



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΩΝ ΥΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΝΟΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΟΠΤΙΚΗΣ & ΟΠΤΟΜΕΤΡΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΟΠΤΙΚΗ ΣΕ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΑΡΝΗΤΙΚΟ ΔΕΙΚΤΗ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ

Σπουδάστριες:

ΤΣΟΜΠΟΛΗ ΜΑΡΙΝΑ

ΣΚΑΠΕΤΗ ΝΙΚΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: κ. ΘΑΝΟΠΟΥΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΑΙΓΙΟ- 2015

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία 10 χρόνια το αντικείμενο των μεταυλικών αντιμετωπίσθηκε 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 μεταυλικά, κερδίζουν το ενδιαφέρον των επιστημόνων, εξαιτίας της δυνατότητάς τους να κατασκευαστούν σύμφωνα με τις απαιτήσεις χρήσης τους, τόσο σε συχνотικό εύρος όσο και σε επιθυμητά χαρακτηριστικά. Στην παρούσα εργασία θα μελετήσουμε δύο διατάξεις μεταυλικών στις οπτικές συχνότητες και συγκεκριμένα την δυνατότητα τους να εμφανίσουν αρνητικές τιμές του δείκτη διάθλασης σε ένα ορισμένο εύρος συχνοτήτων.

Αναλυτικά, στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια σύντομη αναφορά στην φυσική οπτική και στους κλάδους στους οποίους διαχωρίζεται. Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο 2, αναφέρουμε τους νόμους ανάκλασης και διάθλασης καθώς επίσης και την πορεία μιας ακτίνας σε υλικά με θετικό δείκτη διάθλασης, όπου στο κεφάλαιο 3, βλέπουμε ότι καταρίπτονται αυτοί οι νόμοι όταν πλέον μιλάμε για την διάθλαση σε υλικά με αρνητικό δείκτη διάθλασης. Βλέπουμε πως είναι το πρώτο μεταυλικό και σχολιάζουμε πως γίνεται να έχουμε αρνητικό δείκτη διάθλασης σε ένα υλικό. Ακολουθεί το κεφάλαιο 4, στο οποίο περιγράφεται η κατασκευή των μεταυλικών και οι κατηγορίες τους, ενώ οι εφαρμογές και οι τεχνικές αυτών των υλικών αναφέρονται στο κεφάλαιο 5. Η εργασία ολοκληρώνεται με το κεφάλαιο 6, με τα λογικά συμπεράσματα που προκύπτουν

ABSTRACT

During the last 10 years the scientific community has regarded the subject of metamaterials with great interest. The evolution of construction techniques, which served as the catalyst, has given the chance to implement structures that seemed impossible in the past. Metamaterials are gaining the scientists' interest because of their ability to be built according to their usage requirements regarding frequency range and desired characteristics. The aim of this thesis is to study two metamaterial structures in the optical frequencies. In particular, we will study the metamaterial's ability to give negative values to the refractive index in a given frequency range. This is accomplished by manipulating the characteristics of the structures.

In more detail, in Chapter 1 we make a short mention of physical optics and its sub-categories. In Chapter 2 we talk about the reflection and refraction laws and the path of a light beam in a material with a positive refractive index. In Chapter 3 we observe how these laws do not apply when we talk about refraction in materials with a negative refractive index. We study the first metamaterial and talk about how it is possible to have a negative refractive index. In Chapter 4 we describe the construction of metamaterials and their categories, while the applications and techniques of those metamaterials are discussed in Chapter 5. The thesis is completed in Chapter 6 with the logical conclusions derived from all the other chapters.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η πτυχιακή αυτή εργασία αποτελεί το τελευταίο στάδιο των σπουδών μας στο τμήμα Οπτικής κι Οπτομετρίας. Κατά τη διάρκεια της φοίτησης μας, μας δόθηκε η δυνατότητα όχι μόνο να αποκτήσουμε τις απαραίτητες γνώσεις για την επαγγελματική μας καριέρα αλλά και η ευκαιρία να γνωρίσουμε πλήθος ανθρώπων οι οποίοι συνέβαλαν στη διαμόρφωση της προσωπικότητας μας. Στο σημείο αυτό θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον κύριο Ιωάννη Θανόπουλο τόσο για την καθοδήγησή του, κατά την επίβλεψη της πτυχιακής μας εργασίας, όσο και για την διδασκαλία των μαθημάτων του. Επιπλέον θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον κύριο Ανδρέα Ανδρικόπουλο αλλά και τις κυρίες Γεωργία Γεωργαντοπούλου και Δήμητρα Μακρυνιώτη για το ευρύ φάσμα γνώσεων που μας παρείχαν και τη συνδρομή τους στην μελλοντική μας σταδιοδρομία. Τέλος, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους γονείς μας και τους φίλους μας για την αμέριστη συμπαράσταση, κατανόηση και αρωγή που μας προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Αίγιο, Σεπτέμβριος 2015

Τσομπόλη Μαρίνα
Σκαπέτη Νίκη

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη Πρόλογος Περιεχόμενα Κατάλογος Εικόνων

Κεφάλαιο 1	1
Οπτική Φυσική	
1.1 Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 2	3
Νόμοι ανάκλασης και διάθλασης, πορεία ακτινοβολίας σε υλικά με θετικό δείκτη διάθλασης	
2.1 Ανάκλαση του φωτός.....	3
2.2 Διάθλαση του φωτός.....	5
2.2.1 Διάθλαση από πλακίδιο με παράλληλες έδρες.....	8
2.2.2 Διάθλαση στο νερό.....	8
2.2.3 Τοπρίσμα.....	9
2.3 Ηλεκτρομαγνητικό κύμα.....	10
2.3.1 Μηχανισμός παραγωγής.....	11
2.4 Φαινόμενο Ντόπλερ.....	12
2.4.1 Γενική μορφή του φαινομένου.....	13
2.5 Εξισώσεις Maxwell.....	14
2.5.1 Διατύπωση σε όρους μαγνητικών φορτίων.....	14
2.5.2 Διατύπωση σε όρους των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων.....	15
2.5.3 Ο νόμος του Gauss.....	16
2.5.4 Ο νόμος του Gauss για τον μαγνητισμό.....	16
2.5.5 Ο νόμος του Faraday.....	17
2.5.6 Ο νόμος του Ampere με την προσθήκη του Maxwell.....	17
2.5.7 Διάνυσμα Poynting.....	17
Κεφάλαιο 3	19
Αρνητικός δείκτης διάθλασης και πρώτο μεταύλικό	
3.1 Ιστορική αναδρομή.....	19
3.2 Δείκτης διάθλασης.....	20
3.2.1 Αρνητικός δείκτης διάθλασης.....	23
3.2.3 Η προέλευση του δείκτη διάθλασης.....	23
3.3 Το πρώτο μεταύλικό.....	25
3.4 Αντιστροφή του νόμου Snell.....	29

3.5 Αντιστροφή του φαινομένου Ντόπλερ.....	31
3.6 Κυματική εξίσωση και οριακές συνθήκες.....	32
Κεφάλαιο 4.....	34
Κατασκευή και Κατηγοριοποίηση μεταυλικών	
4.1 Τα αριστερόστροφα υλικά έχουν αρνητικό δείκτη διάθλασης.....	34
4.2 Στοιχεία κατασκευής.....	35
4.3 Κατηγορίες μεταυλικών.....	36
4.3.1 Ηλεκτρομαγνητικά υλικά.....	36
i) Διπλά αρνητικά μεταυλικά.....	38
ii) Μονά αρνητικά μεταυλικά.....	39
iii) Μεταυλικά αρνητικού διακένου ζώνης.....	40
4.3.2 Δισισοτροπικά και δισανισοτροπικά μεταυλικά.....	43
4.3.3 Αριστερόστροφα υλικά split-ring-αντηχείου/καλωδίου.....	43
Κεφάλαιο 5.....	46
Εφαρμογές και Τεχνικές μεταυλικών	
5.1 Εφαρμογές και Οπτική	46
5.1.1 “Εξωτικά” Υλικά.....	46
5.1.2 “Αόρατος”μανδύας.....	47
5.1.3 Τέλειος φακός.....	49
5.2 Άλλες εφαρμογές.....	51
5.2.1 Μικροκυματικά φίλτρα και κεραίες μεταυλικών.....	51
5.2.2 Τέλεια οδήγηση ρυθμών μέσω κυματοδηγών.....	51
5.2.3 Κατασκευή επίπεδων φακών.....	52
5.2.4 Κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μικρότερου μεγέθους.....	52
5.2.5 Αύξηση της χωρητικότητας των οπτικών ινών.....	52
5.2.6 Μαγνητική τομογραφία.....	53
5.2.7 Κατασκευή μικρότερων κεραιών.....	53
5.3 Τεχνικές μεταυλικών.....	53
Κεφάλαιο 6.....	60
Συμπεράσματα	
6.1 Κριτική μεταυλικών.....	60
Βιβλιογραφία.....	61

Κατάλογος εικόνων

2.1 Ανάκλαση του ουρανού και των δέντρων στην επιφάνεια του νερού.....	4
2.2 Ανάκλαση του φωτός.....	4
2.3 Διάθλαση του φωτός.....	7
2.4 Διάθλαση του φωτός με $n_1 < n_2$	8
2.5 Διάθλαση του φωτός με $n_1 > n_2$	8
2.6 Διάθλαση από πλακίδιο με παράλληλες έδρες.....	8
2.7 Διάθλαση στο νερό.....	9
2.8 Ανάκλαση-Διάθλαση σε πρίσμα.....	9
2.9 Γωνία εκτροπής.....	10
2.10 Γωνία ελάχιστης εκτροπής.....	10
2.11 Στιγμιότυπο επιπέδου ηλεκτρομαγνητικού κύματος, διαδιδόμενου κατά την διεύθυνση του άξονα x. Οι γραμμές του $B \sim$ είναι παράλληλες προς τον άξονα y και οι γραμμές του $E \sim$ είναι παράλληλες προς τον άξονα z	12
3.1 Κατηγορίες υλικών με βάση το πρόσημο των ηλεκτρομαγνητικών παραμέτρων.....	20
3.2 Φως περνά μέσα από πλακίδιο με αρνητικό δείκτη διάθλασης.....	25
3.3 Μεταδιδόμενη ισχύ για κάθε θεωρούμενο υλικό.....	28
3.4 (α)Διάθλαση σε υλικό με $\epsilon > 0$ και $\mu > 0$, (β)Διάθλαση σε υλικό με $\epsilon < 0$ και $\mu < 0$	30
3.5 (c)κόκκινο βέλος~αρνητική διάθλαση και πράσινο βέλος~θετική διάθλασης, (d)Διάθλαση σε υλικά με αρνητικό δείκτη διάθλασης.....	30
3.6 Το φαινόμενο της θετικής(αριστερό) και αρνητικής(δεξιό) διάθλασης.....	31
3.7 Φαινόμενο Doppler (α) σε σύνηθες υλικό μέσο ($\Delta\omega > 0$) (β) σε μεταυλικό ($\Delta\omega < 0$).....	31
4.1 Διάδοση κυμάτων σε ένα υλικό του οποίου η διηλεκτρική σταθερά και η διαπερατότητα υποτίθεται ότι είναι ταυτόχρονα αρνητικές	38
4.2 Μεταυλικά ηλεκτρομαγνητικού διακένου ζώνης.....	40
4.3 Φωτονικοί κρύσταλλοι.....	41
4.4 Μεταυλικό ηλεκτρομαγνητικού διακένου ζώνης.....	42
4.5 Σύνθεση αρνητικής επιτρεπτότητας και split-ring αντιχεία με χρήση μιας σειράς από ταινίες καλωδίων.....	44
5.1 Απεικόνιση εφαρμογής του αόρατου μανδύα για μικροκυματικές συχνότητες.....	49
5.2 Ο τέλειος φακός του Pendry για πλάκα με δείκτη διάθλασης -1.....	50
5.3 Tunneling με DNG υλικά σε ορθογωνικό κυματοδηγό.....	52
5.4 Αρχή ακύρωσης σκέδασης.....	53
5.5 Συσκευή ακύρωσης σκέδασης.....	55
5.6 Κυλινδρικός μανδύας μελετημένος αριθμητικά.....	59

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Φυσική οπτική

1.1 Εισαγωγή

Η Φυσική Οπτική μελετά τη συμπεριφορά και τις ιδιότητες του φωτός, καθώς επίσης και τα φαινόμενα που έχουν να κάνουν με την αλληλεπίδραση του φωτός με την ύλη. Η οπτική, συνήθως, περιγράφει την συμπεριφορά του ορατού, του υπέρυθρου και του υπεριώδους φωτός. Παρόλα αυτά, το φως εμφανίζεται και σε ανάλογα φαινόμενα όπως οι ακτίνες Χ, τα μικροκύματα, τα ραδιοκύματα, όπως και άλλες μορφές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Γι' αυτό η οπτική μπορεί να θεωρηθεί και ως ένα τμήμα του ηλεκτρομαγνητισμού, ενώ τα περισσότερα οπτικά φαινόμενα μπορούν να περιγραφούν από τις εξισώσεις του Maxwell για τον ηλεκτρομαγνητισμό.

Επειδή, όμως, η ορατή αντίληψη του χώρου και της ύλης γίνεται με φακούς που βρίσκονται στα όργανα της όρασης, τους οφθαλμούς, κύριο αντικείμενο μελέτης της οπτικής είναι τα οπτικά μέσα (κάτοπτρο, φακός, οπτική ίνα κλπ) καθώς και τα όργανα (κάμερα, μικροσκόπιο, τηλεσκόπιο, περισκόπιο κλπ).

Ανάλογα με το μοντέλο που υιοθετείται για τη φύση του φωτός, μπορούμε να διαχωρίζουμε τον κλάδο της Οπτικής στους παρακάτω τομείς:

- Η **Γεωμετρική Οπτική** ασχολείται, κατά κύριο λόγο, με την περιγραφή των περισσότερων φαινομένων που έχουν σχέση με το φως και με τις ποσοτικές σχέσεις αυτών, χωρίς να υπεισέρχεται στην ερμηνεία της φύσεως αυτών των φαινομένων. Δηλαδή θεωρεί το φως ως ένα σύνολο από φωτεινές ακτίνες που διαδίδονται σύμφωνα με την αρχή του ελαχίστου χρόνου, όπως την διατύπωσε το 1650 ο Γάλλος μαθηματικός Πιέρ Ντε Φερμά. Σύμφωνα με αυτή την αρχή, όταν το φως διαδίδεται από ένα σημείο του χώρου σε ένα άλλο, ακολουθεί τη διαδρομή για την οποία απαιτείται ο ελάχιστος χρόνος. Συνέπεια της παραπάνω αρχής αποτελεί η διαπίστωση ότι μέσα σε κάθε ομοιογενές υλικό το φως ακολουθεί ευθύγραμμη πορεία διάδοσης, μια παρατήρηση που πρώτος ο Ήρων είχε διατυπώσει στην αρχαιότητα. Φαινόμενα που ερμηνεύονται στα πλαίσια της Γεωμετρικής Οπτικής είναι η ανάκλαση και η διάθλαση του φωτός.
- Η **Κυματική Οπτική**, στον αντίποδα, ασχολείται με την φύση των φαινομένων που έχουν σχέση με το φως διαπραγματευόμενη τούτο ως κύμα. Αποδίδει, δηλαδή, στο φως χαρακτηριστικά κύματος, όπως η συχνότητα και το μήκος κύματος. Φαινόμενα που ερμηνεύονται στα πλαίσια της Κυματικής Οπτικής είναι η συμβολή, η πόλωση και η περίθλαση του φωτός.

Ως κύμα θεωρείται και από τον Ηλεκτρομαγνητισμό το φως, θεωρώντας το ως ένα είδος ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Κάτω από αυτό το πρίσμα, πολλοί συγκαταλέγουν την Οπτική στα υπο-πεδία του Ηλεκτρομαγνητισμού.

- Η **Κβαντική οπτική** είναι η εφαρμογή της Κβαντομηχανικής θεωρίας συγκεκριμένα στα φαινόμενα που σχετίζονται με το φως και την αλληλεπίδρασή του με την ύλη. Σύμφωνα με αυτή τη θεωρία, το φως αποτελείται από σωματίδια, γνωστά και ως κβάντα φωτός ή φωτόνια. Στα πλαίσια της κβαντικής οπτικής ερμηνεύεται και το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, η εκπομπή δηλαδή ηλεκτρονίων από την επιφάνεια μετάλλων όταν σε αυτά προσπίπτει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.
- Η **Φυσιολογική οπτική**, τέλος, ασχολείται κυρίως με τη λειτουργία του οφθαλμού και τις κυριότερες βλάβες του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Νόμοι ανάκλασης και διάθλασης, πορεία ακτινοβολίας σε υλικά με θετικό δείκτη διάθλασης

2.1 Ανάκλαση του φωτός

Ανάκλαση ονομάζεται το φαινόμενο της αλλαγής διεύθυνσης διάδοσης ενός μετώπου κύματος, μέσα στο ίδιο μέσο, από μια διαχωριστική επιφάνεια. Τα πιο συνηθισμένα παραδείγματα ανάκλασης είναι αυτά των κυμάτων φωτός, ήχου και νερού, καθώς επίσης και των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Ορισμοί:

Ανακλαστική επιφάνεια ή κάτοπτρο: η επιφάνεια που συμβαίνει το φαινόμενο της ανάκλασης

Προσπίπτουσα ακτίνα: η φωτεινή ακτίνα που κατευθύνεται από τη φωτεινή πηγή προς το κάτοπτρο.

Ανακλώμενη ακτίνα: η φωτεινή ακτίνα που ξεκινάει από το κάτοπτρο, και φθάνει στον παρατηρητή.

Επίπεδο ανάκλασης: το επίπεδο που ορίζεται από την προσπίπτουσα και ανακλώμενη ακτίνα.

Σημείο πρόσπτωσης: το σημείο του κατόπτρου όπου προσπίπτει η ακτίνα και στη συνέχεια ανακλάται. Το σημείο πρόσπτωσης είναι ταυτόχρονα και σημείο ανάκλασης.

Γωνία πρόσπτωσης: η γωνία που σχηματίζεται από την προσπίπτουσα ακτίνα με την κάθετο του σημείου πρόσπτωσης, από την οποία και μετράται.

Γωνία ανάκλασης: η γωνία που σχηματίζεται από την ανακλώμενη ακτίνα με την κάθετο του σημείου πρόσπτωσης, από την οποία και μετράται.

Νόμοι ανάκλασης:

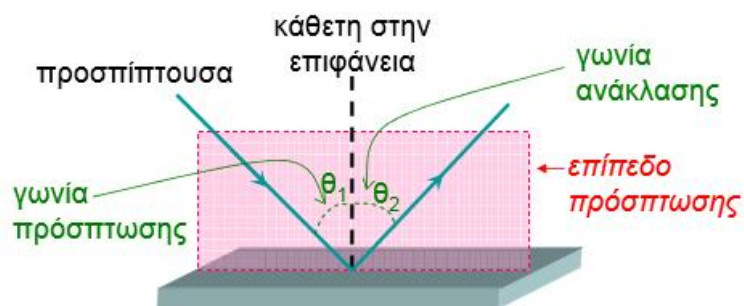
1. Η προσπίπτουσα, η ανακλώμενη ακτίνα και η κάθετη ευθεία επάνω στον καθρέφτη βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο.
2. Η γωνία της προσπίπτουσας είναι ίση με τη γωνία της ανάκλασης.

Συνέπεια του δεύτερου νόμου είναι ότι αν η προσπίπτουσα ακτίνα είναι κάθετη στην ανακλώμενη επιφάνεια (γωνία = 0°), τότε η ανακλώμενη (επίσης γωνία = 0°) θα ταυτίζεται με την προσπίπτουσα.

Στην παρακάτω φωτογραφία (εικόνα 2.1) φαίνεται έντονα ένα παράδειγμα της ανάκλασης:



Εικόνα 2.1: Ανάκλαση του ουρανού και των δέντρων στην επιφάνεια του νερού [26]



Νόμοι της ανάκλασης

A. Η προσπίπτουσα, η ανακλώμενη και η κάθετη στο σημείο πρόσπτωσης είναι συνεπίπεδες και βρίσκονται πάνω στο επίπεδο πρόσπτωσης.

