



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΜΕΤΑΪΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥΣ**

Χατζηκωνσταντή Μαρία

Επιβλέποντες
Ευμορφόπουλος Νέστωρ, Επίκουρος Καθηγητής
Σταμούλης Γεώργιος, Καθηγητής

Βόλος, 2018



UNIVERSITY OF THESSALY
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

DIPLOMA THESIS

ANALYSIS OF METAMATERIAL STRUCTURES AND
METHODS OF SIMULATION

Chatzikonstanti Maria

Supervisors

Eumorfopoulos Nestoras, Assistant Professor
Stamoulis Georgios, Professor

Volos, 2018

Στην οικογένειά μου

Ευχαριστίες

Θα ήθελα πρωτίστως, να ευχαριστήσω τον καθηγητή Ευμορφόπουλο Νέστορα για τα κίνητρα, τις τεράστιες γνώσεις και την καθοδήγηση του, καθώς επίσης και τον επιβλέποντα καθηγητή Σταμούλη Γεώργιο. Με τη συχνή επικοινωνία και συνεργασία μας κατάφερα να ξεπεράσω τυχόν εμπόδια που ήρθαν στο δρόμο μου προς την ολοκλήρωση της έρευνάς μου.

Δεν θα μπορούσα, επίσης, να ξεχάσω, να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στους υπόλοιπους καθηγητές μου για την υποστήριξή τους, την βοήθεια και την υπομονή τους.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τη βαθιά μου ευγνωμοσύνη στους γονείς μου, στην αδερφή μου και στους φίλους μου που όλα αυτά τα χρόνια στέκονται δίπλα μου. Η παροχή αδιάκοπης υποστήριξης και συνεχούς ενθάρρυνσης, συνετέλεσε στην επίτευξη των στόχων μου και στην ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση διατάξεων μεταϊλικών και μέθοδοι προσομοίωσης τους. Τα τελευταία δέκα χρόνια το αντικείμενο των μεταϊλικών αντιμετωπίστηκε από την επιστημονική κοινότητα με ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Καταλυτικό ρόλο σε αυτό, αποτέλεσε η εξέλιξη των τεχνικών κατασκευής, η οποία έδωσε την δυνατότητα υλοποίησης τέτοιων διατάξεων οι οποίες μέχρι πρότινος φάνταζαν αδύνατες. Τα μεταϊλικά εμφανίζουν ταυτόχρονα αρνητικές τιμές των συντακτικών τους παραμέτρων ϵ και μ σε ορισμένο εύρος συχνοτήτων, με αποτέλεσμα αρκετά ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά, όπως η εμφάνιση αρνητικού δείκτη διάθλασης και το γεγονός ότι η ταχύτητα φάσης και η ταχύτητα ομάδας, που χαρακτηρίζει την κατεύθυνση μετάδοσης της ισχύος, έχουν αντίθετες κατευθύνσεις.

Αναλυτικά, στο 1^ο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται μια επισκόπηση της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, με ιδιαίτερη έμφαση στους τρεις νόμους της γεωμετρικής οπτικής ως αποτέλεσμα της ανάκλασης και της μετάδοσης των κυμάτων. Έπειτα, στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται μια εκτενής αναφορά στα ίδια τα μεταϊλικά, με μια σύντομη ιστορική ανασκόπηση και προσδιορίζονται ορισμένες από τις ξεχωριστές ιδιότητες τους. Στη συνέχεια, το 3^ο κεφάλαιο, παρουσιάζει δύο βασικές εφαρμογές των μεταϊλικών, τον αόρατο μανδύα (invisibility cloak) και τον τέλειο φακό (perfect lens). Τέλος, στο 4^ο κεφάλαιο, περιγράφονται δύο μέθοδοι προσομοίωσης μεταϊλικών, η γρήγορη πολυπολική μέθοδος (Fast Multipole Method – FMM) και η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (Finite Difference Time Domain – FDTD).

Abstract

The purpose of this diploma thesis is the analysis of metamaterial structures and methods of simulation. Over the past ten years the subject of metamaterials has been addressed by the scientific community with particular interest. A determining role was the development of construction techniques, which made it possible to implement such provisions which until recently seemed impossible. The metamaterials simultaneously exhibit negative values of their syntactic parameters ϵ and μ over a certain range of frequencies, resulting in several interesting features, such as the occurrence of a negative refractive index and the fact that the phase velocity and group velocity the direction of power transmission, have opposite directions.

Analytically, in the first chapter of the paper an overview of the propagation of electromagnetic waves is made, with particular emphasis on the three laws of geometric optics as a result of reflection and wave propagation. Then, in 2nd chapter an extensive reference is made to the metamaterials themselves, with a brief historical review and identifying some of their particular qualities. Subsequently, 3rd chapter presents two basic applications of metamaterials, invisibility cloak and perfect lens. Finally, 4th chapter describes two methods of metamaterial simulation, the Fast Multipole Method (FMM) and the Finite Difference Time Domain (FDTD) method.

Περιεχόμενα

1 Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων	
1.1 Εισαγωγή στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα	10
1.2 Ηλεκτρομαγνητικά κύματα στο κενό	11
1.2.1 Εξισώσεις Maxwell	11
1.2.2 Μονοχρωματικά επίπεδα κύματα	12
1.3 Ηλεκτρομαγνητικά κύματα στην ύλη	14
1.3.1 Διάδοση σε γραμμικά μέσα	14
1.3.2 Ανάκλαση και μετάδοση για κάθετη πρόσπτωση	16
1.3.3 Ανάκλαση και μετάδοση για πλάγια πρόσπτωση	17
2 Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων σε Μεταύλικά	
2.1 Εισαγωγή στην έννοια των μεταύλικών	20
2.2 Ερευνητική αναδρομή	21
2.3 Το πρώτο μεταύλικό	22
2.4 Κατηγοριοποίηση των μεταύλικών	24
2.5 Ιδιότητες και εφαρμογές	26
2.5.1 Αρνητικός δείκτης διάθλασης	26
2.5.2 Αριστερόστροφα υλικά	26
2.5.3 Αντιστροφή του νόμου Snell	28
2.6 Δημιουργία μεταύλικών	30
3 Εφαρμογές των μεταύλικών	
3.1 Υλικά με εξωτικές ιδιότητες	33
3.2 Αόρατος μανδύας	34
3.2.1 Μανδύας και αορατότητα	35
3.2.2 Τεχνική ακύρωσης σκέδασης	35
3.2.3 Τεχνική μετασχηματισμού συντεταγμένων	37
3.2.4 Τεχνική γραμμής μετάδοσης	39
3.2.5 Πειραματικά αποτελέσματα	41
3.2.6 Άλλες τεχνικές cloaking	41
3.3 Τέλειος φακός	42
4 Μέθοδοι προσομοίωσης μεταύλικών	
4.1 Εισαγωγή	45
4.2 Η Γρήγορη Πολυπολική Μέθοδος	45
4.2.1 Η Ενιαία Εξίσωση Ηλεκτρικού Πεδίου	46
4.2.2 Μοναδιαία Κελιά	48
4.2.3 Δομές Μεταύλικών	50
4.2.4 Αποτελέσματα	52
4.3 Μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών στο Πεδίο του Χρόνου	54
4.3.1 Το ορθογώνιο πλέγμα	54
4.3.2 Το σχέδιο Leapfrog	55
4.3.3 Άλλα σχέδια αποκρυπτογράφησης χωροταξικού τομέα	56
4.3.4 1D Προσομοίωση με τη μέθοδο FDTD	58
Συμπεράσματα	59
Βιβλιογραφία	60

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

1.1 Εισαγωγή στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα

Ο ηλεκτρισμός και ο μαγνητισμός στο ξεκίνημα τους, ήταν εντελώς ξεχωριστά αντικείμενα. Ωστόσο, το 1820 ο Oersted παρατήρησε ότι το ηλεκτρικό ρεύμα μπορούσε να εκτρέψει μια βελόνα. Λίγο αργότερα ο Ampere διατύπωσε τη σωστή υπόθεση ότι όλα τα μαγνητικά φαινόμενα δημιουργούνται από κινούμενα ηλεκτρικά φορτία [1]. Μετά το 1831, ο Faraday ανακάλυψε ότι ένας κινούμενος μαγνήτης προκαλεί ηλεκτρικό ρεύμα. Από τον καιρό που οι Maxwell και Lorentz πρόσθεσαν τις τελευταίες λεπτομέρειες ολοκλήρωσης της θεωρίας, ο ηλεκτρισμός και ο μαγνητισμός παραμένουν αξεδιάλυτα ενωμένοι. Δεν μπορούν να θεωρούνται ξεχωριστά αντικείμενα μελέτης, αλλά ως δύο όψεις ενός και μόνον αντικειμένου, του ηλεκτρομαγνητισμού.

Ο Faraday είχε υποθέσει ότι και η φύση του φωτός, επίσης, είναι ηλεκτρική. Η θεωρία του Maxwell επιβεβαίωσε αυτήν την υπόθεση και σύντομα η οπτική ενσωματώθηκε στον ηλεκτρομαγνητισμό. Από το 1900, τρεις μεγάλοι κλάδοι της φυσικής, ο ηλεκτρισμός, ο μαγνητισμός και η οπτική συγχωνεύτηκαν σε μια ενιαία θεωρία. Μετ' έπειτα έγινε φανερό ότι το ορατό φως αντιπροσωπεύει μόνο ένα μικρό κομμάτι του αχανούς φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που συμπεριλαμβάνει τα ραδιοκύματα, συνεχίζει με τα μικροκύματα, το υπέρυθρο και το υπεριώδες, και φτάνει ως τις ακτίνες X και την πυρηνική ακτινοβολία γάμμα.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα αποτελούνται από ταλαντευόμενα μαγνητικά και ηλεκτρικά πεδία. Για ένα επίπεδο κύμα στον χώρο, οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου είναι παντού κάθετες μεταξύ τους και κάθετες στην διεύθυνση διάδοσης. Αυτή είναι μια θεώρηση που πρακτικά δεν μπορεί να ελεγχθεί αφού τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι μη ορατά. Ωστόσο η θεώρηση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των κυμάτων κατά τα φαινόμενα της ανάκλασης της διάθλασης και της περίθλασης. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι ταλαντώσεις που μεταδίδονται στον ελεύθερο χώρο με την ταχύτητα του φωτός. Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα μπορεί να ταξιδέψει μέσα από οτιδήποτε - είτε πρόκειται για αέρα, για ένα στερεό υλικό είτε για κενό. Δεν χρειάζεται μέσο για διάδοση ή μετακίνηση από το ένα μέρος στο άλλο.

1.2 Ηλεκτρομαγνητικά κύματα στο κενό

1.2.1 Εξισώσεις Maxwell

Οι εξισώσεις του Maxwell είναι το βασικό εργαλείο το οποίο και χρησιμοποιούμε για να κατανοήσουμε όλα τα ηλεκτρομαγνητικά και οπτικά φαινόμενα που απαντώνται στην φύση. Σε περιοχές του χώρου όπου δεν υπάρχουν φορτία ή ρεύματα, οι εξισώσεις του Maxwell είναι οι εξής:

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (1.1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (1.2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1.3)$$

$$\nabla \times B = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1.4)$$

όπου με E και B συμβολίζουμε αντίστοιχα το ηλεκτρικό και το μαγνητικό μακροσκοπικό πεδίο. Η σταθερά μ_0 ονομάζεται *διαπερατότητα του κενού χώρου* με τιμή $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ και η σταθερά ε_0 ονομάζεται *διηλεκτρική σταθερά ή δεκτικότητα, του κενού* με τιμή $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N}\cdot\text{m}^2}$.

Οι παραπάνω εξισώσεις αποτελούν ένα σύνολο πρώτης τάξεως συζευγμένων μερικών διαφορικών εξισώσεων ως προς τα πεδία E και B . Μπορούν όμως να από-συζευχθούν, με εφαρμογή του στροβιλισμού στις (1.3) και (1.4):

$$\nabla \times (\nabla \times E) = \nabla(\nabla \cdot E) - \nabla^2 E = \nabla \times \left(-\frac{\partial B}{\partial t} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times B) = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

$$\nabla \times (\nabla \times B) = \nabla(\nabla \cdot B) - \nabla^2 B = \nabla \times \left(\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \right) = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times E) = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2}.$$

Δεδομένου ότι $\nabla \cdot E = 0$ και $\nabla \cdot B = 0$ καταλήγουμε στις εξής εξισώσεις,

$$\nabla^2 E = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}, \quad \nabla^2 B = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2}. \quad (1.5)$$

Επομένως, μετά την από-σύζευξη, οι εξισώσεις του Maxwell καταλήγουν σε δύο ξεχωριστές, δεύτερης τάξεως εξισώσεις για τα E και B .

Στο κενό, οι συνιστώσες των E και B ικανοποιούν την τρισδιάστατη κυματική εξίσωση

$$\nabla^2 f = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2}.$$

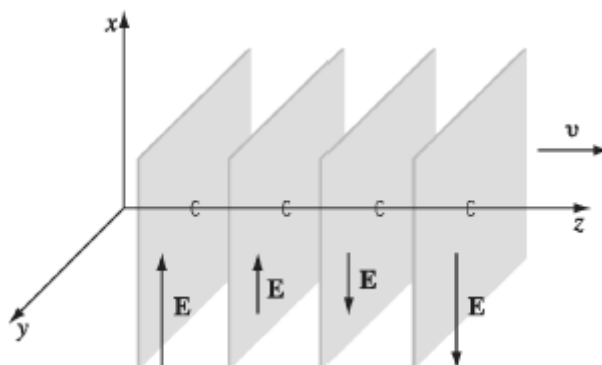
Σύμφωνα με τις εξισώσεις του Maxwell, το κενό επιτρέπει τη διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, και μάλιστα με την πολύ συγκεκριμένη ταχύτητα

$$u = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s},$$

που ισούται ακριβώς με την ταχύτητα του φωτός c .

1.2.2 Μονοχρωματικά επίπεδα κύματα

Δεδομένου ότι οι αισθήσεις μας αντιλαμβάνονται τη συχνότητα του φωτός σαν χρώμα, τα ημιτονοειδή κύματα συχνότητας ω ονομάζονται *μονοχρωματικά*. Επιπρόσθετα, τα κύματα που είναι ανεξάρτητα από τις συντεταγμένες x και y και οδεύουν κατά μήκος του άξονα z , ονομάζονται *επίπεδα*, διότι τα πεδία είναι ομογενή πάνω σε οποιοδήποτε επίπεδο που τέμνει κάθετα τη διεύθυνση διάδοσης (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1 Επίπεδα κύματα.

Επομένως, τα πεδία είναι της μορφής:

$$\vec{E}(z, t) = \vec{E}_0 e^{i(kz - \omega t)}, \quad \vec{B}(z, t) = \vec{B}_0 e^{i(kz - \omega t)},$$

όπου \vec{E}_0 και \vec{B}_0 είναι τα (μικραδικά) πλάτη του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου.

Οι κυματικές εξισώσεις για τα E και B , Εξ. (1.5), έχουν εξαχθεί από τις εξισώσεις Maxwell. Ωστόσο, αν και οποιαδήποτε λύση των εξισώσεων Maxwell (στον κενό χώρο) ικανοποιεί την κυματική εξίσωση, το αντίστροφο δεν αληθεύει. Οι εξισώσεις Maxwell θέτουν πρόσθετους περιορισμούς στα \vec{E}_0 και \vec{B}_0 . Ειδικότερα, δεδομένου ότι $\nabla \cdot E = 0$ και $\nabla \cdot B = 0$, έπεται ότι

$$(\vec{E}_0)_z = (\vec{B}_0)_z = 0.$$

Συνεπώς, αυτό σημαίνει ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι *εγκάρσια*. Με άλλα λόγια, τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία είναι πάντα κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης.

Επίσης, από το νόμο του Faraday, $\nabla \times E = -\partial B/\partial t$, προκύπτει ότι τα πλάτη του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου πρέπει να ικανοποιούν τις σχέσεις

$$-k(\widetilde{E}_0)_y = \omega(\widetilde{B}_0)_x, \quad k(\widetilde{E}_0)_x = (\widetilde{B}_0)_y, \quad (1.6)$$

ή, συμπαγέστερα, την εξίσωση:

$$\widetilde{B}_0 = \frac{k}{\omega} (\hat{z} \times \widetilde{E}_0).$$

Εν κατακλείδι, τα E και B έχουν την ίδια φάση και είναι κάθετα το ένα στο άλλο, ενώ τα πραγματικά πλάτη συνδέονται με τη σχέση

$$B_0 = \frac{k}{\omega} E_0 = \frac{1}{c} E_0.$$

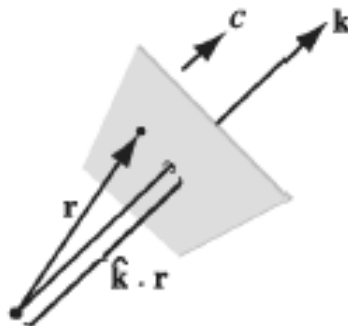
Η τέταρτη εξίσωση του Maxwell, $\nabla \times B = \mu_0 \epsilon_0 (\partial E / \partial t)$, δεν οδηγεί σε κάποια ανεξάρτητη συνθήκη, απλά αναπαράγει την (1.6).

Δεν υπάρχει τίποτα το ξεχωριστό σχετικά με την κατεύθυνση του θετικού άξονα z. Η γενίκευση σε μονοχρωματικά επίπεδα κύματα που οδεύουν προς μια τυχαία κατεύθυνση γίνεται εύκολα. Ο συμβολισμός μπορεί να απλοποιηθεί με την εισαγωγή του διανύσματος διάδοσης (ή κυματικού διανύσματος) k , που δείχνει στην κατεύθυνση διάδοσης και έχει μέτρο τον κυματικό αριθμό k . Η καλύτερη γενίκευση του γινομένου kz είναι το εσωτερικό γινόμενο $k \cdot r$ (Σχήμα 1.2), οπότε

$$\begin{aligned} \widetilde{E}(r, t) &= \widetilde{E}_0 e^{i(k \cdot r - \omega t)} \hat{n}, \\ \widetilde{B}(r, t) &= \frac{1}{c} \widetilde{E}_0 e^{i(k \cdot r - \omega t)} (\hat{k} \times \hat{n}) = \frac{1}{c} \hat{k} \times \widetilde{E}, \end{aligned} \quad (1.7)$$

όπου \hat{n} είναι το διάνυσμα πόλωσης. Δεδομένου ότι το E είναι εγκάρσιο,

$$\hat{n} \times \hat{k} = 0.$$



Σχήμα 1.2 Διάνυσμα διάδοσης k .

Το γεγονός ότι και το B είναι εγκάρσιο, προκύπτει αυτομάτως από την (1.7). Τα φυσικά (πραγματικά) ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία σε ένα μονοχρωματικό επίπεδο κύμα με διάνυσμα διάδοσης k και πόλωση \hat{n} είναι επομένως

$$\tilde{E}(\mathbf{r}, t) = E_0 \cos(k \cdot \mathbf{r} - \omega t + \delta) \hat{n},$$

$$\tilde{B}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{c} E_0 \cos(k \cdot \mathbf{r} - \omega t + \delta) (\hat{k} \times \hat{n}).$$

1.3 Ηλεκτρομαγνητικά κύματα στην ύλη

1.3.1 Διάδοση σε γραμμικά μέσα

Στο εσωτερικό της ύλης, αλλά σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν ελεύθερα φορτία ή ελεύθερα ρεύματα, οι εξισώσεις Maxwell γίνονται,

$$\nabla \cdot D = 0$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t}.$$

Αν το υλικό είναι γραμμικό, τότε έχουμε

$$D = \varepsilon E, \quad H = \frac{1}{\mu} B,$$

και ομογενές, οπότε τα ε και μ δεν μεταβάλλονται από το ένα σημείο στο άλλο, οι εξισώσεις Maxwell ανάγονται στις

$$\nabla \cdot E = 0$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\nabla \times H = \mu \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t},$$

που η μόνη τους διαφορά από τις αντίστοιχες στο κενό, Εξ. (1.1) - (1.4), είναι ότι το $\mu_0 \varepsilon_0$ έχει αντικατασταθεί με το $\mu \varepsilon$. Συνεπώς, σε ένα γραμμικό ομογενές υλικό τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται με ταχύτητα

$$u = \frac{1}{\sqrt{\mu \varepsilon}} = \frac{c}{n},$$

όπου

$$n \equiv \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{\epsilon_0\mu_0}}$$

είναι ο δείκτης διάθλασης του υλικού. Για τα περισσότερα υλικά το μ είναι πολύ κοντά στο μ_0 , οπότε

$$n \cong \sqrt{\epsilon_r},$$

όπου $\epsilon_r \equiv \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ είναι η διηλεκτρική σταθερά (ή σχετική δεκτικότητα). Αφού το ϵ_r είναι σχεδόν πάντα μεγαλύτερο του 1, το φως ταξιδεύει πιο αργά μέσα στην ύλη.

Η πυκνότητα ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας είναι

$$u = \frac{1}{2} \left(\epsilon E^2 + \frac{1}{\mu} B^2 \right),$$

και το διάνυσμα Poynting είναι

$$S = \frac{1}{\mu} (E \times B).$$

Για μονοχρωματικά επίπεδα κύματα η συχνότητα και ο κυματικός αριθμός συνδέονται με τη σχέση $\omega = kv$, το πλάτος του B είναι $1/v$ φορές το πλάτος του E και η ένταση είναι

$$I = \frac{1}{2} \epsilon v E_0^2.$$

Όταν ένα κύμα περνά από ένα τέτοιο υλικό σε ένα άλλο, όπως για παράδειγμα από τον αέρα στο νερό ή από το γυαλί στο πλαστικό, το αποτέλεσμα είναι ένα ανακλώμενο και ένα μεταδιδόμενο κύμα. Αν δεν υπάρχει ελεύθερο φορτίο ή ελεύθερο ρεύμα στη διαχωριστική επιφάνεια, τότε ισχύουν οι εξής συνοριακές συνθήκες,

$$i. \epsilon_1 E_1^\perp = \epsilon_2 E_2^\perp$$

$$ii. B_1^\perp = B_2^\perp$$

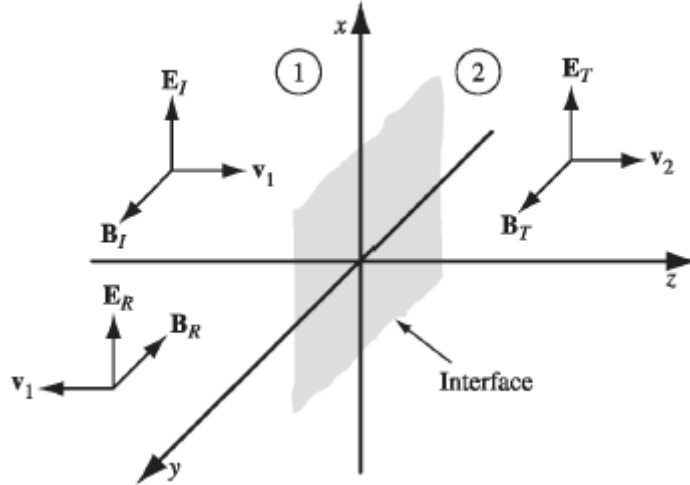
$$iii. E_1^\parallel = E_2^\parallel$$

$$iv. \frac{1}{\mu_1} B_1^\parallel = \frac{1}{\mu_2} B_2^\parallel.$$

Οι εξισώσεις αυτές συσχετίζουν τις συνιστώσες του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου μόλις αριστερά και μόλις δεξιά από την επιφάνεια που διαχωρίζει τα δύο γραμμικά μέσα.

1.3.2 Ανάκλαση και μετάδοση για κάθετη πρόσπτωση

Έστω το επίπεδο xy είναι μια διαχωριστική επιφάνεια ανάμεσα σε δύο γραμμικά μέσα. Ένα επίπεδο κύμα συχνότητας ω , το οποίο οδεύει προς την κατεύθυνση z και είναι πολωμένο στην κατεύθυνση x , προσπίπτει στη διαχωριστική επιφάνεια από τα αριστερά (Σχήμα 1.3).



Σχήμα 1.3 Διαχωριστική επιφάνεια ανάμεσα σε δύο γραμμικά μέσα.

Τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία σε αυτή την επιφάνεια είναι αντίστοιχα τα εξής

$$\tilde{E}_I(z, t) = \tilde{E}_{0I} e^{i(k_1 z - \omega t)} \hat{x},$$

$$\tilde{B}_I(z, t) = \frac{1}{v_1} \tilde{E}_{0I} e^{i(k_1 z - \omega t)} \hat{y}.$$

Το κύμα αυτό δημιουργεί ένα ανακλώμενο κύμα, το οποίο οδεύει προς την αντίθετη κατεύθυνση στο μέσο (1), δηλαδή προς τα αριστερά και έχει τις εξής εξισώσεις

$$\tilde{E}_R(z, t) = \tilde{E}_{0R} e^{i(-k_1 z - \omega t)} \hat{x},$$

$$\tilde{B}_R(z, t) = -\frac{1}{v_1} \tilde{E}_{0R} e^{i(-k_1 z - \omega t)} \hat{y},$$

και ένα μεταδιδόμενο κύμα που κινείται προς τα δεξιά στο μέσο (2) με τις παρακάτω

$$\tilde{E}_T(z, t) = \tilde{E}_{0T} e^{i(k_2 z - \omega t)} \hat{x},$$

$$\tilde{B}_T(z, t) = -\frac{1}{v_1} \tilde{E}_{0T} e^{i(k_2 z - \omega t)} \hat{y}.$$

Τα συνιστάμενα πεδία $\tilde{E}_I + \tilde{E}_R$ και $\tilde{B}_I + \tilde{B}_R$ που βρίσκονται αριστερά της διαχωριστικής επιφάνειας $z = 0$ και τα πεδία \tilde{E}_T , \tilde{B}_T δεξιά της πρέπει να πληρούν τις συνοριακές

συνθήκες (i) - (iv). Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν συνιστώσες κάθετες στην επιφάνεια οι συνθήκες (i), (ii) ικανοποιούνται τετριμμένα. Ωστόσο, η συνθήκη (iii) απαιτεί το εξής

$$\tilde{E}_{0I} + \tilde{E}_{0R} = \tilde{E}_{0T}, \quad (1.8)$$

ενώ η (iv) αναφέρει ότι

$$\frac{1}{\mu_1} \left(\frac{1}{v_1} \tilde{E}_{0I} - \frac{1}{v_1} \tilde{E}_{0R} \right) = \frac{1}{\mu_2} \left(\frac{1}{v_2} \tilde{E}_{0T} \right),$$

ή

$$\tilde{E}_{0I} - \tilde{E}_{0R} = \beta \tilde{E}_{0T}, \quad (1.9)$$

όπου:

$$\beta \equiv \frac{\mu_1 v_1}{\mu_2 v_2} = \frac{\mu_1 n_2}{\mu_2 n_1}.$$

Από τις (1.8) και (1.9) προκύπτουν τα εξερχόμενα πλάτη συναρτήσει του προσπίπτοντος πλάτους

$$\tilde{E}_{0R} = \left(\frac{1 - \beta}{1 + \beta} \right) \tilde{E}_{0I}, \quad \tilde{E}_{0T} = \left(\frac{2}{1 + \beta} \right) \tilde{E}_{0I}.$$

Αν η μαγνητική διαπερατότητα μ είναι περίπου ίση με τη διαπερατότητα στο κενό και θέσουμε $\beta = v_1/v_2$, τότε προκύπτουν οι εξισώσεις

$$\tilde{E}_{0R} = \left(\frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1} \right) \tilde{E}_{0I}, \quad \tilde{E}_{0T} = \left(\frac{2v_2}{v_2 + v_1} \right) \tilde{E}_{0I}.$$

Το ανακλώμενο κύμα έχει ίδια φάση με το προσπίπτον, δηλαδή δείχνει προς τα πάνω, αν $v_2 > v_1$ και αντίθετη φάση, δηλαδή δείχνει προς τα κάτω, αν $v_2 < v_1$. Τα πραγματικά πλάτη συνδέονται μέσω των σχέσεων

$$\tilde{E}_{0R} = \left| \frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1} \right| \tilde{E}_{0I}, \quad \tilde{E}_{0T} = \left| \frac{2v_2}{v_2 + v_1} \right| \tilde{E}_{0I},$$

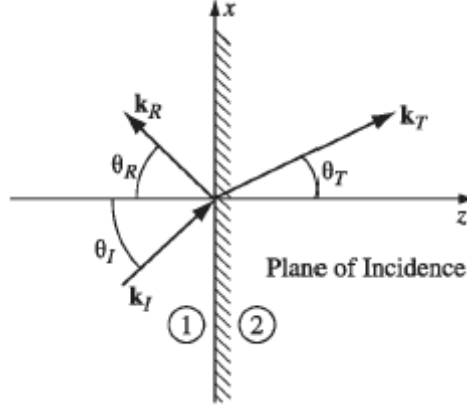
ή, συναρτήσει του δείκτη διάθλασης,

$$\tilde{E}_{0R} = \left| \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right| \tilde{E}_{0I}, \quad \tilde{E}_{0T} = \left| \frac{2n_1}{n_1 + n_2} \right| \tilde{E}_{0I}.$$

1.3.3 Ανάκλαση και μετάδοση για πλάγια πρόσπτωση

Η γενικότερη περίπτωση της πλάγιας πρόσπτωσης, κατά την οποία το προσπίπτον κύμα συναντά τη διαχωριστική επιφάνεια υπό μια τυχαία γωνία θ_I υποδεικνύεται στο

Σχήμα 1.4. Η κάθετη πρόσπτωση είναι απλά μια ειδική περίπτωση της πλάγιας πρόσπτωσης με $\theta_I = 0$.



Σχήμα 1.4 Πλάγια πρόσπτωση

Έστω ένα μονοχρωματικό επίπεδο κύμα

$$\tilde{E}_I(r, t) = \tilde{E}_{0I} e^{i(k_I \cdot r - \omega t)}, \quad \tilde{B}_I(r, t) = \frac{1}{v_1} (\hat{k}_I \times \tilde{E}_I)$$

προσπίπτει από τα αριστερά, δημιουργώντας ένα ανακλώμενο κύμα,

$$\tilde{E}_R(r, t) = \tilde{E}_{0R} e^{i(k_R \cdot r - \omega t)}, \quad \tilde{B}_R(r, t) = \frac{1}{v_1} (\hat{k}_R \times \tilde{E}_R)$$

και ένα μεταδιδόμενο κύμα

$$\tilde{E}_T(r, t) = \tilde{E}_{0T} e^{i(k_T \cdot r - \omega t)}, \quad \tilde{B}_T(r, t) = \frac{1}{v_2} (\hat{k}_T \times \tilde{E}_T).$$

Τα παραπάνω κύματα έχουν την ίδια συχνότητα ω , η οποία καθορίζεται από την πηγή, για παράδειγμα έναν φακό. Σύμφωνα με τη σχέση $\omega = kv$, οι σχέσεις μεταξύ των κυματικών αριθμών είναι:

$$k_I v_1 = k_R v_1 = k_T v_2 = \omega, \quad \text{ή} \quad k_I = k_R = \frac{v_2}{v_1} k_T = \frac{n_1}{n_2} k_T. \quad (1.10)$$

Τα συνιστάμενα πεδία στο μέσο (1) $\tilde{E}_I + \tilde{E}_R$ και $\tilde{B}_I + \tilde{B}_R$ και τα πεδία \tilde{E}_T , \tilde{B}_T στο μέσο (2), πρέπει να ικανοποιούν τις συνοριακές συνθήκες (i) – (iv).

Για τους χωρικούς όρους, πρέπει να ισχύει

$$k_I \cdot r = k_R \cdot r = k_T \cdot r, \quad \text{για } z = 0,$$

ή, αναλυτικότερα για όλα τα x και y ,

$$x(k_I)_x + y(k_I)_y = x(k_R)_x + y(k_R)_y = x(k_T)_x + y(k_T)_y.$$

Για να ισχύει η παραπάνω εξίσωση πρέπει όλες οι ομοειδείς συνιστώσες να είναι ίσες μεταξύ τους, έτσι για $x = 0$:

$$(k_I)_y = (k_R)_y = (k_T)_y,$$

ενώ για $y = 0$:

$$(k_I)_x = (k_R)_x = (k_T)_x.$$

Η παραπάνω εξίσωση υποδηλώνει ότι:

$$k_I \sin \theta_I = k_R \sin \theta_R = k_T \sin \theta_T, \quad (1.11)$$

όπου θ_I είναι η γωνία πρόσπτωσης, θ_R η γωνία ανάκλασης και θ_T η γωνία μετάδοσης ή γωνία διάθλασης. Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (1.10) και (1.11) προκύπτει ο παρακάτω νόμος της ανάκλασης.

Συμπερασματικά, οι τρεις θεμελιώδεις νόμοι της γεωμετρικής οπτικής είναι οι εξής:

Πρώτος Νόμος

Τα κυματικά διανύσματα του προσπίπτοντος, ανακλώμενου και μεταδιδόμενου κύματος βρίσκονται όλα σε ένα επίπεδο, το οποίο ονομάζεται πεδίο πρόσπτωσης, στο οποίο βρίσκεται και η κάθετος στη διαχωριστική επιφάνεια (άξονας z).

Δεύτερος Νόμος

Νόμος της ανάκλασης, Η γωνία πρόσπτωσης ισούται με τη γωνία ανάκλασης:

$$\theta_I = \theta_R.$$

Τρίτος Νόμος

Νόμος της διάθλασης ή *Νόμος του Snell*:

$$n_1 \sin \theta_I = n_2 \sin \theta_T.$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων σε Μεταϋλικά

2.1 Εισαγωγή στην έννοια των μεταϋλικών

Ο όρος *μεταϋλικά* (*metamaterials*) υιοθετήθηκε προκειμένου να χαρακτηρίσει μία νέα κατηγορία υλικών, τα οποία εμφανίζουν αξιοσημείωτες ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες και κατασκευάζονται τεχνητά [2]. Τα μεταϋλικά ορίζονται διεθνώς ως *τεχνητές ενεργά ομογενείς ηλεκτρομαγνητικές δομές με ασυνήθιστες ιδιότητες που δεν παρατηρούνται στη φύση*. Μία ενεργά ομογενής δομή είναι μία δομή στην οποία το μήκος κύματος της διαδιδόμενης ακτινοβολίας είναι αρκετές φορές μεγαλύτερο από το μέσο μέγεθος των δομικών στοιχείων που την αποτελούν. Η συνθήκη αυτή εξασφαλίζει ότι τα φαινόμενα διάθλασης επικρατούν έναντι των φαινομένων σκέδασης και περίθλασης κατά τη διάδοση ενός κύματος εντός του μεταϋλικού μέσου.

Ο κύριος λόγος που ενέπνευσε τους μελετητές να ασχοληθούν αρχικά με τις ιδιότητες των μεταϋλικών είναι η δυνατότητα δημιουργίας μιας δομής με αρνητικό δείκτη διάθλασης σε ορισμένο εύρος συχνοτήτων. Έτσι αποκαλύπτονται αρκετά ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά εκτός από την εμφάνιση αρνητικού δείκτη διάθλασης, όπως η αντιστροφή του φαινομένου Doppler και το γεγονός ότι η ταχύτητα φάσης και η ταχύτητα ομάδας έχουν αντίθετες κατευθύνσεις, με αποτέλεσμα την εμφάνιση οπισθοδρομικών κυμάτων, κάτι που δεν μπορεί να βρεθεί σε κάποιο υλικό ως φυσική ιδιότητα.

Το κλειδί στην αποτελεσματική κατασκευή ενός μεταϋλικού είναι η περιοδική επανάληψη ενός *μοναδιαίου κελιού* (*unit cell*) προς μία ή περισσότερες διαστάσεις του χώρου. Ως μοναδιαίο κελί θεωρείται η στοιχειώδης δομή της άπειρης περιοδικής γεωμετρίας, η οποία επαναλαμβάνεται στο χώρο. Για την ανάλυση μιας τέτοιας γεωμετρίας, αρκεί η μελέτη του πεδίου στο μοναδιαίο κελί με την επιβολή κατάλληλων οριακών συνθηκών. Οι διαστάσεις του είναι ηλεκτρικά μικρές και αποτελείται από κάποιο μεταλλικό στοιχείο ικανό για συντονισμό. Αυτές οι πολύ μικρές διαστάσεις του κελιού (μικρό κλάσμα του μήκους κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας π.χ. $\lambda/10$) βοηθούν έτσι ώστε το μεταϋλικό να συμπεριφέρεται σαν ομογενές υλικό σε μακροσκοπική κλίμακα.

Ο τρόπος κατασκευής ενός μεταϋλικού ξεκινά με μια συλλογή επαναλαμβανόμενων στοιχείων, σχεδιασμένων να έχουν μια ισχυρή απόκριση στα εφαρμοζόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Όσο το μέγεθος και οι αποστάσεις των στοιχείων είναι πολύ μικρότερα από τα μήκη κύματος των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που μας ενδιαφέρουν, η προσπίπτουσα ακτινοβολία δεν μπορεί να διακρίνει τη συλλογή των στοιχείων από ένα συνεχές ομογενές υλικό.

2.2 Ερευνητική διαδρομή

Η ιδέα για την πιθανή ύπαρξη των μεταϋλικών ανήκει στο Ρώσο επιστήμονα Veselago, ο οποίος το 1968 δημοσίευσε ένα άρθρο στο οποίο ανέλυσε την ηλεκτροδυναμική συμπεριφορά των υλικών με ταυτόχρονα αρνητικές τιμές των συντακτικών παραμέτρων τους ϵ και μ , υποθέτοντας την πιθανή ύπαρξή τους. Συγκεκριμένα, προέβλεψε τις μοναδικές ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητές τους, όπως η αντιστροφή του νόμου του Snell (εμφάνιση αρνητικού δείκτη διάθλασης) και η αντιστροφή του φαινομένου Doppler [3].

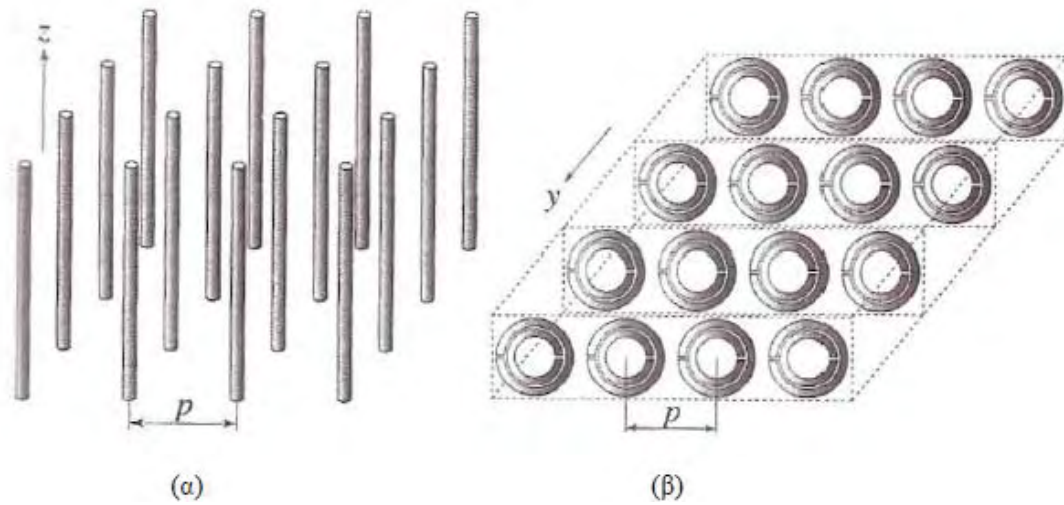
Στην αρχή οι επιστήμονες μελέτησαν την αλληλεπίδραση μεταξύ ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και φυσικών υλικών. Οι μελέτες αυτές έχουν αναπτυχθεί κυρίως σε οπτικές συχνότητες. Στη συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μπορούν αποτελεσματικά να αλληλοεπιδράσουν με τα δομικά συστατικά (δηλαδή, τα μόρια), από τα φυσικά υλικά. Μετά το πρώτο στάδιο, που χαρακτηρίζεται από την έρευνα της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης με φυσικά υλικά, το ενδιαφέρον μεταφέρθηκε στην αναπαραγωγή των ίδιων φαινομένων σε χαμηλότερες συχνότητες. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, η ιδέα ήταν η σύνθεση τεχνητών υλικών κατασκευασμένων από μεταλλικά ή συνθετικά στοιχεία κατάλληλα τοποθετημένα σε ένα διηλεκτρικό μέσο. Οι 'εμφυτευμένες' δομές (inclusions) έχουν τον ίδιο ρόλο που έχουν τα μόρια σε φυσικά υλικά, έχοντας όμως μεγαλύτερο μέγεθος για να καταστεί αποτελεσματική η αλληλεπίδραση με τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερα μήκη κύματος.

Η πειραματική επιβεβαίωση των θεωρητικών συλλογισμών του Veselago ήρθε περίπου 3 δεκαετίες αργότερα από μία ομάδα επιστημόνων στο πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια, San Diego (UCSD) με επικεφαλής τον D.R.Smith [4]. Το υλικό που κατασκευάστηκε ήταν μία ενεργά ομογενής δομή που αποτελούνταν από μία συστοιχία *χάλκινων διαχωρισμένων δακτυλίων* (*Split Ring Resonators - SRRs*) και *λεπτών μεταλλικών συρμάτων* (*Thin Wires - TW*), παρέχοντας αρνητική μαγνητική διαπερατότητα μ και διηλεκτρική επιτρεπτότητα ϵ αντίστοιχα. Κατασκευάζοντας μία δομή σχήματος σφήνας με το συγκεκριμένο υλικό, αποδείχθηκε πειραματικά το φαινόμενο του αρνητικού δείκτη διάθλασης. Μία ομάδα επιστημόνων στο MIT επανέλαβε το πείραμα επιβεβαιώνοντας τα πορίσματα του πανεπιστημίου UCSD [5]. Στη συνέχεια, αρκετοί επιστήμονες ενθαρρύνθηκαν από τα πειραματικά αποτελέσματα και μελέτησαν περαιτέρω τα χαρακτηριστικά και τις εφαρμογές των υλικών αριστερού νόμου (LHMs) [6]-[8].

2.3 Το πρώτο μεταϋλικό

Η πρώτη διάταξη που κατασκευάστηκε για να λειτουργήσει ως μεταϋλικό, αποτέλεσε την απαρχή για μια σειρά από επιστημονικές μελέτες γύρω από το νέο αντικείμενο των μεταϋλικών. Σημειώνεται ότι είχε προετοιμαστεί κατάλληλα το έδαφος για την πειραματική επιβεβαίωση του αρνητικού δείκτη διάθλασης από το πανεπιστήμιο UCSD, από τις πρωτοποριακές εργασίες του John Pendry στο πανεπιστήμιο Imperial του Λονδίνου. Ο Pendry εισήγαγε δύο νέες δομές για την επίτευξη αρνητικής διηλεκτρικής σταθεράς και αρνητικής μαγνητικής διαπερατότητας [9,10] για λειτουργία σε μικροκυματικές συχνότητες. Συγκεκριμένα, αρχικά απέδειξε ότι μία συστοιχία λεπτών μεταλλικών συρμάτων είναι δυνατό να εμφανίσει αρνητική

διηλεκτρική σταθερά ϵ σε ορισμένο εύρος συχνοτήτων. Η διάταξη είχε τη μορφή του σχήματος 2.1 (α), όπου η διάσταση p του unit cell ήταν πολύ μικρότερη του μήκους κύματος λ , επομένως η δομή ήταν ενεργά ομογενής.



Σχήμα 2.1 (α) Συστοιχία λεπτών μεταλλικών συρμάτων που παρείχε $\epsilon < 0$.
(β) Συστοιχία διαχωρισμένων δακτυλίων που παρείχε $\mu < 0$.

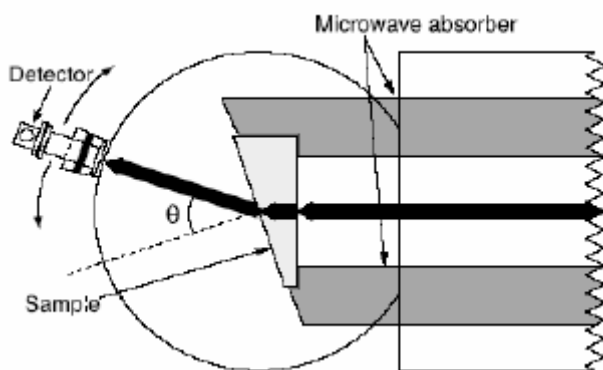
Στη συνέχεια, θεωρώντας τη διάταξη του σχήματος 2.1 (β), αποδείχθηκε ότι μία συστοιχία διαχωρισμένων δακτυλίων είναι δυνατό να εμφανίσει αρνητική μαγνητική διαπερατότητα σε ορισμένο εύρος συχνοτήτων.

Ο συνδυασμός των λεπτών μεταλλικών συρμάτων και της συστοιχίας των διαχωρισμένων δακτυλίων είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μίας σύνθετης τεχνητής διάταξης με ϵ, μ ταυτόχρονα αρνητικά σε ένα στενό εύρος ζώνης συχνοτήτων από τον D.R.Smith το 2001. Το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα αποτελούνταν από μία περιοδική συστοιχία δύο διαστάσεων, της οποίας η δομική μονάδα περιείχε τη διάταξη των διαχωρισμένων δακτυλίων και των λεπτών συρμάτων (Σχήμα 2.2). Από το τετραγωνικό πλέγμα της διάταξης κόπηκε ένα τμήμα πρισματικού σχήματος για τη διεξαγωγή του πειράματος.



Σχήμα 2.2 Αποψη του πρώτου μεταλλικού που κατασκευάστηκε.

Για τον καθορισμό του δείκτη διάθλασης μετρήθηκε η γωνία εκτροπής μίας μικροκυματικής δέσμης καθώς αυτή διέρχεται μέσα από το πρισματικό δείγμα. Το δείγμα τοποθετήθηκε ανάμεσα σε δύο παράλληλες κυκλικές πλάκες αλουμινίου. Ο ανιχνευτής της διάταξης ήταν ένας κυματοδηγός, ο οποίος μπορούσε να περιστρέφεται προκειμένου να καταγράψει τη μεταδιδόμενη ισχύ σε διάφορες γωνίες. (Σχήμα 2.3)



Σχήμα 2.3 Πειραματική διάταξη.

Τα κύματα της δέσμης διαδίδονται μέσα στον κυματοδηγό, που αποτελείται από δύο παράλληλα φύλλα αλουμινίου, ενώ περιορίζεται από κατάλληλη απορροφητική διάταξη (microwave absorber). Μετά από τη διάδοσή της μέσα στο πρίσμα, η δέσμη συναντά τη διεπιφάνεια διάθλασης, οπότε διαθλάται σε γωνία θ που καθορίζεται από το νόμο του Snell. Προκειμένου να μετρηθεί η γωνία εξόδου της δέσμης, περιστρέφεται ο ανιχνευτής και καταγράφεται το φάσμα της μεταδιδόμενης ισχύος σε όλη τη ζώνη συχνοτήτων σε κάθε βήμα με τη βοήθεια ενός αναλυτή φάσματος (network analyzer). Από τις τιμές της καταγραφόμενης ισχύος που αντιστοιχούν στις διάφορες γωνίες σάρωσης επιλέγεται για την εκάστοτε συχνότητα η μεγαλύτερη τιμή, η οποία αντιστοιχεί στη γωνία διάθλασης.

2.4 Κατηγοριοποίηση των μεταϋλικών

Η πρώτη και ίσως η πιο γνωστή κατηγορία μεταϋλικών είναι αυτή που αποτελείται από υλικά που παρουσιάζουν ταυτόχρονα αρνητικά πραγματικά μέρη της διηλεκτρικής τους σταθεράς και μαγνητικής διαπερατότητας. Τέτοιου είδους υλικά είναι ευρύτερα γνωστά είτε ως διπλοαρνητικά υλικά (Double Negative materials - DNG) είτε ως υλικά με αρνητικό δείκτη διάθλασης (Negative Index Materials - NIM), ως αριστερόστροφα υλικά (Left-Handed Materials - LHM) ή ως υλικά με διάδοση εκτελούμενη προς τα πίσω (Backward media - BW). Η προέλευση των ονομασιών αυτών προέρχεται από τις μοναδικές ιδιότητες που παρουσιάζει αυτή η κατηγορία των υλικών.

Ο όρος DNG σημαίνει ότι η διηλεκτρική σταθερά και η μαγνητική διαπερατότητα είναι και οι δύο αρνητικές στις συχνότητες ενδιαφέροντος. Ο όρος NIM αναφέρεται στο γεγονός ότι τα υλικά με ταυτόχρονα αρνητικά πραγματικά μέρη των ϵ και μ εμφανίζουν επίσης αρνητικό πραγματικό μέρος στο δείκτη διάθλασης, οδηγώντας σε μη συμβατικές ιδιότητες διάθλασης. Ο όρος LHM, αντίθετα, τονίζει την ξεχωριστή ιδιότητα αυτών των υλικών όπου το ηλεκτρικό πεδίο, το μαγνητικό πεδίο και το

κυματικό διάνυσμα ενός οδεύοντος επίπεδου κύματος ακολουθούν τον κανόνα της αριστερόστροφης διάδοσης σε αντίθεση με τα συμβατικά μέσα που ακολουθούν τον κανόνα του δεξιού χεριού.

Τέλος, ο όρος BW αναφέρεται πιο συγκεκριμένα στο γεγονός ότι τα υλικά με ταυτόχρονα αρνητικά πραγματικά μέρη των ϵ και μ υποστηρίζουν την προς τα πίσω διάδοση κυμάτων, που χαρακτηρίζεται από ένα κυματικό διάνυσμα, το οποίο είναι αντιπαράλληλο προς το διάνυσμα του Poynting. Σύμφωνα με τον ορισμό που δόθηκε για τα υλικά DNG αυτά αποτελούν μια κατηγορία μεταυλικών που δεν είναι γνωστά φυσικά υλικά και παρουσιάζουν σε κάθε περιοχή συχνοτήτων που μας ενδιαφέρει ταυτόχρονα αρνητικά πραγματικά μέρη των ϵ και μ . Ωστόσο, τεχνητά υλικά που χαρακτηρίζονται από αρνητικό πραγματικό μέρος είτε του ϵ μόνο είτε του μ δεν αντιπροσωπεύουν μεταυλικά, όπως αυτά ορίστηκαν παραπάνω, και οι ιδιότητες τους μπορούν να βρεθούν εύκολα στη φύση.

