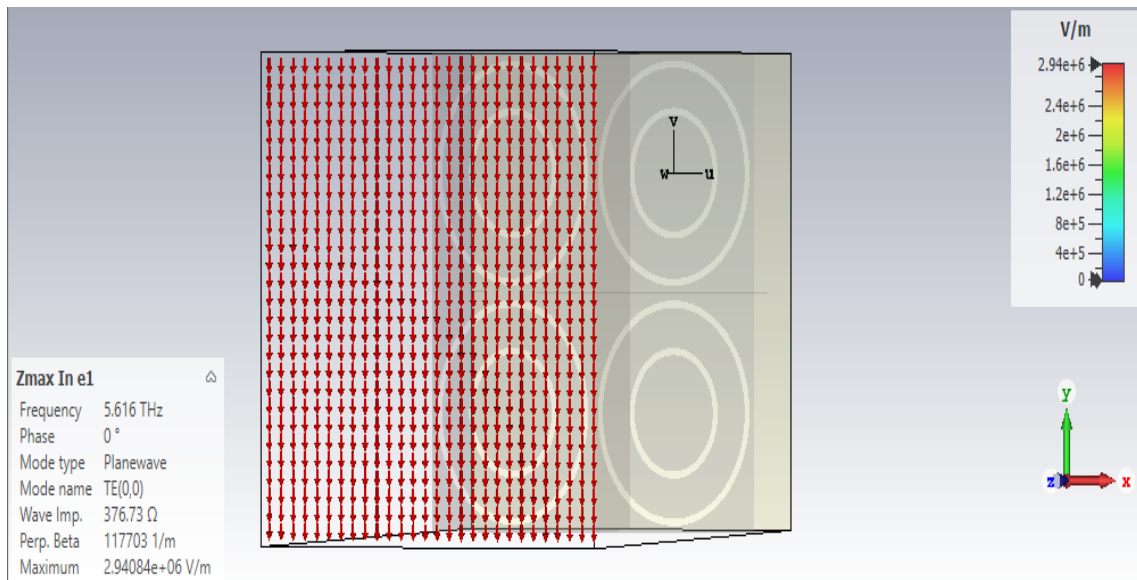


Σχήμα 4.3.4: Κατανομή επιφανειακού ρεύματος για συχνότητα $f=4,4$ THz.

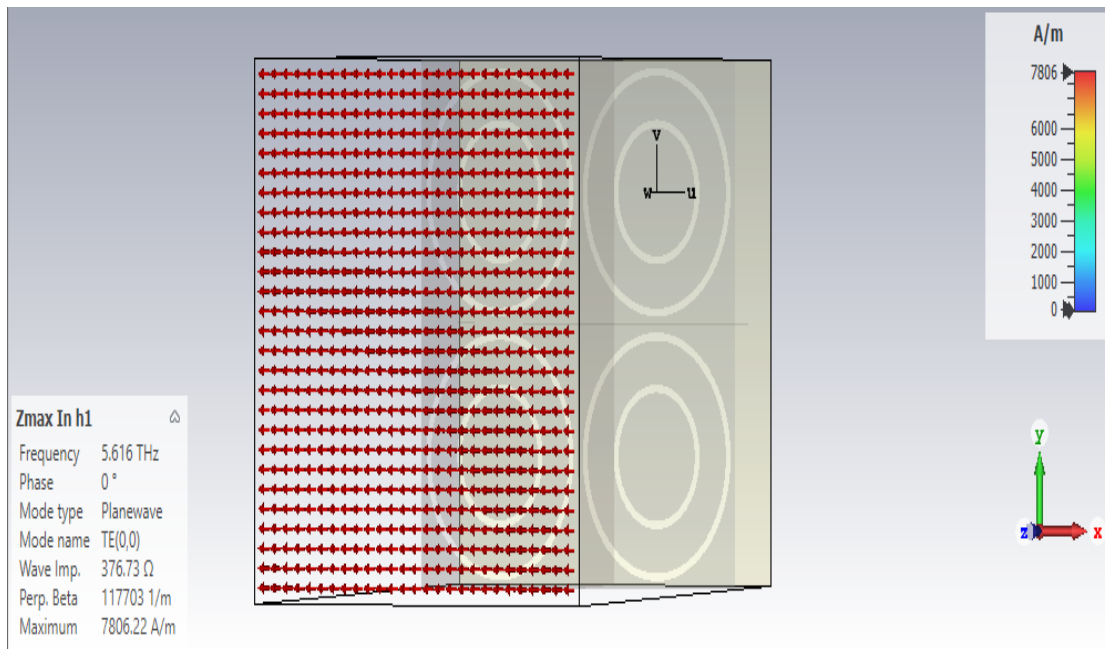


Σχήμα 4.3.5: Κατανομή επιφανειακού ρεύματος για συχνότητα $f=5,1$ THz.