B. Η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης : $\theta_1 = \theta_2$

Εικόνα 2.2: Ανάκλαση του φωτός [27]

2.2 Διάθλαση του φωτός

Διάθλαση ονομάζεται το φυσικό φαινόμενο της εκτροπής της ευθύγραμμης τροχιάς διάδοσης που υφίστανται φωτεινά ή άλλα κύματα όταν διέρχονται από ένα διαπερατό από αυτά μέσον σε έτερο.

Διάθλαση φωτός χαρακτηρίζεται κάθε οπτικό φαινόμενο της εκτροπής της διεύθυνσης των φωτεινών ακτίνων κατά τη μετάβασή τους από ένα διαπερατό μέσο διάδοσης με δείκτη διάθλασης n_1 σε άλλο μέσο διάδοσης με δείκτη διάθλασης $n_1 \neq n_2$. Η διαχωριστική επιφάνεια των δύο μέσων ονομάζεται δίοπτρο.

Το φαινόμενο αυτό, που οφείλεται στη διαφορετική ταχύτητα διάδοσης του φωτεινού κύματος και που εξαρτάται από το διαπερατό μέσο στο οποίο διαδίδεται το κύμα εξετάζει η Κυματική Οπτική.

Η σχέση που συνδέει τη γωνία πρόσπτωσης με τη γωνία διάθλασης, ως προς την κάθετο στη διαχωριστική επιφάνεια, είναι γνωστή ως "Νόμο του Σνελ".

Για μικρές γωνίες θ είναι δυνατό να γίνει η προσέγγιση $\sin\theta \simeq \theta$. Από αυτή την προσέγγιση προκύπτουν και τα γεωμετρικά σφάλματα φακών.

Εκ των παραπάνω συνάγεται ότι στο κενό η πορεία των φωτεινών ακτίνων παραμένει αμετάβλητη, όταν δεν εκτρέπεται από βαρυτικά πεδία, όπως επίσης αμετάβλητη παραμένει κατά την διάδοσή τους μέσα σε ισόπυκνο διαπερατό μέσο π.χ. νερό, γυαλί κ.λπ.

Όταν φωτεινές ακτίνες διερχόμενες από ένα μέσον πέσουν κάθετα στην επιφάνεια του άλλου, τότε η γωνία πρόσπτωσης είναι μηδενική με αποτέλεσμα και η γωνία διάθλασης να είναι και αυτή μηδενική. Για παράδειγμα, ακτίνες φωτός από τον αέρα προσπίπτουσες κάθετα σε νερό συνεχίζουν στην ίδια διεύθυνση. Γεγονός που γνωρίζουν πολύ καλά οι γλάροι όταν εφορμούν κάθετα στη λεία τους.

Ορισμοί:

- Γωνία πρόσπτωσης χαρακτηρίζεται η σχηματιζόμενη γωνία από την διεύθυνση της ακτίνας με την κάθετο του σημείου πρόσπτωσής της.
- Γωνία διάθλασης χαρακτηρίζεται η σχηματιζόμενη γωνία από την διαθλώμενη ακτίνα με την ίδια κάθετο του σημείου εισόδου στο διαπερατό μέσο. Όταν ακτίνες φωτός κινούνται από αραιότερο μέσον σε πυκνότερο η γωνία διάθλασης είναι πάντα μικρότερη της προσπίπτουσας. Το αντίθετο συμβαίνει από πυκνότερο σε αραιότερο μέσο.
- Επίπεδο διάθλασης χαρακτηρίζεται το επίπεδο που ορίζεται από τη προσπίπτουσα και ανακλώμενη ακτίνα.
- Κανονική διάθλαση ονομάζεται η εκτροπή μιας ακτίνας όταν περνάει από ένα μέσο σε άλλο που χωρίζονται μεταξύ τους από μια λεία επιφάνεια.

- Δείκτης διάθλασης (index of refraction) χαρακτηρίζεται το μέτρο της εκτροπής (ή κάμψης) που υφίσταται μια ακτίνα διερχόμενη από ένα διαπερατό μέσον σε άλλο. Ορίζεται ως ο λόγος της ταχύτητας διάδοσης του φωτός "κενό" c προς την ταχύτητα διάδοσης στο υπό εξέταση διαπερατό μέσο u . Ισχύει δηλαδή:

$$n = \frac{c}{u}$$

Από τον παραπάνω ορισμό προκύπτει πως ο δείκτης διάθλασης του κενού ισούται με τη μονάδα. Έτσι, στην περίπτωση όπου έχουμε μετάδοση ακτινοβολίας από το κενό σε ένα οπτικό μέσο με δείκτη διάθλασης n , ο τελευταίος μπορεί να οριστεί συναρτήσει των γωνιών πρόσπτωσης και διάθλασης, θ_1 και θ_2 αντίστοιχα:

Κάθε διαπερατό σώμα (μέσον) έχει ξεχωριστό δείκτη διάθλασης που εξαρτάται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του. Στην ιδιότητα αυτή στηρίζονται πολλοί έλεγχοι τροφίμων, όπως του βουτύρου καθώς το αγνό βούτυρο έχει άλλο δείκτη από εκείνο του νοθευμένου, κάτι που συμβαίνει και με διάφορα λάδια και άλλα υγρά.

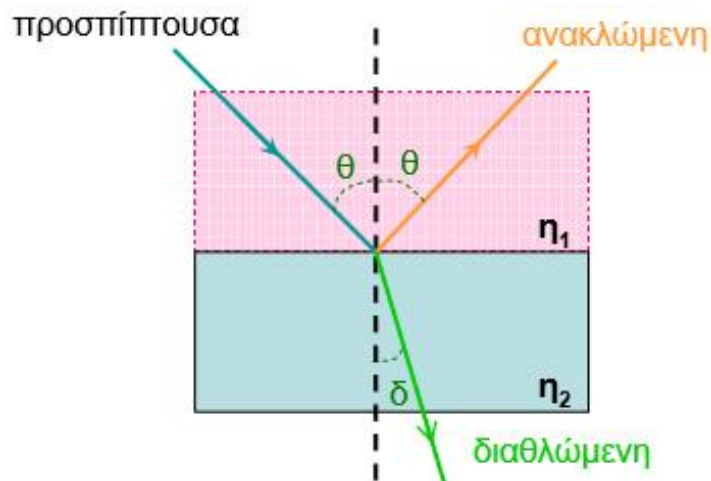
Νόμοι διάθλασης:

Από τα παραπάνω αναφερόμενα καταλήγουμε, σε απλούστερη και συνοπτική απόδοση, στους ακόλουθους νόμους:

1. Το επίπεδο διάθλασης είναι κάθετο στη διαθλαστική επιφάνεια. (εικόνα 2.3)
2. Το ημίτονο του ημίτονου της γωνίας πρόσπτωσης προς το ημίτονο της γωνίας διάθλασης είναι σταθερό για δύο ορισμένα οπτικά μέσα, όπου και υφίσταται η σχέση

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = c, \text{ όπου } c \text{ σταθερό.}$$

3. "Απόλυτος δείκτης διάθλασης" ορισμένου μέσου για συγκεκριμένη ακτινοβολία και θερμοκρασία είναι το ημίτονο των ταχυτήτων διάδοσης του φωτός ανάμεσα στα δύο σώματα που συμβαίνει η διάθλαση.

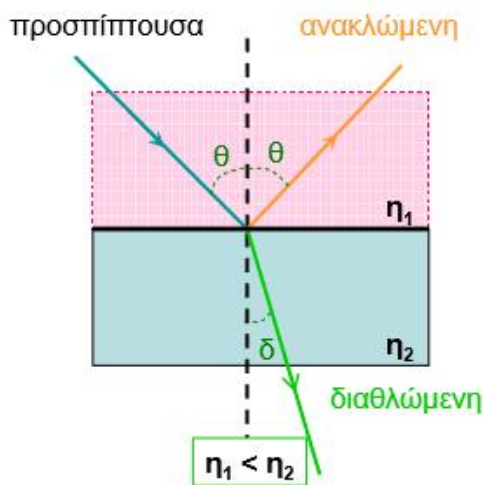


Εικόνα 2.3: Διάθλαση του φωτός [27]

- A) Η προσπίπτουσα, διαθλώμενη και η κάθετη στο σημείο πρόσπτωσης είναι συνεπίπεδες.
- B) Η γωνία διάθλασης εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης και από τους δείκτες διάθλασης των δύο μέσων σύμφωνα με το νόμο του Snell.

$$\eta_1 \sin \theta = \eta_2 \sin \delta$$

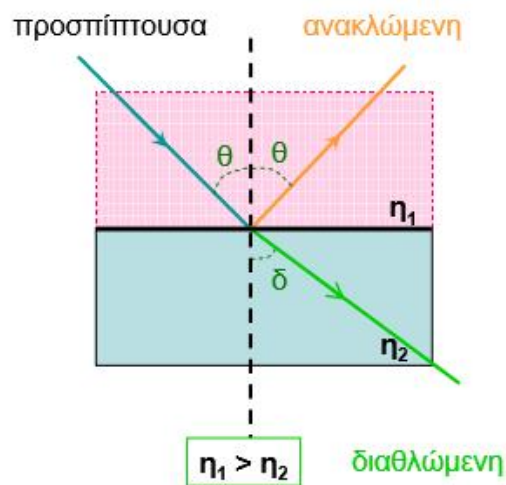
Στις παρακάτω εικόνες βλέπουμε πως γίνεται η διάθλαση όταν $n_1 < n_2$ (Εικόνα 2.4) κι όταν $n_1 > n_2$ αντίστοιχα. (Εικόνα 2.5)



διάδοση από οπτικώς αραιότερο μέσο σε οπτικώς πυκνότερο

$$\delta < \theta$$

Εικόνα 2.4: Διάθλαση του φωτός με $n_1 < n_2$ [27]



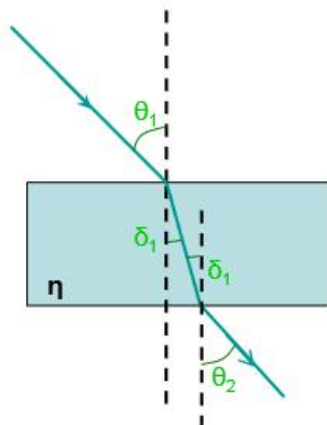
διάδοση από οπτικώς πυκνότερο μέσο σε οπτικώς αραιότερο

$$\delta > \theta$$

Εικόνα 2.5: Διάθλαση του φωτός με $n_1 > n_2$ [27]

2.2.1 Διάθλαση από πλακίδιο με παράλληλες έδρες

Παρατήρηση διάθλασης σε πλακίδιο με παράλληλες έδρες. (Εικόνα 2.6)



1^η διαχωριστική επιφάνεια

$$\eta_\alpha \sin \theta_1 = \eta \sin \delta_1 \Rightarrow \sin \theta_1 = \eta \sin \delta_1 \quad \text{1}$$

2^η διαχωριστική επιφάνεια

$$\eta \sin \delta_1 = \eta_\alpha \sin \theta_2 \Rightarrow \eta \sin \delta_1 = \sin \theta_2 \quad \text{2}$$

1 & 2

$$\sin \theta_1 = \sin \theta_2 \Rightarrow \theta_1 = \theta_2$$

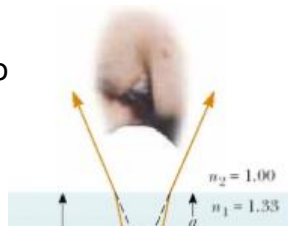
Εικόνα 2.6: Διάθλαση από πλακίδιο με παράλληλες έδρες [27]

→ Παράλληλη μετατόπιση

2.2.2 Διάθλαση στο νερό

Μελέτη διάθλασης του φωτός στο νερό (Εικόνα 2.7)

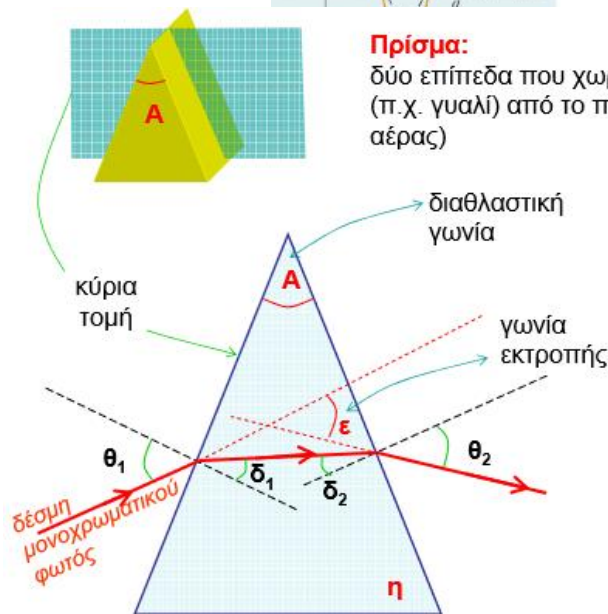
Εικόνα 2.7: Διάθλαση στο νερό [27]



$$\tan \delta = \frac{D}{q} \quad \text{1}$$

$$\tan \theta = \frac{D}{d} \quad \text{2}$$

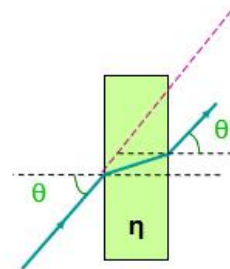
2.2.3 Το πρίσμα



Πρίσμα: δύο επίπεδα που χωρίζουν διαφανές μέσο (π.χ. γυαλί) από το περιβάλλον του (συνήθως αέρας)

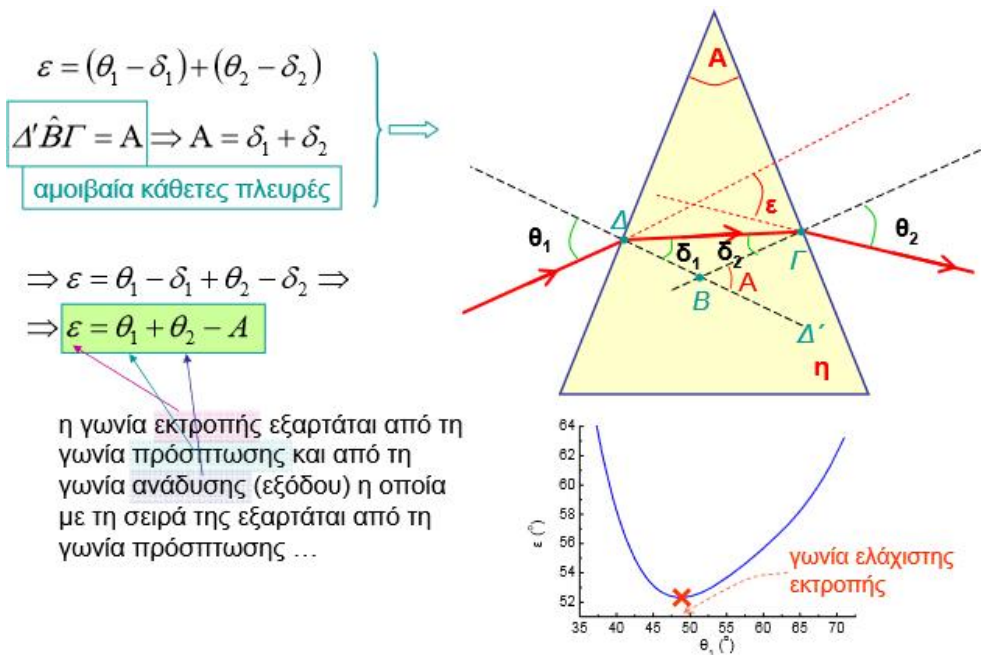
N. Snell: $\eta \sin \theta = \sin \delta$

$$\begin{aligned} \sin^2 \delta &\Rightarrow \frac{D^2}{q^2} \\ \cos^2 \theta & \\ \sin \theta &\Rightarrow q \frac{\sin \delta}{\cos \delta} = d \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \\ \Rightarrow q &= d \frac{\sqrt{1-\eta^2(1-\cos^2 \theta)}}{\eta \cos \theta} \\ &= d \frac{1}{\eta} = \frac{d}{1.33} \end{aligned}$$

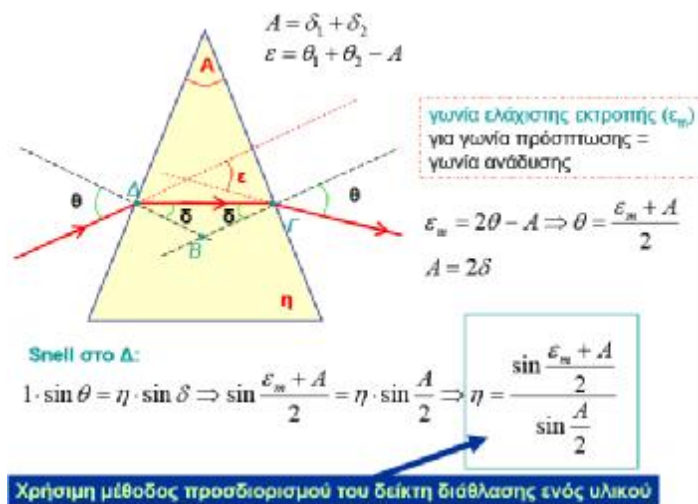


Εικόνα 2.8: Ανάκλαση-Διάθλαση σε πρίσμα [27]

Στην εικόνα 2.8 παρατηρούμε πως πραγματοποιείται η ανάκλαση και η διάθλαση του φωτός σε πρίσμα. Στην εικόνα 2.9 βλέπουμε πως προκύπτει μαθηματικά η γωνία εκτροπής, ενώ στην εικόνα 2.10 υπολογίζεται η γωνία ελάχιστης εκτροπής.



Εικόνα 2.9: Γωνία εκτροπής [27]



Εικόνα 2.10: Γωνία ελάχιστης εκτροπής [27]

2.3 Ηλεκτρομαγνητικό κύμα

Ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι η ταυτόχρονη διάδοση ενός ηλεκτρικού και ενός μαγνητικού πεδίου. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται στο κενό με την

ταχύτητα του φωτός. Σε όλα τα άλλα υλικά διαδίδονται με μικρότερη ταχύτητα. Η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος εξαρτάται από την φύση του μέσου διάδοσης. Για το κενό η ταχύτητα του είναι $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. [28]

2.3.1 Μηχανισμός παραγωγής

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα δημιουργούνται από μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία. Ένα σταθερό ηλεκτρικό πεδίο ή ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο δεν παράγει ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Αυτό σημαίνει ότι ούτε τα ακίνητα φορτία, ούτε τα φορτία που κινούνται με σταθερή ταχύτητα (σταθερά ρεύματα) είναι ικανά να δημιουργήσουν ηλεκτρομαγνητικό κύμα. [28]

Όταν έχουμε, όμως, ηλεκτρικά φορτία που επιταχύνονται, τα μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που δημιουργούν έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Συνεπώς, η αιτία δημιουργίας ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι η επιταχυνόμενη κίνηση των ηλεκτρικών φορτίων.