Για παράδειγμα, ένα υλικό σε κατάσταση πλάσματος, που αποτελείται από ένα αέριο ελεύθερων ηλεκτρονίων, χαρακτηρίζεται από αρνητικό πραγματικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς ϵ σε μία δεδομένη περιοχή συχνοτήτων. Κατά τον ίδιο τρόπο, τα ευγενή μέταλλα παρουσιάζουν αρνητικές τιμές του πραγματικού μέρους της διηλεκτρικής σταθεράς στις υπέρυθρες και οπτικές συχνότητες. Για το λόγο αυτό, ονομάζονται επίσης πλασματικά υλικά (plasmonic materials).

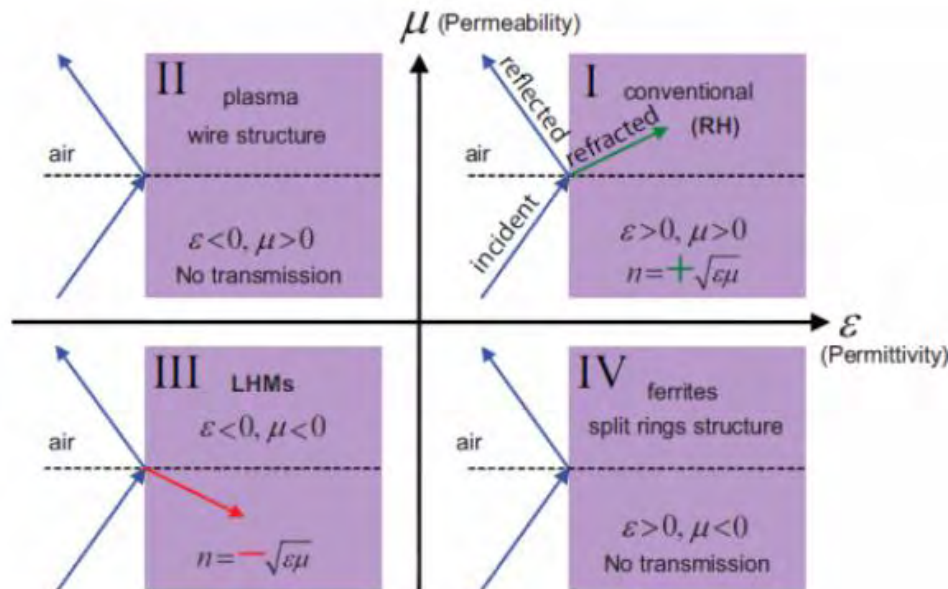
Παρ' όλα αυτά, τα τεχνητά υλικά που χαρακτηρίζονται από αρνητικές τιμές του πραγματικού μέρους του ϵ , που ονομάζονται *ε-αρνητικά* (*E-negative - ENG*) υλικά, και τα υλικά που χαρακτηρίζονται από αρνητικές τιμές του πραγματικού μέρους του μ , που ονομάζονται *μ-αρνητικά* (*Mu-negative - MNG*) υλικά, μπορούν να θεωρηθούν μεταυλικά, ούτως ή άλλως, όταν εμφανίζουν τέτοιες μη συμβατικές ιδιότητες σε συχνότητες όπου τα φυσικά υλικά δεν το κάνουν. Για παράδειγμα, ένα τεχνητό υλικό MNG στις υπέρυθρες συχνότητες είναι σαφώς ένα μεταυλικό, όπως και ένα τεχνητό υλικό ENG στις μικροκυματικές συχνότητες.

Ενώ συνήθως περιγράφουμε ένα υλικό με σταθερές τιμές διηλεκτρικής σταθεράς και μαγνητικής διαπερατότητας, δηλαδή ανεξάρτητες της συχνότητας, στην πραγματικότητα όλες οι ιδιότητες των υλικών εξαρτώνται από τη συχνότητα.

Μία άλλη ενδιαφέρουσα κατηγορία μεταυλικών εκπροσωπείται από υλικά που χαρακτηρίζονται από χαμηλές τιμές διηλεκτρικής σταθεράς ή / και μαγνητικής διαπερατότητας. Σε αυτή την περίπτωση, "χαμηλής τιμής" σημαίνει μία τιμή των ϵ και μ μεταξύ 1 και -1. Όταν η διηλεκτρική σταθερά επιδεικνύει τέτοιες τιμές, το αντίστοιχο υλικό ονομάζεται *ε - κοντά στο μηδέν* (*E-near zero - ENZ*), ενώ όταν η μαγνητική διαπερατότητα είναι μεταξύ 1 και -1, το υλικό αναφέρεται ως *μ - κοντά στο μηδέν* (*M-near zero - MNZ*). Τεχνητά υλικά που χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά υψηλές τιμές είτε διηλεκτρικής σταθεράς ή μαγνητικής διαπερατότητας ή και τα δύο, μπορούν να θεωρηθούν επίσης ως μεταυλικά, εφόσον και αυτές οι τιμές δεν είναι διαθέσιμες σε φυσικά υλικά. Τα υλικά αυτά συνήθως ονομάζονται υλικά με *ε - πολύ μεγάλο*, *μ - πολύ μεγάλο* και υλικά με *πολύ μεγάλο δείκτη διάθλασης*.

Τέλος, τα συμβατικά υλικά, τα οποία χαρακτηρίζονται από θετικό και μεγαλύτερο του 1 πραγματικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς και μαγνητικής διαπερατότητας, αναφέρονται ως *διπλά-θετικά* (*DPS*) υλικά. Ακολουθώντας την ορολογία που

αναφέρθηκε και την αξιολόγηση ανάλογα με τις τιμές των πραγματικών μερών των ϵ και μ , όλα τα υλικά βρίσκονται τοποθετημένα στην παράσταση του Σχήματος 2.4.



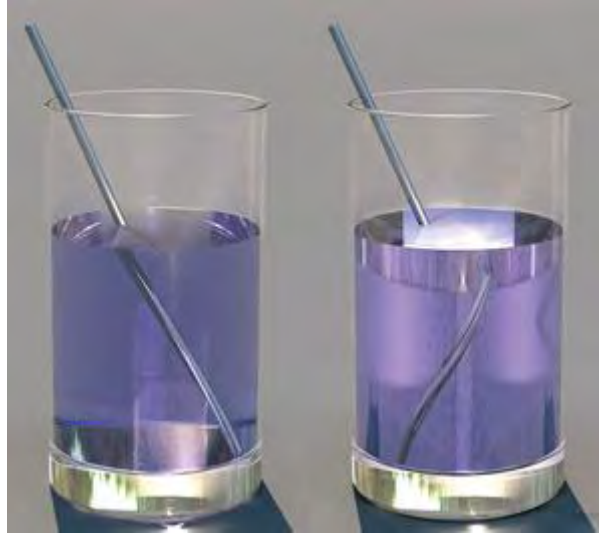
Σχήμα 2.4 Περιγραφή υλικών ανάλογα με το δείκτη διάθλασης

2.5 Ιδιότητες και εφαρμογές των μεταυλικών

2.5.1 Αρνητικός δείκτης διάθλασης

Ένα υλικό με αρνητικό δείκτη διάθλασης προσδίδει περισσότερο ή λιγότερο φως. Ο καλύτερος τρόπος για την εξακρίβωση αυτού του φαινομένου, είναι με την εξέταση δύο παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη διάδοση του φωτός, την ταχύτητα της διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας και την ταχύτητα φάσης. Η πρώτη περιγράφει τη συνολική ροή του φωτός και η δεύτερη περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο κινούνται τα κύματα του φωτός [11]. Σε ένα συνηθισμένο υλικό, τα ηλεκτρόνια αποκρίνονται στα εισερχόμενα πεδία με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούν το δικό τους ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Το προκύπτον πεδίο (ένας συνδυασμός του εισερχόμενου πεδίου και της απόκρισης του υλικού) θα κινηθεί προς την ίδια κατεύθυνση με την εισερχόμενη ακτινοβολία, με κάποια καθυστέρηση και με χαμηλότερη ταχύτητα. Όπως και με το εισερχόμενο πεδίο, τόσο η ενέργεια όσο και η φάση είναι θετικές. Αλλά σε ένα υλικό με αρνητικό δείκτη διάθλασης, η ενέργεια και η φάση κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις. Αν και η ενέργεια του φωτός και του ίδιου του φωτός, εξακολουθεί να κινείται προς την ίδια κατεύθυνση όπως όταν εισήλθε στο υλικό, τα κύματα του φωτός κινούνται προς τα πίσω.

Για παράδειγμα, έστω ένα άχυρο που ακουμπά μέσα σε ένα μισό γεμάτο ποτήρι. Εάν το άχυρο στέκεται στο νερό, θα εμφανιστεί όπως και στον αέρα, με μία μόνο μικρή κλίση στη διεπιφάνεια μεταξύ των δύο υλικών. Αντιθέτως, αν το γυαλί περιείχε ένα υγρό με αρνητικό δείκτη διάθλασης, το άχυρο θα φαινόταν λυγισμένο, σαν να κλίνει προς την αντίθετη κατεύθυνση όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5 Η διεπαφή του αέρα και του νερού - δύο ουσίες με θετικούς δείκτες - δημιουργεί μια μικρή συστροφή στην εμφάνιση ενός άχρου (αριστερά). Εάν το υγρό είχε αρνητικό δείκτη διάθλασης, το άχρο φαίνεται να λυγίζει προς την αντίθετη κατεύθυνση (δεξιά).

2.5.2 Αριστερόστροφα υλικά

Ξεκινώντας από τις εξισώσεις του Maxwell, οι οποίες πρέπει να ικανοποιούνται γενικά για το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο σε χώρο χωρίς πηγές και θεωρώντας χρονική εξάρτηση των πεδίων της μορφή $e^{i\omega t}$, λαμβάνουμε

$$\nabla \times E = -i\omega\mu H$$

$$\nabla \times H = i\omega\mu E$$

$$\nabla \cdot D = \rho$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

όπου $D = \epsilon E$ και $B = \mu H$. Για να εξετάσουμε τη θεμελιώδη απόκριση του μέσου διάδοσης θεωρούμε ένα επίπεδο κύμα της μορφής

$$E = E_0 e^{-ikr}$$

$$H = \frac{E_0}{\zeta} e^{-ikr}$$

όπου $\zeta = \sqrt{\mu/\epsilon}$ η κυματική αντίσταση και k η σταθερά διάδοσης του μέσου.

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω εκφράσεις στις πρώτες δύο εξισώσεις του Maxwell και με χρήση της διανυσματικής ταυτότητας $\nabla \times (fF) = \nabla f \times F + f \nabla \times F$ και της σχέσης $\nabla(e^{-ikr}) = -ike^{-ikr}$ λαμβάνουμε ότι

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

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

Στην περίπτωση συνήθων υλικών με $\varepsilon, \mu > 0$ οι παραπάνω εξισώσεις ορίζουν ότι το ηλεκτρικό πεδίο E , το μαγνητικό πεδίο H και το διάνυσμα διάδοσης k ορίζουν ένα δεξιόστροφο σύστημα. Αντίθετα, στην περίπτωση που $\varepsilon, \mu < 0$ είναι προφανές ότι τα παραπάνω διανύσματα ορίζουν ένα αριστερόστροφο σύστημα, γι' αυτό και τα υλικά αυτά ονομάζονται υλικά αριστερού νόμου. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ταχύτητα φάσης, που ορίζεται από τη σχέση

$$u_p = \frac{\omega}{k} \hat{k}$$

στα υλικά αριστερού νόμου να προκύπτει αντίθετη της ταχύτητας φάσης σε ένα σύνηθες υλικό, αφού το διάνυσμα k έχει αντίθετη φορά. Επιπλέον, η σταθερά διάδοσης k είναι αρνητική σε ένα μεταύλικό, όπως και η ταχύτητα φάσης, σε αντίθεση με τα συνήθη υλικά.

Συνεπώς, η φάση των κυμάτων διαδίδεται ανάποδα, με φορά προς την πηγή και σε αντίθετη κατεύθυνση από την ενέργεια, που αντιπροσωπεύεται από την ταχύτητα ομάδας και διαδίδεται πάντοτε απομακρυνόμενη από την πηγή. Τα μεταύλικά επομένως υποστηρίζουν τη διάδοση κυμάτων προς τα πίσω. Το γεγονός ότι η ταχύτητα φάσης είναι αρνητική ($u_p < 0$) δεν παραβιάζει την αρχή της αιτιότητας γιατί αφορά τη διάδοση μιας διαταραχής και όχι τη μεταφορά ενέργειας προς την πηγή.

Επίσης η πυκνότητα ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας προκύπτει αρνητική αν τα ε και μ είναι ταυτόχρονα αρνητικά, παραβιάζοντας την αρχή διατήρησης της ενέργειας.

Επιπρόσθετα, η σταθερά διάδοσης του μέσου γράφεται στη μορφή

$$k = k_0 n = n \frac{\omega}{c}.$$

Επειδή σε ένα μέσο αριστερού νόμου η σταθερά διάδοσης είναι αρνητική ($k < 0$), από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι και ο δείκτης διάθλασης n του μεταύλικού θα είναι αρνητικός.

2.5.3 Αντιστροφή του νόμου Snell

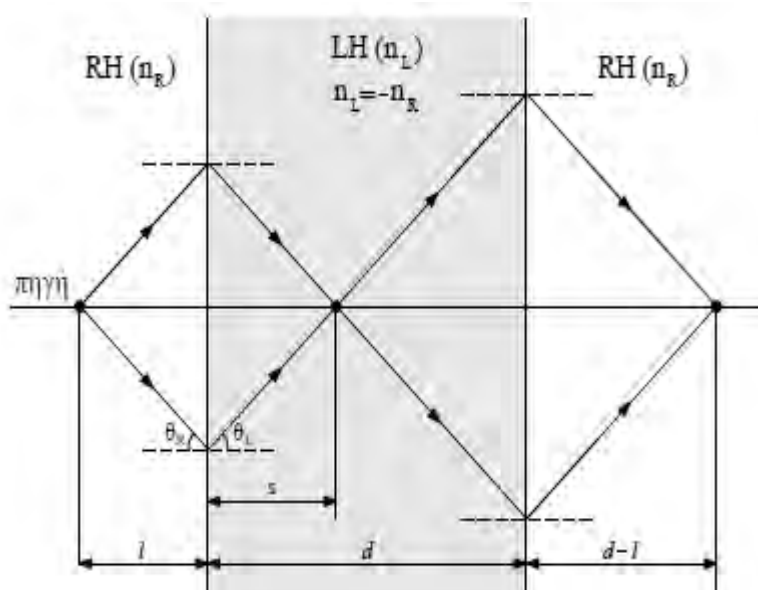
Απόρροια της παραπάνω ιδιότητας είναι η αντιστροφή του νόμου του Snell κατά την πρόσπτωση ενός κύματος σε μια διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ ενός συνήθους υλικού και ενός μεταύλικού, που περιγράφεται από την εξίσωση που αναφέρθηκε παραπάνω

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

όπου n_1, n_2 , οι δείκτες διάθλασης του συνήθους υλικού και του μεταύλικού αντίστοιχα και θ_1, θ_2 οι γωνίες πρόσπτωσης και διάθλασης. Επειδή $n_2 < 0$ προκύπτει ότι η γωνία διάθλασης θ_2 πρέπει να είναι επίσης αρνητική, δηλαδή η διάθλαση να πραγματοποιείται κατά την αντίθετη κατεύθυνση από ό,τι συνήθως. Εκμεταλλευόμενοι

αυτή την ιδιότητα, είναι δυνατό να επιτευχθεί διπλή εστίαση μίας προσπίπτουσας δέσμης χρησιμοποιώντας μία πλάκα από μεταλλικό, η οποία λειτουργεί ως ένα είδος φακού. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6, κατά την πρόσπτωση της δέσμης στη διαχωριστική επιφάνεια ενός συνήθους υλικού κι ενός μεταλλικού πραγματοποιείται διάθλαση κατά την αντίθετη κατεύθυνση, με αποτέλεσμα δύο ακτίνες που εκπέμπονται συμμετρικά από την πηγή να εστιάζονται σε ένα σημείο, αφού διανύσουν απόσταση s εντός της πλάκας από μεταλλικό. Συνεχίζοντας την πορεία τους μέσα στην πλάκα συναντούν τη δεύτερη διαχωριστική επιφάνεια και διαθλώνται ξανά κατά την αντίθετη κατεύθυνση με αποτέλεσμα τη σύγκλισή τους για δεύτερη φορά εκτός της πλάκας.

Αν μάλιστα ο δείκτης διάθλασης του μεταλλικού έχει τιμή αντίθετη από το δείκτη διάθλασης του συνήθους υλικού ($n_L = -n_R$), τότε δε συμβαίνει καθόλου ανάκλαση στις διαχωριστικές επιφάνειες των δύο μέσων και οι γωνίες πρόσπτωσης και διάθλασης προκύπτουν ίσες, δηλαδή $\theta_R = \theta_L$. Σε αυτή την περίπτωση οι ακτίνες συγκλίνουν για πρώτη φορά εντός της πλάκας από μεταλλικό σε απόσταση $s = l$ από την πρώτη διαχωριστική επιφάνεια και για δεύτερη φορά εκτός της πλάκας σε απόσταση $d - l$ από τη δεύτερη διαχωριστική επιφάνεια. Η επίτευξη εστίασης με τη συγκεκριμένη γεωμετρία είναι προφανώς αδύνατη αν η πλάκα αποτελείται από ένα σύνηθες υλικό με $\epsilon, \mu > 0$.

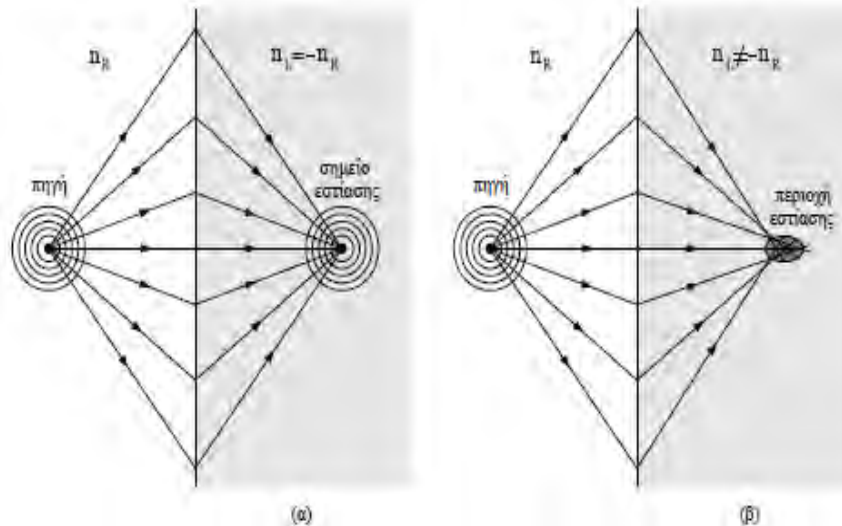


Σχήμα 2.6 Διπλή εστίαση δέσμης με τη χρήση πλάκας από μεταλλικό.

Αντί για δύο συμμετρικά εκπεμπόμενες ακτίνες μπορούμε να θεωρήσουμε ένα σύνολο ακτινών (κυμάτων) ή γενικότερα ένα κυλινδρικό ή σφαιρικό κύμα εκπεμπόμενο από μία σημειακή πηγή. Στην περίπτωση αυτή, όταν τα δύο μέσα έχουν την ίδια ηλεκτρομαγνητική πυκνότητα ($n_L = -n_R$), κάθε ζεύγος l συμμετρικών ακτινών με γωνία πρόσπτωσης $\theta_{R,l}$ εστιάζεται στο ίδιο σημείο, αφού $\theta_{L,l} = \theta_{R,l}$ για κάθε l , ώστε οι εστιακές αποστάσεις να είναι ίδιες για κάθε ζεύγος ακτινών ($s_l = s$), όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.7 (α).

Αν οι ηλεκτρομαγνητικές πυκνότητες των δύο μέσων διαφέρουν ($|n_L| \neq n_R$), τότε ακτίνες με διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης διαθλώνται σε διαφορετικά εστιακά

σημεία με αποτέλεσμα οι εστιακές αποστάσεις s_l να προκύπτουν διαφορετικές. Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται μία σφαιρική απόκλιση, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7 (β) και το εστιακό σημείο εκφυλίζεται σε μία διάχυτη εστιακή κηλίδα (focal spot), της οποίας η επιφάνεια αυξάνεται με την αύξηση της διαφοράς ανάμεσα στους δείκτες διάθλασης των δύο μέσων. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην έλλειψη προσαρμογής κατά την πρόσπτωση στις διαχωριστικές επιφάνειες και την παρουσία ανακλώμενων δεσμών, οι οποίες έχουν παραλειφθεί κατά τη σχεδίαση στο Σχήμα 2.7 (β).



Σχήμα 2.7 (α) Εστίαση σφαιρικής δέσμης σε ένα σημείο ($n_L = -n_R$)
(β) Εστίαση σφαιρικής δέσμης σε μια κηλίδα ($|n_L| \neq n_R$)

2.6 Δημιουργία μεταλλικών

Τα μεταλλικά αποτελούνται από ‘μετά-άτομα’, δηλαδή μικρές δυσδιάστατες ή τρισδιάστατες δομές από πολυμερές, διηλεκτρικό υλικό ή μέταλλο. Όταν αυτές οι δομές είναι διατεταγμένες σε κανονικούς, επαναλαμβανόμενους κρυστάλλους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να χειριστούν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με νέους τρόπους. Οι δυνατότητες ενός μεταλλικού καθορίζονται από το μέγεθος, το σχήμα και την ποιότητα αυτών των δομών.

Η τεχνολογία για την κατασκευή μεταλλικών έχει εξελιχθεί πολύ. Τα τελευταία χρόνια, οι ερευνητικές ομάδες σε όλο τον κόσμο κατάφεραν να αναπτύξουν έναν τρόπο να αντλούν μετά-άτομα χρησιμοποιώντας laser. Οι δομές που προκύπτουν μπορούν να πάρουν σχεδόν οποιοδήποτε σχήμα και να στοιβάζονται σε τρεις διαστάσεις σε πυκνές, κρυστάλλινες διατάξεις. Επιπλέον, μπορούν να γίνουν αρκετά μικρές ώστε να επιδεικνύουν μοναδικές μηχανικές και θερμικές ιδιότητες και να μεταβάλλουν τη ροή του φωτός σε μια σειρά από μήκη κύματος.

Όταν το πεδίο των μεταλλικών ξεκίνησε, περίπου μια δεκαετία πριν, τα μετά-άτομα είχαν την τάση να είναι μακροσκοπικά, δηλαδή μεταλλικοί δακτύλιοι και σύρματα μεγέθους εκατοστόμετρα τυπωμένα σε τυποποιημένες πλακέτες κυκλωμάτων. Αλλά αυτές οι δομές ήταν τόσο μεγάλες που θα μπορούσαν να δράσουν μόνο σε ακτινοβολία μεγαλύτερου μήκους κύματος, στο τμήμα μικροκυμάτων του φάσματος. Για να γίνουν μεταλλικά που μπορούν να δράσουν σε ορατό φως, το οποίο έχει μήκος κύματος

περίπου 400 έως 750 nm, τα "άτομα" πρέπει να είναι της τάξεως των 100 έως 200 nm ή μικρότερα.

Ένας τρόπος δημιουργίας τέτοιων δομών είναι με την τεχνολογία που έχει ήδη αναπτυχθεί από τη βιομηχανία ημιαγωγών. Υπάρχουν ήδη ισχυρά εργαλεία σχεδίασης, όπως η *φωτολιθογραφία (photolithography)* και η *λιθογραφία δέσμης ηλεκτρονίων (electron-beam lithography)*, οι οποίες χρησιμοποιούνται συνήθως για την κατασκευή δομών υπομικρομέτρου και νανοκλίμακας. Ομάδες από διάφορα πανεπιστήμια στον κόσμο, χρησιμοποίησαν επιτυχώς αυτές τις τεχνικές για να δημιουργήσουν συστοιχίες απλών δομών μεταλλικών, συμπεριλαμβανομένων των SRRs, οι οποίες είναι αρκετά μικρές ώστε να δρουν σε ορατό ή υπέρυθρο φως. Ωστόσο, αυτές οι λιθογραφικές προσεγγίσεις αρχίζουν να διασπώνται ακόμη και με την κατασκευή φαινομενικά απλών αντικειμένων 3-D, κάτι που είναι απαραίτητο για ένα μεταλλικό που μπορεί να δράσει στο φως ανεξάρτητα από την κατεύθυνση. Η λιθογραφία έχει σχεδιαστεί για να σχεδιάζει 2-D χαρακτηριστικά, έτσι ώστε να κατασκευάσει μια σειρά από μικροσκοπικά ελικοειδή πηνία, τα οποία κατασκευάζονται ανά στρώση (layer by layer). Ωστόσο, είναι μια χρονοβόρα διαδικασία που απαιτεί προσεκτική ευθυγράμμιση.