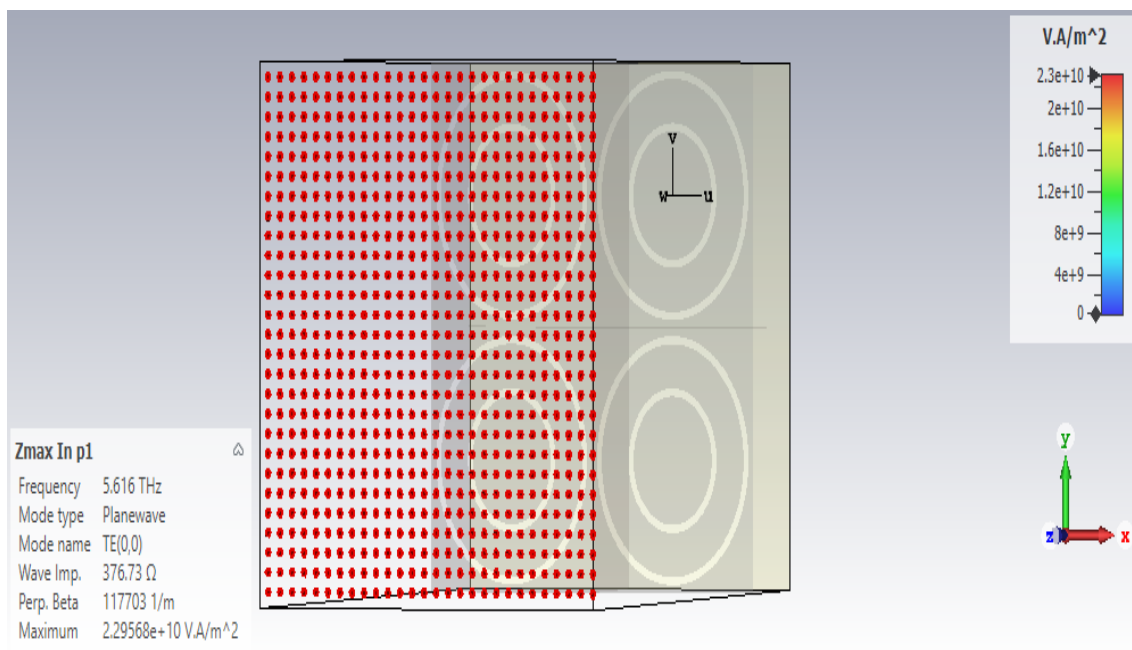
Στα παραπάνω σχήματα παρατηρούμε την κατανομή του επιφανειακού ρεύματος για συχνότητες 2, 4,4 και 5,1 THz. Στο σχήμα 4.3.3 το επιφανειακό ρεύμα για συχνότητα 2 THz παρατηρούμε ότι είναι αρκετά μεγάλο στην αριστερή και δεξιά πλευρά των δύο κύκλων. Σε αντίθεση με τα σχήματα 4.3.4 και 4.3.5 όπου το επιφανειακό ρεύμα είναι σε μικρό ποσοστό για 4,4 THz εξωτερικά των δύο κύκλων και για 5,1 THz εσωτερικά και εξωτερικά αυτών. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι η κυματική ενέργεια THz μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια στις συχνότητες συντονισμού και ο απορροφητής είναι ικανός να μειώσει δραστικά τη μεταδιδόμενη ενέργεια [15].



Σχήμα 4.3.6: Κατεύθυνση κατανομής ρεύματος κατακόρυφη προς τα κάτω στην επιφάνεια του κατόπτρου.

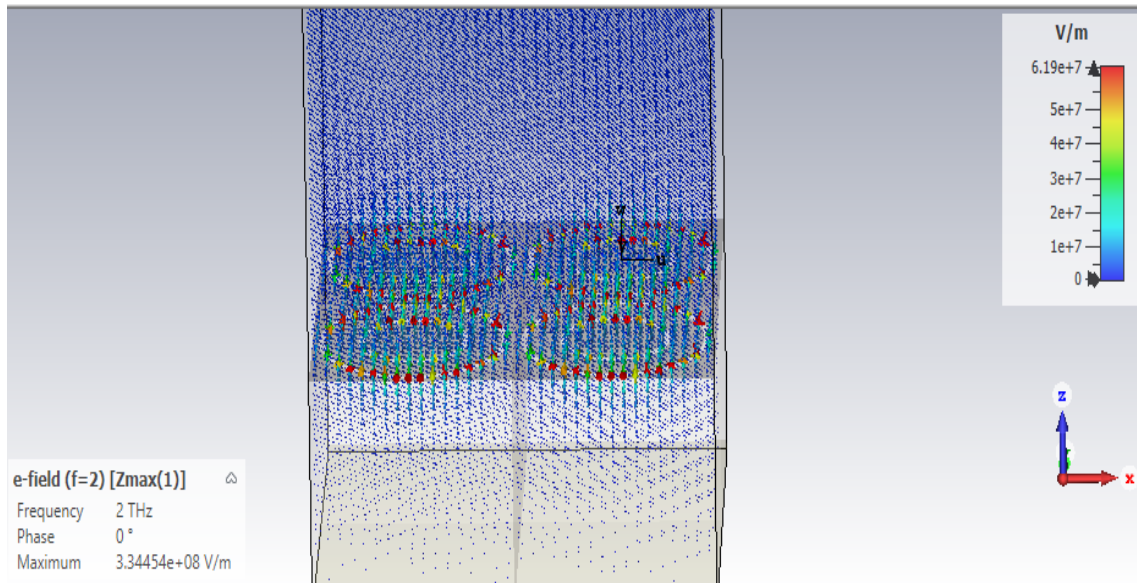


Σχήμα 4.3.7: Κατεύθυνση κατανομής ρεύματος προς τα αριστερά στην επιφάνεια του κατόπτρου.