Μια από τις απλές συσκευές παραγωγής ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι το ταλαντούμενο ηλεκτρικό δίπολο. Το ταλαντούμενο ηλεκτρικό δίπολο είναι μια συσκευή που αποτελείται από δύο μεταλλικές ράβδους, οι οποίες συνδέονται με πηγή εναλλασσόμενης τάσης. Οι ράβδοι φορτίζονται εναλλάξ με θετικά και αρνητικά φορτία που μεταβάλλονται ημιτονοειδώς με τον χρόνο. Η κίνηση των φορτίων αυτή αποτελεί εναλλασσόμενο ρεύμα. Τα ταλαντούμενα ηλεκτρικά δίπολα αποτελούν κοινή μέθοδο παραγωγής ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στους ραδιοφωνικούς και τηλεοπτικούς σταθμούς. [28]

Από τις εξισώσεις του Maxwell για το Ηλεκτρικό και το Μαγνητικό πεδίο προκύπτει ότι:

- Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι εγκάρσιο, με τα διανύσματα του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου να είναι κάθετα μεταξύ τους και κάθετα στην διεύθυνση διάδοσης του κύματος.
- Κάθε στιγμή ο λόγος των μέτρων των εντάσεων του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου είναι ίσος με την ταχύτητα διάδοσης v (για το κενό c)

$$\frac{E}{B} = v$$

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, όπως και τα μηχανικά, υπακούουν στην αρχή της επαλληλίας.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο ενός αρμονικού ηλεκτρομαγνητικού κύματος που διαδίδεται κατά τη διεύθυνση x είναι :

$$E = E_{max} \eta \mu 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$
$$B = B_{max} \eta \mu 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

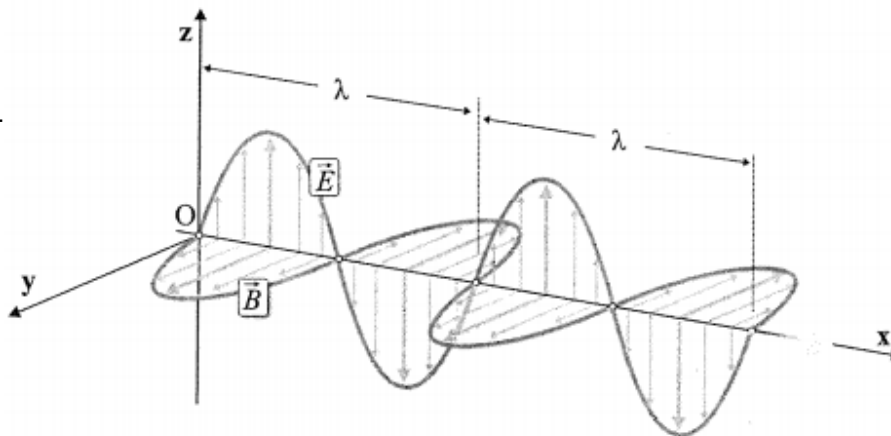
όπου E_{\max} , B_{\max} οι μέγιστες τιμές της έντασης του Ηλεκτρικού και Μαγνητικού πεδίου αντίστοιχα. [28]

Το στιγμιότυπο ενός τέτοιου αρμονικού κύματος φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 2.11):

Εικόνα

2.11:

Στιγμιότυπο υπο επιπέδου ηλεκτρομαγνητικού κύματος



ς,

διαδιδόμενου κατά την διεύθυνση του άξονα x . Οι γραμμές του B είναι παράλληλες προς τον άξονα y και οι γραμμές του E είναι παράλληλες προς τον άξονα z [28]

2.4 Φαινόμενο Ντόπλερ

Το **φαινόμενο Ντόπλερ** είναι η παρατηρούμενη αλλαγή στη συχνότητα και το μήκος κύματος ενός κύματος από παρατηρητή που βρίσκεται σε σχετική κίνηση με την πηγή των κυμάτων. Η ονομασία είναι προς τιμήν του αυστριακού φυσικού Κρίστιαν Ντόπλερ (*Christian Doppler*), που το πρότεινε το 1842. Το φαινόμενο παρατηρείται συχνά όταν πλησιάζει και απομακρύνεται ένα όχημα που έχει σειρήνα (πχ ασθενοφόρο) ή κάνει θόρυβο (πχ μηχανές). Πιο συγκεκριμένα η συχνότητα του ήχου αυξάνεται όταν πλησιάζει το όχημα τον παρατηρητή, ενώ μειώνεται όταν απομακρύνεται από αυτόν.

Για κύματα, όπως τα ηχητικά κύματα, που διαδίδονται μέσα σε κάποιο υλικό μέσο, η ταχύτητα τόσο του παρατηρητή όσο και της πηγής, πρέπει να προσδιορίζεται σε σχέση με το μέσο διάδοσης. Το τελικό φαινόμενο Ντόπλερ μπορεί, επομένως, να προκύψει από την κίνηση του παρατηρητή, από την κίνηση της πηγής και από την κίνηση του μέσου διάδοσης. Για κύματα που δεν χρειάζονται ένα υλικό μέσο για τη διάδοσή τους, όπως τα ηλεκτρομαγνητικά

(φως) ή τα βαρυτικά κύματα στην ειδική σχετικότητα, μόνο η σχετική ταχύτητα του παρατηρητή και της πηγής παίζει ρόλο.

2.4.1 Γενική μορφή του φαινομένου

Για κύματα που διαδίδονται μέσα σε ένα υλικό μέσο (ηχητικά, υπερηχητικά, κύματα πίεσης κλπ.), η σχέση μεταξύ παρατηρούμενης συχνότητας (ν') και εκπεμπόμενης (πραγματικής) συχνότητας (ν) δίνεται από τη σχέση:

$$\nu' = \left(\frac{v \pm v_o}{v \mp v_s} \right) \nu$$

όπου

v είναι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος (π.χ. 340 m/s για τον ήχο στον αέρα),

v_o είναι η ταχύτητα του παρατηρητή ως προς το μέσο διάδοσης, και

v_s είναι η ταχύτητα της πηγής (που εκπέμπει το κύμα) ως προς το μέσο διάδοσης.[13]

Τα πρόσημα στις ταχύτητες ακολουθούν την εξής σύμβαση: μια θετική ένδειξη σημαίνει κίνηση του παρατηρητή προς την πηγή, ενώ μια αρνητική σημαίνει απομάκρυνση από την πηγή. Για την ταχύτητα της πηγής ισχύει η αντίστροφη σύμβαση.

Ένας καλός μνημονικός κανόνας είναι: τόσο για τον παρατηρητή όσο και για την πηγή, το «πλησίασμα» έχει την τάση να αυξήσει τη συχνότητα, ενώ η «απομάκρυνση» την τάση να μειώσει τη συχνότητα, με τις φορές των κινήσεων να λαμβάνονται πάντοτε σε σχέση με το μέσο διάδοσης. Έχει σημασία ότι όταν για παράδειγμα η φορά της κίνησης του παρατηρητή είναι «προς» την πηγή, δεν σημαίνει απαραίτητα ότι την πλησιάζει - μπορεί η πηγή να απομακρύνεται με μεγαλύτερη ταχύτητα. Για την εύρεση όμως του σωστού πρόσημου, αρκεί να γνωρίζουμε την «τάση» της πηγής ή του παρατηρητή να πλησιάζουν ή να απομακρύνονται, ανεξάρτητα από το τελικό αποτέλεσμα. Η τελική τιμή της συχνότητας θα προκύψει από τη σχετική «δύναμη» του αριθμητή και του παρονομαστή στον παραπάνω τύπο, και μπορεί να είναι μικρότερη, μεγαλύτερη ή και ίση με την πραγματική συχνότητα, ανάλογα με τον παράγοντα που υπερισχύει.

Είναι σημαντικό, επίσης, ότι η συχνότητα του εκπεμπόμενου κύματος δεν αλλάζει. Αυτό που αλλάζει είναι η συχνότητα που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής, δηλαδή η συχνότητα με την οποία φτάνουν σ' αυτόν τα μέτωπα του κύματος. Ειδικότερα, στην περίπτωση που κινείται η πηγή ως προς το μέσο διάδοσης, αλλάζει και το μήκος κύματος (η απόσταση που «μετράει» ο παρατηρητής ανάμεσα σε δύο διαδοχικά μέτωπα κύματος), ενώ όταν η πηγή είναι ακίνητη το

μήκος κύματος δεν μεταβάλλεται.

2.5 Εξισώσεις Maxwell

Οι εξισώσεις του Maxwell είναι ένα σύνολο των μερικών διαφορικών εξισώσεων που, σε συνδυασμό με το νόμο της δύναμης Lorentz, αποτελούν τα θεμέλια της κλασικής ηλεκτρομαγνητικής, της κλασικής οπτικής, και των ηλεκτρικών κυλωμάτων. Τα πεδία αυτά με τη σειρά τους αποτελούν τη βάση των σύγχρονων ηλεκτρικών και των επικοινωνιακών τεχνολογιών. Οι εξισώσεις του Maxwell περιγράφουν πώς τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία δημιουργούνται και πώς αλληλεπιδρούν μεταξύ τους από τις γομώσεις και τα ρεύματα. Πήραν το όνομά τους από τον Σκωτσέζο φυσικό και μαθηματικό James Clerk Maxwell, ο οποίος δημοσίευσε μια πρώιμη μορφή των εξισώσεων αυτών μεταξύ 1861 και 1862. [10]

Οι εξισώσεις έχουν δύο σημαντικές παραλλαγές. Η "μικροσκοπική προσέγγιση" των εξισώσεων Maxwell χρησιμοποιεί ολικά φορτία και ρεύματα, συμπεριλαμβανομένων των περίπλοκων φορτίων και ρευμάτων των υλικών σε ατομική κλίμακα. Έχει καθολική εφαρμογή, αλλά συνήθως δεν είναι εφικτό να υπολογιστεί. Η «μακροσκοπική προσέγγιση» των εξισώσεων Maxwell ορίζει δύο νέα βοηθητικά πεδία που περιγράφουν μεγάλης κλίμακας συμπεριφορές χωρίς να χρειάζεται να εξεταστούν αυτά τα στοιχεία ατομικής κλίμακας, αλλά απαιτεί τη χρήση των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες των σχετικών υλικών.

Ο όρος "εξισώσεις του Μάξγουελ" χρησιμοποιείται συχνά για άλλες μορφές των εξισώσεων Maxwell. Για παράδειγμα, οι διατυπώσεις χρόνου χρησιμοποιούνται συνήθως σε υψηλή ενέργεια και στη βαρυτική Φυσική. Αυτές οι διατυπώσεις ορίζονται στον χωροχρόνο καλύτερα από ότι στον χώρο και στον χρόνο χωριστά, είναι συμβατές με την ειδική και την γενική σχετικότητα. Στην κβαντική μηχανική και αναλυτική μηχανική οι εκδόσεις των εξισώσεων Maxwell με βάση τα ηλεκτρόνια και μαγνητικά δυναμικά προτιμώνται.

Από τα μέσα του 20ου αιώνα, είναι ευρέως γνωστό ότι οι εξισώσεις του Maxwell δεν είναι ακριβείς νόμοι του σύμπαντος, αλλά είναι μια κλασική προσέγγιση με την πιο ακριβή και θεμελιώδη θεωρία της κβαντικής ηλεκτρομαγνητικής. Στις περισσότερες περιπτώσεις, όμως, η κβαντικές αποκλίσεις από τις εξισώσεις του Maxwell είναι αφάνταστα μικρές. Εξαιρέσεις συμβαίνουν όταν η σωματιδιακή φύση του φωτός είναι σημαντική ή για πολύ ισχυρά ηλεκτρικά πεδία. [10]

2.5.1 Διατύπωση σε όρους μαγνητικών φορτίων

Για να περιγράψουμε τον ηλεκτρομαγνητισμό σε αυτήν την διατύπωση, χρησιμοποιείται η ισχυρή γλώσσα του διανυσματικού λογισμικού.

Οι εξισώσεις εισάγουν το ηλεκτρικό πεδίο E , ένα διανυσματικό πεδίο και το μαγνητικό πεδίο B , ένα αξονικό πεδίο, όπου το καθένα έχει γενικά χρονική εξάρτηση. Οι πηγές αυτών των πεδίων είναι ηλεκτρικά πεδία και ηλεκτρικά ρεύματα, που μπορούν να εκφραστούν ως τοπικές πυκνότητες και συγκεκριμένα πυκνότητα πεδίου ρ και πυκνότητα ρεύματος J . Ένας ξεχωριστός νόμος της φύσης, ο νόμος της δύναμης Lorentz, περιγράφει πως το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο ενεργούν σε φορτισμένα σωματίδια και ρεύματα. Μια εκδοχή του νόμου αυτού είχε συμπεριληφθεί στις αρχικές εξισώσεις του Maxwell, αλλά κατά συνθήκη δεν ισχύει πλέον.

Στην ηλεκτρομαγνητική θεωρία οι εξισώσεις Μάξγουελ είναι μία τετράδα εξισώσεων που διατυπώθηκαν από τον Σκοτσέζο φυσικό και μαθηματικό Τζέιμς Κλαρκ Μάξγουελ (*James Clerk Maxwell*) και περιγράφουν τη συμπεριφορά ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων καθώς και τις αλληλεπιδράσεις τους με την ύλη. Η αρχική δημοσίευση του Μάξγουελ αναφερόταν σε οκτώ συνολικά, αλληλοσχετιζόμενες εξισώσεις. Η μορφή των τεσσάρων εξισώσεων, όπως χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα, σχηματοποιήθηκε από τον αυτοδίδακτο Άγγλο φυσικό και μαθηματικό Όλιβερ Χέβισάιντ, ο οποίος τις αναδιατύπωσε χρησιμοποιώντας διανυσματικό λογισμό, απλοποιώντας τις αποδείξεις τους και συμπυκνώνοντας τις από 8 σε 4.

Οι τέσσερις εξισώσεις του Μάξγουελ περιγράφουν αντίστοιχα (με τη συνηθισμένη σειρά γραφής τους) το πως ηλεκτρικά φορτία παράγουν ηλεκτρικά πεδία (Νόμος του Gauss), την πειραματική απουσία μαγνητικών μονοπόλων, πως τα ηλεκτρικά ρεύματα και τα μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία παράγουν μαγνητικά πεδία (Νόμος των Αμπέρ και Μάξγουελ) και το πως η μεταβολή ενός μαγνητικού πεδίου παράγει ηλεκτρικά πεδία (Νόμος του Φάραντεϊ για την επαγωγή).

Η ακριβής διατύπωση των εξισώσεων Maxwell εξαρτάται από τον ακριβή ορισμό των σχετικών ποσοτήτων. Οι συμβάσεις διαφέρουν με τα μοναδιαία συστήματα: επειδή οι διάφοροι ορισμοί και οι διαστάσεις αλλάζουν από την απορρόφηση διαστατικών παραγόντων, όπως η ταχύτητα του φωτός c . Αυτό κάνει τις σταθερές να βγαίνουν διαφορετικές. [10]

2.5.2 Διατύπωση σε όρους των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων

Οι εξισώσεις εισαγάγουν το ηλεκτρικό πεδίο E , ένα διανυσματικό πεδίο, και το μαγνητικό πεδίο B , ένα ψευδοδιανυσματικό πεδίο (*pseudovector field*), όπου το καθένα έχει γενικά χρονική εξάρτηση. Οι πηγές αυτών των πεδίων είναι ηλεκτρικά φορτία και ρεύματα, τα οποία μπορούν να εκφραστούν ως τοπικές πυκνότητες που ονομάζονται πυκνότητα φορτίου ρ και ένταση ρεύματος J . Ένας ξεχωριστός νόμος της φύσης, ο νόμος της δύναμης Lorentz, περιγράφει πώς το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο σε πράξη φορτισμένα σωματίδια και τα ρεύματα. Μια έκδοση του νόμου αυτού είχε συμπεριληφθεί στις αρχικές εξισώσεις του Maxwell, αλλά, κατά συνθήκη, δεν συμπεριλαμβάνεται πλέον.

Η ακριβής διατύπωση των εξισώσεων Maxwell εξαρτάται από τον ακριβή ορισμό των σχετικών ποσοτήτων. Συμβάσεις διαφέρουν στα διάφορα συστήματα μονάδων. Αυτό κάνει τις σταθερές να βγαίνουν διαφορετικά.

Στις σχέσεις ηλεκτρικού-μαγνητικού πεδίου υπάρχουν τέσσερις εξισώσεις. Δύο από αυτές περιγράφουν πώς τα πεδία μεταβάλλονται στο χώρο και λόγω πηγών, εάν υπάρχουν. Τα ηλεκτρικά πεδία που προέρχονται από τα ηλεκτρικά φορτία στο νόμο του Gauss, και τα μαγνητικά πεδία, όπως κλειστές γραμμές του πεδίου που δεν οφείλονται σε μαγνητικά μονόπολα του νόμου του Gauss για το μαγνητισμό. Τα άλλα δύο περιγράφουν πώς τα πεδία «κυκλοφορούν» γύρω από τις αντίστοιχες πηγές τους. Το μαγνητικό πεδίο "κυκλοφορεί" γύρω από ηλεκτρικά ρεύματα και χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία του νόμου του Ampere με την προσθήκη του Maxwell, ενώ το ηλεκτρικό πεδίο «κυκλοφορεί» γύρω από χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδία του νόμου Faraday. [10]

2.5.3 Ο νόμος του Gauss

Ο νόμος του Gauss περιγράφει τη σχέση ανάμεσα σε ένα στατικό ηλεκτρικό πεδίο και τα ηλεκτρικά φορτία που το προκαλούν: Τα στατικά ηλεκτρικά πεδία κατευθύνονται από τα θετικά φορτία προς τα αρνητικά φορτία. Στο πεδίο της γραμμικής περιγραφής, οι δυναμικές ηλεκτρικές του ηλεκτρικού πεδίου ξεκινούν μόνο από θετικά ηλεκτρικά φορτία και τελειώνουν μόνο σε αρνητικά φορτία. Επομένως «μετρώντας» τον αριθμό των δυναμικών γραμμών που διέρχονται μέσω μιας κλειστής επιφάνειας παίρνουμε το συνολικό φορτίο (περιλαμβανομένου του δεσμευμένου φορτίου λόγω πόλωσης του υλικού) που περικλείεται από την επιφάνεια αυτή δια της διαπερατότητας του ελεύθερου χώρου (της διηλεκτρικής σταθεράς του κενού). Πιο τεχνικά, ο νόμος του Gauss εκφράζει τη σχέση που έχει η ηλεκτρική ροή μέσα από κάθε υποθετική κλειστή "Γκαουσιανή επιφάνεια" με το περικλειόμενο στην επιφάνεια ηλεκτρικό φορτίο. [10]

2.5.4 Ο νόμος του Gauss για τον μαγνητισμό

Ο νόμος του Gauss για τον μαγνητισμό δηλώνει ότι δεν υπάρχουν «μαγνητικά φορτία» (που ονομάζονται επίσης και μαγνητικά μονόπολα), ανάλογα με τα ηλεκτρικά φορτία. Αντ' αυτού, το μαγνητικό πεδίο που οφείλεται στα υλικά που παράγεται από μια διάταξη που ονομάζεται δίπολο. Τα μαγνητικά δίπολα είναι εκπροσωπούνται καλύτερα ως βρόχοι ρεύματος, αλλά μοιάζουν με θετικά και αρνητικά «μαγνητικά φορτία», άρρηκτα συνδεδεμένα μεταξύ τους, που δεν έχουν καθαρό «μαγνητικό φορτίο». Από άποψη των δυναμικών γραμμών, αυτή η εξίσωση δηλώνει ότι οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου δεν αρχίζουν ούτε τελειώνουν, αλλά κάνουν βρόχους ή επεκτείνονται στο άπειρο και γυρνάνε πάλι πίσω. Με άλλα λόγια, κάθε γραμμή μαγνητικού πεδίου που εισέρχεται σε

ένα δεδομένο όγκο πρέπει από κάπου να βγει από αυτόν τον όγκο. Ισοδύναμες τεχνικές καταστάσεις είναι το ότι το συνολικό άθροισμα της μαγνητικής ροής μέσω οποιασδήποτε Gaussian επιφάνειας είναι μηδέν, ή ότι το μαγνητικό πεδίο είναι ένα σωληνοειδές διανυσματικό πεδίο. [10]

2.5.5 Ο νόμος του Faraday

Οι τύποι των εξισώσεων Maxwell-Faraday και του νόμου Faraday περιγράφουν πως ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργεί («επάγει») ένα ηλεκτρικό πεδίο. Αυτό δυναμικά επάγει ένα ηλεκτρικό πεδίο που έχει κλειστές τις δυναμικές γραμμές ακριβώς όπως το μαγνητικό πεδίο, αν δεν υπερκαλύπτεται από ένα στατικό (προκαλούμενο από φορτίο) ηλεκτρικό πεδίο. Αυτή η πτυχή της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής είναι η αρχή λειτουργίας πίσω από πολλές ηλεκτρικές γεννήτριες: για παράδειγμα, ένας περιστρεφόμενος μαγνήτης δημιουργεί ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο με τη σειρά του δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο σε ένα κοντινό καλώδιο. [10]

2.5.6 Ο νόμος του Ampere με την προσθήκη του Maxwell

Ο νόμος του Ampere με την προσθήκη του Maxwell δηλώνει ότι τα μαγνητικά πεδία μπορούν να δημιουργηθούν με δύο τρόπους: με ηλεκτρικό ρεύμα (αυτός ήταν ο αρχικός «νόμος του Ampere») και με μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία (αυτήν ήταν η "προσθήκη του Maxwell").