Ένας καλύτερος τρόπος για να γίνουν δομές 3-D, είναι με τη χρήση του φωτός laser και μερικές δεξιοτεχνίες που αναπτύχθηκαν τα τελευταία χρόνια. Αυτός ο τύπος οπτικής λιθογραφίας, η οποία ονομάζεται *άμεση γραφή laser (direct laser writing)*, θεωρείται ως μικροσκοπική έκδοση της εκτύπωσης 3-D. Όπως και με τη στερεολιθογραφία, η οποία κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον Charles W. Hull το 1986, το φως χρησιμοποιείται για να σκιαγραφήσει ένα σχήμα. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση, τα σχήματα δεν γίνονται layer by layer. Αντ' αυτού όλα γίνονται απ' ευθείας.

Όπως και σε άλλες λιθογραφικές τεχνικές, η άμεση γραφή laser χρησιμοποιεί μια ένωση που ονομάζεται αντίσταση, στην περίπτωση αυτή, ένα φωτοευαίσθητο μίγμα, το οποίο ονομάζεται *φωτό-ανθεκτικό (photoresist)*. Για να κατασκευάσουμε μεταλλικά, ξεκινάμε με ένα παχύ στρώμα των υλικών, το οποίο καλύπτει μια γυάλινη ολίσθηση ή κάποιο άλλο υπόστρωμα και τοποθετείται σε ένα μικροσκόπιο. Όταν λάμπει ένα laser μέσω των οπτικών μικροσκοπίων και πάνω στο φωτοευαίσθητο, το φως σπάει τα μόρια και δημιουργεί το εκτεθειμένο υλικό. Όταν τελειώσουμε, μπορούμε να πλύνουμε το μη εκτεθειμένο υλικό με διαλύτη και να παραμείνει μόνο το εκτεθειμένο υλικό.

Συνήθως, αυτή η προσέγγιση θα λειτουργούσε σωστά μόνο σε δύο διαστάσεις. Αυτό συμβαίνει επειδή ακόμα και αν το laser εμβαθύνει στο φωτό-ανθεκτικό, τα φωτόνια θα έχουν απορροφηθεί όχι μόνο κοντά στην εστιακή περιοχή αλλά και σε ολόκληρο τον κώνο δέσμης, κάτω και πάνω από την εστίαση. Για να καταστεί πραγματοποιήσιμη η διαδικασία σε τρεις διαστάσεις, πρέπει να αλλάξει ελαφρώς η στρατηγική, συνδυάζοντας τον 'φωτό-εκκινητή' (*photoinitiator*) -το μέρος του φωτό-ανθεκτικού που απορροφά τα φωτόνια- με λέιζερ με μεγαλύτερο μήκος κύματος. Εάν ο συνδυασμός των δύο είναι σωστός, είναι δυνατόν να δημιουργηθεί ένα σύστημα στο οποίο ο φωτό-εκκινητής πρέπει να απορροφήσει δύο φωτόνια αντί για ένα. Πάραυτα, αυτή η τεχνική δεν είναι αρκετά καλή για να δημιουργήσει μετά-άτομα αρκετά μικρά ώστε να αλληλοεπιδρούν με το φως. Ο περιορισμός είναι το φράγμα περίθλασης Abbe, χαρακτηριστικό του οπτικού μικροσκοπίου που περιορίζει τη χωρική ανάλυση ενός

φακού και, συνεπώς, πόσο στενά μπορούν να τοποθετηθούν δύο παρακείμενα χαρακτηριστικά ή γραμμές. Για ένα λέιζερ των 800 nm, το οποίο λειτουργεί καλά με τα κοινά φωτό-ανθεκτικά και για τους φακούς μικροσκοπίου υψηλής απόδοσης, περιορίζετε σε πλάγια απόσταση περίπου 300 nm λόγω του Abbe.

Επί δεκαετίες, αυτός ο περιορισμός φαίνεται να είναι θεμελιώδης. Αλλά πριν από μερικά χρόνια, αποδείχθηκε ότι υπάρχει ένας τρόπος πέρα από αυτό. Η ιδέα ξεκίνησε με τον φυσικό Stephen Hell, στο Ινστιτούτο Max Planck για Βιοφυσική Χημεία, στο Göttingen της Γερμανίας. Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, πρότεινε έναν τρόπο να σπάσει το φράγμα περίθλασης χρησιμοποιώντας ένα δεύτερο λέιζερ που λειτουργεί με διαφορετική συχνότητα. Η ομάδα του Hell ενδιαφέρθηκε να χρησιμοποιήσει μια τεχνική που ονομάζεται *διεγερμένη εξάντληση εκπομπών (stimulated emission depletion)* για να προκαλέσει τη χρώση των χρωματισμένων κυττάρων και άλλων βιολογικών δομών όσο το δυνατόν πιο μικροσκοπικά, ώστε να μπορούν να απεικονιστούν σε πολύ υψηλή ανάλυση κάτω από το μικροσκόπιο. Αλλά η προσαρμογή της προσέγγισης δύο λέιζερ δεν ήταν εύκολη.

Όταν η ομάδα στο Karlsruhe Ινστιτούτο της Τεχνολογίας (KIT) άρχισε να εξετάζει τη δυνατότητα το 2008, δεν υπήρχαν φωτό-ανθεκτικά που να έχουν αναπτυχθεί ειδικά για να υποστηρίξουν την προσέγγιση. Ένα χρόνο μετά βρέθηκε ένας φωτό-εκκινητής, με τον οποίο διαπιστώθηκε ότι είναι δυνατόν να εκτυπωθούν δομές με πλευρική ανάλυση (η απόσταση μεταξύ δύο παρακείμενων χαρακτηριστικών) περίπου 175 nm, περίπου 40% λεπτότερες από ό, τι μπορεί να επιτευχθεί στο όριο Abbe. Αυτό είναι μια μεγάλη βελτίωση. Αλλά κατ' αρχήν, θα πρέπει να είναι δυνατή η χρήση χωρικών αναλύσεων λίγων δεκάδων nm με χρήση φωτός 800 nm. Η ώθηση της ανάλυσης αυτής της λιθογραφίας σε μια τέτοια κλίμακα απαιτεί περισσότερη δουλειά. Το πρόβλημα δεν είναι πια η οπτική αλλά οι φωτό-αντιστάσεις που χρησιμοποιούνται. Για λόγους που εξακολουθούν να διερευνώνται, οι προσπάθειες να γίνουν μικρότερες δομές συνήθως έχουν ως αποτέλεσμα ακατάλληλα χαρακτηριστικά. Ακόμα, η ανάλυση είναι αρκετά λεπτή ώστε να δημιουργηθούν τεχνητά υλικά που μπορούν να λειτουργήσουν στο ορατό τμήμα του φάσματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Εφαρμογές των Μεταύλικών

3.1 Υλικά με εξωτικές ιδιότητες

Πίσω στο 1968, ο Veselago αναφέρθηκε, στην κλασική πλέον εργασία του, στις εξωτικές ιδιότητες των μεταύλικών LH (ή NRI), οι οποίες αναφέρθηκαν και πιο πάνω. Μεταξύ αυτών των ιδιοτήτων, η αντιστροφή του φαινομένου Doppler φαίνεται εξαιρετικά δύσκολο να παραχθεί πειραματικά. Ένα φαινόμενο που μοιάζει πολύ με την αντιστροφή της ακτινοβολίας Vavilov-Cerenkov έχει εφαρμοστεί στις κεραίες διαρροής κύματος. Η αντιστροφή του νόμου Snell και η σχετική παραδοσιακή αντιστροφή οπτικού φακού και εστίασης πλάκας, μετά τις αρχικές διαφωνίες, έχουν επικυρωθεί θεωρητικά και πειραματικά από αρκετούς ερευνητές. Ωστόσο, λίγες πρακτικές εφαρμογές προέκυψαν, κυρίως λόγω της δυσκολίας της μαζικής κατασκευής αποδοτικών NRI μεταύλικών. Το 2000, ο Pendry είχε αναφερθεί στο φαινόμενο της 'υπέρ-εστίασης', αξιοποιώντας μια επιφάνεια πλασμονικού συντονισμού (επιφανειακά κύματα) στις διεπαφές της LH πλάκας Veselago για να ενισχύσει τα οδεύοντα κύματα και έτσι να ξεπεραστεί το όριο περίθλασης. Αυτή η συναρπαστική ιδέα έχει συγκεντρώσει τεράστια προσοχή, καθώς αρχικά είχε θεωρηθεί από πολλούς ότι αποτελεί μια επαναστατική ανακάλυψη για την υποκυματική απεικόνιση. Ωστόσο, προέκυψαν σοβαροί περιορισμοί για το πείραμα αυτό, με κύριο περιορισμό την καταστρατήγηση της συνθήκης $\epsilon/\epsilon_0 = \mu/\mu_0 = -1$, και το γεγονός ότι η υπερ-ανάλυση με LH-πλάκα, αν και μπορεί να είναι δισδιάστατη, δεν μπορεί να υπέρ-εστιάσει στην ενέργεια σε τρισδιάστατο χώρο. Μια ανάλυση του φακού του Pendry παρέχεται από τον Marques, που τον παρομοιάζει με συσκευή σηράγγων-αντιστοίχισης, γνωστή στους μηχανικούς μικροκυμάτων. Παρά τα πρωταρχικά ελπιδοφόρα αποτελέσματα με τη χρήση απλουστευμένων (όχι NRI) δομών, ο *υπερφακός* (*hyperlens*) δεν φαίνεται να είναι έτοιμος ακόμα για πρακτικούς σκοπούς στην οπτική. Ωστόσο, πολλές συναφείς συναρπαστικές ερευνητικές κατευθύνσεις, όπως ο *hyperlens* έχουν προταθεί και καταβάλλονται προσπάθειες για την υλοποίησή τους, και να εμπλουτιστεί το δυναμικό πεδίο της υποκυματικής απεικόνισης.

Από την αρχική πρόταση του Linden, πολλές έρευνες έχουν διεξαχθεί για την υλοποίηση των οπτικών αρνητικών παραμέτρων ($\epsilon < 0$ ή $\mu < 0$ ή και τα δύο) των μεταύλικών. Ωστόσο, οι δομές αυτές είναι γενικά ηλεκτρομαγνητικά λεπτά οπτικά στρώματα με προσθήκες μεταύλικών, που είναι ουσιαστικά παρεμφερείς με επιφάνειες επιλογής συχνότητας μικροκυμάτων, παρά πραγματικά υλικά, με εξαίρεση ορισμένα πρόσφατα παραδείγματα για κάποιες πολυστρωματικές δομές. Μια άλλη πρόσφατη εφαρμογή μεταύλικών, η οποία είναι πάρα πολύ ελκυστική για τους επιστήμονες, είναι το *cloaking*, που βασίζεται είτε στην ακύρωση της σκέδασης είτε στον μετασχηματισμό συντεταγμένων. Στη δεύτερη περίπτωση, χρησιμοποιούνται μεταύλικά βαθμιαίου δείκτη (GRIN) για να δημιουργήσουν καλούπι για τη ροή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Ενώ τέτοιες δομές GRIN μπορούν κατ' αρχήν να υλοποιηθούν με τεχνητά διηλεκτρικά θετικών παραμέτρων, ή από πιο πρόσφατα τρισδιάστατα μεταύλικά, η πρακτική τους εφαρμογή είναι εξαιρετικά δύσκολη σε μικροκύματα και σχεδόν αδιανόητη στην οπτική, όπου πολλοί περιορισμοί, όπως τα προβλήματα κατασκευής, απαγορευτικές απώλειες, ο περιορισμός του εύρους ζώνης και η περίθλαση θα έχει ως αποτέλεσμα περισσότερο παραμορφωμένες εικόνες παρά πραγματική αφάνεια.

3.2 Αόρατος μανδύας (*Invisible cloaking*)

Η δυνατότητα να γίνει ένα αντικείμενο αόρατο, ακόμα και για ένα ορισμένο εύρος του φάσματος, ανέκαθεν αντιμετωπιζόταν από την επιστημονική κοινότητα με ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Για την υλοποίηση μιας τέτοιας εφαρμογής εφαρμόστηκαν δύο προσεγγίσεις. Στην μία από αυτές, η λήψη και η προβολή εικόνων περιμετρικά του αντικειμένου μπορούσε να το καταστήσει θεωρητικά αόρατο αλλά μια τέτοια μέθοδος ήταν ιδιαίτερα επίπονη καθώς απαιτούσε τον διαρκή επαναπροσδιορισμό του περιβάλλοντος χώρου και αδυνατούσε επίσης να προσαρμοστεί σε ταχείες μεταβολές του. Η δεύτερη προσέγγιση, στην οποία μπορούν να συμβάλλουν τα μεταϊλικά, στοχεύει στο να καταστήσει το αντικείμενο αόρατο εμποδίζοντας την διάχυση του φωτός που πέφτει πάνω στο αντικείμενο. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί προσαρμόζοντας τα χαρακτηριστικά του αντικειμένου που μας ενδιαφέρει ανάλογα με το αν θέλουμε να το καταστήσουμε 'αόρατο' σε κάποιο μικροκυματικό ή υπέρυθρο ραντάρ ή να το διαμορφώσουμε έτσι ώστε να μην αλληλοεπιδρά με την προσπίπτουσα ακτινοβολία καθιστώντας το αόρατο σε κάποιον παρατηρητή που βρίσκεται κάποια απόσταση από το αντικείμενο. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε το cloaking και σε περιπτώσεις ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας έτσι ώστε να περιορίζονται οι παρεμβολές με γειτονικά αντικείμενα.

Η ιδέα για μια συσκευή που κάνει τα αντικείμενα αόρατα με το γυμνό μάτι έχει μια πολύ μεγάλη ιστορία, ξεκινώντας από την λαογραφία πολλών λαών, αλλά υπάρχουν ερευνητές που υποστηρίζουν ότι μπορεί μια τέτοια συσκευή να είναι σχεδόν υλοποιήσιμη, τουλάχιστον σε ένα περιορισμένο φάσμα συχνοτήτων. Το ερώτημα είναι αν μπορεί ένα φυσικό σώμα πεπερασμένου μεγέθους να γίνει αόρατο για την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Οι επιστήμονες απασχολούνται με αυτό το ερώτημα πολύ καιρό. Ο Dollin δημοσίευσε μια εργασία το 1961, όπου περιγράφεται μία ανομοιογενής και ανισότροπη μαγνητοδιηλεκτρική δομή, τέτοια ώστε ένα επίπεδο κύμα που έρχεται από το άπειρο σε αυτό το σώμα να "διέρχεται μέσα από αυτό χωρίς παρεμβολές". Προφανώς ανεξάρτητα από αυτό το πρώιμο έργο, παρόμοιες δομές, πιο πρόσφατα, έχουν προταθεί σε μια σειρά εργασιών από τους Leonhardt, Pendry, Greenleaf και άλλους. Σε άλλο παράδειγμα, ο Kerker δημοσίευσε μια εργασία με τίτλο 'Αόρατα σώματα' το 1975, η οποία ήταν ένας πρόδρομος μιας άλλης πρόσφατης σειράς δημοσιεύσεων από τους Alu και Engheta, σχετικά με τις αόρατες δομές που βασίζονται στην ακύρωση της διασποράς.

Το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο για τα Τεχνητά Ηλεκτρομαγνητικά υλικά και τα μεταϊλικά ορίζει το μεταϊλικό ως 'μια διάταξη τεχνητών δομικών στοιχείων, με στόχο την επίτευξη επιθυμητών και ασυνήθιστων ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων' [12]. Εάν ορισμένες ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες ενός υλικού (συνήθως λαμβάνονται υπόψη η επιτρεπτικότητα του και η διαπερατότητα του) είναι απαραίτητες για μια εφαρμογή σε μια συγκεκριμένη σειρά από μήκη κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, το υλικό αυτό πρέπει να εμφανίζεται ομοιογενές στην κλίμακα του μήκους κύματος. Αυτό σημαίνει ότι το μέγεθος των 'μορίων' του, καθώς και η απόσταση μεταξύ των "μορίων" θα πρέπει να είναι πολύ μικρότερη από το μήκος κύματος. Εάν η εφαρμογή είναι, για παράδειγμα, στο φάσμα συχνοτήτων των μικροκυμάτων, όπου το μήκος κύματος είναι της τάξης των εκατοστών, το μέγεθος ενός και μόνο "μορίου" πρέπει να είναι της τάξης των χιλιοστών, και μπορεί να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί από τα συνηθισμένα υλικά που αποτελούνται από τα συνηθισμένα, αμελητέα σε αυτό το μήκος κύματος κλίμακας,

μόρια. Αυτή είναι μία από τις αιτίες που επικράτησε ο όρος μεταϊλικό. Φυσικά, αν η επιθυμητή εφαρμογή είναι σε πολύ υψηλές συχνότητες, όπως στο ορατό φάσμα, το μέγεθος αυτών των τεχνητών “μορίων” θα πρέπει να είναι της τάξης των δεκάδων νανομέτρων ή ακόμα και μικρότερες, γεγονός που καθιστά την υλοποίηση μια σοβαρή τεχνολογική πρόκληση.

Οι λειτουργικές ιδιότητες των μεταϊλικών ορίζονται από τα (κανονικά) υλικά από τα οποία δημιουργείται το μεταϊλικό και έχουν σχέση με το σχήμα τους, τον αμοιβαίο προσανατολισμό τους και τη συγκέντρωση των προσθηκών, κ.ο.κ. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν πάρα πολλοί βαθμοί ελευθερίας στο σχεδιασμό της επιθυμητής ηλεκτρομαγνητικής απάντησης, επιτρέποντας την πραγματοποίηση τεχνητών μέσων με αρκετά εξωτικές και ακραίες ιδιότητες, όπως απαιτείται για την υλοποίηση των συσκευών cloaking. Αν και η έρευνα σχετικά με τα μεταϊλικά ξεκίνησε μόλις πρόσφατα, τα αποτελέσματα καλύπτουν αρκετά αυτό το θέμα.

3.2.1 Μανδύας και αορατότητα

Σκοπός του cloaking ή αλλιώς του ηλεκτρομαγνητικού μανδύα είναι να καταστήσει ένα αντικείμενο ‘αόρατο’ για τις ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες, σε μια συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων. Φυσικά, οι πιο συναρπαστικές εφαρμογές του είναι αυτές οι οποίες το επιτυγχάνουν στο ορατό τμήμα του φάσματος. Ένα αντικείμενο είναι αόρατο όταν δεν αντανακλά κύματα πίσω στην πηγή και, επιπλέον, δεν διασπείρει κύματα προς άλλες κατευθύνσεις, και δεν δημιουργεί καμία σκιά (το τελευταίο σημαίνει ότι δεν υπάρχει διασπορά με κατεύθυνση προς τα εμπρός). Από αυτές τις συνθήκες προκύπτει ότι το αντικείμενο δεν θα πρέπει να απορροφά οποιαδήποτε ενέργεια. Με άλλα λόγια, το αντικείμενο δεν πρέπει να διαταράξει τα υφιστάμενα πεδία έξω από αυτό.

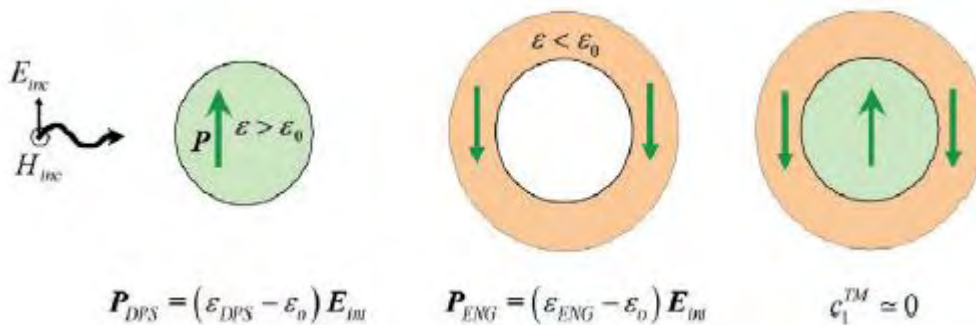
Κατά τη θεωρία της σκέδασης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (συμπεριλαμβανομένου του φωτισμού), η δημιουργία “μανδύα” για ένα αντικείμενο σημαίνει τη μείωση της συνολικής διατομής σκέδασης του (SCS), στο μηδέν, αφού η συνολική διατομή σκέδασης ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής σκεδαζόμενης ισχύος προς την πυκνότητα ισχύος. Το cloaking δεν πρέπει να συγχέεται με την τεχνολογία stealth. Οι τεχνολογίες Stealth ελαχιστοποιούν την ισχύ που ανακλάται πίσω στο ραντάρ αντίχρεσης (διατομή backscattering ή “διατομή ραντάρ”). Αυτό μπορεί να γίνει είτε με την κάλυψη ενός αντικειμένου με ένα στρώμα απορρόφησης, ή με τη διαμόρφωση του αντικειμένου, έτσι ώστε το πεδίο σκέδασης στην κατεύθυνση του φωτισμού να είναι ελάχιστο. Προφανώς, ακόμη και ένα ιδανικό αεροσκάφος stealth είναι ορατό, αν παρατηρείται από τα πλάγια ή από πίσω. Μπορεί να αποδειχθεί ότι τα απορροφητικά καλύμματα και η διαμόρφωση του αντικειμένου δεν μπορούν να μειώσουν τη συνολική διατομή σκέδασης πάνω από 50%.

Η έννοια της αορατότητας έχει στενή σχέση με το cloaking στην πρόσφατη βιβλιογραφία. Μερικές δομές μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως μανδύες, αν το αντικείμενο που πρέπει να γίνει αόρατο αποτελείται από, π.χ., ένα τέλειο κοίλο θάλαμο, αφού μέσα σε αυτό το περίβλημα δεν υπάρχουν πεδία.

3.2.2 Τεχνική ακύρωσης σκέδασης (*Scattering cancellation technique*)

Είναι γνωστό εδώ και πολύ καιρό ότι η σκέδαση από ένα αντικείμενο μπορεί να μετριαστεί με την προσθήκη στο σύστημα ενός άλλου αντικείμενου, η σκέδαση του οποίου είναι συμπληρωματική σε σχέση με τον κύριο σκεδαστή. Αυτός ο τύπος ελαχιστοποίησης της σκέδασης μπορεί να επιτευχθεί, για παράδειγμα, με την κάλυψη του κυρίως σκεδάζοντος αντικείμενου από μία ή πολλαπλές στρώσεις διηλεκτρικού υλικού. Το πρόσφατο ενδιαφέρον για την τεχνική αυτή έχει αναζωπυρωθεί, μετά από πρόταση για χρήση πλασμονικών υλικών για διαφάνεια.

Το Σχήμα 3.2 μας δίνει ένα παράδειγμα της αρχής ακύρωσης σκέδασης. Εδώ είναι ένα σφαιρικό διηλεκτρικό αντικείμενο, με επιτρεπτότητα μεγαλύτερη σε σχέση με το περιβάλλον μέσο, το οποίο καλύπτεται από ένα διηλεκτρικό περίβλημα με επιτρεπτότητα μικρότερη σε σχέση με το περιβάλλον μέσο. Η διάμετρος του περιβλήματος μπορεί να επιλεγεί έτσι ώστε η σκέδαση από τον πυρήνα και το περίβλημα να αλληλοακυρώνονται, δεδομένου ότι οι διπολικές ροπές έχουν αντίθετο πρόσημο. Βέβαια, ενδέχεται να υπάρχουν επίσης και άλλοι τρόποι εκτός από τη χρήση πολωμένων μέσων, αλλά έχει αποδειχθεί ότι αποτελεσματική αορατότητα μπορεί να επιτευχθεί ακόμη και με την καταστολή της σκέδασης του δίπολου. Το cloaking ομάδων σωματιδίων και η επέκταση της προσέγγισης της ακύρωσης σκέδασης στις υπέρυθρες και οπτικές συχνότητες έχουν επίσης προταθεί, καθώς και η αποτελεσματικότητα των υλικών διασποράς.