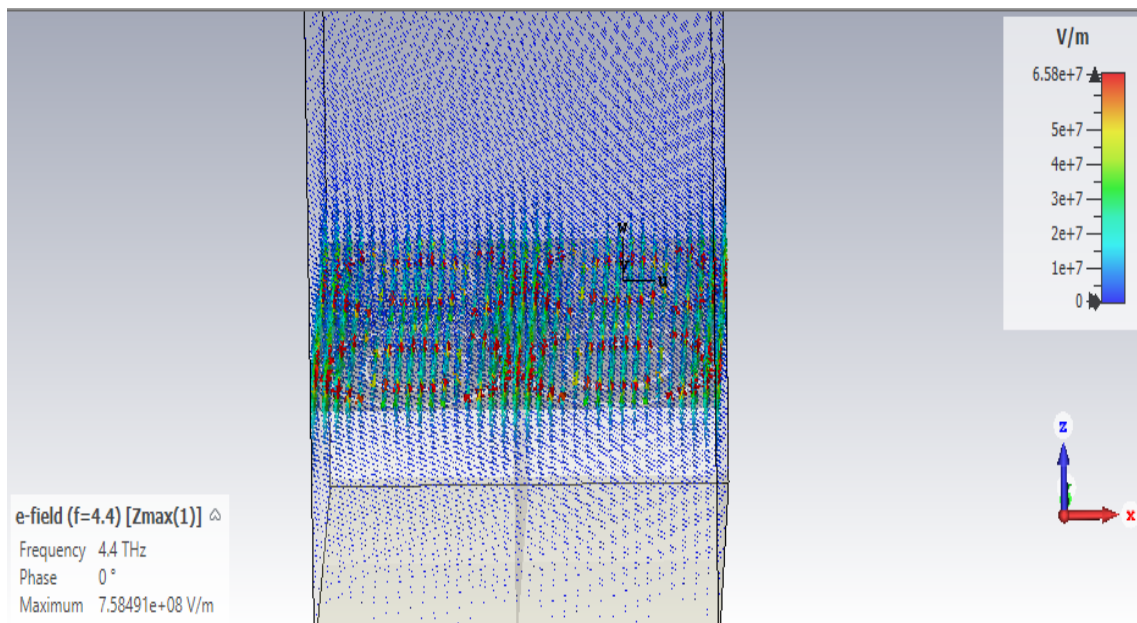


Σχήμα 4.3.8: Κατεύθυνση κατανομής ρεύματος προς το υλικό στην επιφάνεια του κατόπτρου.

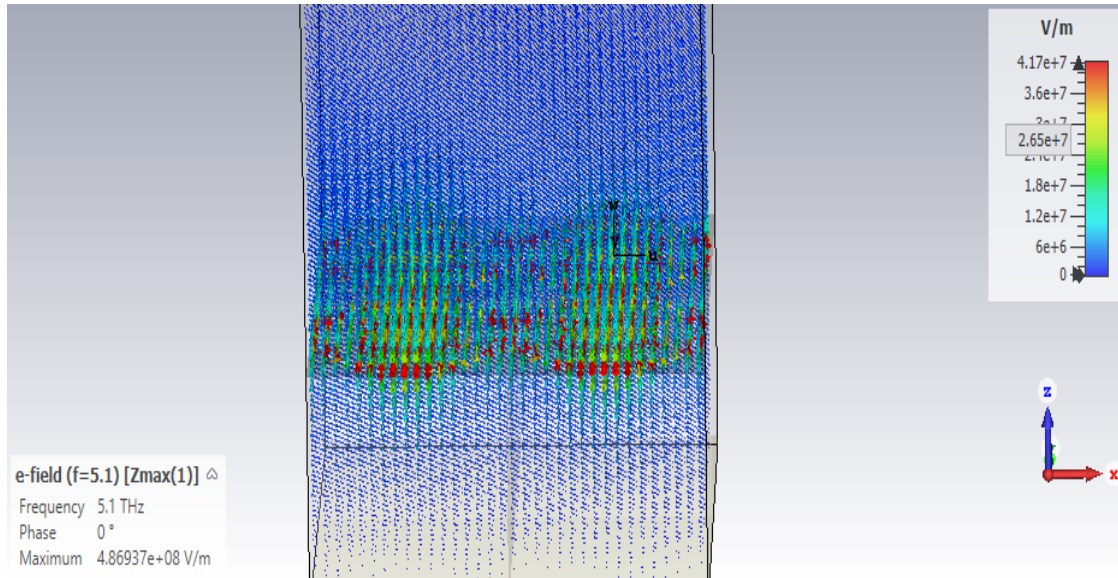
Στα προαναφερόμενα σχήματα διακρίνουμε την κατεύθυνση κατανομής του ρεύματος με κατευθύνσεις προς τα κάτω, αριστερά και ως προς την εσωτερική πλευρά της μεταεπιφάνειας.



Σχήμα 4.3.9: Πλάγια όψη της προσομοιωμένης ροής ισχύος για συχνότητα $f=2\text{THz}$.