Η προσθήκη του Maxwell στον νόμο του Ampere είναι ιδιαίτερα σημαντική: δείχνει ότι όχι μόνο ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο προκαλεί ένα ηλεκτρικό πεδίο, αλλά και ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο προκαλεί ένα μαγνητικό πεδίο. Ως εκ τούτου, αυτές οι εξισώσεις επιτρέπουν αυταρκεί (self-sustaining) "ηλεκτρομαγνητικά κύματα" να ταξιδέψουν στο κενό χώρο.

Η ταχύτητα που υπολογίζεται για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, η οποία θα μπορούσε να προβλεφθεί από πειράματα σχετικά με τα φορτία και τα ρεύματα, ταιριάζει ακριβώς με την ταχύτητα του φωτός. Πράγματι, το φως είναι μια μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (όπως είναι ακτίνες X, τα ραδιοκύματα, και άλλα). Ο Maxwell κατανόησε τη σύνδεση μεταξύ των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και του φωτός το 1861, ενώνοντας έτσι τις θεωρίες του ηλεκτρομαγνητισμού και της οπτικής. [10]

2.5.7 Διάνυσμα Poynting

Το διάνυσμα Poynting μπορεί να θεωρηθεί ότι αναπαριστά τη ροή ενέργειας ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Ονομάστηκε έτσι από τον εφευρέτη του John Henry

Poynting . Ο Oliver Heaviside ανακάλυψε ανεξάρτητα το διάνυσμα Poynting. Στην πρωτότυπη εργασία του Poynting και σε πολλά εγχειρίδια ορίζεται ως:

η οποία συχνά καλείται μορφή Abraham. Εδώ το E είναι το ηλεκτρικό πεδίο και H το βοηθητικό μαγνητικό πεδίο. Μερικές φορές χρησιμοποιείται ένας εναλλακτικός ορισμός σε όρους ηλεκτρικού πεδίου E και του μαγνητικού πεδίου B . Είναι επίσης δυνατόν να συνδυαστεί το πεδίο μετατόπισης D και το μαγνητικό πεδίο B για να παρθεί η μορφή Minkowski του διανύσματος Poynting, ή να χρησιμοποιηθούν τα D και H για την κατασκευή μιας άλλης. Η επιλογή είναι αμφιλεγόμενη: ο Pfeifer et al. συνοψίζει θαυμάσια την ενός αιώνα διαμάχη μεταξύ των υποστηρικτών των μορφών Abraham και Minkowski. [26]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Αρνητικός δείκτης διάθλασης και πρώτο μεταύλικό

3.1 Ιστορική αναδρομή

Για να περιγραφτούν τα υλικά τα οποία εμφανίζουν ιδιότητες που δεν εμφανίζονται αυτούσιες στη φύση χρησιμοποιήθηκε ο όρος μεταύλικό. Η λέξη αυτή αναφέρεται σε τεχνητά υλικά, τα οποία συνθέτουν δομές, των οποίων τα χαρακτηριστικά δεν καθορίζονται από τα ίδια τα υλικά αλλά από τον τρόπο διάταξης τους. Οι δομές αυτές φτιάχνονται ούτως ώστε στα επιθυμητά μήκη κύματος να εμφανίζουν μοναδικές ιδιότητες κι έτσι προκύπτουν νέες και ενδιαφέρουσες εφαρμογές. Στο πεδίο διέγερσης η μικροσκοπική τους δομή σε σχέση με το μήκος κύματος τις κάνει αόρατες και αποκρύπτει τα δομικά τους χαρακτηριστικά με αποτέλεσμα οι δομές αυτές να μπορούν να περιγραφούν με συστηματικό τρόπο σαν ομογενή υλικά τα οποία εμφανίζουν ενεργές τιμές ηλεκτρομαγνητικών παραμέτρων όπως η διηλεκτρική επιδεκτικότητα ϵ και η μαγνητική διαπερατότητα μ . Τα μεταύλικά εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από συντονισμούς για να εμφανίσουν τις ιδιότητες τους, ενώ σημαντικός παράγοντας είναι επίσης και οι διαστάσεις της διάταξης που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό των ηλεκτρομαγνητικών παραμέτρων για δεδομένο εύρος συχνοτήτων. Με την κατάλληλη διέγερση των διατάξεων αυτών και ενισχύοντας τους συντονισμούς που εμφανίζονται είναι δυνατόν να πετύχει κανείς αρνητικές τιμές της επιδεκτικότητας εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα και αρνητικές τιμές για την διαπερατότητα. Κάτι τέτοιο μπορεί αρχικά να φαίνεται παράλογο και να μην συνάδει με την κλασική θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού έτσι όπως αυτή διατυπώθηκε από τον James Maxwell στην αρχή του 20ου αιώνα. Παρόλα αυτά η εμφάνιση των ιδιοτήτων αυτών κάθε άλλο παρά παραβιάζει τις αρχές του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου όπως θα δούμε στην συνέχεια όταν και θα εξετάσουμε αναλυτικά τις γενικές σχέσεις που ισχύουν για τέτοια υλικά. [35]

Ο Ρώσος φυσικός Βίκτωρ Βεσελάγκο, το 1968, δημοσίευσε μια πρωτοποριακή εργασία στην οποία παρουσίαζε τις επαναστατικές, τεχνολογικές εφαρμογές που θα είχε ένα υλικό με αρνητικό δείκτη διάθλασης. Τέτοιο υλικό όμως δεν υπήρχε τότε και ούτε είχε κανείς την παραμικρή ιδέα πως θα μπορούσε να κατασκευαστεί. Τριάντα έξι χρόνια όμως αργότερα φαίνεται πως οι επιστήμονες κατάφεραν να κατασκευάσουν αυτό που δεν είχε καταφέρει η φύση, και νέοι δρόμοι ανοίγονται τόσο στη φυσική όσο και στην τεχνολογία.

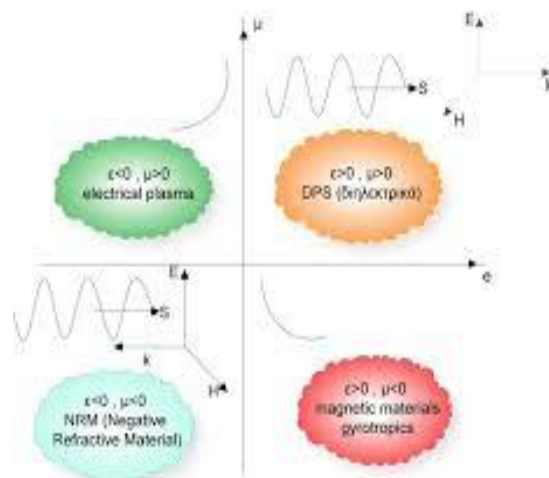
Ο φυσικός Βίκτωρ Βεσελάγκο είχε την ιδέα να υπολογίσει ποιες θα ήταν οι ιδιότητες ενός υλικού με αρνητικό δείκτη διάθλασης, τα οποία τα ονόμασε αριστερόστροφο υλικό εξαιτίας της διάταξης που έχουν σε αυτό το ηλεκτρικό πεδίο, μαγνητικό πεδίο και η διεύθυνση διάδοσης. Τα αποτελέσματα στα οποία κατέληξε ήταν πραγματικά εντυπωσιακά, η εργασία του όμως θεωρήθηκε ως ένα είδος επιστημονικής παραδοξολογίας αφού κανείς δεν μπορούσε να φανταστεί πως θα μπορούσε να κατασκευαστεί ένα υλικό με αρνητικό δείκτη διάθλασης.

3.2 Δείκτης διάθλασης

Όταν μια ακτίνα φως περνάει το όριο μεταξύ του αέρα και του νερού ή κάποιου άλλου διάφανου υλικού, κάμπτεται και ο βαθμός κάμψης εξαρτάται από το βαθμό διάθλασης του υλικού. Όσον αφορά το ορατό φως, τα διάφανα υλικά όπως η ύαλος, το ύδωρ και ο αδάμας έχουν βαθμό διάθλασης ένα ή μεγαλύτερο γεγονός που σημαίνει ότι όταν το φως εισέρχεται σε αυτά κάμπτεται προς τα μέσα.

Όμως με τα μεταϋλικά οι επιστήμονες μπορούν να επιτύχουν βαθμό διάθλασης από το μηδέν μέχρι το ένα. Θεωρητικά, θα ήταν δυνατή η κατασκευή υλικού με βαθμό διάθλασης αρνητικό. Σε αυτή την περίπτωση, το φως που θα εισερχόταν σε ένα τέτοιο υλικό θα έκανε απότομη αναστροφή, σαν να είχε χτυπήσει σε έναν αόρατο καθρέφτη.[22]

Η μεγαλύτερη προοπτική των μεταϋλικών είναι η δυνατότητα να δημιουργηθεί μία δομή με αρνητικό διαθλαστικό δείκτη, δεδομένου ότι αυτό το χαρακτηριστικό δεν βρίσκεται σε κανένα μη συνθετικό υλικό. Σχεδόν όλα τα υλικά που συναντώνται στην οπτική, όπως το γυαλί ή το νερό, έχουν θετικές τιμές και για τη διηλεκτρική σταθερά ϵ και για τη διαπερατότητα μ . Ωστόσο, πολλά μέταλλα (όπως το ασήμι και ο χρυσός), έχουν αρνητικές ϵ σε ορατά μήκη κύματος. Ένα υλικό με ένα από τα δύο (αλλά όχι και τα δύο) είτε το ϵ είτε το μ αρνητικό είναι αδιαφανές στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία



Εικόνα 3.1: Κατηγορίες υλικών με βάση το πρόσημο των ηλεκτρομαγνητικών παραμέτρων. [33]

Αν και οι οπτικές ιδιότητες από διαφανές υλικό πλήρως καθορισμένο από τις παραμέτρους ϵ και μ , του δείκτη διάθλασης χρησιμοποιούνται συχνά στην πράξη, μπορούν να προσδιοριστούν από το δείκτη διάθλασης. Όλα τα γνωστά μη

μεταϋλικά διαφανή υλικά έχουν θετικές ϵ και μ . Κατά συνθήκη, η θετική τετραγωνική ρίζα χρησιμοποιείται για το n . Ωστόσο, ορισμένα κατασκευασμένα μεταϋλικά έχουν $\epsilon < 0$ και $\mu < 0$. Επειδή το γινόμενο $\epsilon\mu$ είναι θετικό, το n είναι πραγματικό. Υπό αυτές τις συνθήκες, είναι αναγκαίο να λάβει την αρνητική τετραγωνική ρίζα για n . Ο φυσικός Victor Veselago απέδειξε ότι οι εν λόγω ουσίες μπορούν να μεταδώσουν φως. Οι ανωτέρω σκέψεις είναι απλοϊκές για τα πραγματικά υλικά, τα οποία πρέπει να έχουν σύνθετη τιμή ϵ και μ . Το πραγματικό μέρος και των δύο και μ και ϵ δεν χρειάζεται να είναι αρνητικό για ένα παθητικό υλικό για την εμφάνιση αρνητικής διάθλασης. Τα μεταϋλικά με αρνητικό n έχουν πολλές ενδιαφέρουσες ιδιότητες.[22]

Για επίπεδα διαδιδόμενα κύματα σε ηλεκτρομαγνητικά μεταϋλικά, το ηλεκτρικό πεδίο, το μαγνητικό πεδίο και το κυματοδιάνυσμα ακολουθούν έναν κανόνα προς αριστερά, δημιουργώντας έτσι το όνομα αριστερόστροφα (meta) υλικά. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι όροι αριστερόστροφα και δεξιόστροφα μπορούν επίσης να προκύψουν για τη μελέτη των chiral μέσων, αλλά η χρήση τους στο πλαίσιο αυτό δεν έχει καμία σχέση με αυτό το αποτέλεσμα. Η επίδραση της αρνητικής διάθλασης είναι ανάλογη με τη διάδοση κυμάτων σε μια αριστερόστροφη γραμμή μεταφοράς, και οι εν λόγω δομές έχουν χρησιμοποιηθεί για να επαληθευθούν ορισμένες από τις επιπτώσεις που περιγράφονται εδώ. Η κατεύθυνση είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό σε μεταϋλικό σχεδιασμό και την κατασκευή που σχετίζεται με την κατεύθυνση της διάδοσης κυμάτων. Τα μεταϋλικά ως αριστερόστροφα μέσα υπάρχουν όταν τόσο η ϵ διηλεκτρική σταθερά όσο και η μ μαγνητική διαπερατότητα είναι αρνητικές. Σε καθημερινή βάση - στερεά υλικά, υγρά ή αέρια, διαφανή ή αδιαφανή, αγωγός ή μονωτής – τα δεξιόστροφα υλικά κυριαρχούν. Αυτό σημαίνει ότι η διηλεκτρική σταθερά και η διαπερατότητα που οδηγούν σε ένα συνηθισμένο θετικό δείκτη διάθλασης είναι θετικές. Ωστόσο, τα μεταϋλικά έχουν την ικανότητα να παρουσιάζουν μια κατάσταση όπου τόσο η επιτρεπτικότητα όσο και η διαπερατότητα είναι αρνητικές, με αποτέλεσμα έναν ιδιαίτερο, δείκτη αρνητικής διάθλασης, δηλαδή ένα αριστερόστροφο υλικό. Οι περιοδικές δομές, όπως οι φωτονικοί κρύσταλλοι, δεν είναι αποτελεσματικές δομές, όταν λειτουργούν σε συχνότητες σε συνθήκες Bragg, όπου η περίοδος είναι συγκρίσιμη (ή μεγαλύτερη από αυτή) του καθοδηγούμενου μήκους κύματος ($p \approx \lambda g$). Σε αυτές τις συνθήκες, η δομή είναι περιθλαστική και όχι διαθλαστική, και δεν μπορεί να χαρακτηριστεί από ενιαίο δείκτη διάθλασης. Ως εκ τούτου, περιοδικές δομές σε συνθήκες Bragg δεν εμπίπτουν στην κατηγορία των μεταϋλικών, σύμφωνα με τον ορισμό που αναφέρεται στην εισαγωγή, ακόμη και αν μπορούν να αναπαράγουν αποτελέσματα παρόμοια με την αρνητική διάθλαση. Παρ' όλα αυτά, τα NRI μεταϋλικά, που δεν είναι άμεσα υπαρκτά στη φύση, γενικά γίνονται από περιοδικές διατάξεις ώστε να ικανοποιούν τον αποτελεσματικό μέσο όρο $p \ll \lambda g$ μόνο σε ένα περιορισμένο εύρος ζώνης συχνοτήτων. Συνεπώς, είναι χρήσιμο να μελετηθούν στο γενικότερο πλαίσιο των περιοδικών δομών, για μια πλήρη ανάλυση και την ορθή κατανόηση της συμπεριφοράς τους. Τα μεταϋλικά μπορούν να είναι μονοδιάστατα, δισδιάστατα ή τρισδιάστατα. Αν και μπορεί να

υποστηριχθεί ότι η δομή 1D δεν αποτελεί υλικό με τη μορφή της ύλης, μια 1D δομή μεταϋλικού παρουσιάζει όλες τις θεμελιώδεις ιδιότητες των 2D και 3D μεταϋλικών, παρόμοια με τις 1D συμβατικές περιοδικές δομές που παρουσιάζουν τις θεμελιώδεις ιδιότητες των αντίστοιχων 2D και 3D δομών (διάθλαση, διάγραμμα εύρους ζώνης, αρμονικό φάσμα Bloch-Floquet, ελαττωματικά μέσα, επιφανειακά κύματα). Η συγκρίσιμη συμπεριφορά των 1D μεταϋλικών με τα αντίστοιχα 2D και 3D είναι ακόμη πιο σημαντική, καθώς η απόκριση των αποτελεσματικών μέσων δεν εξαρτάται από τον τύπο πλέγματος του αλλά μόνο από τη φύση των "ατόμων" του. Γι' αυτό, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι μια 1D δομή παρουσιάζει την πραγματική φύση του δείκτη διάθλασης ενός μετα-ϋλικού. Το διάγραμμα διασποράς μιας τυπικής (συμβατικής) 1D περιοδικής δομής, με το άπειρο άθροισμα των θετικών και αρνητικών αρμονικών χώρου ομαδικής ταχύτητας (Bloch-Floquet θεώρημα) είναι:

$$\beta_q(\omega) = \pm \left[\beta_0(\omega) + \frac{2\pi}{p} q \right]$$

για δύο διαφορετικές περιόδους p . Αποδεικνύεται ότι εάν η συνθήκη $p \ll \lambda$ ικανοποιείται, η επιρροή των ανώτερων αρμονικών χώρου ($|q| > 0$) είναι αμελητέα, έτσι ώστε ένας αποτελεσματικός δείκτης διάθλασης μπορεί να ορισθεί ως η θεμελιώδης αρμονική χώρου της δομής:

$$n(\omega) = \frac{\beta_0(\omega)}{k_0} = \frac{c\beta_0(\omega)}{k_0},$$

$$G(z, z', \omega) = \int \sum \alpha_m(z', \beta) \Psi_m(z, \beta) d\beta$$

όπου το θετικό πρόσημο έχει επιλεγεί για να διασφαλισθεί θετική ταχύτητα. Θεωρώντας τη συνάρτηση Green του (απόκριση πεδίου σε μια μοναδιαία πηγή), η οποία προσδιορίζεται από τους ιδιορρυθμούς $\Psi_m(z, \beta)$ και ιδιοσυχνότητες $\omega_m(\beta)$, όπου m είναι η "λειτουργία" ή δείκτης εύρους ($m = 0, 1, 2, \dots$) και καθορίζεται από την επίλυση της κυματικής εξίσωσης με επέκταση Fourier του πεδίου Ψ και των περιοδικών χαρακτηριστικών. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας το γεγονός ότι η $\Psi_m(z, \beta)$ χτίζει ένα πλήρες ορθοκανονικό σύνολο ρυθμών μεταφοράς για την κυματική εξίσωση, η συνάρτηση Green γίνεται:

$$G(z, z', \omega) = \int \sum \alpha_m(z', \beta) \Psi_m(z, \beta) d\beta$$

με

$$\alpha_m = \frac{\Psi_m(z', \beta)}{\omega_m^2(\beta) - \omega^2}$$

όπου z και z' είναι οι χωρικές συντεταγμένες των σημείων παρατήρησης και της πηγής, αντίστοιχα, β είναι η σταθερά διάδοσης, η οποία ισχύει σε γενικές περιπτώσεις (2D και 3D περιπτώσεις), και το $\alpha_m \propto z'$, $\beta \propto$ αντιπροσωπεύει τους συντελεστές πλάτους της επέκτασης της συνάρτησης Green. Η συνάρτηση Green, είναι μοναδική σε συχνότητες λειτουργίας και τέμνει τις ιδιομορφές της δομής, δηλαδή $\omega = \omega_m \propto \beta$. Η μείωση της ηλεκτρομαγνητικής περιόδου β επεκτείνει το "πλέγμα αρμονικών χώρου", και επομένως επεκτείνονται και οι εκάστοτε ζώνες της δομής, η οποία συγκλίνει προς το πλέγμα των αρμονικών χώρου, στην οριακή περίπτωση των αμελητέων διαταραχών. Υποθέτοντας ότι η συχνότητα λειτουργίας ω βρίσκεται στη χαμηλότερη ζώνη συχνοτήτων ($m = 0$), αυτή η επέκταση του διαγράμματος διασποράς αυξάνει την ποσότητα

$$|\omega_m^2(\beta) - \omega^2|$$

για όλες τις συχνότητες $m=1,2,\dots$ και έτσι μειώνεται η συμμετοχή των συχνοτήτων με $m>0$. Εάν ο λόγος p / λ_g είναι αρκετά μικρός, μόνο η θεμελιώδης αρμονική $q=0$ έχει σημασία και οι υπόλοιπες αγνοούνται. Έτσι ένα μεταυλικό συμπεριφέρεται ανάλογα με την κρυσταλλική ύλη, όπου η μοριακή δομή είναι τόσο μικρή ηλεκτρομαγνητικά, ώστε το κύμα δεν "βλέπει" τα μόρια σε υπεριώδεις (και πιο χαμηλές) συχνότητες. [22]

3.2.1 Αρνητικός δείκτης διάθλασης

Ο δείκτης διάθλασης ενός υλικού ορίζει τη γωνία κατά την οποία κάμπτεται μια ακτίνα φωτός όταν μεταβαίνει από ένα οπτικό μέσο σε ένα άλλο. Ανάλογα με την πυκνότητα του οπτικού μέσου, ο δείκτης διάθλασης παίρνει τιμές από 1 (για το κενό) έως υψηλότερες τιμές (για το νερό ή το γυαλί). Πρόσφατες έρευνες απέδειξαν ότι ο δείκτης διάθλασης ενός υλικού μπορεί να πάρει και αρνητικές τιμές. Προκειμένου να κατανοήσουμε τη σημασία των αρνητικών τιμών του δείκτη διάθλασης, όπως επίσης και τις επιπτώσεις που έχει στην τεχνολογία, ας δούμε τι καθορίζει τον δείκτη διάθλασης ενός υλικού. [34]

3.2.3 Η προέλευση του δείκτη διάθλασης

Εάν θεωρήσουμε ότι το φως είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα, τότε περιγράφουμε τη διάδοσή του με τις εξισώσεις Maxwell. Μέσα σε αυτές τις εξισώσεις περιέχονται δύο παράμετροι οι οποίες είναι χαρακτηριστικές του οπτικού μέσου, και αν συνδυαστούν δίνουν τη αντίστοιχη τιμή της ταχύτητας του φωτός για το συγκεκριμένο οπτικό μέσο. Οι δύο αυτές παράμετροι είναι η διηλεκτρική σταθερά και η μαγνητική διαπερατότητα. Με το σύμβολο ϵ ορίζουμε την ηλεκτρική επιτρεπτότητα, η οποία περιγράφει πόσο έντονα ένα ηλεκτρικό πεδίο επηρεάζει ένα υλικό. Με μ συμβολίζουμε τη μαγνητική διαπερατότητα που περιγράφει πόσο εισχωρεί ένα μαγνητικό πεδίο σε ένα υλικό. Η ταχύτητα του φωτός δίνεται από τον συνδυασμό αυτών των δύο:

$$c = \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{\epsilon_0\mu_0}}$$

Στο κενό η ηλεκτρική επιτρεπτότητα και η μαγνητική διαπερατότητα συμβολίζονται με ϵ_0 και μ_0 και δίνουν τη γνωστή μας ταχύτητα του φωτός στο

κενό $3 \cdot 10^8$ m/s.