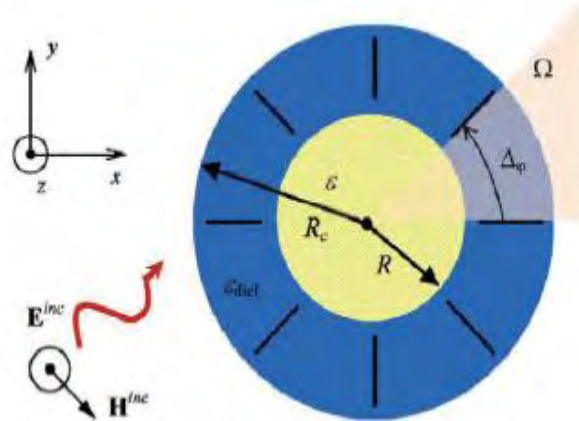


Σχήμα 3.2 Απεικόνιση της τεχνικής ακύρωσης σκέδασης

Τα προβλήματα της αξιοποίησης μανδύων, με βάση την τεχνική ακύρωσης σκέδασης, αφορούν στην υλοποίηση των υλικών με τις απαραίτητες εξωτικές παραμέτρους (π.χ., υλικών που έχουν σχετική επιτρεπτότητα $\epsilon_r < 1$). Υπάρχουν ορισμένα υλικά που είναι άμεσα διαθέσιμα στη φύση και έχουν την επιθυμητή ϵ_r σε χαμηλές τιμές για συχνότητες στην περιοχή των THz, δηλαδή στις υπέρυθρες ή στις οπτικές συχνότητες (πλασμονικά υλικά όπως το ασήμι και ο χρυσός). Η χρησιμοποίηση αυτών των πλασμονικών υλικών περιορίζεται από τις απώλειες τους και από το γεγονός ότι οι ιδιότητες τους ποικίλλουν σημαντικά σε συνάρτηση με τη συχνότητα. Επιπλέον, σε μια συγκεκριμένη συχνότητα μπορεί να μην υπάρχει κανένα υλικό με τις κατάλληλες ιδιότητες.

Πρόσφατα προτάθηκε ο σχεδιασμός ενός μανδύα ακύρωσης σκέδασης, που αποτελείται από μεταλλικά εμφυτεύματα λεπτών πλακών παράλληλων μεταξύ τους, οι οποίες τοποθετούνται ακτινωτά γύρω από την κυλινδρική περιοχή όπου είναι τοποθετημένο ένα διηλεκτρικό αντικείμενο. Αυτή η δομή είναι ένα παράδειγμα μιας

συσκευής ακύρωσης σκέδασης η οποία αποτελείται από ένα τεχνητό μεταλλικό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3 Παράδειγμα συσκευής ακύρωσης σκεδάσμου, που αποτελείται από μεταλλικές παράλληλες πλάκες ενσωματωμένες σε ένα διηλεκτρικό

Τα πλεονεκτήματα της τεχνικής ακύρωσης σκέδασης είναι η απλή σχεδίαση και δομή (με την προϋπόθεση ότι τα υλικά με τις επιθυμητές ιδιότητες είναι διαθέσιμα), καθώς και η δυνατότητα να προκληθεί αορατότητα ή cloaking με ιστροπικά και ομοιογενή υλικά. Τα μειονεκτήματα, ανάλογα με το είδος του αντικείμενου που πρέπει να γίνεται αόρατο (προσπελάσιμο αντικείμενο) είναι η υλοποίηση των μεταλλικών με τις απαιτούμενες ιδιότητες, αν δεν είναι διαθέσιμα πλασμονικά υλικά, οι περιορισμοί του bandwidth που είναι εγγενείς στα μεταλλικά, καθώς και ο θεμελιώδης περιορισμός της ταχύτητας διάδοσης της ενέργειας κατά την απόκρυψη συμπαγών αντικείμενων στον ελεύθερο χώρο με παθητικούς μανδύες (για την ιδανική κυκλοφορία της ενέργειας το ηλεκτρομαγνητικό κύμα πρέπει να κάνει κύκλο γύρω από το cloaked αντικείμενο γρηγορότερα από την ταχύτητα του φωτός).

3.2.3 Τεχνική μετασχηματισμού συντεταγμένων (Coordinate transformation technique)

Ο μανδύας από μεταλλικά, ο οποίος επιτρέπει την παρουσία σωμάτων με μηδενικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία, μέσα σε μια συσκευή που αποτελείται από τέτοια υλικά, έχει περιγραφεί πρόσφατα από τους Leonhardt και Pendry. Αυτή η τεχνική στηρίζεται στον μετασχηματισμό συντεταγμένων. Για παράδειγμα ένα σημείο στον ηλεκτρομαγνητικό χώρο μετασχηματίζεται σε σφαίρα στον φυσικό χώρο, κάνοντας έτσι δυνατή τη δημιουργία ενός σφαιρικού όγκου, όπου δεν υφίστανται ηλεκτρομαγνητικά πεδία αλλά αντίθετα οδηγούνται γύρω από το σώμα.

Το cloaking για σώματα στον ελεύθερο χώρο, με την τεχνική μετασχηματισμού συντεταγμένων, απαιτεί οπωσδήποτε τη χρήση ανισότροπων μεταλλικών χωρίς απώλειες με ορισμένες ιδιότητες, όπως της ενεργής διηλεκτρικής σταθερά (ϵ_r) ή της ενεργής διαπερατότητας (μ_r) με τιμές μικρότερες από τις αντίστοιχες στον ελεύθερο χώρο.

Η πρώτη υλοποίηση ενός μανδύα αλλαγής συντεταγμένων, που λειτουργεί στην περιοχή των μικροκυμάτων, έχει παρουσιαστεί πρόσφατα. Η δομή του είναι μια

δισδιάστατη απλούστευση της γενικότερης περίπτωσης και λειτουργεί ως μανδύας για μία πόλωση μόνο, για την οποία το ηλεκτρικό πεδίο είναι παράλληλο προς τον άξονα του κυλινδρικού μανδύα (TM πόλωση). Μια άλλη δισδιάστατη απλοποίηση που επιτυγχάνει την TE πόλωση στο ορατό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, έχει επίσης προταθεί, αλλά δεν έχει υλοποιηθεί ακόμη.

Μία από τις μεγάλες προκλήσεις για την υλοποίηση των μανδύων μεταλλικών που επιτυγχάνουν την αυθαίρετη πόλωση (arbitrary polarization) από τα πεδία είναι η ανάγκη του σχεδιασμού υλικών των οποίων η σχετική διαπερατότητα είναι ίση με την σχετική επιτρεπτότητα. Όπως φαίνεται, αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τεχνητά χειρότροπα υλικά. Σε αυτά τα υλικά η επιθυμητή απόκριση παρέχεται από μικρά ηλεκτρικά εγκλείσματα (συνηθέστερα, έλικες μετάλλου). Δεδομένου ότι τόσο οι ηλεκτρικές όσο και οι μαγνητικές πολώσεις παρέχονται από τις ίδιες προσθήκες, το σχήμα τους μπορεί να επιλέγεται έτσι ώστε η σχετική πραγματική διαπερατότητα να είναι ίδια με την επιτρεπτότητα. Η χειροτροπία, η οποία δεν είναι επιθυμητή για την εφαρμογή του cloaking, μπορεί να αντισταθμιστεί με τη χρήση μείγματος από σπείρες. Πρόσφατα, έχει προταθεί τέτοιος χειρότροπος μανδύας και η απόδοσή του αποδείχθηκε πειραματικά σε συχνοτήτες μικροκυμάτων.

Γενικά η λειτουργία όλων αυτών των μανδύων περιορίζεται από τη διεσπαρμένη (dispersive) και με απώλειες επιτρεπτότητα ή διαπερατότητα, που είναι εγγενείς σε αυτά τα μεταλλικά που χρησιμοποιούνται για τους μανδύες, και έχουν σαν αποτέλεσμα ένα πολύ στενό εύρος συχνοτήτων στο οποίο επιτυγχάνεται το cloaking. Επίσης η εισαγωγή απλουστεύσεων για τις ιδανικές τιμές επιτρεπτότητας και διαπερατότητας, αναπόφευκτα εξασθενεί την απόδοση του μανδύα.

Ένα θεμελιώδες σχεδιαστικό πρόβλημα σχετίζεται με τους περιορισμούς στους συσχετισμούς που προκύπτουν όταν κάνουμε cloaking σε αντικείμενα στον ελεύθερο χώρο: το κύμα που προωθείται μέσα από τον μανδύα πρέπει να έχει ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτή του κύματος εκτός του αντικειμένου. Αυτό είναι δυνατό να επιτευχθεί για cloaking π.χ. ακουστικών κυμάτων, αλλά γίνεται ένα σοβαρό πρόβλημα όταν επιθυμούμε cloaking ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στον αέρα, ή στον ελεύθερο χώρο, αφού το κύμα έξω από το μανδύα ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός. Η ταχύτητα φάσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μπορεί φυσικά να είναι γρηγορότερη από την ταχύτητα του φωτός, αλλά η ταχύτητα της ενέργειας σε ένα παθητικό σύστημα δεν μπορεί. Μια λύση είναι να συμπεριληφθούν ενεργά στοιχεία στα υλικά που συνθέτουν τον μανδύα. Η τελευταία επιλογή παρουσιάζει το μειονέκτημα των πιθανών πεδιακών ασταθειών και καθιστά τον σχεδιασμό των απαραίτητων τύπων μεταλλικών ακόμη πιο δύσκολο και περίπλοκο.

Πρόσφατες θεωρητικές εξελίξεις της προσέγγισης μετασχηματισμού-οπτικής για το cloaking περιλαμβάνουν τη χρήση μη γραμμικών μετασχηματισμών και την ιδέα της χρησιμοποίησης διαφορετικών μετασχηματισμένων χώρων στον τανυστή πεδίου (ηλεκτρικό πεδίο και μαγνητική επαγωγή) και στον τανυστή διέγερσης (πεδίο μετατόπισης και μαγνητικό πεδίο). Επιπλέον έχει προταθεί μια εναλλακτική προσέγγιση στον σχεδιασμό των τεχνητών υλικών, τα οποία επιτελούν την επιθυμητή μετατροπή της κατανομής των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων του χώρου που έχει καταληφθεί από τα υλικά.

Τα οφέλη της τεχνικής μετασχηματισμού συντεταγμένων είναι η απλότητα του θεωρητικού σχεδιασμού και το γεγονός ότι είναι ουσιαστικά ανεξάρτητη από το σχήμα του αντικειμένου στον μανδύα ή την συστατική του ύλη. Τα μειονεκτήματα είναι οι δυσκολίες στην υλοποίηση των υλικών με τις κατάλληλες ιδιότητες, ειδικά όταν λειτουργούμε σε ευρύ εύρος ζώνης και η απόκρυψη από σήματα (ενεργειακοί παλμοί) είναι υποχρεωτική.

3.2.4 Τεχνική γραμμής μετάδοσης (*Transmission-line technique*)

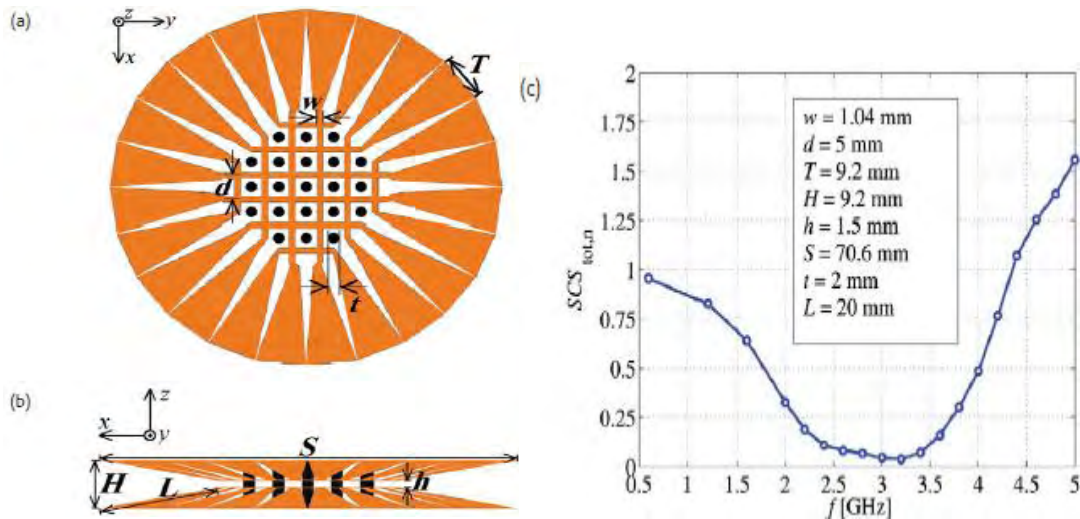
Πρόσφατα έχει προταθεί μια τεχνική cloaking, η οποία είναι ριζικά διαφορετική. Η τεχνική αυτή βασίζεται στη χρήση των ογκομετρικών δομών, που αποτελούνται από δισδιάστατα ή τρισδιάστατα δίκτυα γραμμών μετάδοσης. Σε αυτές τις δομές, τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία διαδίδονται στο εσωτερικό των γραμμών μεταφοράς, αφήνοντας έτσι τον όγκο μεταξύ αυτών των γραμμών αποτελεσματικά cloaked.

Δεδομένου ότι τα πεδία που εισέρχονται από το περιβάλλον μέσο στον μανδύα πρέπει να "πιέζονται" ανάμεσα στις γραμμές μεταφοράς, χρειάζεται ένα στρώμα ζεύξης να συνδυάσει τα πεδία μεταξύ αυτού του μέσου και του δικτύου. Αυτό το στρώμα περιγράφεται ως ένα "στρώμα μετάβασης". Έχει προταθεί ότι στην πράξη αυτό το στρώμα μπορεί να υλοποιηθεί, π.χ. με σταδιακή διεύρυνση γραμμών μετάδοσης παράλληλων λωρίδων, που στην ουσία λειτουργούν ως μετασχηματιστές λειτουργίας μεταξύ του μανδύα και του περιβάλλοντος μέσου. Η λειτουργία του εν λόγω πρακτικά υλοποιήσιμου στρώματος μετάβασης έχει επιβεβαιωθεί αριθμητικά και πειραματικά σε διάφορες δομές.

Παρόλο που η βασική αρχή του cloaking, με δίκτυα γραμμών μετάδοσης είναι πολύ απλή, δεν μπορεί να ξεπεράσει τον εξής θεμελιώδη περιορισμό: για τέλει cloaking ενός αντικειμένου στον ελεύθερο χώρο, η ταχύτητα κύματος μέσα στις γραμμές μεταφοράς θα πρέπει να υπερβαίνει την ταχύτητα του φωτός. Αυτό συμβαίνει επειδή το ίδιο το δίκτυο "επιβραδύνει" το κύμα, δεδομένου ότι μια γραμμή μεταφοράς βλέπει όλες τις άλλες γραμμές μεταφοράς σαν περιοδικά φορτία. Είναι δυνατή η απόκτηση ιδανικού κυματαριθμού σε ένα δίκτυο, ακόμα και όταν κάνουμε cloaking αντικειμένων στον ελεύθερο χώρο, με την τοποθέτηση περιοδικών φορτίων σε ένα τέτοιο δίκτυο. Ωστόσο, η λύση αυτή έχει το αναπόφευκτο μειονέκτημα της πολυπλοκότητας του σχεδιασμού και της μεγάλης διασποράς συχνότητας. Ως εκ τούτου συμπεραίνεται ότι για τις πρακτικές εφαρμογές που απαιτούν μεγάλο εύρος ζώνης, ή και την απόκρυψη από σήματα, η χρήση απλών αφόρτιστων δικτύων γραμμών μεταφοράς είναι προτιμότερη, έστω και αν η ταχύτητα διάδοσης στο εσωτερικό του μανδύα δεν είναι η ιδανική. Αυτό απεικονίζεται με τη διεξαγωγή προσομοιώσεων πλήρους κύματος ενός ομοιογενούς κυλίνδρου μέσα στον οποίο το κύμα ταξιδεύει με τον ίδιο κυματαριθμό, όπως και σε ένα μανδύα που αποτελείται από δισδιάστατα δίκτυα μεταφοράς με ελεύθερο χώρο ανάμεσα στις γραμμές μεταφοράς.

Η σκέδαση από αυτό τον "μανδύα" είναι συγκρίσιμη με την σκέδαση από ένα δισδιάστατο πίνακα από αγωγίμες ράβδους. Τα αποτελέσματα μπορούν να ερμηνευθούν με τον ακόλουθο τρόπο: επειδή ο μανδύας είναι απόλυτα ταυτισμένος με τον περιβάλλοντα ελεύθερο χώρο, μπορεί να συμβεί μόνο σκέδαση προς τα εμπρός. Αυτή η σκέδαση προς τα εμπρός γίνεται ισχυρότερη όσο αυξάνεται το ηλεκτρικό μέγεθος του μανδύα, όπως αναμενόταν. Από το Σχήμα 3.4 μπορούμε να συμπεράνουμε

ότι ακόμα και με ένα μανδύα με διάμετρο ίση με 0.4λ , η συνολική διατομή σκέδασης του πίνακα PEC (Perfect Electric Conductor) μπορεί να μειωθεί κατά 75%. Υπάρχουν επίσης και άλλες περιοχές στις οποίες μπορεί να επιτευχθεί αποτελεσματική απόκρυψη, ανάλογα με το ηλεκτρικό μέγεθος του μανδύα, το οποίο μπορεί να είναι ακόμη και αρκετά μήκη κύματος. Είναι σαφές ότι το αποτέλεσμα του cloaking θα είναι αναπόφευκτα μικρότερης ευρυζωνικότητας σε αυτές τις περιπτώσεις.



Σχήμα 3.4 Απεικόνιση ενός κυλινδρικού ογκομετρικού μανδύα (περιοδικός στην κατεύθυνση z) σε xy - (a) και xz -επίπεδο (b). Η δομή του μανδύα (που εμφανίζεται με πορτοκαλί χρώμα) λειτουργεί για οποιαδήποτε γωνία πρόσπτωσης στο xy -επίπεδο για την TE-πόλωση, δηλ. για κύματα με το ηλεκτρικό πεδίο παράλληλο προς τον άξονα z . Ο μανδύας είναι δισδιάστατη σειρά από ράβδους PEC και απεικονίζεται με μαύρο χρώμα. γ) Προσομοίωση πλήρους κύματος με συνολική διατομή διασκορπισμού του cloaked αντικειμένου, ομαλοποιημένη σε αυτό του uncloaked αντικειμένου. Οι διαστάσεις του προσομοιωμένου μανδύα και αντικειμένου είναι που απεικονίζεται στο ένθετο του (γ).

Ένας κυλινδρικός μανδύας όπως φαίνεται στο σχήμα έχει πρόσφατα μελετηθεί αριθμητικά. Για να υπολογιστεί η συνολική διατομή σκέδασης των cloaked και uncloaked αντικειμένων, φωτίζεται το υπόδειγμα στο σχήμα και το ίδιο μοντέλο χωρίς τον μανδύα, δηλαδή, ο πίνακας PEC μόνος, με επίπεδα κύματα που έχουν το ηλεκτρικό πεδίο παράλληλο προς τον άξονα z . Από την προσομοίωση, αφαιρούμε την σκεδαζόμενη ενέργεια προς όλες τις κατευθύνσεις στο xy -επίπεδο και υπολογίζεται η συνολική διατομή σκέδασης στις δύο περιπτώσεις. Για να τονιστεί η αποτελεσματικότητα της απόκρυψης, κανονικοποιούμε την υπολογιζόμενη συνολική διατομή σκέδασης του cloaked αντικειμένου ως προς τη συνολική διατομή σκέδασης του uncloaked αντικειμένου, όπως και στην περίπτωση του ομογενούς "μανδύα". Το αποτέλεσμα είναι η συνολική κανονικοποιημένη SCS, όπως παρουσιάζεται. Το σχετικό εύρος ζώνης, όπου επιτυγχάνεται ένα λογικό αποτέλεσμα απόκρυψης ($SCS_{tot}, v < 0.5$, δηλαδή, μείωση της συνολικής διατομής σκέδασης κατά περισσότερο από 50%), είναι περισσότερο από 75% με κεντρική συχνότητα στα 2.9GHz. Στη βέλτιστη συχνότητα απόκρυψης των 3.2GHz, το συνολικό SCS του cloaked αντικειμένου έχει μειωθεί κατά περισσότερο από 96%, σε σύγκριση με το uncloaked αντικείμενο.

Τα οφέλη από την τεχνική γραμμής μετάδοσης είναι η απλή δομή, η ευκολία της κατασκευής και συναρμολόγησης, καθώς και η λειτουργία ευρείας ζώνης. Το σημαντικότερο μειονέκτημα της εφαρμογής αυτής, ιδίως σε σύγκριση με τις προηγούμενες τεχνικές στις οποίες αναφερόμαστε, είναι ο περιορισμός της σχετικά με το μέγεθος και το σχήμα του cloaked αντικειμένου.

3.2.5 Πειραματικά αποτελέσματα

Δεδομένου ότι η υλοποίηση των μεταλλικών, και ιδίως εκείνων που απαιτούνται για μανδύες μετασχηματισμού συντεταγμένων ή για ακύρωση σκέδασης, είναι μάλλον δύσκολη, υπήρξαν πολύ λίγα πειραματικά αποτελέσματα που σχετίζονται με αυτές τις τεχνικές cloaking. Η προσέγγιση των γραμμών μετάδοσης, από την άλλη πλευρά, προσφέρει έναν τρόπο για να επιτευχθεί ένας αποτελεσματικός μανδύας με πολύ απλές κατασκευές. Έχει μελετηθεί πρόσφατα το πώς η υλοποίηση του στρώματος μετάβασης, το οποία βασίζεται στην επέκταση των παράλληλων ταινιών γραμμών μεταφοράς, συνεργάζεται με τις αναπόφευκτες ατέλειες που σχετίζονται με την κατασκευή του. Σε αυτή την περίπτωση έχει μελετηθεί ένα διδιάστατο δίκτυο γραμμών μεταφοράς με τετράγωνο σχήμα και ο στόχος της μελέτης ήταν να δείξει την τέλεια ζεύξη των κυμάτων μεταξύ ελεύθερου χώρου και εύκολα υλοποιήσιμου δικτύου cloaking. Η καλή σύζευξη TE-πολωμένων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, που εκπέμπονται από μια κυλινδρική πηγή τοποθετημένη κοντά στο δίκτυο, έχει επιτευχθεί με αριθμητικές προσομοιώσεις.

Σαν αποτέλεσμα αυτών των δομών έχουμε έναν μανδύα ο οποίος είναι αόρατος για κάθετα πολωμένη μικροκυματική ακτινοβολία ακόμη και αν τα κύματα προσπίπτουν από διαφορετικές κατευθύνσεις.

3.2.6 Άλλες τεχνικές cloaking

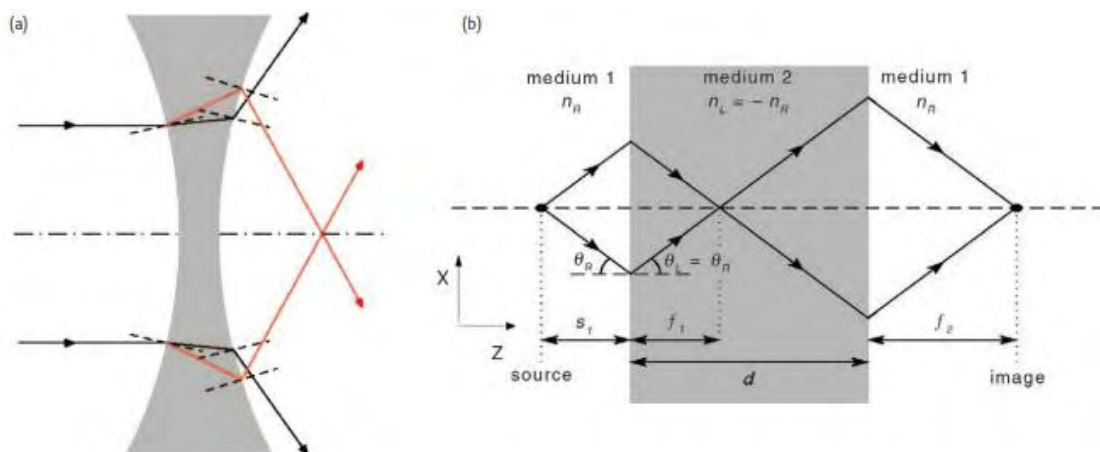
Υπάρχουν επίσης και άλλες τεχνικές cloaking. Μια τέτοια τεχνική προτάθηκε από τον Kildal και τους συνεργάτες του πριν από περισσότερα από δέκα χρόνια. Η εν λόγω τεχνική βασίζεται στην επικάλυψη ενός αντικειμένου, που αποτελείται, για παράδειγμα, από μέταλλα, με τη λεγόμενη σκληρή επιφάνεια να έχει επίμηκες σχήμα προς την κατεύθυνση της διάδοσης των κυμάτων. Έχει αποδειχθεί ότι αυτή η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για τη μείωση της προς τα εμπρός σκέδασης από το εν λόγω αντικείμενο, με αποτέλεσμα τη μείωση της συνολικής διατομής σκέδασης. Το σαφές μειονέκτημα αυτής της τεχνικής, είναι ότι το αποτέλεσμα του cloaking εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη γωνία άφιξης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Αυτή είναι μια λογική συνέπεια του γεγονότος ότι η “απόκρυψη” της συσκευής δεν είναι συμμετρική, αλλά έχει ένα επίμηκες σχήμα. Παρ' όλα αυτά, αυτή η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απόκρυψη σε εφαρμογές όπου η γωνία προσπτώσεως είναι γνωστή, για παράδειγμα στη μείωση της σκέδασης από την κεραία υποστήριξης.