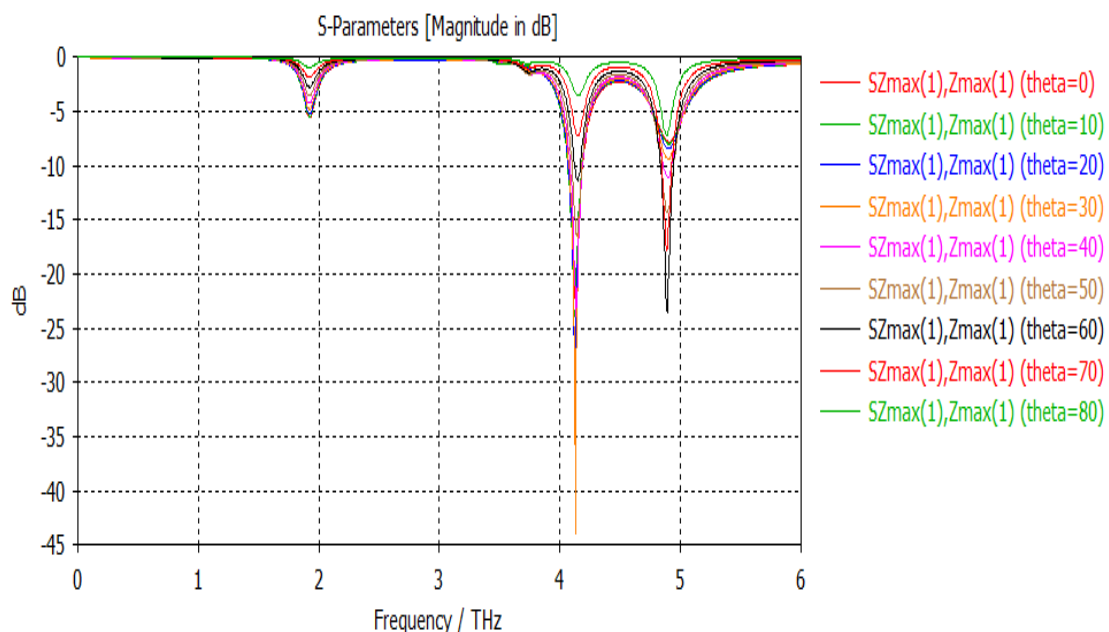


Σχήμα 4.3.10: Πλάγια όψη της προσομοιωμένης ροής ισχύος για συχνότητα $f=4,4\text{THz}$.

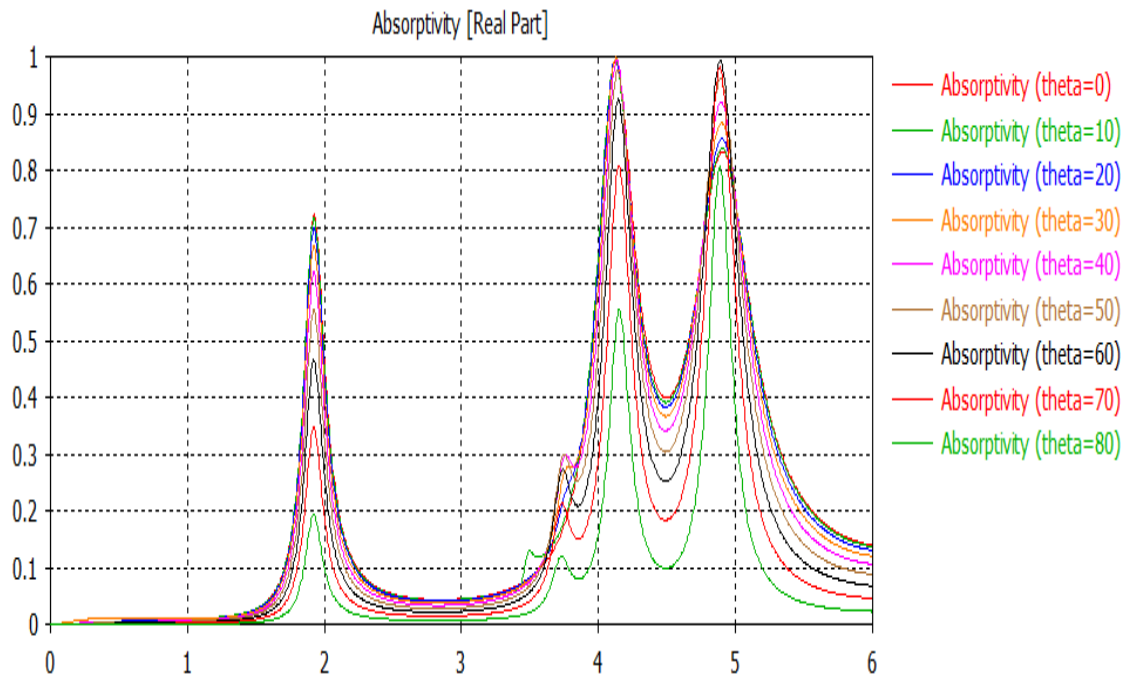


Σχήμα 4.3.11: Πλάγια όψη της προσομοιωμένης ροής ισχύος για συχνότητα $f=5,1\text{THz}$.