Το φως εξακολουθεί να διαδίδεται χωρίς να παραβιάζονται οι νόμοι της φυσικής όταν οι τιμές των ϵ και μ είναι και οι δύο αρνητικές. Για λόγους όμως διατήρησης της ενέργειας πρέπει η τετραγωνική ρίζα της παραπάνω σχέσης να έχει αρνητικό πρόσημο κι έτσι ο δείκτης διάθλασης αποκτά αρνητική τιμή.

Η αρνητική τιμή του n επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο το φως διαθλάται.. Πριν όμως ασχοληθούμε με το θέμα αυτό ας ρίξουμε μια ματιά πως επιτυγχάνονται οι αρνητικές τιμές των ϵ και μ . [34]

Αρνητικές τιμές των ϵ και μ σημαίνουν ότι τα υλικά αυτά τείνουν να αποβάλλουν το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο από το εσωτερικό τους. Το κλειδί στις κατασκευές αυτές είναι η κλίμακα των κατασκευών να είναι μικρότερη από το μήκος κύματος των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων.

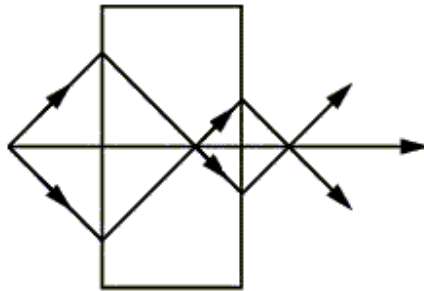
Τα πρόσφατα πειράματα σχεδιάστηκαν για μεγαλύτερα μήκη κύματος στην περιοχή των μικροκυμάτων, διότι αυτό είναι δύσκολο τεχνολογικά για τα μήκη κύματος του ορατού φωτός. Θεωρητικές μελέτες όμως για φωτονικούς κρυστάλλους προβλέπουν και εκεί παρόμοια παράξενη συμπεριφορά.

Μια προφανής ερώτηση που αναδύεται στο σημείο αυτό είναι: « Αν η αρνητική τιμή του ϵ αποβάλλει το ηλεκτρικό πεδίο και η αρνητική τιμή του μ αποβάλλει το μαγνητικό πεδίο δεν θα έχει αυτό ως αποτέλεσμα να αποκλείονται από το υλικό αυτό και τα δύο πεδία;»

Η απάντηση στο ερώτημα αυτό είναι «Όχι». Ας δούμε λοιπόν τι συνέπειες έχει ο αρνητικός δείκτης διάθλασης.

Όλη η παραπάνω συζήτηση για αρνητικούς δείκτες διάθλασης μπορεί να είναι ενδιαφέρουσα από μόνη της αλλά τι σημαίνει αυτό για το φως;

Το κυριότερο συμπέρασμα είναι ότι το φως κάμπτεται κατά την αντίθετη κατεύθυνση απ' ό,τι θα συνέβαινε σε ένα υλικό με τον συνηθισμένο θετικό δείκτη διάθλασης. Αυτό σημαίνει ότι το αντικείμενο που συνήθως θεωρούμε ως συγκλίνοντα φακό (το οποίο εστιάζει παράλληλες ακτίνες σ' ένα σημείο) αν έχει αρνητικό δείκτη διάθλασης δρα ως αποκλίνον φακός και αντίστροφα. Στην εικόνα 2 είναι ένα παράδειγμα που δείχνει πως το φως που προέρχεται από μια σημειακή πηγή, διαθλάται καθώς εισέρχεται σ' ένα πλακίδιο φτιαγμένο από υλικό με δείκτη διάθλασης -1 το οποίο περιβάλλεται από υλικό με δείκτη διάθλασης $+1$. Στην διαχωριστική επιφάνεια των δύο υλικών το φως κάμπτεται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Έτσι τελικά το πλακίδιο μπορεί να επανεστιάσει το φως σ' ένα σημείο. [34]



Εικόνα 3.2: Φως περνά μέσα από πλακίδιο με αρνητικό δείκτη διάθλασης [34]

3.3 Το πρώτο μεταϋλικό

Η πρώτη διάταξη που κατασκευάστηκε για να λειτουργήσει ως μεταϋλικό, αποτέλεσε την απαρχή για μία 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 για την επίτευξη αρνητικής διηλεκτρικής σταθεράς και αρνητικής μαγνητικής διαπερατότητας για λειτουργία σε μικροκυματικές συχνότητες, εισήγαγε δύο νέες δομές. Συγκεκριμένα, αρχικά απέδειξε ότι μία συστοιχία λεπτών μεταλλικών συρμάτων (Thin Wires-TW) είναι δυνατό να εμφανίσει αρνητική διηλεκτρική σταθερά ϵ σε ορισμένο εύρος συχνοτήτων. [5]

Αν το προσπίπτον ηλεκτρικό πεδίο είχε την κατεύθυνση του άξονα των συρμάτων ($E \parallel z$), έτσι ώστε να επάγει ένα ρεύμα κατά μήκος τους και να παράγει ισοδύναμες ηλεκτρικές διπολικές ροπές, η συνολική δομή παρουσίαζε μία διηλεκτρική σταθερά τύπου πλάσματος, με διασπορά ως προς τη συχνότητα,

σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\varepsilon_r(\omega) = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 + \zeta^2} + i \frac{\zeta \omega_{pe}^2}{\omega(\omega^2 + \zeta^2)}$$

όπου:

$$\omega_{pe} = \sqrt{2\pi c^2 / [p^2 \ln(p/\alpha)]}$$

(c: ταχύτητα του φωτός, α: ακτίνα των συρμάτων) είναι η ηλεκτρική συχνότητα πλάσματος, η οποία μπορεί να ρυθμιστεί στην περιοχή των GHz και

$$\zeta = \varepsilon_0 (p \omega_{pe} / \alpha)^2 / \pi \sigma$$

(σ: αγωγιμότητα του μετάλλου) είναι ένας παράγοντας απόσβεσης λόγω των απωλειών του μετάλλου. Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ότι

$$\text{Re}(\varepsilon_r) < 0 \quad \text{για } \omega^2 < \omega_{pe}^2 - \zeta^2$$

η οποία αν αγνοηθούν τυχόν απώλειες ($\zeta = 0$) απλοποιείται στην ακόλουθη συνθήκη

$$\varepsilon_r < 0 \quad \text{για } \omega < \omega_{pe}$$

Το μήκος των συρμάτων της παραπάνω διάταξης θεωρείται ότι είναι αρκετά μεγαλύτερο από το μήκος κύματος (θεωρητικά άπειρο).

Στη συνέχεια αποδείχθηκε ότι μία συστοιχία διαχωρισμένων δακτυλίων (Split Ring Resonators-SRRs) είναι δυνατό να εμφανίσει αρνητική μαγνητική διαπερατότητα σε ορισμένο εύρος συχνοτήτων. Αν το διεγείρον μαγνητικό πεδίο H έχει διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο των δακτυλίων ($H \perp y$), έτσι ώστε να επάγει ρεύματα συντονισμού στο βρόχο και να παράγει ισοδύναμες μαγνητικές διπολικές ροπές, τότε η ενεργός μαγνητική διαπερατότητα της συνολικής δομής λαμβάνει τη μορφή

$$\mu_r(\omega) = 1 - \frac{F\omega^2(\omega^2 - \omega_{0m}^2)}{(\omega^2 - \omega_{0m}^2)^2 + (\omega\zeta)^2} + i \frac{F\omega^2\zeta}{(\omega^2 - \omega_{0m}^2)^2 + (\omega\zeta)^2}$$

όπου:

$$F = \pi(a/p)^2$$

$$\omega_{0m} = c \sqrt{\frac{3p}{\pi \ln(2w\alpha^3/\delta)}}$$

(α : εσωτερική ακτίνα του μικρού δακτυλίου), είναι η συχνότητα μαγνητικού συντονισμού, η οποία ρυθμίζεται στην περιοχή των GHz (w : πάχος των δακτυλίων, δ : διάκενο μεταξύ των δακτυλίων) και $\zeta = 2pR'/\alpha$ μο ο συντελεστής απόσβεσης λόγω απωλειών του μετάλλου (R' : η αντίσταση ανά μονάδα μήκους του μετάλλου). Σημειώνεται ότι η δομή SRR παρουσιάζει μαγνητική απόκριση παρόλο που δεν περιλαμβάνει μαγνητικά αγωγιμα υλικά, εξαιτίας της παρουσίας μαγνητικών διπολικών ροπών που επάγονται στους δακτυλίους. Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ότι

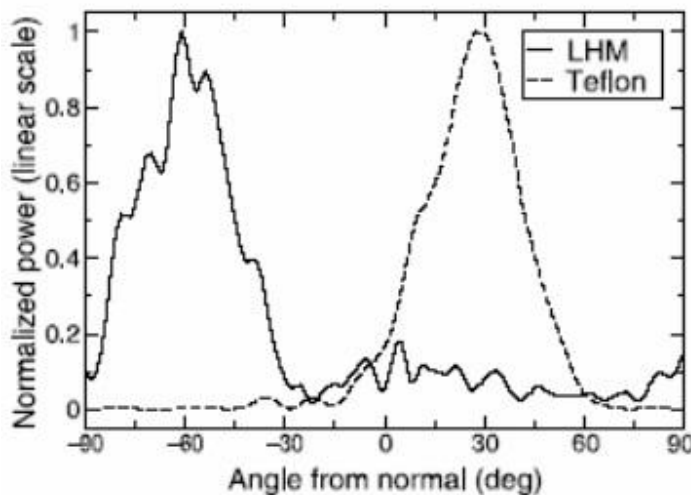
$$\mu_r(\omega) < 0 \quad \text{για} \quad \omega_{0m} < \omega < \frac{\omega_{0m}}{\sqrt{1-F}} = \omega_{pm}$$

που ω_{pm} η συχνότητα μαγνητικού πλάσματος. Η έκφραση για τη μαγνητική διαπερατότητα παρουσιάζει συμπεριφορά συντονισμού, σε αντίθεση με την αντίστοιχη έκφραση για την ενεργό διηλεκτρική σταθερά. 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. Από το τετραγωνικό πλέγμα της διάταξης κόπηκε ένα τμήμα πρισματικού σχήματος για τη διεξαγωγή του πειράματος. [5]

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 ακτίνας 15 cm των οποίων η απόσταση ήταν 1.2 cm. Ο ανιχνευτής της διάταξης ήταν ένας κυματοδηγός ρυθμισμένος στη ζώνη συχνοτήτων X (8–12 GHz), ο οποίος μπορούσε να περιστρέφεται σε βήματα των 1.5 μοιρών προκειμένου να

καταγράψει τη μεταδιδόμενη ισχύ σε διάφορες γωνίες. Το πρίσμα φωτιζόταν από μία μικροκυματική δέσμη, της οποίας το ηλεκτρικό πεδίο είναι πολωμένο παράλληλα στα σύρματα της δομικής μονάδας και εγκάρσιο στους διαχωρισμένους δακτυλίους (TM πόλωση).

Τα κύματα της δέσμης διαδίδονται μέσα στον κυματοδηγό, που αποτελείται από δύο παράλληλα φύλλα αλουμινίου, ενώ περιορίζονται 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- μετρητής ισχύος με βήμα 1.5 μοίρες και καταγράφεται το φάσμα της μεταδιδόμενης ισχύος σε όλη τη ζώνη X (8–12 GHz) 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. Διεξήχθησαν πειράματα και με ένα δείγμα κατασκευασμένο από Teflon του ίδιου σχήματος για να συγκριθούν τα αποτελέσματα. Η διεύθυνση της επιφάνειας εξόδου του πρίσματος σχημάτιζε γωνία 18.4 μοιρών με τη διεύθυνση της επιφάνειας πρόσπτωσης. Στη συχνότητα των 10.5 GHz προέκυψε αρνητική γωνία διάθλασης $\theta = -61$ μοίρες για το πρίσμα από το σύνθετο μεταυλικό, ενώ η γωνία διάθλασης για το πρίσμα από Teflon προέκυψε θετική και ίση με $\theta = 27$ μοίρες, όπως άλλωστε αναμενόταν. [5]



Εικόνα 3.3: Μεταδιδόμενη ισχύ για κάθε θεωρούμενο υλικό [35]

Στην εικόνα 3.3 παρατηρούμε ότι εμφανίζεται ένα μέγιστο στη μεταδιδόμενη ισχύ για κάθε θεωρούμενο υλικό, που αντιστοιχεί στη γωνία διάθλασης. Ο δείκτης διάθλασης του πρίσματος από Teflon προκύπτει από το νόμο του Snell ίσος με

1.4 ενώ ο αντίστοιχος δείκτης διάθλασης για το σύνθετο μεταϋλικό προκύπτει αρνητικός με τιμή -2.7. Σημειώνεται επίσης ότι η δομική μονάδα της περιοδικής διάταξης του σύνθετου υλικού είχε διάσταση $a = 5 \text{ nm}$, ενώ το κεντρικό (για $f = 10 \text{ GHz}$) μήκος κύματος της ζώνης X είναι 3 cm , δηλαδή $\lambda = 6a$, συνθήκη που δείχνει ότι η προσέγγιση του “ενεργού μέσου” ήταν σχετικά ικανοποιητική. Επιπλέον, επειδή η μετρούμενη μεταδιδόμενη ισχύς της διαθλώμενης δέσμης παρουσίαζε μεταβολές ανάλογα με τη θέση του δείγματος, στα αποτελέσματα λήφθηκε υπόψη ο μέσος όρος των καταγραφόμενων τιμών ισχύος για 8 διαφορετικές θέσεις του δείγματος. Η πειραματική επιβεβαίωση του αρνητικού δείκτη διάθλασης έδωσε ώθηση για την περαιτέρω έρευνα στο αντικείμενο των μεταϋλικών την τελευταία δεκαετία. [5]

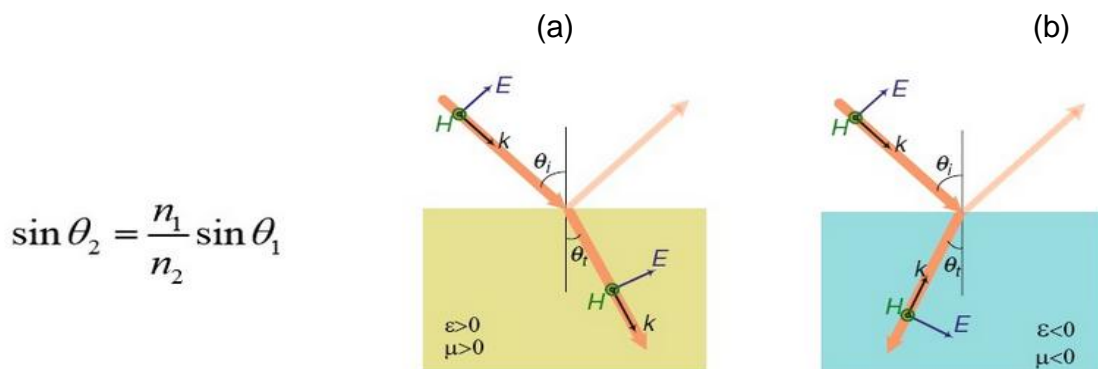
3.4 Αντιστροφή του νόμου Snell

Η αντιστροφή του νόμου του Snell κατά την πρόσπτωση ενός κύματος σε μια διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ ενός συνήθους υλικού και ενός μεταϋλικού, που περιγράφεται από τη γνωστή σχέση:

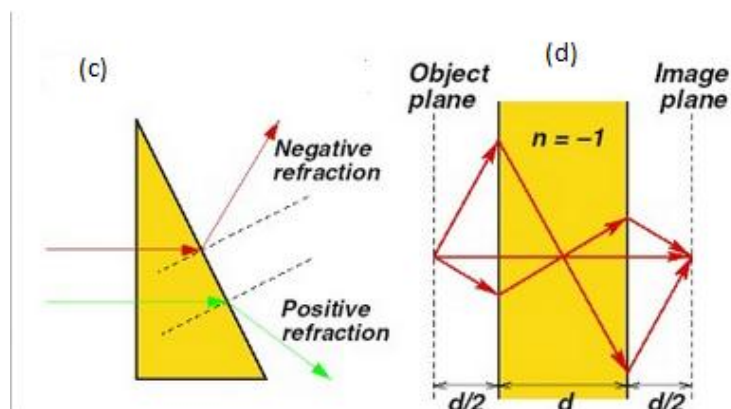
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

όπου n_1, n_2 οι δείκτες διάθλασης του συνήθους υλικού και του μεταϋλικού 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 μεταϋλικό, η οποία λειτουργεί ως ένα είδος φακού. Συγκεκριμένα, κατά την πρόσπτωση της δέσμης στη διαχωριστική επιφάνεια ενός συνήθους υλικού κι ενός μεταϋλικού (LH Material) 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 μεταϋλικό. 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 μεταϋλικού 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 μεταϋλικό 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