Το cloaking και η αορατότητα έχουν, τα τελευταία χρόνια, γίνει πραγματικότητα και όχι φαντασία, μετά την ανακάλυψη και την υλοποίηση των διαφόρων τύπων μεταλλικών και πλασμονικών υλικών. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές τεχνικές για να επιτευχθεί cloaking από ηλεκτρομαγνητικά ή ακουστικά κύματα, και όλες αυτές οι

τεχνικές έχουν ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σε σύγκριση με τις άλλες. Επί του παρόντος, η σχετική έρευνα για το cloaking αποσκοπεί στο να επεκτείνει το εφικτό εύρος ζώνης, όπου η αφάνεια αυθαίρετων ή συγκεκριμένων αντικειμένων μπορεί να επιτευχθεί, καθώς και να επεκτείνει την κατασκευή τέτοιων συσκευών στο οπτικό φάσμα συχνοτήτων. Υπάρχουν ορισμένοι θεμελιώδεις περιορισμοί στην απόκρυψη, ειδικά με παθητικές συσκευές, ωστόσο πρόσφατα έχουν πραγματοποιηθεί συσκευές που παρουσιάζουν πραγματική απόκρυψη, παρ' όλο που δεν είναι τέλειες.

3.2 Τέλειος φακός (Perfect Lens)

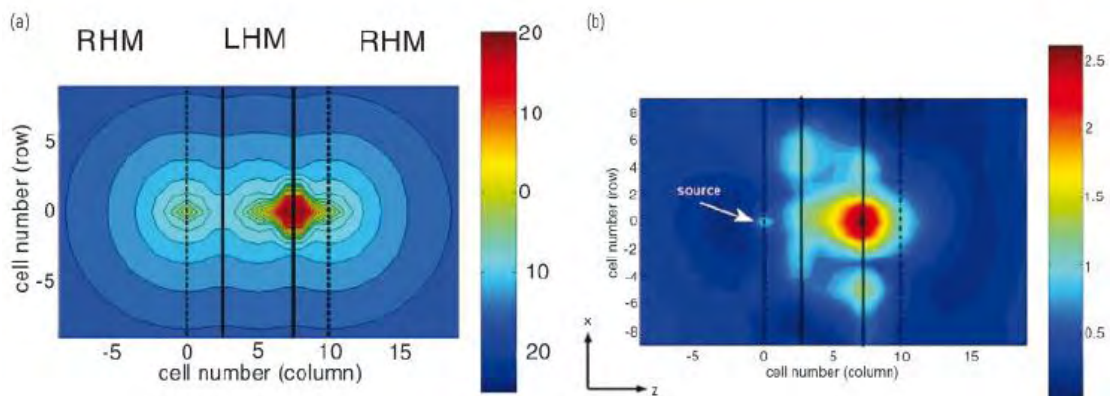
Μια από τις πιο συναρπαστικές προτάσεις, στην έρευνα των μεταλλικών, είναι η απεικόνιση πέρα από το όριο περίθλασης. Αυτή η αναζήτηση ξεκίνησε όταν ο John Pendry υποστήριξε ότι ο φακός Veselago (Σχήμα 3.5) θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι ενεργεί ως ένας τέλειος φακός (perfect lens) [13]. Αυτή η πρόταση θα πρέπει να κατανοηθεί, στο πλαίσιο της λειτουργίας του φακού Veselago ως μικροσκοπίου. Σε αυτό το πλαίσιο, αυτό που περιορίζει την ανάλυση είναι τα χαμένα εγκάρσια κυματοδιανύσματα k_x (υποθέτοντας 2D διάδοση για απλοποίηση). Το διαδιδόμενα κύματα $k_x < k_0$, που αντιστοιχούν σε μεγάλες γωνίες διάδοσης με τον οπτικό άξονα, δεν θα συλλέγονται από το διάφραγμα του φακού και θα χαθούν. Ωστόσο, αν η διάμετρος του φακού είναι αρκετά μεγάλη, όλα αυτά τα διαδιδόμενα κύματα θα πρέπει να συλλέγονται και θα συγκεντρώνονται στο επίπεδο του σχήματος, σύμφωνα με το διάγραμμα ακτινών του σχήματος 3.5 (β). Ωστόσο, ακόμη και στην περίπτωση αυτή, η ανάλυση ενός συμβατικού φακού θα ήταν περιορισμένη, διότι τα οδεύοντα κύματα (κοντινό πεδίο) δεν θα φθάσουν στο επίπεδο του σχήματος, λόγω της εκθετικής εξασθένησης τους με την απόσταση. Ως εκ τούτου, στην καλύτερη περίπτωση, η ανάλυση ενός συμβατικού φακού μικροσκοπίου θα περιοριστεί στο $2\pi/k_0 = \lambda_0$, δηλαδή κάτω από το μήκος κύματος του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που χρησιμοποιείται για την απεικόνιση.



Σχήμα 3.5 Ειδικοί φακοί εστίασης.

- (α) Κοίλος φακός εστίασης, ο οποίος αποκλίνει για θετικό δείκτη (μαύρη γραμμή) και συγκλίνει για αρνητικό δείκτη (πορτοκαλί γραμμή).
- (β) Ο φακός Veselago-Pendry κατασκευασμένος από πλάκα μέσου NRI. Η αρνητική διάθλαση χρησιμοποιείται για την εστίαση ενός σημείου σε ένα σημείο. Οι ακτίνες συγκλίνουν στο ίδιο σημείο όταν ο δείκτης είναι -1 , οδηγώντας σε εστίαση χωρίς εκτροπή.

Για τον φακό Veselago-Pendry, τα διαδιδόμενα κύματα $k_x < k_0$ αποκαθίστανται τέλεια στο επίπεδο της εικόνας, σύμφωνα με το διάγραμμα ακτινοβολίας του σχήματος. Στην περίπτωση αυτή, υπάρχει απόλυτη αντιστοιχία (χωρίς ανακλάσεις) για όλα τα συστατικά k_x , κάτι το οποίο είναι πολύ σημαντικό δεδομένου ότι η διάθλαση σε πλάγια πρόσπτωση σε ένα συμβατικό (θετικός δείκτης) διηλεκτρικό οδηγεί σε ανακλάσεις. Αυτό που είναι ακόμη πιο σημαντικό όμως είναι το γεγονός ότι η αυθαίρετη συνιστώσα οδεύοντων κυμάτων $k_x < k_0$ αντιστοιχίζεται επίσης και η αντίστοιχη μεταφορά συντελεστή από τις πηγές έως το επίπεδο της εικόνας είναι ένα προς ένα. Ως εκ τούτου, τουλάχιστον υπό ιδανικές συνθήκες, ο φακός Veselago αποκαθιστά μια "τέλεια" εικόνα.



Σχήμα 3.6 (α) Υπολογισμένο κατακόρυφο ηλεκτρικό πεδίο (στην y κατεύθυνση) πάνω στον hyperlens NRI-TL. Οι συμπαγείς γραμμές ορίζουν τα όρια NRI-TL και οι διακεκομμένες τα επίπεδα της πηγής και της εικόνας.
(β) Πειραματική κατακόρυφη κατανομή ηλεκτρικού πεδίου πάνω από έναν hyperlens NRI-TL στα 1.057 GHz.

Στο Σχήμα 3.6, η εικόνα μιας πηγής (μικρό ηλεκτρικό δίπολο), σχεδιάζεται μέσα από μια έκδοση ενός φακού γραμμής μετάδοσης Veselago-Pendry. Σημειώνεται ότι το πιο φωτεινό σημείο βρίσκεται στην έξοδο του φακού και κατά μήκος της γραμμής που ενώνει την πηγή και την εικόνα. Από την άλλη πλευρά, αν κάποιος εξετάσει τα κυλινδρικά κύματα στο σχήμα, καθίσταται προφανές ότι το κέντρο φάσεως σε καθεμία από τις τρεις περιφέρειες προσδιορίζει τη θέση της πηγής, το κέντρο της NRI-TL πλάκας και η εικόνα, η οποία βρίσκεται εκτός της NRI-TL πλάκας και αντίστοιχα με την εικόνα ακτίνας (παρά το γεγονός ότι ο συγκεκριμένος φακός είναι μόνο το ένα τέταρτο-μήκος κύματος σε πάχος, η εικόνα ακτίνας φαίνεται να παραμένει αντιπροσωπευτική κάτι το οποίο είναι κάπως περίεργο). Συνεπώς, σε αυτόν τον "υπερ-αναλυτικό" τρόπο λειτουργίας και γύρω από την περιοχή της εικόνας δεν μπορεί να προσδιοριστεί μια περιοχή σημείου, δεδομένου ότι η περιοχή της εικόνας κυριαρχείται από τα ισχυρά οδεύοντα κύματα. Παρ' όλα αυτά, αυτό το είδος της απεικόνισης, στο οποίο χρησιμοποιήθηκε μια ταινία από άργυρο ως ηλεκτροστατικός υπερφακός, για να μεταφέρεται ένα οπτικό πρότυπο (μάσκα), από το επίπεδο πηγής έως το επίπεδο της εικόνας με την ανάλυση υπό-περίθλασης, μπορεί να είναι χρήσιμο, όπως αποδείχθηκε.

Η πλήρως ιστροπική 3D δομή του σχήματος 3.6 είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί πειραματικά. Ωστόσο, διατηρώντας μόνο τα οριζόντια επίπεδα της κυψελίδας φαίνεται στην εικόνα, ότι μια ογκομετρική πολυστρωματική δομή NRI-TL μπορεί εύκολα να

κατασκευαστεί. Η προκύπτουσα δομή θα είναι ισοτροπική για τα κύματα με τα μαγνητικά πεδία τους πολωμένα κάθετα προς τα στρώματα. Η αντίστοιχη δομή φαίνεται στο σχήμα και αποτελείται από στρώσεις συνεπιπέδων NRI ταινιών γραμμών μεταφοράς. Προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες, χρησιμοποιούνται τσιπ υψηλής χωρητικότητας και πηνία για τη φόρτωση των τυπωμένων γραμμών μετάδοσης. Έχουν επίσης αναφερθεί άλλες πρόσφατες προσπάθειες δημιουργίας υπερφακών, με τη χρήση ευρυζωνικών ογκομετρικών και ισοτροπικών φακών NRI-TL.

Μια συναρπαστική πρόσφατη εξέλιξη στον τομέα του υπερφακού Veselago-Pendry είναι η εφαρμογή μαγνητικής τομογραφίας (MRI). Συγκεκριμένα, έχει κατασκευαστεί ένας μαγνητοστατικός τρισδιάστατος φακός, με βάση το στοιχείο SRR, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αύξηση της ευαισθησίας των πηνίων επιφανείας. Έτσι προκύπτει η σαφής βελτίωση της εικόνας μαγνητικής τομογραφίας των δύο ανθρώπινων γονάτων και χωρίς την παρουσία του υπερφακού μεταξύ των γονάτων, όπως φάνηκε σε πρόσφατη εργασία.

Το κύριο μειονέκτημα του υπερφακού Veselago-Pendry είναι ότι η επιτευχθείσα υπέρ-ανάλυση είναι πολύ ευαίσθητη σε απώλειες υλικού. Ένα ξεχωριστό παράδειγμα για την επίλυση αυτού του προβλήματος είναι ο λεγόμενος *υπέρ-φακός (hyperlens)* που χρησιμοποιεί ανισότροπα μεταϋλικά, που χαρακτηρίζονται από υπερβολικά χωρητικό διάγραμμα διασποράς. Αυτά τα 'υπερβολικά' μέσα υποστηρίζουν στενά περιορισμένες ακτίνες (όπως οι «κόννοι απόκρισης» στο ανισοτροπικό πλάσμα), που έχουν παρουσιαστεί σε προηγούμενες εργασίες με μικροκύματα και χρησιμοποιούν μεταϋλικά γραμμών μετάδοσης. Όταν αυτά τα "υπερβολικά" μεταϋλικά διαμορφώνονται σε ένα κυλινδρικό (ή σφαιρικό) φακό, τότε οι ακτίνες που προέρχονται από ένα αντικείμενο προχωρούν προς τα έξω και τονίζουν τα υπό το μήκος κύματος χαρακτηριστικά. Όταν χωρίζονται από αποστάσεις $\lambda/2$ ή μεγαλύτερες, θα μπορούν να παρατηρηθούν με χρήση συμβατικών μικροσκοπίων. Η πειραματική επίδειξη αυτής της ιδέας σε οπτικές συχνότητες γίνεται με τη χρήση στρωματικών δομών αργύρου / διηλεκτρικού για τη σύνθεση των απαιτούμενων υπερκανονικών (extraordinary) μεταϋλικών. Οι hyperlenses προσφέρουν μεγέθυνση και είναι σημαντικά λιγότερο ευαίσθητοι στις υλικές ζημιές, αλλά η απόσταση εργασίας μεταξύ του αντικειμένου και του φακού πρέπει να είναι πολύ μικρή, σε σύγκριση με το μήκος κύματος ελεύθερου χώρου.

Τέλος, θα ήταν ενδιαφέρον να συγκριθούν, εν συντομία, η απεικόνιση με hyperlens μεταϋλικών και με τα συμβατικά μικροσκόπια κοντινού πεδίου. Τα τελευταία μπορούν να επιτύχουν ακραία ανάλυση υπό το μήκος κύματος, αλλά απαιτούν οξείες γωνίες και ακριβή μηχανική σάρωση σε πολύ κοντινή απόσταση από το υπόδειγμα. Από την άλλη πλευρά, οι τεχνικές με τα μεταϋλικά μπορούν να διαμορφώσουν την εικόνα χωρίς σάρωση (δηλαδή παράλληλα, κάτι που είναι σημαντικό για βιολογική απεικόνιση), σε κανονικές αποστάσεις από το υπόδειγμα και θα μπορούσαν να προσφέρουν μεγέθυνση (π.χ. στην περίπτωση του hyperlens). Επιπλέον, η παράλληλη διαμόρφωση απεικόνισης που προσφέρεται από hyperlens μεταϋλικού, μπορεί να αποδειχθεί χρήσιμη για την φωτολιθογραφία υπό το μήκος κύματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Μέθοδοι Προσομοίωσης των Μεταλλικών

4.1 Εισαγωγή

Η διαδικασία της σχεδίασης και κατασκευής ενός συστήματος περιλαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό δύσκολων βημάτων μέχρι την ολοκλήρωσή της. Ένα από τα πιο βασικά στάδια αποτελεί η διεξαγωγή πειραμάτων, που επιβεβαιώνουν κάθε επί μέρους μονάδα της υπό σχεδίασης διάταξης. Ωστόσο, πολλές φορές οι οικονομικές και υλικοτεχνικές απαιτήσεις αυτών των πειραμάτων καθιστούν την υλοποίησή τους πρακτικά αδύνατη. Επιπροσθέτως, υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες η γεωμετρική πολυπλοκότητα των υπό σχεδίαση συστημάτων, σε συνδυασμό με την πολύπλοκη φύση των εξισώσεων που καθορίζουν τη φύση τους, δεν επιτρέπουν μια αναλυτική προσέγγιση και επίλυση αυτών των εξισώσεων.

Για την αντιμετώπιση τέτοιου είδους προβλημάτων έχει καθιερωθεί, εδώ και αρκετά χρόνια, η υλοποίηση προσομοιώσεων μέσω ειδικών υπολογιστικών τεχνικών. Οι συγκεκριμένες τεχνικές διακρίνουν το χώρο και το χρόνο, έτσι ώστε να μπορούν να γίνουν κατανοητές ως έννοιες από έναν υπολογιστή και μετασχηματίζουν τις εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία του συστήματος σε μια αντίστοιχη διακριτή μορφή. Εν συνεχεία, επιστρατεύεται η ισχύς των υπολογιστών, οι οποίοι επιλύουν τις διακριτές εξισώσεις προσομοιώνοντας τη συμπεριφορά του συστήματος με κάποιο ελάχιστο σφάλμα. Με αυτόν τον τρόπο επιτρέπεται η διενέργεια μεγάλου αριθμού δοκιμών σε μικρό χρονικό διάστημα, με ελάχιστο κόστος.

Κατά καιρούς έχει δημιουργηθεί και εφαρμοστεί ένας ιδιαίτερα μεγάλος αριθμός τέτοιων αριθμητικών μεθόδων, κάθε μια από τις οποίες εμφανίζει τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα. Οι δύο σημαντικότερες μέθοδοι είναι η *γρήγορη πολυπολική μέθοδος* (*Fast Multipole Method – FMM*) και η *μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου* (*Finite Difference Time Domain – FDTD*).

4.2 Η Γρήγορη Πολυπολική μέθοδος

Η Fast Multipole Method είναι μια αριθμητική τεχνική, η οποία έχει προέλευση από το διαστρικό πρόβλημα αλληλοεπίδρασης, κατά το οποίο υπολογίζονται οι αλληλεπιδράσεις ανάμεσα σε N αντικείμενα [14]. Για την μαθηματική κατανόηση του προβλήματος, θεωρούμαι το πρόβλημα της διασποράς των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από λεπτές δομές σύρματος. Χρησιμοποιούμε την τεχνική για να κατανοήσουμε τη διασπορά από ένα υλικό με αρνητικό δείκτη διάθλασης, το οποίο είναι τεχνητά κατασκευασμένο από ένα σύνθετα διαμορφωμένο σύρμα ενσωματωμένο σε ένα μέσο υποδοχής.

Χωρίς να χρησιμοποιούνται οποιεσδήποτε προσεγγίσεις ομογενοποίησης, τα τρισδιάστατα μεταλλικά διατυπώνονται αυστηρά χρησιμοποιώντας την *ενιαία εξίσωση ηλεκτρικού πεδίου* (*Electric Field Integral Equation - EFIE*). Οι επιφάνειες του αγωγού

σχεδιάζονται με άριστα αγωγή φύλλα με μηδενικό πάχος. Για ακριβείς αριθμητικές λύσεις, τόσο το EFIE όσο και οι επιφάνειες των κατασκευών των μεταλλικών διακριτοποιούνται ταυτόχρονα σε μικρά επίπεδα τρίγωνα. Οι εξισώσεις πυκνών πινάκων που προκύπτουν επιλύονται επαναληπτικά, όπου οι πολλαπλασιασμοί των διανυσμάτων των πινάκων εκτελούνται κατ' ευθείαν με τον πολυεπίπεδο γρήγορο πολυπολικό αλγόριθμο (*Multilevel Fast Multipole Algorithm - MLFMA*).

4.2.1 Η Ενιαία Εξίσωση Ηλεκτρικού Πεδίου

Έστω μια πυκνότητα ρεύματος $j(r)$ με αντίστοιχη πυκνότητα φορτίου $\rho(r) = -\frac{1}{j\omega} \nabla j(r)$ ενσωματωμένη στο κενό. Θεωρούμαι ένα χρονικά αρμονικό σύστημα με $e^{j\omega t}$ εξαρτώμενο από το χρόνο. Το ηλεκτρικό φορτίο που δημιουργείται από το $j(r)$ δίνεται από:

$$e(r) = -j\omega\mu_0 \int_V G(r|r')j(r')dV' - \frac{1}{\epsilon_0} \nabla \int_V G(r|r')\rho(r')dV'$$

με την Green συνάρτηση:

$$G(r|r') = \frac{1}{4\pi} \frac{e^{-jk_0|r-r'|}}{|r-r'|}$$

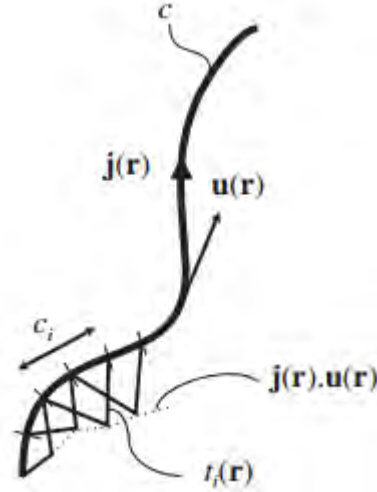
με $k_0 = \omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$.

Έστω ένα λεπτό τέλει αγωγίμο ηλεκτρικό καλώδιο με ακτίνα a , το οποίο υποτάσσεται σε ένα ηλεκτρικό πεδίο $e^i(r)$. Το πεδίο θα προκαλέσει επιφανειακές πυκνότητες φορτίου $j(r)$ στο καλώδιο, παράγοντας ένα διάσπαρτο ηλεκτρικό φορτίο $e^s(r)$, το οποίο θα ακυρώσει την επαπτόμενη συνιστώσα του προσπίπτων ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του καλωδίου. Εφόσον το καλώδιο είναι λεπτό, θεωρούμαι ότι το ρεύμα ρέει στον άξονα του καλωδίου και επιβάλλουμε την ακύρωση του συνολικού επαπτόμενου ηλεκτρικού πεδίου $e(r) = e^i(r) + e^s(r)$ επίσης στον άξονα. Έτσι το ρεύμα στο καλώδιο δίνεται από τη σχέση:

$$\lim_{r \rightarrow c} e^i(r)u(r) = \lim_{r \rightarrow c} [j\omega\mu_0 \int_c G(r|r')u(r)j(r')dc' + \frac{1}{\epsilon_0} u(r) \nabla \int_c G(r|r')\rho(r')dc'] \quad (4.1)$$

όπου c η καμπύλη που περιγράφει το καλώδιο (Σχήμα 4.1) και $u(r)$ το μοναδιαίο διάνυσμα επαπτόμενο στο καλώδιο στο σημείο r .

Για να λύσουμε αυτή την εξίσωση χρησιμοποιούμε το Galerkin MoM. Το τέλος του καλωδίου διαιρείται σε τμήματα και το ρεύμα κατά μήκος αναπαρίσταται από μία επέκταση σε τριγωνικές συναρτήσεις βάσης $t_i(r)$ όπως υποδεικνύεται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1 Λεπτό καλώδιο (Thin Wire).

Η συνάρτηση πυκνότητας είναι

$$j(r) = \sum_{i=1}^N I_i t_i(r) u(r)$$

με I_i , $i = 1, \dots, N$ οι διακριτές αγνώστου. Αν $p_i(r) = \nabla[t_i(r)u(r)]$ τότε η πυκνότητα φορτίου είναι

$$\rho(r) = \frac{1}{j\omega} \sum_{i=1}^N I_i p_i(r).$$

Μια εξίσωση για N αγνώστους λαμβάνεται με την επιβολή της εξίσωσης (4.1), δοκιμάζοντας τις συναρτήσεις $t_i(r)$, $i = 1, \dots, N$. Αυτό οδηγεί σε ένα γραμμικό σύστημα εξισώσεων της μορφής:

$$\bar{Z}I = V \quad (4.2)$$

με

$$Z_{ij} = j\omega\mu_0 \int_{c_i} \int_{c_j} t_i(r) t_j(r') G(r|r') dc' dc + \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \int_{c_i} \int_{c_j} p_i(r) p_j(r') G(r|r') dc' dc$$

και

$$V_i = \int_{c_i} t_i(r) e^i(r) u(r) dc$$

όπου c_i το υποστήριγμα του $t_i(r)$ κατά μήκος του καλωδίου.

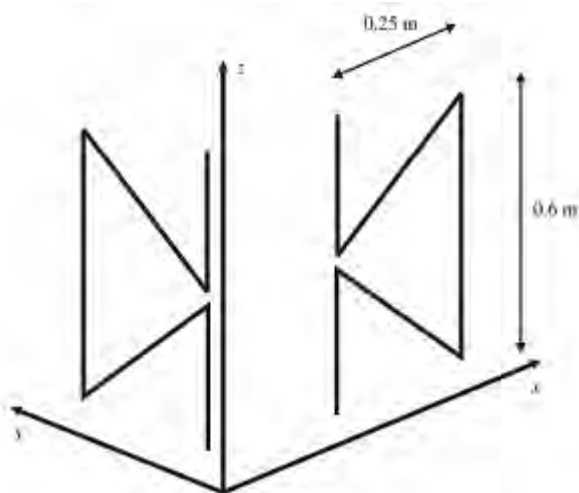
Η λύση του προβλήματος είναι η λύση του γραμμικού συστήματος (4.2), το οποίο μπορεί να λυθεί με ευθείς μεθόδους, όπως την LU decomposition. Άλλη προσέγγιση είναι να χρησιμοποιήσουμε μια επαναληπτική μέθοδο, η οποία χρησιμοποιεί διάφορες τιμές για τα I_i του αριστερού μέρους μέχρι να είναι ίσο με το δεξί μέρος V , για μια προκαθορισμένη ακρίβεια. Ωστόσο, αν είναι απαραίτητες P επαναλήψεις και το P είναι πολύ μικρότερο του N , η χρήση της επαναληπτικής μεθόδου είναι καταστροφική. Οι

πιο συχνές επαναληπτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι οι Jacobi, Gauss-Siedel, συζυγείς βαθμίδες (conjugate gradient) όπως bi-conjugate gradient και TFQMR.