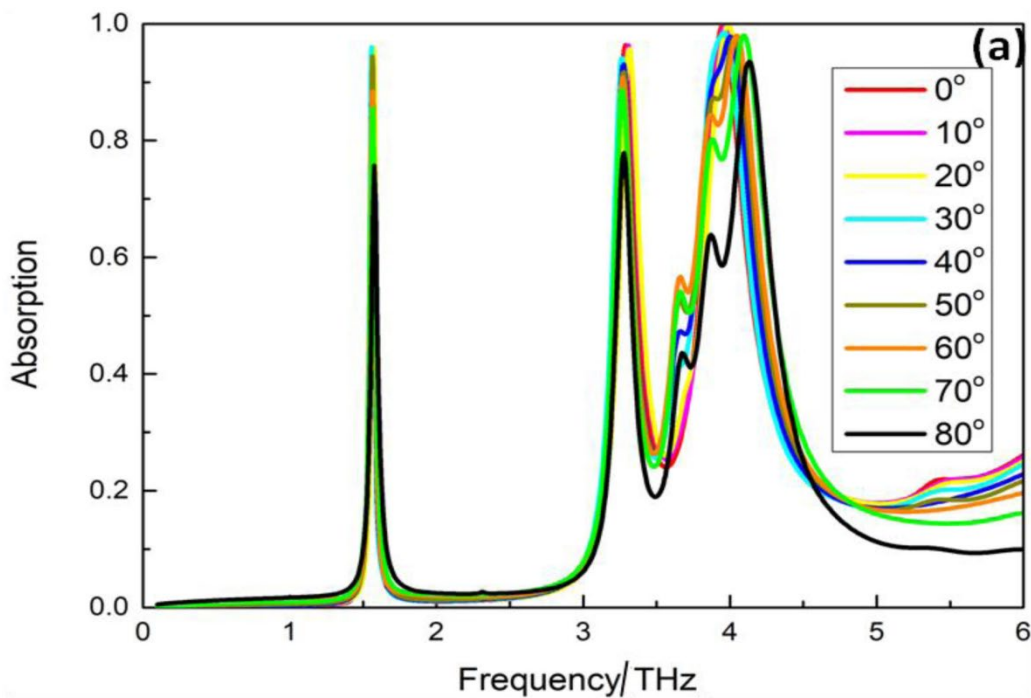
Στα σχήματα 4.3.9, 4.3.10 και 4.3.11 παρατηρούμε την πλάγια όψη της προσομοιωμένης ροής ισχύος για συχνότητες 2, 4,4 και 5,1 THz. Στο σχήμα 4.3.9 βλέπουμε ότι η ροή ισχύος είναι αρκετά μεγάλη σε σύγκριση με τα άλλα δύο σχήματα. Το γεγονός αυτό συμβαίνει καθώς η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια περνά από τον ελεύθερο χώρο και κατά μήκος του άξονα z μέχρι να φτάσει στο φίλμ του γραφενίου. Επειδή η συχνότητά του είναι αρκετά μικρή 2 THz η πυκνότητα της ισχύος είναι μεγαλύτερη και συγκεντρώνεται στο γραφένιο. Η απώλεια ισχύος του φίλμ γραφενίου για τις συχνότητες 4,4 και 5,1 THz προκύπτει κυρίως από την θερμότητα joule η οποία προέρχεται από τον ηλεκτρικό συντονισμό [15].



Σχήμα 4.3.12: S-parameters σε γωνία πρόσπτωσης από 0 έως 80 μοίρες με βασικό υλικό το γραφένιο.

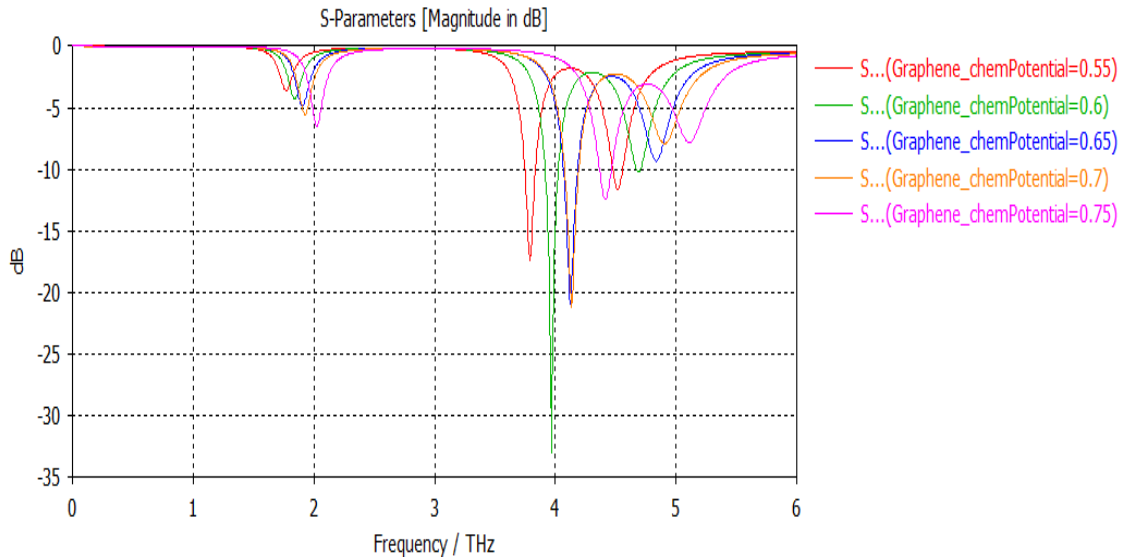


Σχήμα 4.3.13: Απορρόφηση σε συχνότητα THz με ευρεία γωνία πρόσπτωσης από 0 έως 80 μοίρες με βασικό υλικό το γραφένιο.