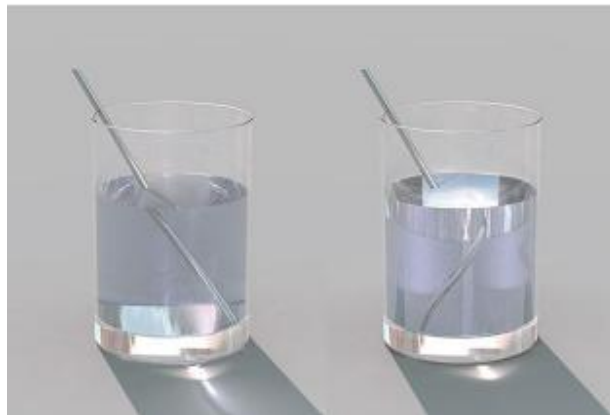
με τη συγκεκριμένη γεωμετρία είναι προφανώς αδύνατη αν η πλάκα αποτελείται από ένα σύνηθες υλικό με $\epsilon, \mu > 0$. Αντί για δύο συμμετρικά εκπεμπόμενες ακτίνες μπορούμε να θεωρήσουμε ένα σύνολο ακτίνων (κυμάτων) ή γενικότερα ένα κυλινδρικό ή σφαιρικό κύμα εκπεμπόμενο από μία σημειακή πηγή. Στην περίπτωση αυτή, όταν τα δύο μέσα έχουν την ίδια ηλεκτρομαγνητική πυκνότητα ($n_L = -n_R$), κάθε ζεύγος l συμμετρικών ακτίνων 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 ακτίνων ($s_l = s$). 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 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. [35]



Εικόνα 3.4:(a)Διάθλαση σε υλικό με $\epsilon > 0$ και $\mu > 0$, (b)Διάθλαση σε υλικό με $\epsilon < 0$ και $\mu < 0$ [38]



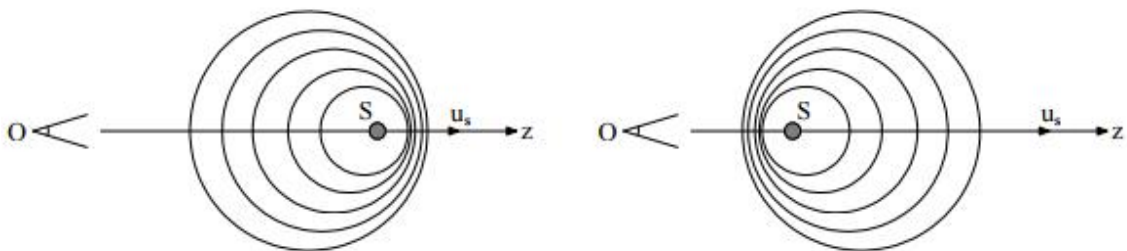
Εικόνα 3.5: (c)κόκκινο βέλος~αρνητική διάθλαση κ πράσινο βέλος~θετική διάθλασης
(d)Διάθλαση σε υλικά με αρνητικό δείκτη διάθλασης [38]



Εικόνα 3.6: Το φαινόμενο της θετικής(αριστερό) και αρνητικής(δεξιό) διάθλασης [31]

3.5 Αντιστροφή του φαινομένου Ντόπλερ

Άλλη συνέπεια των ιδιοτήτων των μεταυλικών είναι η αντιστροφή του φαινομένου Doppler. Θεωρούμε μία πηγή S που κινείται κατά μήκος του άξονα z και ακτινοβολεί ομοιοκατευθυντικά ένα κύμα γωνιακής συχνότητας ω . [35]



Εικόνα 3.7: Φαινόμενο Doppler (α) σε σύνηθες υλικό μέσο ($\Delta\omega > 0$) (β) σε μεταυλικό ($\Delta\omega < 0$). [35]
Υποθέτουμε ότι η πηγή S κινείται προς τα θετικά του άξονα z με ταχύτητα $u_s = z / t$. Τότε η φάση που βλέπει ο παρατηρητής στο σημείο O είναι της μορφής

$$\varphi = \omega t - kz = \omega t - ku_s t = \omega \left(1 - \frac{k}{\omega} u_s \right) t = \omega \left(1 - \frac{u_s}{u_p} \right) t$$

αφού $u_p = \omega/k$. Ο συντελεστής του t είναι η συχνότητα Doppler, που ορίζεται ως η διαφορά της συχνότητας ω της ακίνητης πηγής και της ολίσθησης συχνότητας $\Delta\omega$ (Doppler shift)

$$\omega_D = \omega - \Delta\omega$$

όπου $\Delta\omega = \omega u_s/u_p$. Επειδή όπως αποδείχθηκε παραπάνω, στα υλικά αριστερού νόμου η ταχύτητα φάσης είναι αρνητική ($u_p < 0$), προκύπτει ότι και η ολίσθηση Doppler θα είναι αρνητική ($\Delta\omega < 0$), σε αντίθεση με τα συνήθη υλικά μέσα. Συνεπώς, σε ένα μεταυλικό μέσο διάδοσης, όταν η πηγή κινείται απομακρυνόμενη από τον παρατηρητή, αυτός βλέπει συχνότητα μεγαλύτερη από τη συχνότητα ω του εκπεμπόμενου κύματος. Αντίστοιχα, όταν η πηγή κινείται κατευθυνόμενη προς τον παρατηρητή σε ένα μεταυλικό, αυτός θα βλέπει συχνότητα μικρότερη από την εκπεμπόμενη. Επομένως, στα υλικά αριστερού νόμου επιτυγχάνεται αντιστροφή του φαινομένου Doppler. [35]

3.6 Κυματική εξίσωση και οριακές συνθήκες

Η εξίσωση που θα χρησιμοποιήσουμε συχνά για να περιγράψουμε ένα κύμα προέρχεται από τις γενικές εξισώσεις του Maxwell και έχει την μορφή:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0 \quad , \quad \text{όπου} \quad k^2 = \omega^2$$

Η λύση για την παραπάνω κυματική εξίσωση έχοντας θεωρήσει μια αρμονική μεταβολή ως προς τον χρόνο και τον χώρο είναι η εξής:

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

με το k να συμβολίζει τον κυματικό αριθμό ο οποίος και δείχνει την διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Το μέτρο του k , $|k|$, ισούται με τον κυματικό αριθμό και η μορφή του, για διάδοση σε τρισσορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων, είναι:

$$k = k_x \vec{x} + k_y \vec{y} + k_z \vec{z} .$$

Το διάνυσμα k δίνεται επίσης κι από τη σχέση: $k = \beta - j\alpha$

με το β να αντιπροσωπεύει την σταθερά διάδοσης του κύματος στο μέσο και το α να συμβολίζει την σταθερά απωλειών κατά την διάδοση του κύματος. Αν θεωρήσουμε πως η διεύθυνση διάδοσης του κύματος είναι κατά τα θετικά z τότε η έκφραση του ηλεκτρικού πεδίου αποκτά την μορφή:

$$E = E_0 e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} .$$

Σε αρκετές περιπτώσεις η σταθερά απωλειών θεωρείται ίση με το μηδέν αλλά αυτό εξαρτάται κυρίως από την φύση του μέσου καθώς και το εύρος συχνοτήτων που μελετάμε. Το μαγνητικό πεδίο μπορεί να προκύψει από την έκφραση του ηλεκτρικού μέσα από τις γνωστές σχέσεις του Maxwell και γι'αυτό δεν θα αναφερθούμε άλλο σε αυτό.

Όταν το κύμα διασχίζει την διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων τότε θα πρέπει να ισχύουν οι γνωστές συνθήκες της ισότητας των εφαπτωμενικών(t) και κάθετων συνιστωσών(n):

$$H_{1t} = H_{2t}$$

$$E_{1t} = E_{2t}$$

$$\epsilon_1 E_{1n} = \epsilon_2 E_{2n}$$

$$\mu_1 H_{1n} = \mu_2 H_{2n}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Κατασκευή και Κατηγοριοποίηση μεταϋλικών

4.1 Τα αριστερόστροφα υλικά έχουν αρνητικό δείκτη διάθλασης.

Την περασμένη χρονιά οι φυσικοί στο Πανεπιστήμιο San Diego της Καλιφόρνιας οι οποίοι παρήγαγαν μια νέα κατηγορία συνθετικών υλικών πίστεψαν ότι θα αντιστρέψουν την συμπεριφορά πολλών θεμελιωδών ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων που σχετίζονται με αυτά τα υλικά και τώρα έχουν επιτέλους πειραματικές αποδείξεις για τις πρώτες από αυτές τις προσδοκώμενες αντιστροφές. Ανακάλυψαν δηλαδή ένα απίστευτο χαρακτηριστικό του νέου υλικού, που έχει αναπτυχθεί από τους αμερικανούς φυσικούς, Sheldon Schultz και των συναδέλφων του. Να έχει δηλαδή αρνητικό δείκτη διαθλάσεως, που είναι μια ιδιορρυθμία των θεμελιωδών κανόνων της οπτικής. [16]

Τον τρόπο διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μέσα στα συνθετικά αυτά υλικά που δεν είχε ποτέ παρατηρηθεί στο παρελθόν είναι συμπεράσματα των πειραμάτων τους. Το επίτευγμα αυτό δεν είναι μόνο ένα επιστημονικό αξιοπερίεργο. Τα νέα υλικά θα μπορούσαν να αποδειχτούν χρήσιμα στην ανάπτυξη νέων κεραιών και άλλων ηλεκτρομαγνητικών συσκευών. Μπορεί επίσης να καταστήσει δυνατή την κατασκευή "τέλειων φακών" ικανών να εστιάζουν το φως και άλλες ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες με ακρίβεια που δεν επιτρέπουν οι συμβατικοί φακοί.

Οι επιστήμονες διαβίβασαν στα πειράματά τους μικροκύματα με συχνότητες όμοιες με αυτές που χρησιμοποιεί η αστυνομία στα radar της μέσα από ένα μικροσκοπικό δείγμα φτιαγμένο από το συνθετικό υλικό τους. Ότι ανακάλυψαν είναι αυτό ακριβώς που είχαν προβλέψει πριν ένα χρόνο. Ότι δηλαδή τα μικροκύματα εξήλθαν από το υλικό στην αντίθετη κατεύθυνση από αυτή που προβλέπεται από το νόμο του Snell. Ο νόμος του Snell περιγράφει τη γωνία διάθλασης που παρατηρείται καθώς το φως επιβραδύνεται όταν εισέρχεται σε υλικά όπως το νερό, το γυαλί και άλλα συνηθισμένα διαφανή υλικά. [16]

Αυτά τα πειράματα επιβεβαιώνουν προηγούμενες θεωρητικές προβλέψεις, ότι μια νέα κατηγορία υλικών μπορεί να προκαλέσει την εκτροπή των μικροκυμάτων σε κατεύθυνση αντίθετη απ' αυτή που προκαλούν τα συνηθισμένα υλικά, λέει ο Sheldon Schultz, καθηγητής φυσικής στο UCSD. Ο Schultz μαζί με τους David R. Smith και Richard A. Shelby είναι οι επιστήμονες που ανέφεραν την παρατήρηση. Αν το φαινόμενο αυτό αποδειχτεί δυνατόν να συμβεί και με τις οπτικές συχνότητες, τα υλικά αυτά θα έχουν την παράξενη ιδιότητα, μια μικρή φωτεινή

αναλαμπή από τη μια πλευρά ενός τέτοιου πλακιδίου να εστιάζεται σ' ένα σημείο από την άλλη πλευρά. [16]

Με τα συνηθισμένα διαφανή υλικά δεν υπάρχει κανένας τρόπος να επιτύχουμε κάτι τέτοιο. Οι φυσικοί μετρούν την εκτροπή του φωτός από ένα υλικό με τον λεγόμενο δείκτη διάθλασης του υλικού. Όσο πιο μεγάλη τιμή έχει ο δείκτης διάθλασης τόσο πιο πολύ επιβραδύνεται το φως και εκτρέπεται όταν εισέρχεται από ένα υλικό σε ένα άλλο. Ο αέρας για παράδειγμα έχει δείκτη διάθλασης 1,0 για το φως, το νερό έχει 1,3 και το γυαλί περίπου 1,5. Αυτό σημαίνει ότι μια ακτίνα φωτός κάμπτεται κατά κάποια γωνία όταν εισέρχεται στο νερό από τον αέρα και κάμπτεται λίγο περισσότερο όταν εισέρχεται στο γυαλί. Το φαινόμενο αυτό σε συνδυασμό με την καμπύλη επιφάνεια του γυαλιού επιτρέπει στους φακούς να εστιάζουν το φως.

Όταν η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία περνάει μέσα από τα συνηθισμένα υλικά τα οποία λέμε ότι παρουσιάζουν θετικό δείκτη διάθλασης εκτρέπεται πάντα προς την ίδια κατεύθυνση. Πρόκειται για την πρώτη επίδειξη υλικών με αρνητικό δείκτη διάθλασης. Ο λόγος για τον οποίο υλικά με αρνητικό δείκτη διάθλασης μπορούν να δώσουν τέλειους φακούς είναι ότι δεν παρουσιάζουν σφάλματα περίθλασης. Το σφάλμα περίθλασης εμποδίζει ένα συμβατικό φακό να συγκεντρώσει το φως μιας σημειακής πηγής σε εστία διαμέτρου μικρότερης από το ήμισυ του μήκους κύματος που χρησιμοποιείται.

Το γεγονός ότι το συνθετικό υλικό που αναπτύχθηκε από την ομάδα στο UCSD δεν μπορεί να εστιάσει το ορατό φως, δεν αποτελεί ουσιαστικό εμπόδιο και ελπίζεται ότι σύντομα θα παρακαμφθεί. Η συμπεριφορά των υλικών αυτών δεν παραβιάζει κάποιο νόμο της φυσικής. Απλά δείχνει μια αντιστροφή ενός από τους δεξιόστροφους κανόνες της φυσικής ο οποίος περιγράφει τη σχέση μεταξύ του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου της ακτινοβολίας και της κατεύθυνσης της ταχύτητας διάδοσής της.

Το φαινόμενο Ντόπλερ είναι μια άλλη ιδιότητα την οποία προβλέπεται ότι αναστρέφει το νέο συνθετικό υλικό. Σύμφωνα με αυτό η συχνότητα του φωτός μιας κινούμενης πηγής μεγαλώνει καθώς η πηγή πλησιάζει τον παρατηρητή και μειώνεται καθώς απομακρύνεται από αυτόν. Σύμφωνα με τις εξισώσεις του Maxwell που περιγράφουν τη σχέση μεταξύ του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου, μια μικροκυματική ακτινοβολία ή το φως μιας κινούμενης πηγής θα δείχνει το αντίθετο από το συνηθισμένο αποτέλεσμα μέσα σε ένα τέτοιο υλικό. Ένας παρατηρητής δηλαδή θα μετράει μικρότερη συχνότητα καθώς η πηγή πλησιάζει και μεγαλύτερη καθώς η πηγή απομακρύνεται από αυτόν. [16]

4.2 Στοιχεία κατασκευής των μεταυλικών

Ως τεχνητά υλικά μπορούν να χαρακτηριστούν τα μεταυλικά που έχουν κατασκευαστεί για να παρέχουν ιδιότητες οι οποίες δεν μπορεί να είναι άμεσα διαθέσιμες στη φύση. Αυτά τα υλικά αποκτούν συνήθως τις ιδιότητες τους από τη δομή και όχι από τη σύνθεση, με τη συμμετοχή των μικρών ανομοιογενειών,

ώστε να παρουσιάζουν αποτελεσματική μακροσκοπική συμπεριφορά. [8]

Με τον αρνητικό δείκτη διάθλασης, όπου έχει ασχοληθεί η πρωτογενής έρευνα στα μεταϋλικά, φαίνεται να έχει καταστεί δυνατή η δημιουργία υπερφακών, που μπορούν να έχουν χωρική ανάλυση μικρότερη από το μήκος κύματος. Σε κάποιες εργασίες, έχει αποδειχτεί ότι επιτυγχάνεται ένα είδος «αορατότητας» τουλάχιστον πάνω σε μια στενή περιοχή μηκών κύματος με υλικά βαθμιαίου δείκτη (GRIN). Αν και τα πρώτα μεταϋλικά ήταν τα ηλεκτρομαγνητικά, τα ακουστικά και τα σεισμικά μεταϋλικά αποτελούν επίσης τομείς της ενεργού έρευνας.

Είναι ποικίλες οι πιθανές εφαρμογές των μεταϋλικών και περιλαμβάνουν εφαρμογές αεροδιαστημικής, αισθητήρες ανίχνευσης και παρακολούθησης υποδομών, έξυπνες συσκευές διαχείρισης της ηλιακής ενέργειας, στη δημόσια ασφάλεια, σε κεραιές σφαιρικού θόλου, σε υψηλής συχνότητας επικοινωνία στο πεδίο μάχης, σε φακούς και σε κεραιές υψηλής απολαβής, βελτιωμένους αισθητήρες υπερήχων, ακόμα και σε θωράκιση κατασκευών από σεισμούς.

Είναι διεπιστημονική η έρευνα σε μεταϋλικά και περιλαμβάνει τομείς όπως η ηλεκτρική εφαρμοσμένη μηχανική, ο ηλεκτρομαγνητισμός, η φυσική στερεάς κατάστασης, τα μικροκύματα, η κατασκευή κεραιών, η οπτοηλεκτρονική, η κλασική οπτική, οι επιστήμες των υλικών, η μηχανική ημιαγωγών, οι νανοεπιστήμες και άλλες. [8]

4.3 Κατηγορίες μεταϋλικών

Όπως προβλέπει ο σχεδιαστής, τα ηλεκτρομαγνητικά μεταϋλικά μπορούν να συντεθούν με την ενσωμάτωση τεχνητά κατασκευασμένων προσθηκών (όπως μεγάλης κλίμακας τεχνητά άτομα) σε καθορισμένο μέσο υποδοχής ή σε μια επιφάνεια υποδοχής με ένα μεγάλο σύνολο των διαθέσιμων, ανεξάρτητων παραμέτρων. Αυτές οι παράμετροι καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο το μεταϋλικό πρέπει να κατασκευαστεί. Περιλαμβάνουν τις ιδιότητες των υλικών υποδοχής, καθώς και το σχήμα, το μέγεθος και τη σύνθεση των προσθηκών. Άλλες παράμετροι που εξετάζονται είναι η πυκνότητα, η διαρρύθμιση και η ευθυγράμμιση αυτών των προσθηκών. Με τον καθορισμό όλων αυτών των παραμέτρων, κατά τη διάρκεια της κατασκευής, ένα μεταϋλικό είναι σχεδιασμένο για συγκεκριμένες λειτουργίες ηλεκτρομαγνητικής απόκρισης. Επιπλέον, οι λειτουργίες αυτές δεν περιλαμβάνονται στην απόκριση των επιμέρους συστατικών του. Όλες οι παράμετροι σχεδιασμού μπορεί να διαδραματίσουν καιρό ρόλο στην τελική έκβαση της διαδικασίας σύνθεσης. Μεταξύ αυτών η γεωμετρία των προσθηκών είναι μια παράμετρος που μπορεί να παρέχει τις νέες δυνατότητες για την χρήση του μετα-υλικού. Τα μεταϋλικά χωρίζονται σε διαφορετικές επιμέρους κατηγορίες, ως εξής:

4.3.1 Ηλεκτρομαγνητικά μεταϋλικά

Ειδικά στην οπτική και στην φωτονική τα μεταϋλικά έχουν εξελιχθεί σε ένα νέο

πεδίο εντός της φυσικής και του ηλεκτρομαγνητισμού.

Δείχνουν προοπτική για οπτικές και μικροκυματικές εφαρμογές, όπως τα νέα είδη steerers δοκού, διαμορφωτές, band-pass φίλτρα, φακοί, μικροκυματικούς συζεύκτες και κεραίες σφαιρικού θόλου. Τα μεταυλικά αποτελούνται από περιοδικές δομές.

Ένα ηλεκτρονικό μεταυλικό επηρεάζει τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, έχοντας δομικά χαρακτηριστικά μικρότερα από το μήκος κύματος του φωτός. Επιπλέον, εάν ένα μεταυλικό συμπεριφέρεται σαν ένα ομοιογενές υλικό, τότε περιγράφεται από ένα δείκτη διάθλασης. Τα χαρακτηριστικά του πρέπει να είναι πολύ μικρότερα από το μήκος κύματος. Μέχρι σήμερα, υποκυματικές (subwavelength) κατασκευές έχουν δείξει μόνο μερικά αμφίβολα αποτελέσματα σε ορατά μήκη κύματος.