4.2.2 Μοναδιαία Κελιά

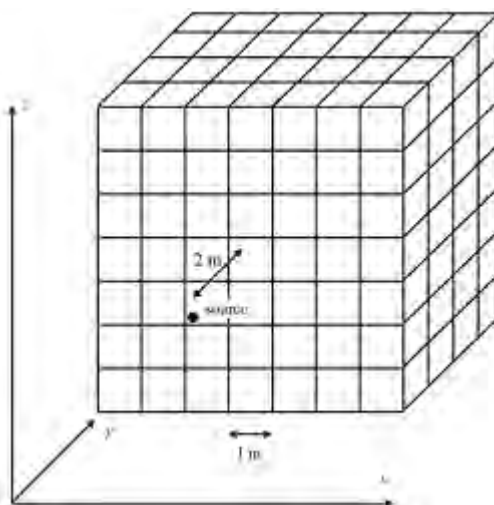
Ένα μεταϋλικό είναι ένα τεχνητό υλικό το οποίο απαρτίζεται από μικρά εγκλείσματα τα οποία είναι ενσωματωμένα σε ένα μέσο υποδοχής. Οι ιδιότητες των εγκλεισμάτων μπορούν να αλλάξουν τις παραμέτρους του υλικού του μέσου υποδοχής. Εάν το μέσον υποδοχής περιέχει μικρούς βρόχους και καλώδια, είναι δυνατόν να συμπεριφερθεί ως ένα μέσον με αρνητικό δείκτη διάθλασης, δηλαδή ένα ομογενές μέσον με ταυτόχρονες αρνητικές τιμές διηλεκτρικής σταθεράς και διαπερατότητας.

Θεωρούμε ένα μεταϋλικό όπου τα εγκλείσματα είναι bow-tie συρμάτινα στοιχεία. Ένα κελί με δύο ορθογώνια bow-tie στοιχεία υποδεικνύονται στο Σχήμα 4.2.



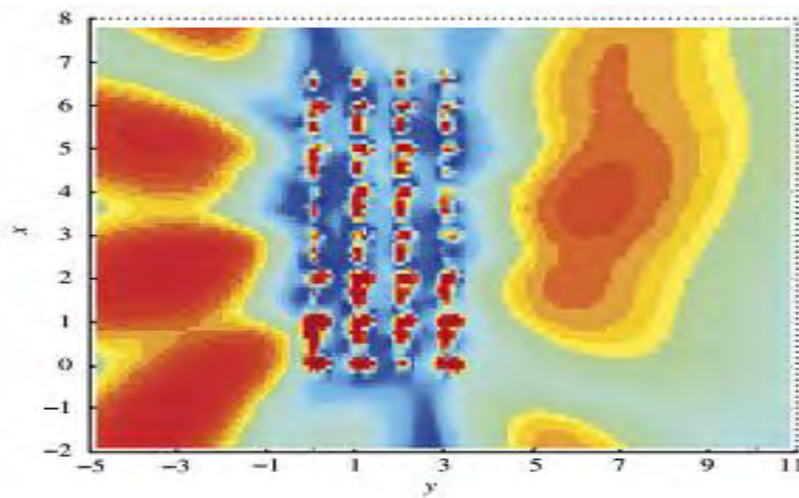
Σχήμα 4.2 Μια μονάδα κυψέλης με δύο ορθογώνια bow-tie στοιχεία.

Τα κελιά περιοδικά στοιβάζονται μέσα σε ένα κυβικό πλέγμα $7 \times 4 \times 7$ μοναδικών κελιών (Σχήμα 4.3).



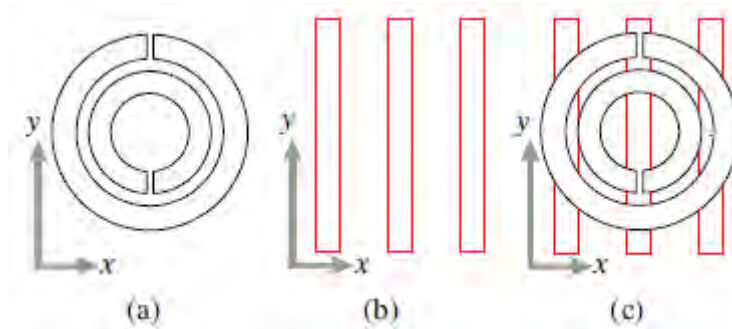
Σχήμα 4.3 Ένα κυβικό περιοδικό πλέγμα μονάδων κυψελών που αποτελεί ένα κομμάτι μεταλλικού.

Η συχνότητα επιλέγεται έτσι ώστε το μήκος κύματος λ να είναι 3.52m. Κάθε bow-tie στοιχείο είναι διακριτοποιημένο, βάση του MoM, σε 18 στοιχεία, παράγοντας 36 αγνώστους για κάθε κελί, συνεπώς 7056 αγνώστους. Μία σημειακή πηγή τοποθετείται σε μια απόσταση 2m κεντρικά μπροστά από την πλάκα και το αποτέλεσμα στο οριζόντιο επίπεδο μέσω της πηγής φαίνεται στο Σχήμα 4.4. Τα bow-tie στοιχεία παράγουν αρνητική διηλεκτρική σταθερά και αρνητική μαγνητική διαπερατότητα σε συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων. Ένα εστιασμένο αποτέλεσμα είναι ορατό στην αντίθετη πλευρά της πλάκας, δείχνοντας ότι το μεταλλικό πράγματι συμπεριφέρεται σαν υλικό με αρνητικό δείκτη διάθλασης. Το αποτέλεσμα δεν είναι τέλει σε περιορισμένο αριθμό κελιών στην πλάκα και στο άπειρο και σε σχετικά μικρές διαστάσεις.



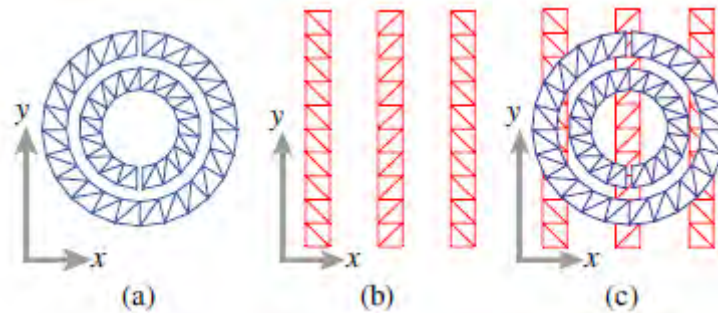
Σχήμα 4.4 Διάσπαρτο πεδίο στο οριζόντιο επίπεδο που περιέχει την πηγή της δομής του σχήματος 4.3.

Το Σχήμα 4.5 παρουσιάζει τις μονάδες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των δομών των μεταλλικών [15]. Ένα απλό SRR, το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 4.5 (α), έχει διαστάσεις της τάξης των microns. Ο μικρότερος δακτύλιος έχει εσωτερική ακτίνα 43 μm και εξωτερική ακτίνα 67,2 μm . ο μεγαλύτερος δακτύλιος έχει εσωτερική ακτίνα 80,7 μm και εξωτερική ακτίνα 107,5 μm . και το πλάτος κενού είναι 7,2 μm . Με αυτές τις διαστάσεις, το SRR αντηχεί σε περίπου 100 GHz, όταν βρίσκεται σε ένα μέσο με σχετική διηλεκτρική σταθερά 4.8. Γύρω από τη συχνότητα συντονισμού, το SRR διεγείρει αρνητική διαπερατότητα στο μέσο. Οι διαστάσεις των λεπτών συρμάτων που απεικονίζονται στο Σχήμα 4.5 (b) είναι συμβατές με τις διαστάσεις των SRR και εμφανίζουν αρνητική διαπερατότητα σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, συμπεριλαμβανομένων των 100 GHz. Τέλος, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.5 (c), θεωρούμε επίσης σύνθετα μεταλλικά (CMMs) συνδυάζοντας SRRs και λεπτά σύρματα στο ίδιο μέσο για να αποκτήσουμε μια διπλή αρνητική ιδιότητα.



Σχήμα 4.5 Unit cells (a) SRR, (b) thin wires, (γ) συνδυασμός SRR και thin wires.

Οι απεικονίσεις των unit cells παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.6, όπου χρησιμοποιούμε τους βέλτιστους αριθμούς επίπεδων τριγώνων, δηλαδή ελαχιστοποιούμε τους αριθμούς των τριγώνων για την αποτελεσματικότητα των προσομοιώσεων, ενώ τα τρίγωνα είναι αρκετά μικρά για να διακριτοποιήσουν τις γεωμετρίες και τα ρεύματα της επιφάνειας με ακρίβεια.



Σχήμα 4.6 Διακριτοποίηση των μονάδων του Σχήματος 4.5.

4.2.3 Δομές Μεταλλικών

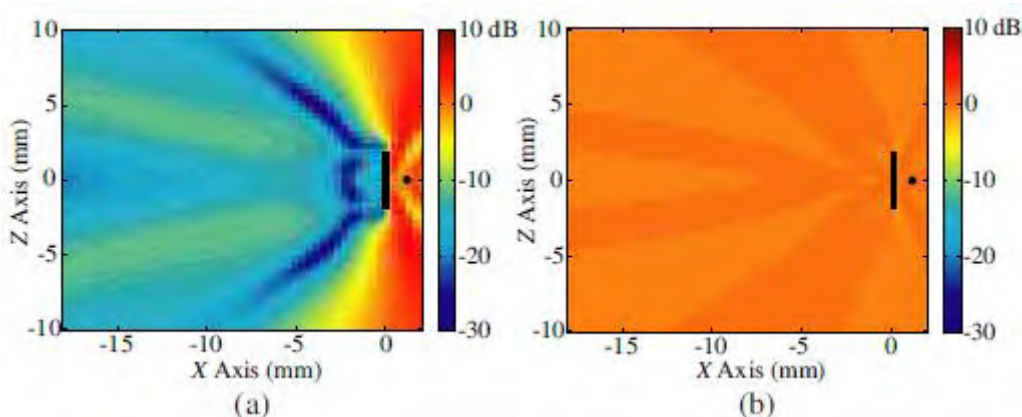
Split Ring Resonators (SRR)

Η δομή SRR που φαίνεται στο Σχήμα 4.5 (α) παρουσιάζει μαγνητικό συντονισμό στα περίπου 100 GHz, όταν διεγείρεται κατάλληλα από ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Στη συχνότητα συντονισμού, η ηλεκτρομαγνητική απόκριση του SRR αλλάζει αισθητά. Ακόμη και ένα ενιαίο SRR είναι σε θέση να εμποδίσει τη μετάδοση των κυμάτων, η οποία μπορεί να παρατηρηθεί ως φαινόμενο σκίασης. Αυτή η ασυνήθιστη συμπεριφορά γύρω από τη συχνότητα συντονισμού μπορεί να εξηγηθεί με την προκαλούμενη αρνητική αποτελεσματική διαπερατότητα στο μέσο.

Thin wires (TW)

Οι περιοδικές διευθετήσεις λεπτών συρμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρεμπόδιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, εάν η απόσταση μεταξύ των συρμάτων είναι μικρή σε σύγκριση με το μήκος κύματος και εάν τα σύρματα είναι ευθυγραμμισμένα παράλληλα προς το ηλεκτρικό πεδίο του προσπίπτοντος κύματος. Σε αντίθεση με τους SRRs, το υπό σκίαση αποτέλεσμα, μπορεί να επιτευχθεί με λεπτά σύρματα σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Αυτή η γνωστή ιδιότητα θωράκισης μπορεί επίσης να εξηγηθεί ως αποτέλεσμα αρνητικής δεκτικότητας στο μέσο.

Για παράδειγμα, στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μετάδοσης για μια σειρά από λεπτά σύρματα που βρίσκονται στο επίπεδο $x = 0$. Η συστοιχία φωτίζεται από ένα Hertzian δίπολο που βρίσκεται στα δεξιά της συστοιχίας και προσανατολίζεται προς την κατεύθυνση y . Στο σχήμα 4.7 (α), τα λεπτά σύρματα εγκαθίστανται κατά μήκος του άξονα y και είναι παράλληλα με το κυρίαρχο στοιχείο του εισερχόμενου ηλεκτρικού ρεύματος. Για αυτή τη ρύθμιση, η αποτελεσματική διαπερατότητα καθίσταται αρνητική και η ισχύς που μεταδίδεται μέσω της συστοιχίας είναι σχετικά χαμηλή. Στο Σχήμα 4.7 (β), ωστόσο, η συστοιχία περιστρέφεται και το προσπίπτων ηλεκτρικό πεδίο είναι ως επί το πλείστον κάθετο προς τα λεπτά σύρματα. Σε αυτή την περίπτωση, η συστοιχία λεπτών συρμάτων είναι εμφανής. Σημειώστε ότι η περιοχή $x > 0$ στο επίπεδο $y = 0$ σχεδιάζεται επίσης έτσι ώστε να φαίνεται καθαρά η κατανομή των λεπτών συρμάτων και του δίπολου, παρόλο που αυτή η περιοχή δεν είναι στην πραγματικότητα η περιοχή μετάδοσης.



Σχήμα 4.7 Μετάδοση ισχύος (σε κλίμακα dB) για ένα τοίχωμα λεπτού καλωδίου που φωτίζεται από ένα Hertzian δίπολο, όταν τα λεπτά καλώδια είναι (α) παράλληλα και (β) κάθετα στην κυρίαρχη ηλεκτρική πόλωση.

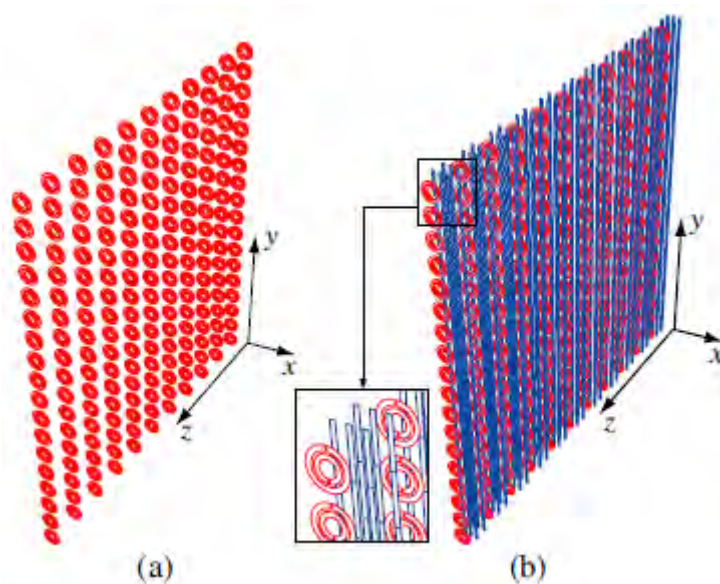
Composite Metamaterials (CMM)

Τα CMM κατασκευάζονται με προσεκτική τοποθέτηση SRR και λεπτών συρμάτων στο ίδιο μέσο. Με αυτόν τον τρόπο, οι επιθυμητές ιδιότητες των SRR και των λεπτών συρμάτων μπορούν να συνδυαστούν, δηλ. τόσο η διαπερατότητα όσο και η δεκτικότητα μπορούν να είναι ταυτόχρονα αρνητικές για ορισμένες συχνότητες. Όταν οι SRRs δεν αντηχούν, οι δομές CMM είναι αδιαφανείς εξαιτίας της αρνητικής δεκτικότητας που προκαλείται από τα λεπτά σύρματα. Ωστόσο, στις συχνότητες συντονισμού των SRRs, οι CMM είναι απροσδόκητα διαφανείς, γεγονός που μπορεί να εξηγηθεί από την επαγόμενη διπλή αρνητικότητα.

Metamaterial Walls

Οι τοίχοι μεταϊλικών κατασκευάζονται με την τακτική διαρρύθμιση εκατοντάδων SRR και/ή λεπτών καλωδίων. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 4.8 (α) απεικονίζεται μια συστοιχία SRR 18×11 (1-layer wall) που βρίσκεται στο $x = 0$. Οι SRRs βρίσκονται σε επίπεδα κάθετα στον άξονα z , ενώ η περιοδικότητα των μονάδων είναι $262.7 \mu\text{m}$ και $450 \mu\text{m}$ στις κατευθύνσεις y και z , αντίστοιχα. Για τα τοιχώματα πολλαπλών στρωμάτων, η περιοδικότητα στην κατεύθυνση x επιλέγεται επίσης ως $262.7 \mu\text{m}$. Συνδυάζοντας αυτή τη συστοιχία SRR με λεπτά σύρματα, κατασκευάζεται ένα τοίχωμα CMM, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.8 (β). Δύο σειρές λεπτών συρμάτων μπορούν

να φανούν μεταξύ δύο διαδοχικών σειρών SRR στην κατεύθυνση z, όπως φαίνεται στο ένθετο του Σχήματος 4.8 (β).



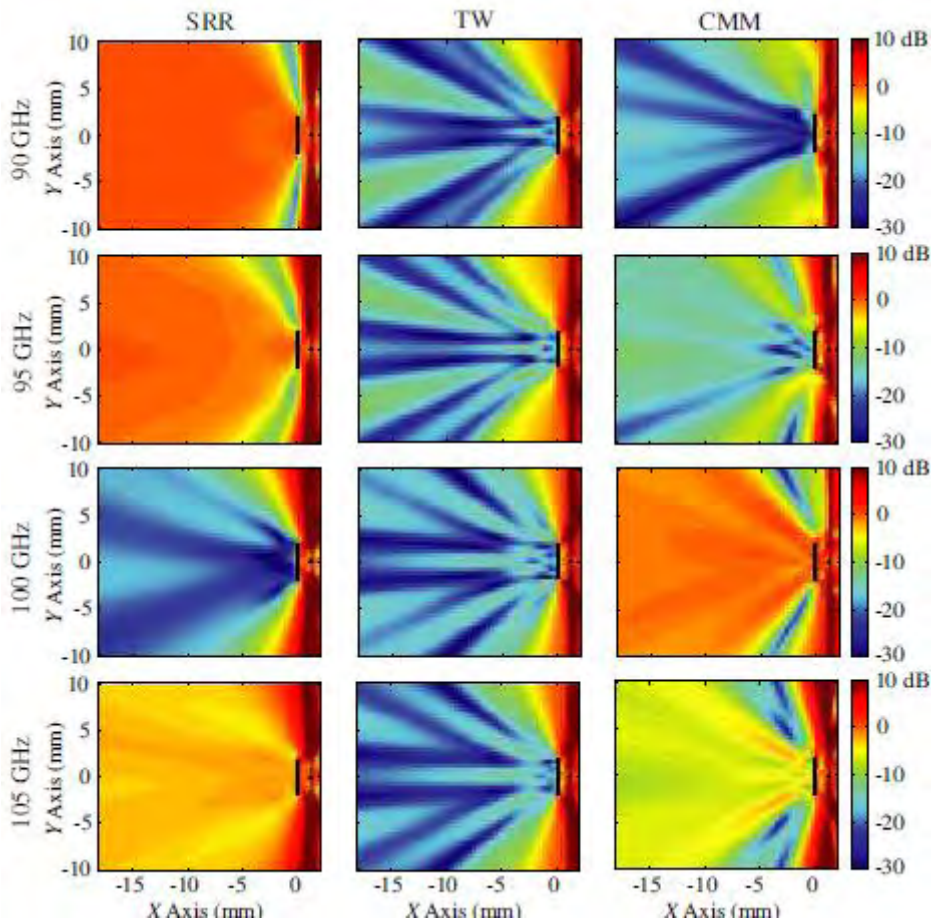
Σχήμα 4.8 (α) 1-layer SRR τοίχος με 18×11 SRRs (β) 1-layer CMM τοίχος με 18×11 SRRs συνδυασμένο με thin wires.

4.2.4 Αποτελέσματα

Το Σχήμα 4.9 παρουσιάζει τα αποτελέσματα μετάδοσης ισχύος για 1-layer SRR, λεπτό σύρμα και CMM τοίχους που βρίσκονται στο $x = 0$. Η μετάδοση ισχύος που ορίζεται στο (21) υπολογίζεται σε διάφορα σημεία στο επίπεδο $z = 0$ στα 90 GHz, 95 GHz, 100 GHz και 105 GHz. Η διέγερση είναι ένα Hertzian δίπολο προσανατολισμένο κατά την κατεύθυνση y και βρίσκεται στο $x = 1.2$ mm, όπως επίσης υποδεικνύεται από κουκκίδες στα διαγράμματα. Οι παρατηρήσεις που προκύπτουν είναι οι εξής:

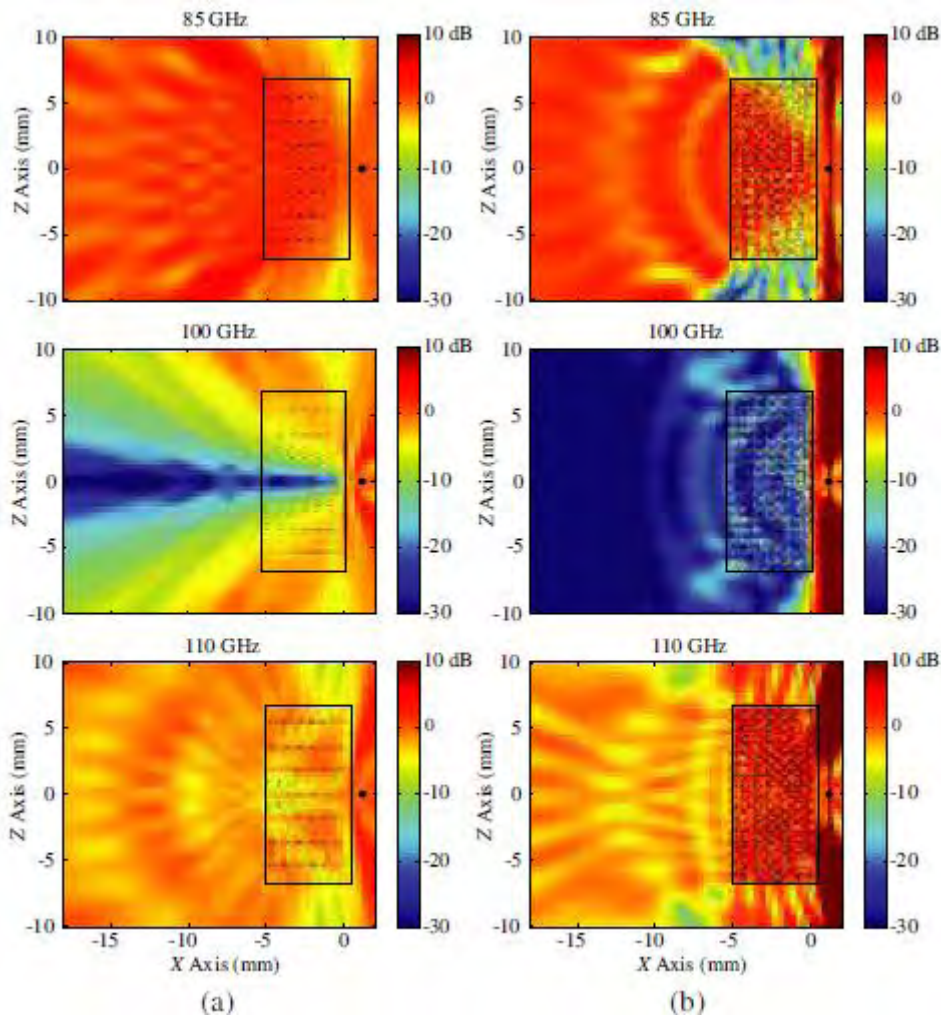
- Στα 90 GHz και 95 GHz, η μετάδοση ισχύος στα αριστερά του τοίχου SRR είναι σχεδόν ενιαία (0 dB). Στα 100 GHz, ωστόσο, η μετάδοση πέφτει δραστικά και παρατηρείται φαινόμενο σκίασης. Σε αυτή τη συχνότητα, το τοίχωμα SRR είναι αδιαφανές, λόγω της αρνητικής διαπερατότητας που διεγείρεται στο μέσο. Ο τοίχος γίνεται πάλι διαφανής στα 105 GHz, αν και η μεταδιδόμενη ισχύς είναι μικρότερη από 0 dB.
- Σε αντίθεση με το τοίχωμα SRR, η δομή λεπτού σύρματος είναι αδιαφανής και στις τέσσερις συχνότητες ως αποτέλεσμα της αρνητικής δεκτικότητας που προκαλείται στο μέσο. Αυτό επιτυγχάνεται με τη σωστή ευθυγράμμιση των λεπτών συρμάτων. Αν και υπάρχουν ορισμένες παραλλαγές, η μετάδοση ισχύος είναι γενικά μικρότερη από 10 dB στα αριστερά του τοίχου.
- Η δομή CMM που κατασκευάζεται με συνδυασμό των SRR και των τοιχωμάτων των λεπτών συρμάτων είναι αδιαφανής στα 90 GHz και στα 95 GHz. Σε αυτές τις συχνότητες, η ιδιότητα μετάδοσης της CMM κυριαρχείται από την αρνητική δεκτικότητα που υπαγορεύεται από τα λεπτά σύρματα. Στα 100 GHz, ωστόσο, η δομή γίνεται διαφανής. Αυτή η ασυνήθιστη συμπεριφορά του CMM είναι αποτέλεσμα διπλής αρνητικότητας, δεδομένου ότι οι SRRs

αντηχούν στα 100 GHz, και η διαπερατότητα και η δεκτικότητα του μέσου είναι αρνητικές σε αυτή τη συχνότητα. Στη συνέχεια, ο τοίχος CMM είναι διαφανής ακόμα κι αν τα στοιχεία του, δηλαδή τα SRR και τα λεπτά τοιχώματα, είναι αδιαφανή. Ο διαφάνεια της σύνθετης δομής μειώνεται στα 105 GHz.