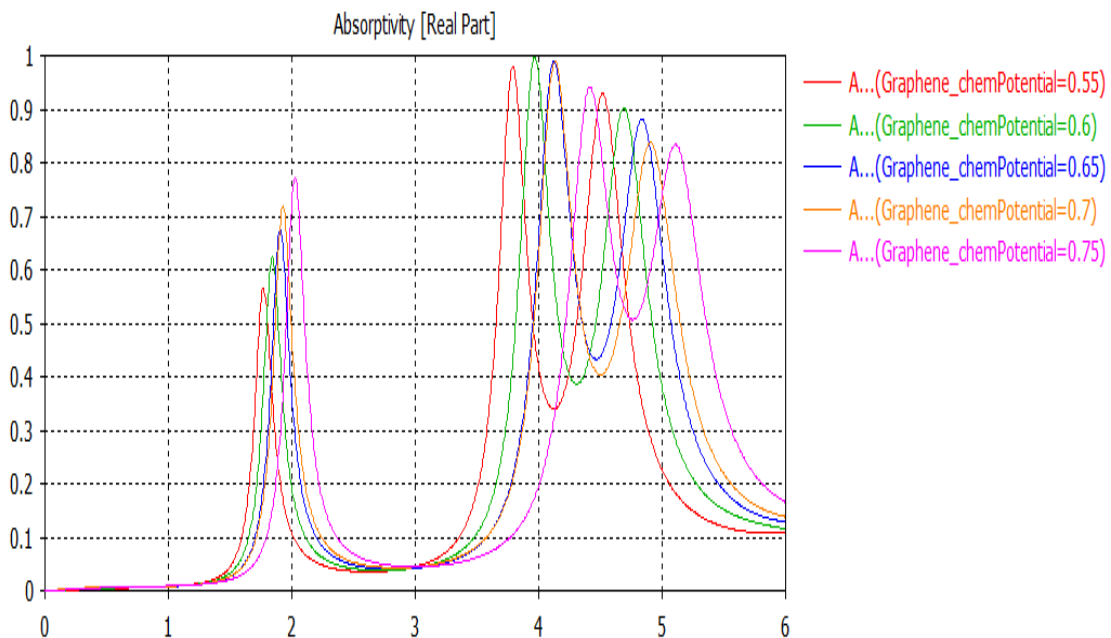


Σχήμα 4.3.14: Απορρόφηση σε συχνότητα THz με ευρεία γωνία πρόσπτωσης από 0 έως 80 μοίρες με βασικό υλικό το BDS film [36].

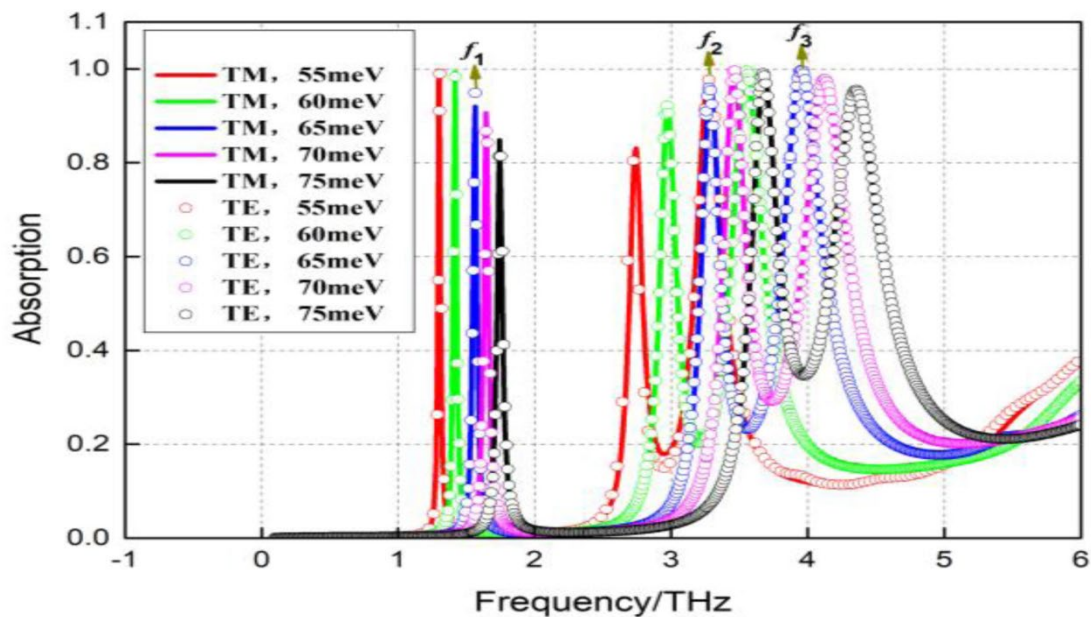
Στις δύο παραπάνω εικόνες 4.3.13 προσομοίωση με γραφένιο και 4.3.14 προσομοίωση με BDS film, παρατηρούμε μικρές διαφορές όσον αφορά το ύψος των κυματομορφών δηλαδή την απορρόφηση του υλικού, όπου στο film βλέπουμε μία αύξηση με ποσοστό απορρόφησης 100% σε αντίθεση με το γραφένιο όπου στην αρχή διακρίνουμε ποσοστό 70%. Ακόμη διακρίνουμε μία αρκετά μικρή διαφορά θα έλεγε κανείς στις συχνότητες των terahertz (THz), δηλαδή στις τιμές 3-4 THz όπου το BDS film παρουσιάζει εκτόνωση κοντά στην συχνότητα 3 THz ενώ το γραφένιο κοντά στην συχνότητα 4 THz.



Σχήμα 4.3.15: S-parameters σε συχνότητα THz με διαφορετικό εφαρμοσμένο χημικό δυναμικό του φίλμ μονοστρωματικού γραφενίου με τιμές: (1) 0.55eV, (2) 0.6eV, (3) 0.65eV, (4) 0.7eV, (5) 0.75eV.



Σχήμα 4.3.16: Απορρόφηση σε συχνότητα THz με διαφορετικό εφαρμοσμένο χημικό δυναμικό του φίλμ μονοστρωματικού γραφενίου με τιμές: (1) 0.55eV, (2) 0.6eV, (3) 0.65eV, (4) 0.7eV, (5) 0.75eV.