Για την ακτινοβολία μικροκυμάτων, οι δομές πρέπει να είναι της τάξης λίγων εκατοστών. Τα μεταυλικά μικροκυματικών συχνοτήτων είναι συνήθως συνθετικά, κατασκευάζονται ως συστοιχίες από ηλεκτρικώς αγωγίμα στοιχεία (όπως βρόχους καλωδίων), τα οποία διαθέτουν κατάλληλα επαγωγικά και χωρητικά χαρακτηριστικά. Αυτά είναι γνωστά ως splitring αντηχεία. [12]

Μια άλλη κατασκευή που μπορεί να παρουσιάζει υποκυματικά ($p \ll \lambda_g$) χαρακτηριστικά είναι οι επιφάνειες επιλεκτικών συχνοτήτων (FSS), γνωστές ως Τεχνητοί Μαγνητικοί Αγωγοί (AMC) ή, εναλλακτικά ονομάζονται Επιφάνειες Υψηλών Αντιστάσεων (HIS). Αυτά έχουν, επίσης, επαγωγικά και χωρητικά χαρακτηριστικά, τα οποία συνδέονται άμεσα με την υποκυματική δομή τους.

Οι φωτονικοί κρύσταλλοι (Photonic Crystals- PCs) και οι επιφάνειες επιλεκτικών συχνοτήτων όπως οι σχάρες διάθλασης, οι διηλεκτρικοί καθρέπτες, και οι οπτικές επικαλύψεις έχουν εμφανείς ομοιότητες με τα υποκυματικά δομημένα μεταυλικά. Ωστόσο, αυτές συνήθως θεωρούνται διαφορετικές από τις υποκυματικές δομές, λόγω της χαρακτηριστικής τους δομής για τα μήκη κύματος στα οποία λειτουργούν, και συνεπώς δεν μπορεί να υπάρξει προσέγγιση τους σαν ομοιογενή υλικά.

Ωστόσο, δομές μεταυλικών όπως οι φωτονικοί κρύσταλλοι είναι αποτελεσματικές για το ορατό φάσμα φωτός. Το μέσο του ορατού φάσματος έχει μήκος κύματος περίπου 560 nm, οι δομές PC είναι γενικά το ήμισυ αυτού του μεγέθους ή και μικρότερες, δηλαδή είναι < 280 nm. [12]

Ο W.E. Kock ανέπτυξε υλικά τα οποία είχαν παρόμοια χαρακτηριστικά με τα μεταυλικά ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του 1940. Τέτοιου είδους υλικά, περιγράφηκαν για πρώτη φορά θεωρητικά από τον Victor Veselago το 1967. Λίγο περισσότερο από 30 χρόνια αργότερα, το 2000, ο Smith θα αναφερθεί στην πειραματική επίδειξη της λειτουργίας των ηλεκτρομαγνητικών μεταυλικών με τη χρήση μιας συστοιχίας περιοδικών, split-ring αντηχείων καθώς και λεπτών δομών σύρματος. Αργότερα, προέκυψε μια μέθοδος που προβλέπεται να πραγματοποιήσει αριστερόστροφα μεταυλικά, με τεχνητά ομαδοποιημένα μοντέλα στοιχείων που φορτώνονται σε γραμμές μεταφοράς της τεχνολογίας των microstrip.

Σε συχνοτήτες μικροκυμάτων, ο πρώτος πραγματικός μανδύας αορατότητας

(cloaking) πραγματοποιήθηκε το 2006. Ωστόσο, μόνο ένα πολύ μικρό αντικείμενο ήταν ατελώς αόρατο.

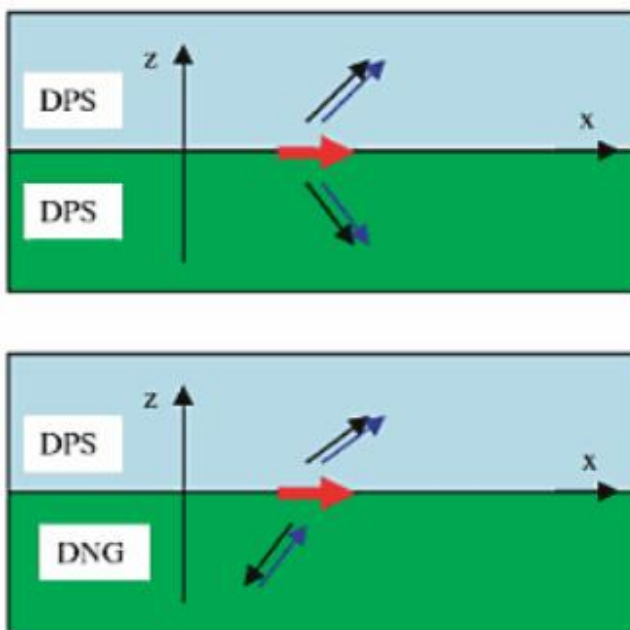
Ένας ερευνητής ανέφερε ότι για να υλοποιηθούν οι εφαρμογές των μεταυλικών, πολλοί στόχοι πρέπει να επιτευχθούν: όπως η μείωση των απωλειών ενέργειας, η οποία αποτελεί σημαντικό περιοριστικό παράγοντα, και η διατήρηση της ανάπτυξης τρισδιάστατων ισότροπων υλικών, αντί των επίπεδων δομών και στη συνέχεια η εξεύρεση τρόπων για την μαζική παραγωγή τους. [12]

ι) Διπλά αρνητικά μεταυλικά

Τα διπλά αρνητικά μεταυλικά (DNG) είναι επίσης γνωστά και ως μεταυλικά με αρνητικό δείκτη (NIM). Άλλες ορολογίες για τα DNG είναι "αριστερόστροφα μέσα", "μέσα με αρνητικό διαθλαστικό δείκτη", "μέσα ανάστροφου κύματος", κ.λ.π. Στα DNG, τόσο η επιτρεπτικότητα όσο και η διαπερατότητα είναι αρνητικές και ως αποτέλεσμα έχουν αρνητικό δείκτη διάθλασης.

Σε οπτικά υλικά, οι δύο παράμετροι ϵ και μ είναι θετικές, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την διάδοση του κύματος προς τα εμπρός. Αν τα ϵ και μ είναι αρνητικά, παράγεται ένα προς τα πίσω κύμα. Αν η ϵ και η μ έχουν διαφορετικά πρόσημα, αυτό οδηγεί σε μη διάδοση κυμάτων. [12]

Ο Veselago δημοσίευσε, το 1968, μια εργασία περιγράφοντας διάδοση κυμάτων σε ένα υλικό του οποίου η διηλεκτρική σταθερά και η διαπερατότητα υποτίθεται ότι είναι ταυτόχρονα αρνητικές, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1. Σε ένα τέτοιο υλικό, έδειξε ότι η ταχύτητα φάσης θα είναι αντιπαράλληλη προς την κατεύθυνση του διανύσματος Poynting. Αυτό είναι αντίθετο με την κυματική διάδοση στα φυσικά υλικά που υπάρχουν. Κατά τα έτη 2000 και 2001, δημοσιεύθηκαν εργασίες σχετικά με την πρώτη δημιουργία τεχνητού υλικού που έχει αρνητικό δείκτη διάθλασης.



Εικόνα 4.1: Διάδοση κυμάτων σε ένα υλικό του οποίου η διηλεκτρική σταθερά και η διαπερατότητα υποτίθεται ότι είναι ταυτόχρονα αρνητικές [29]

Μελέτες έχουν προτείνει εφαρμογές για αρνητικό δείκτη διάθλασης υλικών. Οι εφαρμογές αυτές αφορούν αντιστάθμιση φάσης με ηλεκτρικά μικρά αντηχεία, αρνητικές γωνίες διάθλασης, υποκυματικούς κυματοδηγούς, κεραία ανάστροφων κυμάτων, ακτινοβολία Cherenkov, φωτόνιο σήραγγας, και ενίσχυση ηλεκτρικά μικρών κεραίων. Η έννοια της συνεχούς διέγερσης κύματος αποτελεί βασική συνιστώσα των μελετών αυτών για την απόκτηση αρνητικού δείκτη διάθλασης χρησιμοποιώντας μέσα DNG. Τα DNG μεταϋλικά είναι εκ φύσεως υλικά διασποράς, έτσι ώστε η επιτρεπτότητα τους και η διαπερατότητα τους να εξαρτώνται από τη συχνότητα του κύματος. Μέχρι σήμερα, τα μέσα DNGs κατασκευάζονται μόνο τεχνητά .

Αξίζει να σημειωθεί ότι και τα παθητικά μονά αρνητικά (SNG) μεταϋλικά είναι από τη φύση τους μέσα διασποράς. Ως εκ τούτου, για τα παθητικά μεταϋλικά, τα πραγματικά στοιχεία των παραμέτρων του υλικού είναι συχνά αρνητικά μόνο για μια ορισμένη ζώνη συχνοτήτων και, οι τιμές τους μπορούν να μετακινούνται ή και να διαφέρουν σημαντικά, με τις αλλαγές στη συχνότητα. Ως εκ τούτου, θα πρέπει, κατά κανόνα, να λαμβάνεται υπόψη η εξάρτηση από τη συχνότητα αυτών των παραμέτρων του υλικού.

ii) Μονά αρνητικά μεταϋλικά

Τα μονά αρνητικά μεταϋλικά (SNG) έχουν αρνητική είτε την επιτρεπτότητα είτε τη διαπερατότητα, αλλά όχι και τις δύο μαζί. Είναι τα ENG μεταϋλικά και τα MNG μεταϋλικά τα οποία αναλύονται κατωτέρω. Ενδιαφέροντα πειράματα διεξήχθησαν από τον συνδυασμό με δύο στρώματα SNG σε ένα μεταϋλικό. Αυτά δημιουργούν πράγματι μια άλλη μορφή DNG μεταϋλικού. Μια πλάκα του υλικού ENG και μια πλάκα υλικού MNG έχουν ενωθεί για τη διεξαγωγή πειραμάτων ανάκλασης κύματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την έκθεση του σε ιδιότητες, όπως, το ανώμαλο tunneling, τη διαφάνεια και τη μηδενική ανάκλαση. Η επιτρεπτότητα τους, η διαπερατότητα και ο δείκτης διάθλασης τους αλλάζουν με τις αλλαγές στη συχνότητα .

- Εψιλον αρνητικά μέσα (ENG) η ϵ είναι αρνητική, ενώ η μ είναι θετική. Πολλές μορφές πλάσματος παρουσιάζουν αυτό το χαρακτηριστικό. Για παράδειγμα, τα ευγενή μέταλλα όπως χρυσός ή ασήμι θα παρουσιάσουν αυτό το χαρακτηριστικό στο υπέρυθρο και στο ορατό φάσμα.

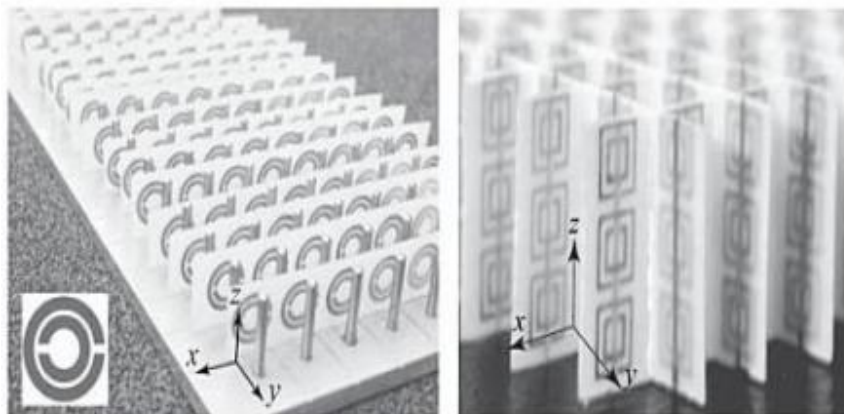
- Μι αρνητικά (MNG) η ϵ είναι θετική, ενώ η μ είναι αρνητική. Ένα υλικό, το οποίο ονομάζεται γυροτροπικό ή γυρομαγνητικό παρουσιάζει αυτά τα χαρακτηριστικά. Ένα γυροτροπικό υλικό είναι ένα μέσο που έχει αλλάξει από την παρουσία ενός στατικού μαγνητικού πεδίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μαγνητο-οπτική επίδραση. Η μαγνητο-οπτική επίδραση είναι μια σειρά από φαινόμενα στα οποία ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδίδεται μέσα από ένα μέσο που έχει αλλάξει από

την παρουσία ενός στατικού μαγνητικού πεδίου. Σε ένα τέτοιο υλικό, οι ελλειπτικές πολώσεις περιστρεφόμενες αριστερά και δεξιά, μπορεί να διαδοθούν σε διαφορετικές ταχύτητες, κάτι που οδηγεί σε μια σειρά σημαντικών φαινομένων. Όταν το φως μεταδίδεται μέσω ενός στρώματος μαγνητο-οπτικών υλικών, το αποτέλεσμα ονομάζεται επίδραση Faraday: το επίπεδο της πόλωσης μπορεί να περιστραφεί, σχηματίζοντας ένα περιστροφέα Faraday. Το αποτέλεσμα της ανάκλασης από ένα μαγνητο-οπτικό υλικό είναι γνωστό ως μαγνητο-οπτικό φαινόμενο Kerr (δεν πρέπει να συγχέεται με το φαινόμενο Kerr). Δύο γυροτροπικά υλικά με αντίστροφες κατευθύνσεις περιστροφής των δύο βασικών πολώσεων ονομάζονται οπτικώς ισομερή. [12]

iii) Μεταυλικά ηλεκτρομαγνητικού διακένου ζώνης (EBG)

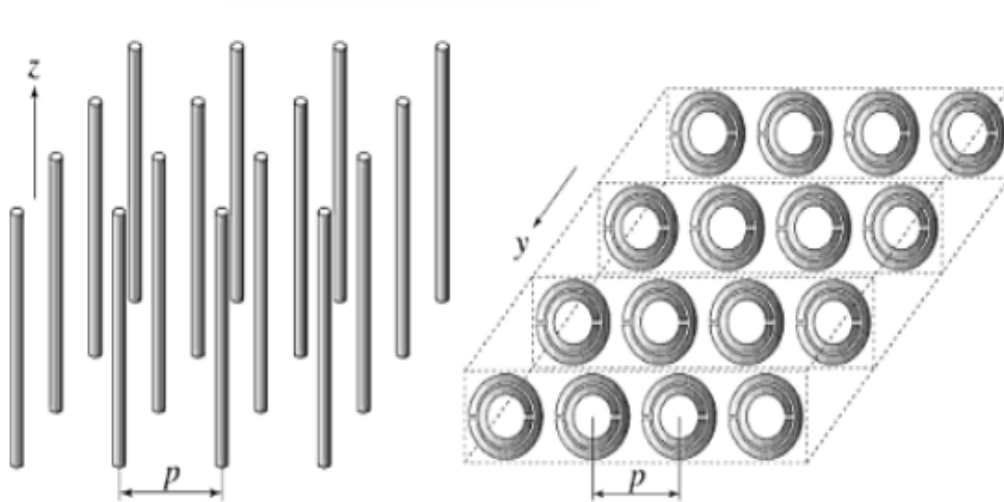
Τα μεταυλικά EBG (εικόνα 4.2) ελέγχουν τη διάδοση του φωτός. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με μια κατηγορία μεταυλικών που είναι γνωστή ως φωτονικοί κρύσταλλοι (PC), ή μια άλλη κατηγορία μεταυλικών γνωστή ως αριστερόστροφα υλικά (LHM) Και τα δύο είναι μια νέα κατηγορία τεχνητών μηχανικών κατασκευών, και επιτυγχάνουν τη χειραγώγηση της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (φως). Οι PC μπορεί να απαγορεύσουν εντελώς τη διάδοση του φωτός. Ωστόσο, τόσο οι PC όσο και τα LHM είναι σε θέση να του επιτρέπουν να διαδίδεται σε ορισμένες κατευθύνσεις, και μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να έχουν ηλεκτρομαγνητικά φασματικά κενά στην επιθυμητή συχνότητα.

Εικόνα 4.2:
Μεταυλικά ηλεκτρομαγνητικού διακένου ζώνης [32]



Επιπλέον, μεταυλικά όπως οι φωτονικοί κρύσταλλοι της εικόνας 4.3 είναι σύνθετα, περιοδικά υλικά και θεωρούνται ηλεκτρομαγνητικά υλικά EBG. Ωστόσο, ένας PC πρώτα διακρίνεται από τις μικρότερες του μήκους κύματος δομές του, όπως τα συντονίσιμα μεταυλικά, επειδή το PC αντλεί τις ιδιότητές του από τα χαρακτηριστικά φασματικά κενά του. Επιπλέον, ο PC λειτουργεί στο μήκος

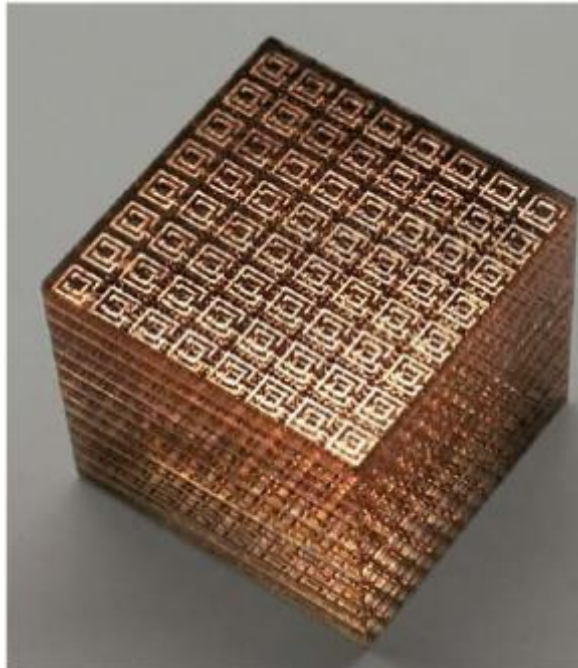
κύματος του φωτός, ενώ άλλα μεταύλικά λειτουργούν σε μικρότερα μήκη από το μήκος κύματος. Επιπλέον παρουσιάζεται σύνθετη ανάκλαση των φωτονικών κρυστάλλων με λειτουργίες διάθλασης του φωτός. Αντίθετα, μια διηλεκτρική σταθερά και διαπερατότητα καθορίζει τα μεταύλικά (επίσης μια σύνθετη απόκριση), τα οποία προέρχονται από μια δομή κάτω του μήκους κύματος του φωτός και η περίθλαση τους πρέπει να καταργηθεί . [12]



Εικόνα 4.3: Φωτονικοί κρύσταλλοι [32]

Ο PC είναι επίσης ένα υλικό στο οποίο περιοδικές προσθήκες αναστέλλουν την κυματική διάδοση λόγω καταστροφικής παρέμβασης από σκέδαση και από περιοδική επανάληψη. Η φωτονική bandgap ιδιότητα των φωτονικών κρυστάλλων τους καθιστά το ηλεκτρομαγνητικό ανάλογο των ηλεκτρονικών ημιαγωγικών κρυστάλλων .

Η προβλεπόμενη παραγωγή υλικού του EBG έχει θέσει ως στόχο τη δημιουργία περιοδικών, διηλεκτρικών δομών, με χαμηλές απώλειες και υψηλής ποιότητας. Ένα EBG, όπως αυτό της εικόνας 4.4, επηρεάζει τις ιδιότητες των φωτονίων με τον ίδιο τρόπο που τα υλικά των ημιαγωγών επηρεάζουν τις ιδιότητες των ηλεκτρονίων. Έτσι, ο κρύσταλλος είναι το τέλειο υλικό EBG, επειδή δεν επιτρέπει τη διάδοση του φωτός .