Σχήμα 4.9 Μεταδόσεις ισχύος (σε κλίμακα dB) για τοίχους SRR [Σχήμα 4.8 (α)], λεπτού σύρματος και CMM [Σχήμα 4.8 (b)].

Τέλος, το Σχήμα 4.10 παρουσιάζει τα αποτελέσματα μετάδοσης για ένα μεγάλο τοίχωμα SRR που περιλαμβάνει $51 \times 29 \times 20$ SRRs. Το πρόβλημα σκέδασης είναι διακριτοποιημένο με 2.425.560 αγνώστους και επιλύθηκε χρησιμοποιώντας MLFMA παραλληλισμένο σε 64 διαδικασίες. Τα σχήματα 8 (a) και 8 (b) παρουσιάζουν τη μετάδοση ισχύος στα επίπεδα $y = 0$ και $z = 0$, αντίστοιχα, όταν το τοίχωμα φωτίζεται από ένα Hertzian δίπολο στα 85 GHz, 100 GHz και 110 GHz. Η περιοχή που καταλαμβάνει ο τοίχος υποδεικνύεται με τα μαύρα πλαίσια στα διαγράμματα. Τα SRRs είναι προσανατολισμένα κάθετα στην κατεύθυνση z , ενώ οι διαχωρίσεις είναι κατά μήκος της κατεύθυνσης y . Εκτός από ένα βαθύ υπό σκίαση αποτέλεσμα στα 100 GHz παρατηρούμε ότι η περιοχή χαμηλής μετάδοσης έχει διαφορετικά σχήματα στα δύο επίπεδα.



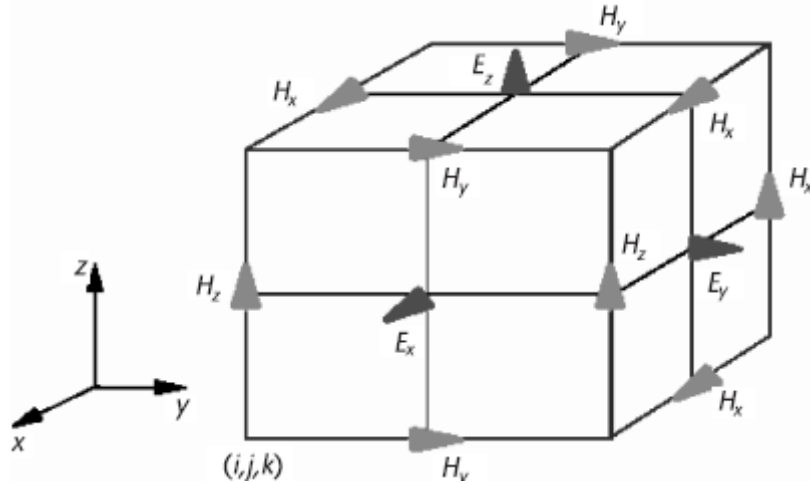
Σχήμα 4.10 Τα αποτελέσματα της μετάδοσης ισχύος (σε κλίμακα dB) ενός SRR για (α) $y = 0$ και (β) $z = 0$ επίπεδα.

4.3 Μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών στο Πεδίο του Χρόνου

Η Finite Difference Time Domain μέθοδος έχει αποδειχθεί ότι είναι μία από τις πιο αποτελεσματικές αριθμητικές μεθόδους στη μελέτη των μεταλλικών [16]. Ως άμεση λύση στις εξισώσεις του Maxwell, η FDTD προσφέρει έναν απλό τρόπο, έτσι ώστε να μοντελοποιήσει πολύπλοκες περιοδικές δομές. Η ίδρυση της καθορίστηκε από τον Yee το 1966 [17]. Ο Yee επέλεξε μια γεωμετρική σχέση για τη χωρική δειγματοληψία των διανυσματικών συνιστωσών των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων που επιτρέπουν να αντιπροσωπεύονται τόσο οι διαφορικές όσο και οι ολοκληρωμένες μορφές των εξισώσεων του Maxwell με έναν εύρωστο τρόπο. Ο αλγόριθμος FDTD, όπως προτείνεται από τον Yee στην αρχική του δημοσίευση, είναι ακριβής και σε δύο χρονικές στιγμές και στον χώρο. Επιπλέον, σε αυτόν τον αλγόριθμο, οι αριθμητικές επιδράσεις διασποράς μπορούν να διατηρηθούν μικρές, χρησιμοποιώντας ένα μέγεθος κυψελών το οποίο είναι επαρκώς μικρό σε σύγκριση με το μήκος κύματος, δηλαδή της τάξεως του $\lambda/20$ ή $\lambda/30$.

4.3.1 Το ορθογώνιο πλέγμα

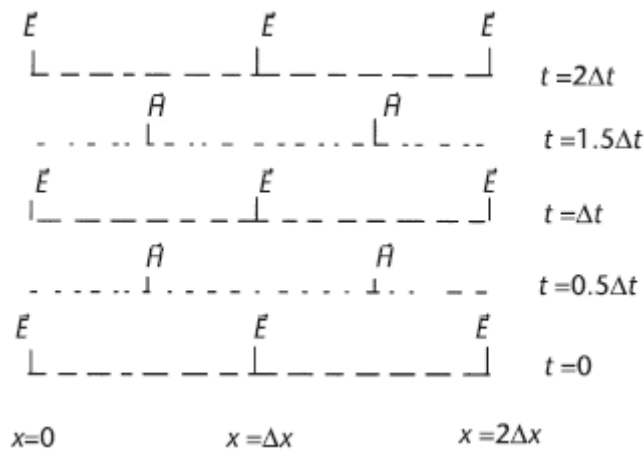
Ο αλγόριθμος του Yee τοποθετεί τις συνιστώσες του \vec{E} και \vec{H} στα κέντρα των γραμμών και επιφανειών του δικτύου έτσι ώστε κάθε στοιχείο \vec{E} να περιβάλλεται από τέσσερις συνιστώσες \vec{H} και αντιστρόφως. Αυτό παρέχει μια κομψή αλλά και απλή εικόνα του τρισδιάστατου χώρου, που γεμίζει από τις αλληλένδετες συστοιχίες του νόμου του Faraday και του περιγράμματος του νόμου του Ampere. Έτσι, είναι δυνατόν να εξακριβωθούν οι συνιστώσες \vec{E} που σχετίζονται με την ροή ρεύματος μετατόπισης που συνδέεται με τους βρόχους \vec{H} και αντίστοιχα οι \vec{H} συνιστώσες που συνδέονται με τη μαγνητική ροή συνδέονται με τους βρόχους \vec{E} , όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.11.



Σχήμα 4.11 Το ορθογώνιο πλέγμα του Yee.

4.3.2 Το σχέδιο Leapfrog

Ο αλγόριθμος του Yee χρησιμοποιεί την χρονική διαφοροποίηση για τις συνιστώσες των \vec{E} και \vec{H} και στη συνέχεια τις λύνει με τη χρήση ενός σχήματος μεταπήδησης όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.12. Όλα τα στοιχεία \vec{E} στον διαμορφωμένο χώρο υπολογίζονται και αποθηκεύονται στη μνήμη χρησιμοποιώντας τις προηγούμενες υπολογιζόμενες τιμές του και τα πρόσφατα ενημερωμένα δεδομένα πεδία του \vec{H} . Στο επόμενο βήμα, το \vec{H} επαναλαμβάνεται με βάση το προηγούμενο \vec{H} και το νεοεμφανιζόμενο \vec{E} . Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρις ότου τερματιστεί η βαθμίδα.



Σχήμα 4.12 Το σχήμα Leapfrog-το χρονικό σχήμα της FDTD μεθόδου.

Η αριθμητική σταθερότητα του αλγορίθμου απαιτεί να ορίσουμε ένα ανώτερο όριο στο βήμα χρόνου που καθορίζεται από τις χωρικές αυξήσεις Δx , Δy και Δz σύμφωνα με τη συνθήκη σταθερότητας Courant-Friedrich-Levy (CFL). Η επιβολή αυτού του άνω ορίου στο Δt εγγυάται τη σταθερότητα του αλγορίθμου, η οποία είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση της ισχύς της όταν εφαρμόζεται σε μεγάλη ποικιλία των προβλημάτων μοντελοποίησης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Ωστόσο, υπάρχουν εφαρμογές της προσομοίωσης FDTD που βρίσκει την σταθερότητα CFL πολύ περιοριστική.

Έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για να μειωθεί ή ακόμα και να αφαιρεθεί η σταθερότητα CFL. Ορισμένες πρώιμες εργασίες αφορούσαν εφαρμογή της εναλλασσόμενης κατεύθυνσης (ADI) [18], η οποία είναι άνευ όρων σταθερή. Στην πρώτη προσπάθεια της εφαρμογής της ADI στο FDTD, η οποία χρονολογείται από το 1984, ο τελεστής πεπερασμένων διαφορών συμπεριλήφθηκε σε τρεις έμμεσους χειρισμούς στις τρεις κατευθύνσεις των συντεταγμένων, δηλαδή τα x , y και z . Ωστόσο, ήταν δύσκολο να αποδειχθεί αριθμητική σταθερότητα αυτού του σχήματος εκείνη την εποχή. Το 1999, ένας 2-D FDTD αλγόριθμος που δεν περιορίστηκε από τη συνθήκη σταθερότητας Courant προτάθηκε για ένα 2D-TE κύμα και η μέθοδος ADI εμφανίστηκε και πάλι σε αυτόν τον αλγόριθμο. Η σύνθεση FDTD που προκύπτει βρέθηκε ότι είναι άνευ όρων σταθερή. Κατά συνέπεια, ήταν δυνατό να αφαιρεθεί ο περιορισμός CFL στον αλγόριθμο FDTD και η επιλογή του χρονικού βήματος εξαρτήθηκε μόνο από την επιθυμητή ακρίβεια.

4.3.3 Άλλα σχέδια αποκρυπτογράφησης χωροταξικού τομέα

Δεδομένου ότι η μέθοδος FDTD είναι αλγόριθμος που βασίζεται σε πλέγμα, η δημιουργία πλέγματος παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην εφαρμογή του. Ένα σωστά καθορισμένο πλέγμα βοηθά στη μείωση του αριθμητικού σφάλματος και αυξάνει την υπολογιστική απόδοση.

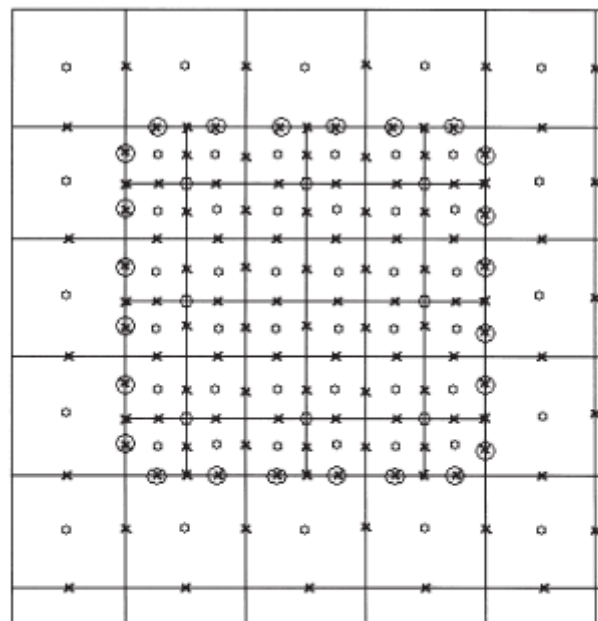
Ένα ορθογώνιο, ομοιόμορφο και καρτεσιανό σύστημα αντιστάθμισης είναι πιο απλό να υλοποιηθεί και χρησιμοποιείται πιο συχνά για τη μοντελοποίηση του FDTD, καθώς εισάγει ελάχιστα αριθμητικά σφάλματα [19]. Στο πλαίσιο αυτό έχουν αναπτυχθεί ποικίλα συστήματα παραγωγής πλέγματος του FDTD, και έχουν οδηγήσει σε πολλές

τροποποιήσεις του αρχικού Yee FDTD σχεδίου. Επιπρόσθετα, το *υπό-πλέγμα* (*subgridding*), η *μη ορθογώνια συστροφή* (*nonorthogonal meshing*) και η χρήση *υβριδικών πλεγμάτων* (*hybrid meshes*) έχουν χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως η έρευνα μεγάλων δομών με λεπτή λεπτομέρεια και η μοντελοποίηση αντικειμένων που αποτελούνται από καμπύλες ή λοξές επιφάνειες.

Subgridding Mesh

Για να εξασφαλιστεί αριθμητική ακρίβεια είναι απαραίτητο το μέγεθος κυψέλης (η χωρική αύξηση Δx) σε διακριτοποίηση FDTD, να είναι πολύ μικρότερο (συνήθως μικρότερο από $\lambda/10$) στην ενδιαφερόμενη περιοχή συχνοτήτων. Συνεπώς, η προσομοίωση ενός ηλεκτρικά μεγάλου αντικειμένου με τοπικά λεπτές δομές χρησιμοποιώντας συνολικά ένα λεπτό πλέγμα (μικρό Δx) και ένα μικρό Δt που κατέχει το μικρό μέγεθος κυψελών είναι υπολογιστικά δαπανηρό στη μοντελοποίηση FDTD.

Μία προσέγγιση του προβλήματος είναι να εισαχθεί ένα σύστημα πλέγματος *subgridding*. Η βασική ιδέα που ακολουθείται σε αυτό το σχήμα συνεπάγεται τη διαίρεση του υπολογιστικού όγκου σε υποπεριφέρειες και την προσομοίωση τους με μεταβλητά μεγέθη βημάτων. Ένα χοντρό πλέγμα χρησιμοποιείται σε μεγάλο όγκο και τα λεπτά πλέγματα εφαρμόζονται μόνο σε περιοχές που περιέχουν αντικείμενα με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ή κοντά σε ασυνέχειες. Για να ελαχιστοποιηθούν οι αριθμητικές ανακλάσεις από μια απότομη μετάβαση μεταξύ των πολύ χονδροειδών και των πολύ λεπτών περιοχών των πλεγμάτων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια ακολουθία *subgrids* στο μέγεθος των κυψελών με συντελεστή 2 ή 3 και μια σειρά υποσυνόλων.



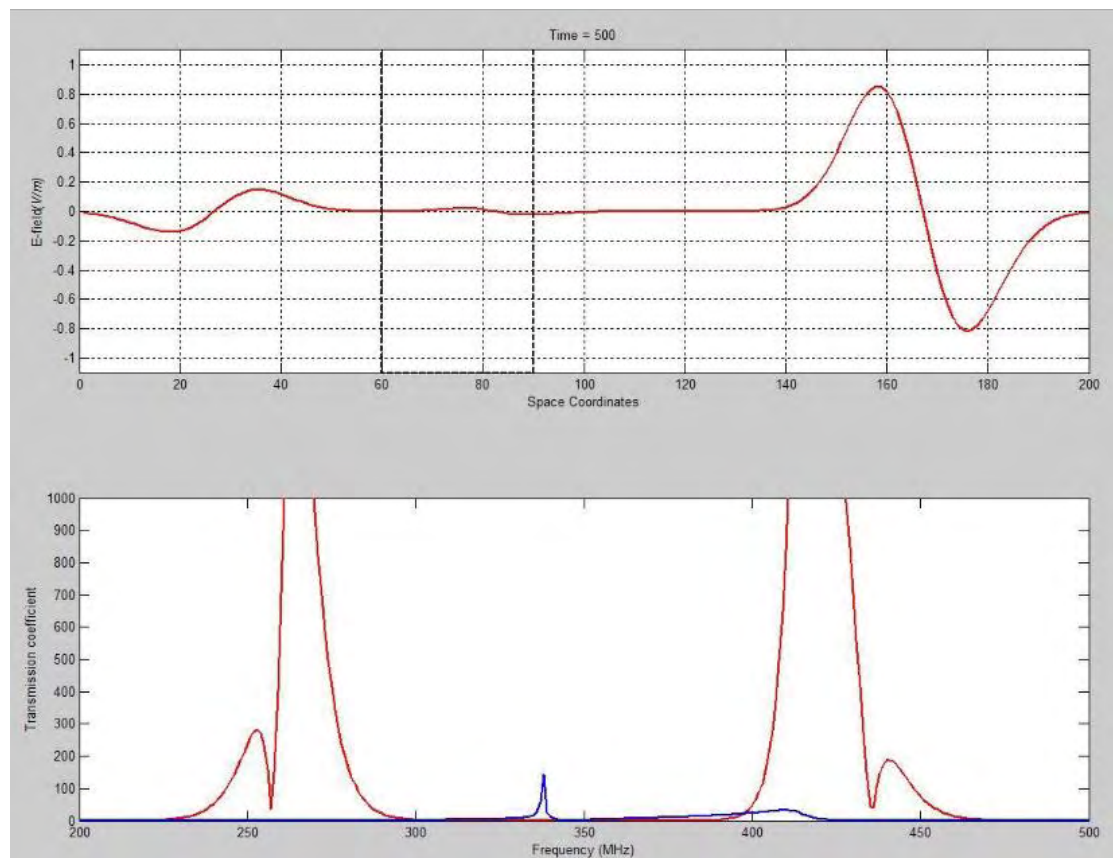
- x Electric field points
- o Magnetic field points
- ⊗ Electric field values obtained by spatial and time interpolations
- o Initial values for the magnetic field obtained by spatial and time average of the four neighbors

Σχήμα 4.13 Μια διατομή ενός υπολογιστικού τομέα.

Στο Σχήμα 4.13 εμφανίζονται οι θέσεις στις οποίες υπολογίζονται οι ποσότητες πεδίου. Δεδομένου ότι η χωρική προσαύξηση στο λεπτό πλέγμα είναι μόνο το ήμισυ εκείνης του χονδροειδούς πλέγματος, η αύξηση του χρόνου για την περιοχή λεπτού πλέγματος ισούται με το ήμισυ εκείνης του χονδρού τομέα. Οι χρονικές προσαυξήσεις σε κάθε υποπεριοχή μπορούν είτε να επιλεγούν σύμφωνα με τη μικρότερη χωρική αύξηση είτε μπορούν να σχετίζονται με τις χωρικές αυξήσεις σε κάθε υποπεριοχή. Στο περίγραμμα χρησιμοποιείται μια παρεμβολή για τον υπολογισμό των εφαπτομενικών ηλεκτρικών πεδίων και των μαγνητικών πεδίων οριακής στρώσης στην περιοχή λεπτών πλεγμάτων. Για το FDTD subgridding, μπορούν να βρεθούν διάφορα συστήματα πλεγμάτων και παρεμβολής.

4.3.4 1D Προσομοίωση με τη μέθοδο FDTD

Στο Σχήμα 4.14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της 1D προσομοίωσης με τη μέθοδο FDTD [20]. Το πρώτο γράφημα δείχνει πώς συμπεριφέρεται το μεταλλικό στην απόκριση διαφορετικών χρονικών βημάτων και το δεύτερο γράφημα δείχνει την παράμετρο μετάδοσης του σε διαφορετική συχνότητα.



Σχήμα 4.14 1D Προσομοίωση.

Συμπεράσματα

Στη σημερινή εποχή, υπάρχουν δύο βασικές ερευνητικές κατευθύνσεις που είναι οι πιο ενεργές στον τομέα των μεταλλικών. Η μία κατεύθυνση της έρευνας είναι προσανατολισμένη στο να εκμεταλλευτεί τα μεταλλικά σε συμβατικά κυκλώματα μικροκυμάτων (π.χ. κυκλώματα και κεραίες). Με το σωστό συνδυασμό μικροκυματικών εξαρτημάτων και μεταλλικών, είναι δυνατό να υπερνικήσουμε πολλούς από τους βασικούς περιορισμούς των συμβατικών στοιχείων, ανοίγοντας την πόρτα για νέες επαναστατικές δομές με βελτιωμένες επιδόσεις. Και αυτό γιατί τα μεταλλικά δεν αντιπροσωπεύουν μια νέα τεχνολογία στη μικροκυματική περιοχή, αλλά ένα νέο τρόπο σκέψης πάνω στις υφιστάμενες τεχνολογίες. Τα περισσότερα από τα δείγματα μεταλλικών που κατασκευάστηκαν στην περιοχή των μικροκυμάτων, στην πραγματικότητα, βασίζονται στην καθιερωμένη τεχνολογία των τυπωμένων κυκλωμάτων.

Η άλλη γραμμή έρευνας είναι αφιερωμένη στο να φέρει τις νέες δυνατότητες που ανακαλύφθηκαν στις συχνότητες μικροκυμάτων πίσω στην οπτική. Σε αυτό το πλαίσιο, νέα ώθηση δόθηκε από τη νανοτεχνολογία και την διαθέσιμη και σχετικά εύκολη κατασκευή νανοδομών. Ανεξάρτητα από τη ζώνη συχνοτήτων της εκάστοτε εφαρμογής, μπορούμε να θεωρούμε ένα μεταλλικό ως ένα ενεργό τεχνητό υλικό που αποτελείται από μια σωστή χωρική τοποθέτηση των εμφυτευμένων δομών μέσα σε ένα υλικό. Η σύνθεση, ευθυγράμμιση, πυκνότητα και το σχήμα/γεωμετρία των δομών αυτών, καθώς και οι καταστατικές παράμετροι του υλικού καθορίζουν την μακροσκοπική σύνθεση του μεταλλικού. Με τέτοιους βαθμούς ελευθερίας είναι υλοποιήσιμος ο σχεδιασμός ενός τεχνητού υλικού που να κατέχει τις επιθυμητές ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες.

Βιβλιογραφία

- [1] D.J.Griffiths, “Εισαγωγή στην Ηλεκτροδυναμική”, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 2007.
- [2] Μ.Καμπιτάκης, “Ανάλυση και σχεδίαση μικροκυματικών μεταλλικών μέσων”, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2011.
- [3] V.Veselago, “The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ”, *Sov. Phys.*, vol. 10, Feb. 1968, pp. 509-514.
- [4] R.Shelby, D.Smith, S.Schultz, “Experimental verification of a negative index of refraction”, *Science*, vol. 292, pp. 77-79, April 2001.
- [5] A.Houck, J.Brock and I.Chuang, “Experimental observations of a left-handed material that obeys Snell’s Law”, *Phys. Rev. Lett.*, vol.90, April 2003.
- [6] C.Simovski, P.Belov, H.Sailing, “Backward wave region and negative material parameters of a structure formed by lattices of wires and split-ring resonators”, *IEEE Trans. Antennas & Prop.*, vol. 51, pp. 2582-2591, 2003.
- [7] E.Ozbay, K.Aydin, E.Cubukcu and M.Bayindir, “Transmission and reflection properties of composite double negative metamaterials in free space”, *IEEE Trans. Antennas & Prop.*, vol. 51, pp. 2592-2595, 2003.
- [8] R.Ziolkowski and A.Kipple, “Application of double negative materials to increase the power radiated by electrically small antennas”, *IEEE Trans. Antennas & Prop.*, vol. 51, pp. 2626-2640, 2003.
- [9] J.Pendry, A.Holden, W.Stewart and I.Youngs, “Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 76, pp. 4773-4776, June 1996.
- [10] J.Pendry, A.Holden, D.Robbins and W.Stewart, “Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena”, *IEEE Trans. MTT*, vol. 47, pp. 2075-2084, 1999.
- [11] J.Fischer, M.Thiel and M.Wegener, “How to Make a Better Invisibility Cloak- With Lasers”, *IEEE Spectrum*, Jan. 2014
- [12] P.Alitalo, S.Tretyakov, “Electromagnetic cloaking with metamaterials”, *Materials today*, vol. 3, Mar. 2009, pp. 22-29
- [13] G.V.Eleftheriades, “EM transmission metamaterials”, University of Toronto, Mar. 2009, pp 30-41
- [14] F.Olyslager, L.Meert, K.Cools, “The fast multipole method in electromagnetics applied to the simulation of metamaterials”, *Journal of Computational and Applied Math.*, Oct. 2005
- [15] L.Gurel, O.Ergul, A.Unal and T.Malas, “Fast and accurate analysis of large metamaterial structures using the Multilevel Fast Multipole Algorithm”, *Computational Electromagnetics Res. Center*, 2009
- [16] A.Taflove and S.C.Hagness, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, 2nd ed., Norwood, MA: Artech House, 2000
- [17] K.S.Yee, “Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell’s equations in isotropic media”, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-14, No. 3, 302--307, 1966.
- [18] F.Zheng, Z.Chen, and J.Zhang, “Toward the development of a three-dimensional unconditionally stable finite-difference time-domain method”, *IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques*, Vol. 48, No. 9, 1550--1558, 2000.
- [19] J.F.Thompson, Z.U.A. Ward, and C.W. Mastin, *Numerical Grid Generation: Foundations and Applications*, New York: Elsevier North-Holland, Inc., 1985.

[20] Metamaterial 1D simulation using FDTD method:
https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/35530-metamaterial-1d-simulation-using-fdtd-method?s_tid=gn_loc_drop