Σχήμα 4.3.17: Απορρόφηση σε συχνότητα THz με διαφορετικό εφαρμοσμένο χημικό δυναμικό BDS Film με τιμές: (1) 0.55meV, (2) 0.6meV, (3) 0.65meV, (4) 0.7meV, (5) 0.75meV [36].

Στις εικόνες 4.3.16 προσομοίωση με γραφένιο και 4.3.17 προσομοίωση με BDS film, διακρίνουμε αρκετές διαφορές, καθώς η απορρόφηση στο φιλμ είναι σε μεγαλύτερο ποσοστό στην αρχή από το γραφένιο στο εύρος συχνοτήτων 1 έως 2 THz. Ακόμη η απορρόφηση του φιλμ πλησιάζει το 100% σε αντίθεση με το γραφένιο όπου στις ίδιες συχνότητες η απορρόφηση κοντεύει το 80%. Ενώ στις συχνοτητες 2-5 THz η απορρόφηση του BDS film είναι σταθερή στο 100% , ακολούθως και τα ποσοστά του γραφενίου είναι κοντά στο 100%. Πιο συγκεκριμένα το φιλμ σε όλο σχεδόν το εύρος των συχνοτήτων παρουσιάζει ποσοστό απορρόφησης 100%, ενώ το γραφένιο παρουσιάζει ποσοστό 100% σε συγκεκριμένο διάστημα συχνοτήτων. Τέλος παρατηρούμε ότι το BDS film προηγείται από το γραφένιο καθώς διαθέτει κατά 0.5 THz ταχύτερα αποτελέσματα.

Ανακεφαλαιώνοντας, στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήσαμε εισαγωγή στην έννοια των μεταϊλικών και συγκεκριμένα των μεταεπιφανειών, και έπειτα αναφερθήκαμε στην έννοια του γραφένιου σε THz συχνότητες. Στην συνέχεια ακολούθησε η προσομοιωτική μελέτη παθητικών, απορροφητικών μεταεπιφανειών, συνοδευόμενες από τα εκάστοτε αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα οι μεταεπιφάνειες που διαλέξαμε είχαν ως στόχο την τέλεια απορρόφηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

Αξιοσημείωτο είναι να αναφέρουμε ότι για την σχεδίαση των προσομοιώσεων αλλά και για την ανάδειξη των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό CST, όπου και στηρίχθηκε ολόκληρη η διπλωματική εργασία.

Ακόμη τα κεφάλαια 1 και 2 έχουν την βάση τους σε επιστημονικά άρθρα και έρευνες όπου μελετήθηκαν και συνδυάστηκαν για την ολοκλήρωση του θεωρητικού υποβάθρου της εργασίας.

Στα κεφάλαια 3 και 4 πραγματοποιήθηκε μια αποτελεσματική απόπειρα για την σχεδίαση δυο διαφορετικών προσομοιώσεων μεταεπιφανειών χρησιμοποιώντας ως κύριο υλικό το γραφένιο και ως υλικό καθρέπτη το χρυσό. Στόχος αυτών των δύο προσομοιώσεων ήταν η μεγαλύτερη δυνατή απορρόφηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, η οποία πραγματοποιήθηκε σε μεγάλο βαθμό.

Το βασικότερο συμπέρασμα αυτής της διπλωματικής είναι το γεγονός ότι για την έρευνα και την μελέτη των μεταεπιφανειών είναι απαραίτητη σε μεγάλο βαθμό η γνώση θεωρίας ηλεκτρομαγνητισμού καθώς και η γνώση υπολογιστικών μεθόδων. Κατανοούμε λοιπόν, ότι με υλικά όπως το γραφένιο και με απλές περιοδικές διατάξεις μπορούμε να δημιουργήσουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα για την πρώτη διάταξη ακολουθήσαμε το αντίστοιχο άρθρο για την κατασκευή, υλοποίηση και παρατηρήσαμε ότι τα αποτελέσματα μας είναι όμοια με αυτό. Στην δεύτερη διάταξη πραγματοποιήσαμε μία σύγκριση ανάμεσα στο υλικό γραφένιο και στο BDS FILM, και καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι οι μετρήσεις και των δύο υλικών δεν διαφέρουν σημαντικά καθώς και τα αποτελέσματα είναι εξίσου όμοια.

Τέλος στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν δώσαμε σχεδόν καθόλου έμφαση στις ανομοιόμορφες μεταεπιφάνειες οι οποίες απασχολούν σε μεγάλο βαθμό τα τελευταία χρόνια την επιστημονική κοινότητα. Επιπλέον εξαιτίας της δυσκολίας κατασκευής και του ελάχιστου χρόνου δεν δώσαμε βαρύτητα στις μεταεπιφάνειες με ενεργά συγκεντρωμένα στοιχεία, οι οποίες παρουσιάζουν επίσης εξαιρετική ζήτηση το τελευταίο χρονικό διάστημα [11].

- [1] G.V. Eleftheriades and K.G. Balmain, *Negative-Refraction Metamaterials*, Wiley, 2005.
- [2] V A Libi Mol, C K Anandan “An ultrathin microwave metamaterial absorber with enhanced bandwidth and angular stability” 2017.
- [3] Christopher L. Holloway, Edward F. Kuester, Joshua A. Gordon, John O Hara, Jim Booth, Davis R. Amith “An Overview of the Theory and Applications of Metasurfaces : The Two Dimensional Equivalents of Metamaterials” April 2012.
- [4] Ziheng Zhou, Ke Chen, Junming Zhao, Ping Chen, Tian Jiang, Bo Zhu, Yijun Feng, And Yue Li “Metasurface Salisbury screen: achieving ultra wideband microwave absorption” November 2017.
- [5] ChengGang Hu, Xiong Li, Qin Feng, Xu Nan Chen and XianGang Luo “Investigation of the role of the dielectric loss in metamaterial absorber” March 2010.
- [6] Geim A. K. and K.S Novoselov, *The Rise of Graphene*, 2007.
- [7] C.Simovski, P.Belov, H.Sailing, “Backward wave region and negative material parameters of a structure formed by lattice of wires and split-ring-resonators” *IEEE Trans. Antennas & Prop.*, vol 51, pp. 2582-2591, 2003.
- [8] E. Ozbay, K Aydin, E. Cubukcu and M. Bayindir, “Transmission and reflection properties of composite double negative metamaterials in free space”, *IEE Trans. Antennas & Prop.* , vol. 51, pp. 2582-2591, 2003.
- [9] I. Llauger, C. Kremers, D. N. Chigrin, J. M. Jornet, M. C. Lemme, A. Cabellos-Aparicio, and E. A. ON, “Radiation characteristics of tunable graphene in the terahertz band,” *Radioengineering*, vol. 21, no. 4, pp. 946-953, 2012.
- [10] Ντόκος Κωνσταντίνος “Υπολογιστική θεωρητική ανάλυση μεταεπιφανειών” Διπλωματική εργασία, Μάρτιος 2020.
- [11] Μαρία Χριστίνα Γκανίδη “Απορροφητές βασισμένοι σε δομές μεταλλικών για εφαρμογή σε μικροκυματικές συχνότητες”, Διπλωματική εργασία ,Θεσσαλονίκη 2021.
- [12] Τουμάση Παναγιώτη “Ανάπτυξη κεραιών για In Vitro φασματοσκοπία βιολογικών ιστών στο THz φάσμα συχνοτήτων”, Διπλωματική εργασία, Φεβρουάριος 2018.
- [13] Φασουλάκης Αναστάσιος “Προσομοίωση μεταλλικών και γραφενίου σε συστήματα ασύρματης μεταφοράς ενέργειας μέσω της τεχνικής FDTD” Διπλωματική εργασία, Σεπτέμβριος 2017.

- [14] Vinit Singh Yadav, Brajesh K. Kaushik, Amalendu Patnaik, “Broadband THz Absorber for Large Inclination Angle TE and TM Waves”, IEEE Photonics Journal, vol. 13, no. 5, October 2021.
- [15] Jiao Wang, Xinguo Wan, Yannan Jiango, “Tunable Triple-Band Terahertz Absorber Based on Bulk-Dirac-Semimetal Metasurface”, IEE Photonics, Vol. 13, Issue: 4, Aug. 2021.
- [16] optiki.files.wordpress.com/2013/12/metamaterials.pdf
- [17] en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_metasurface
- [18] <https://www.somasleep.gr/el/blog/to-covid-19-b19.html>
- [19] https://www.researchgate.net/publication/321371901_An_Overview_of_Metamaterial_Researches
- [20] <http://www.physics.ntua.gr/gr/dpms/diplomatikes/pantazis.pdf>
- [21] <https://www.asrmeta.com/whta-are-metamaterials-and-metasurfaces/>
- [22] <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adom.202100175>
- [23] <https://www.in.gr/2021/06/17/b-science/sars-cov2/koronaioi-magiko-yliko-prosferei-taxeia-anixneysi/>
- [24] <https://gr.dreamstime.com/-image37672212>
- [25] <https://www.naftemporiki.gr/story/911907/othones-apo-grafenio-anoigoun-ton-dromo-gia-diafanes-eukamptes-ilektronikes-suskeues>
- [26] <https://www.intechopen.com/chapters/49248>
- [27] <https://mybroadband.co.za/news/science/206762-using-graphene-to-make-flexible-oled-screens.html>
- [28] <https://www.komotinipress.gr/epistimonas-anakalipsan-ilektroniko-xarti/>
- [29] <https://www.researchgate.net/project/Hybrid-Nanoparticles-and-Graphene-Nanosheets-Modified-Nano-filter-for-Water-Desalination-and-Purification>
- [30] <https://energypress.gr/news/neo-yliko-apeilei-na-ekthronisei-grafenio>
- [31] <https://www.ubuy.com.ro/en/product/4CNVW2O-superhc-50-pcs-graphene-protective-masks-black-disposable-face-mask-breathable-3-layer-non-woven-fac>
- [32] <https://www.mobosdata.com/news/samsung-might-soon-deliver-graphene-batteries/>

- [33] <https://www.aliexpress.com/item/4000099731087.html>
- [34] <https://www.nature.com/articles/nmat708>
- [35] <https://othjournal.com/2020/02/28/terahertz-technologies-and-future-security-environments/>
- [36] https://www.researchgate.net/publication/352389466_Tunable_Triple-Band_Terahertz_Absorber_Based_on_Bulk-Dirac-Semimetal_Metasurface
- [37] <https://physicsgg.me/2015/05/19/κεραία-ραδιοσυχνοτήτων-από-γραφένιο/>
- [38] <https://technology-earth.com/el/198492-graphene-based-nano-antennas-may-enable-networks-of-tiny-machines/>
- [39] <https://aip.scitation.org/na101/home/literatum/publisher/aip/journals/content/apl/2015/apl.2015.106.issue-20/1.4919935/production/images/medium/1.4919935.figures.f3.gif>