Εικόνα 4.4: Μεταϋλικό ηλεκτρομαγνητικού διακένου ζώνης [31]

Τα μεταϋλικά ηλεκτρομαγνητικού bandgap (EBG) έχουν σχεδιαστεί για να αποτρέπουν τη διάδοση μιας ζώνης συχνοτήτων, για ορισμένες γωνίες άφιξης και πόλωσης. Με EBG υλικά νέες μέθοδοι χρησιμοποιούν τις ιδιότητες των διαφόρων διηλεκτρικών για να επιτευχθεί καλύτερη απόδοση. Μια ποικιλία από σχήματα και δομές έχουν προταθεί για την κατασκευή των ειδικών EBG μεταϋλικών. Ωστόσο, στην πράξη είναι αδύνατον να οικοδομήσουμε μια άψογη συσκευή EBG. Παράγοντες όπως η εξέλιξη των ιδεών, η έρευνα, οι δοκιμές και η ανάπτυξη, σε συνδυασμό με τις προοπτικές σημαντικών τεχνολογικών λύσεων, έχουν οδηγήσει την ανάπτυξη της εφαρμοσμένης επιστήμης EBG. [12]

Η εμπορική παραγωγή των διηλεκτρικών διατάξεων EBG έχει καθυστερήσει, επειδή τα εμπορικά πλεονεκτήματα δεν είναι άμεσα εμφανή. Ωστόσο, οι νεοσύστατες εταιρείες μέχρι τώρα ασχολούνται αποκλειστικά με την αξιοποίηση μεταϋλικών EBG. Αυτά τα μεταϋλικά έχουν κατασκευαστεί για συχνότητες που κυμαίνονται από λίγα gigahertz (GHz), έως και αρκετά terahertz (THz). Με άλλα λόγια, οι εφαρμογές έχουν επιτύχει συνθετικά υλικά για ραδιοσυχνότητες, μικροκυματικές συχνότητες ακόμη και συχνότητες ως τα μέσα της υπέρυθρης περιοχής.

Ένα EBG είναι το αποτέλεσμα ενός μεταϋλικού που λειτουργεί σε καθεστώς όπου η περίοδος είναι ένα σημαντικό ποσοστό του μήκους κύματος.

4.3.2 Δισισοτροπικά και δισανισοτροπικά μεταύλικά

Τα Διπλοθετικά μέσα (DPS) υπάρχουν στη φύση, σαν φυσικά διηλεκτρικά. Η διηλεκτρική σταθερά και η μαγνητική διαπερατότητα τους είναι ταυτόχρονα θετικές και η διάδοση κυμάτων σ' αυτά γίνεται στην κατεύθυνση προς τα εμπρός. Έχουν παραχθεί τεχνητά υλικά τα οποία έχουν DPS, ENG, και MNG ιδιότητες.

Η κατηγοριοποίηση των μεταύλικών σε μονά ή διπλά αρνητικά, ή διπλά θετικά, συνήθως γίνεται με βάση την υπόθεση ότι το μεταύλικό έχει ανεξάρτητες ηλεκτρικές και μαγνητικές αποκρίσεις που περιγράφονται από τις παραμέτρους ϵ και μ . Ωστόσο, σε πολλά παραδείγματα ηλεκτρομαγνητικών μεταύλικών, το ηλεκτρικό πεδίο προκαλεί μαγνητική πόλωση, και το μαγνητικό πεδίο προκαλεί ηλεκτρική πόλωση, δηλαδή, μαγνητο-ηλεκτρική ζεύξη. Τέτοια μέσα ονομάζονται ως δισισοτροπικά. Μέσα τα οποία εμφανίζουν μαγνητο-ηλεκτρικές ζεύξεις, και τα οποία είναι ανισότροπα (όπως συμβαίνει σε κοινά μεταύλικά) αναφέρονται ως δισανισοτροπικά. [12]

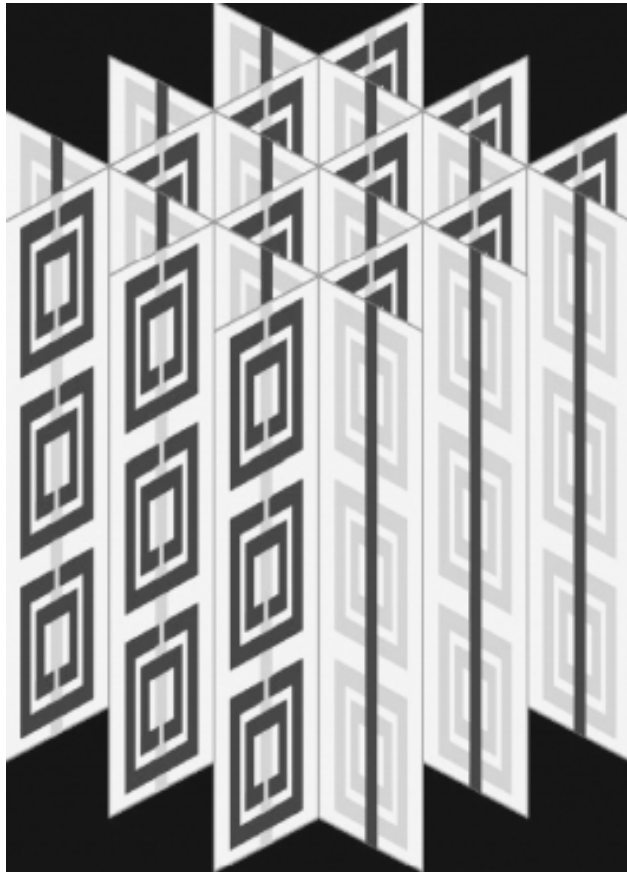
Εγγενείς στην μαγνητοηλεκτρική ζεύξη των διμερών ισοτροπικών μέσων είναι οι τέσσερις παράμετροι υλικού που αλληλεπιδρούν με την ηλεκτρική (E) και τη μαγνητική (H) ένταση των πεδίων, καθώς και την ηλεκτρική (D) και τη μαγνητική (B) πυκνότητα ροής. Αυτές οι τέσσερις παράμετροι υλικού είναι οι ϵ , μ , κ και χ δηλαδή η επιτρεπτικότητα, η διαπερατότητα, η δύναμη της χειροτροπίας (chiral force), και η παράμετρος Tellegen, αντίστοιχα. Επιπλέον, σε αυτό το είδος των μέσων, οι παράμετροι υλικού δεν μεταβάλλονται με τις αλλαγές των μετρήσεων κατά μήκος ενός περιστρεφόμενου συστήματος συντεταγμένων. Γι' αυτό χαρακτηρίζονται ως αμετάβλητα ή μονοδιάστατα.

Οι εγγενείς μαγνητοηλεκτρικές παράμετροι, κ και χ , επηρεάζουν τη φάση του κύματος. Επιπλέον, η επίδραση της παραμέτρου χειροτροπίας επηρεάζει τη διάσπαση του δείκτη διάθλασης. Σε ισοτροπικό μέσο αυτό έχει ως αποτέλεσμα διάδοση κυμάτων μόνο αν ϵ και μ έχουν το ίδιο πρόσημο. Σε δισισοτροπικά μέσα με το χ να θεωρείται μηδενικό, και το κ να έχει μη μηδενική τιμή, μπορούν να εμφανιστούν διαφορετικά αποτελέσματα. Τόσο το προς τα πίσω το κύμα όσο και ένα κύμα προς τα εμπρός μπορούν να εμφανιστούν. Εναλλακτικά, μπορούν να εμφανιστούν δύο κύματα προς τα εμπρός ή δύο πίσω κύματα, ανάλογα με τη δύναμη της παραμέτρου χειροτροπίας. [12]

4.3.3 Αριστερόστροφα υλικά split-ring-αντηχείου/καλωδίου

Στην πρωτοποριακή εργασία του ο Veselago απέδειξε ότι ένα υποθετικό μέσο με αρνητική διηλεκτρική σταθερά και διαπερατότητα είναι συμβατό με τις εξισώσεις του Maxwell και προσπάθησε να περιγράψει τις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες του εν λόγω μέσου. Για παράδειγμα, επεσήμανε ότι σε αυτά τα μέσα το ηλεκτρικό πεδίο E, το μαγνητικό πεδίο H και ο φορέας διάδοσης k θα ακολουθήσει έναν αριστερόστροφο κανόνα (εξ ου και η ονομασία των συγκεκριμένων μέσων σαν «αριστερόστροφα»), καθώς και ότι η φάση και η

ταχύτητα ομάδας θα πρέπει να είναι αντι-παράλληλα (λόγω αρνητικού δείκτη διάθλασης). Ωστόσο ο Veselago δεν προέβλεψε με βεβαιότητα τυχόν ειδικές δομές που θα εμφανίζουν αυτές τις ιδιότητες. Αναγνώρισε ότι το πλάσμα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση αρνητικής επιτρεπτότητας και θεώρησε ότι κάποιο είδος μαγνητικού πλάσματος (που δεν είναι διαθέσιμο φυσικά) απαιτείται για την απόκτηση αρνητικής διαπερατότητας. Η λύση στο πρόβλημα της υλοποίησης ενός τέτοιου μέσου αρνητικού διαθλαστικού δείκτη (NRI) δόθηκε τρεις δεκαετίες αργότερα από τους Shelby, Smith και Schultz. Η δομή που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από μια σειρά από ταινίες καλωδίων για να συνθέσει την αρνητική επιτρεπτότητα και split-ring αντηχεία (χωρητικά φορτισμένοι βρόχοι) για να δημιουργήσει την αρνητική διαπερατότητα, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.5. [1]



Εικόνα 4.5: Σύνθεση αρνητικής επιτρεπτότητας και split-ring αντηχεία με χρήση μιας σειράς από ταινίες καλωδίων [37]

Η χρήση ενός πίνακα από επαγωγικά καλώδια για να συνθέσουν τεχνητά διηλεκτρικά, με συμπεριφορά που μοιάζει με το πλάσμα, αναφέρθηκαν στο παρελθόν από τον Rotman (αν και ο Rotman ποτέ δεν διερεύνησε την περιοχή με $\epsilon < 0$) και ανεξάρτητα από τον Pendry. Από την άλλη πλευρά, η χρήση των splitting αντηχείων για τη σύνθεση μέσω αρνητικής διαπερατότητας έχει προταθεί από τον Pendry. Παρ' όλα αυτά, πρέπει να σημειωθεί ότι τα μαγνητικά σωματίδια που κατασκευάζονται από χωρητικά φορτισμένους βρόχους προτάθηκαν επίσης από τον Sergei Schelkunoff το 1952. Ωστόσο ο Schelkunoff πρότεινε αυτά τα σωματίδια, ως μέσο σύνθεσης τιμών υψηλής διαπερατότητας (και όχι αρνητικές), αλλά αναγνώρισε ότι τέτοια, υψηλής διαπερατότητας τεχνητά διηλεκτρικά, θα παρουσίαζαν μεγάλη διασπορά. [1]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Εφαρμογές και Τεχνικές μεταϋλικών

5.1 Εφαρμογές και Οπτική

Τα υλικά έχουν αρκετές εφαρμογές. Εμείς θ' ασχοληθούμε περισσότερο με τις εφαρμογές που έχουν να κάνουν με την Οπτική. Αυτές είναι:

5.1.1 “Εξωτικά” Υλικά

Πίσω στο 1967, ο Veselago αναφέρθηκε, στην κλασική πλέον εργασία του, στις εξωτικές ιδιότητες των μεταϋλικών 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 μεταϋλικών. Το 2000, ο Pendry είχε αναφερθεί στο φαινόμενο της «υπερεστίασης», 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 υπερανάλυση με LH-πλάκα, αν και μπορεί να είναι δισδιάστατη, δεν μπορεί να υπερεστιάσει στην ενέργεια σε τρισδιάστατο χώρο. Μια ανάλυση του φακού του Pendry παρέχεται από τον Marqués, 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 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. [36]

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 μεταϋλικών,. Ωστόσο, οι δομές αυτές είναι γενικά ηλεκτρομαγνητικά λεπτά οπτικά στρώματα με προσθήκες μεταϋλικών, 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 αδιάνοητη 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.

5.1.2 “Αόρατος” μανδύας

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 μεταύλικά, 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. [36]

Ο ηλεκτρομαγνητικός μανδύας προκαλεί αυξανόμενο ενδιαφέρον στην επιστημονική κοινότητα, ιδίως μεταξύ των ερευνητών οι οποίοι αναπτύσσουν τα λεγόμενα μεταύλικά ως τεχνητές κατασκευές, οι οποίες έχουν εξωτικές ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες.

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.

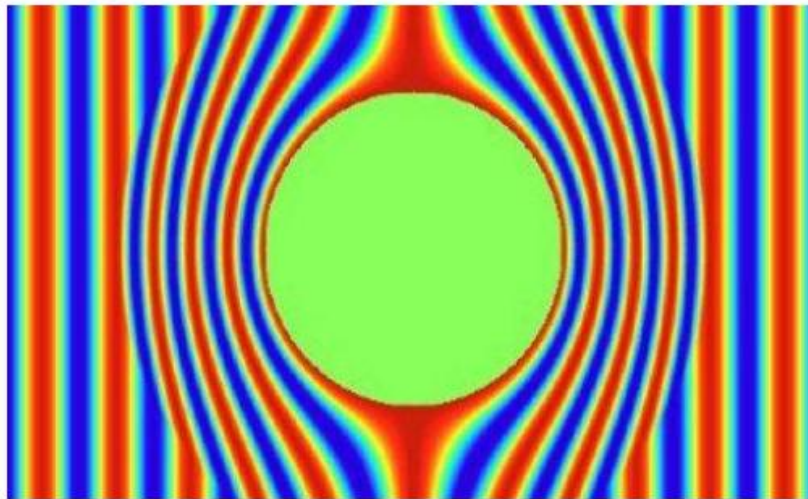
Ενδιαφέρον παρουσιάζουν και τεχνικές cloaking σχετικές με τον μετασχηματισμό συντεταγμένων, καθώς και με τη χρήση τεχνητών υλικών που υλοποιούνται ως πυκνοί βρόχοι γραμμών μεταφοράς. Υπάρχουν κάποιες άλλες τεχνικές, όπως η χρήση τεχνητών ηλεκτρομαγνητικών επιφανειών, οι οποίες επιτρέπουν να κρύβονται αντικείμενα ορισμένων ειδικών σχημάτων για μία μόνο κατεύθυνση φωτισμού, ή με τη χρήση των πλασμονικών δομών συντονισμού.

Στην καρδιά της έρευνας για τεχνικές cloaking είναι η χρήση υλικών με πολύ συγκεκριμένες και συχνά αρκετά εξωτικές ιδιότητες. Επειδή η φύση δεν μας προσφέρει έτοιμα προς χρήση υλικά με τις αναγκαίες ιδιότητες, η μόνη δυνατότητα είναι να τα υλοποιήσουμε ως τεχνητά υλικά (μεταυλικά). [36]

Το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο για τα Τεχνητά Ηλεκτρομαγνητικά υλικά και τα μεταυλικά ορίζει το μεταυλικό ως «μια διάταξη τεχνητών δομικών στοιχείων, με στόχο την επίτευξη επιθυμητών και ασυνήθιστων ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων». Εάν ορισμένες ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες ενός υλικού (συνήθως λαμβάνονται υπόψη η επιτρεπτότητα 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 συνήθη υλικά που αποτελούνται από τα συνηθισμένα, αμελητέα σε αυτό το μήκος κύματος κλίμακας, μόρια. Αυτή είναι μία από τις αιτίες που επικράτησε ο όρος "μεταυλικό": είναι ένα τεχνητό υλικό με ασυνήθιστες ιδιότητες, διαφορετικό από τα συνήθη υλικά με τις συνήθεις ιδιότητες. 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 μεταυλικών ορίζονται από τα (κανονικά) υλικά

από τα οποία δημιουργείται το μεταϋλικό και έχουν σχέση με το σχήμα τους, τον αμοιβαίο προσανατολισμό τους και τη συγκέντρωση των προσθηκών, 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 μεταϋλικά ξεκίνησε μόλις πρόσφατα, τα αποτελέσματα καλύπτουν αρκετά αυτό το θέμα. Στην εικόνα 5.1 απεικονίζεται η εφαρμογή του αόρατου μανδύα για μικροκυματικές συχνότητες. [36]



Εικόνα 5.1: Απεικόνιση εφαρμογής του αόρατου μανδύα για μικροκυματικές συχνότητες. [36]

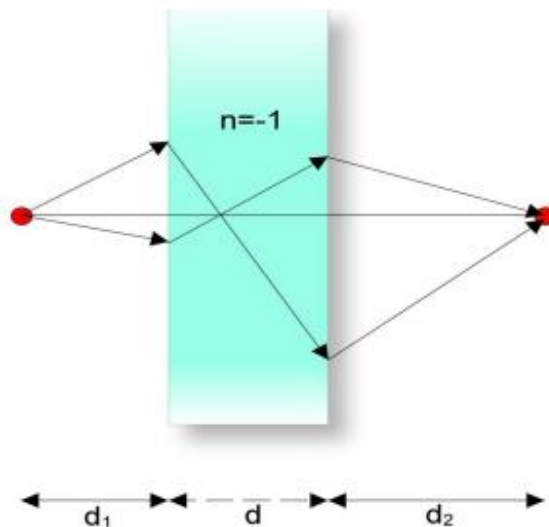
5.1.3 Τέλειος φακός του Pendry

Η ιδέα του τέλειου φακού προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Victor Veselago (1968) ενώ ο πρώτος που επιχείρησε την υλοποίησή του ήταν ο John Pendry (2000). Ο τέλειος φακός είναι στην ουσία μια διηλεκτρική πλάκα η οποία έχει δείκτη διάθλασης $n=-1$. Όπως είναι ήδη γνωστό από την οπτική οποιοσδήποτε εμπορικός φακός παρουσιάζει κάποιους περιορισμούς όσον αφορά την αναλυτικότητά του. Οι περιορισμοί αυτοί προέρχονται τόσο από την κατασκευαστική μέθοδο που χρησιμοποιείται για τον φακό όσο και από τα όρια

περίθλασης. Το διαθέσιμο οπτικό εύρος του τέλει φακού είναι, θεωρητικά τουλάχιστον, απεριόριστο και δύναται να απεικονίσει άπειρη πληροφορία. [36]
 Το είδωλο ενός σημείου σχηματίζεται τόσο μέσα στον ίδιο το φακό όσο και στην απέναντι πλευρά από την πηγή. Μία επιπλέον συνθήκη που πρέπει να τηρείται έχει να κάνει με τις αποστάσεις των ειδώλων τόσο μεταξύ τους όσο και από την πηγή. Πιο συγκεκριμένα πρέπει να ισχύει:

$$d=d_1+d_2$$

Οι αποστάσεις αυτές σημειώνονται στην εικόνα 5.2 στην οποία απεικονίζονται τα είδωλα μιας σημειακής πηγής έτσι όπως αυτά προκύπτουν για την περίπτωση ενός μεταλλικού με $n=-1$. Αξίζει να σημειώσουμε πως οι πρακτικές εφαρμογές των τέλει φακών αδυνατούν να δώσουν την θεωρητική άπειρη αναλυτικότητα γεγονός που οφείλεται στην αδυναμία καθαρού δείκτη διάθλασης ίσου με -1 καθώς και στα τμήματα του μεταλλικού που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή ενός τέτοιου φακού. Παρόλα αυτά η αναλυτικότητα μπορεί να αυξηθεί σε αρκετά μικρά μήκη κύματος οδηγώντας έτσι σε εφαρμογές που είναι γνωστές ως super-lenses (υπερ-φακοί)



Εικόνα 5.2: Ο τέλει φακός του Pendry για πλάκα με δείκτη διάθλασης -1 . [36]

5.2 Άλλες εφαρμογές

Στη συνέχεια θα δούμε διάφορες εφαρμογές των μεταυλικών γενικότερα.

5.2.1 Μικροκυματικά φίλτρα και κεραίες μεταυλικών

Ίσως οι εφαρμογές, όπου οι διατάξεις μεταυλικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν πιο άμεσα και να λάβουμε πρακτικά αποτελέσματα ανήκουν στην κατηγορία αυτή. Συνοπτικά με τη χρήση μεταυλικών σε μικροκυματικές διατάξεις (φίλτρα ή κεραίες) μπορούμε να επιτύχουμε:

1. Κατασκευή μικρών σε μέγεθος και συμπαγών διατάξεων
2. Καλύτερη προσαρμογή των διατάξεων αυτών με τις υπόλοιπες συσκευές ενός μικροκυματικού δικτύου. Αυτό οφείλεται στην ιδιότητα των DNG μέσων να διαθέτουν αρνητική χαρακτηριστική αντίσταση. Και γενικότερα, επίτευξη των επιθυμητών χαρακτηριστικών σκέδασης.
3. Επίτευξη καλύτερης ή πιο σωστά επιθυμητής, συμπεριφοράς διατάξεων. Για παράδειγμα, θα μπορούσαμε να αυξήσουμε την κατευθυνότητα μιας κεραίας, χωρίς να μεταβάλλουμε το μέγεθος της, σε σχέση με την αντίστοιχη συμβατική, χρησιμοποιώντας ένα στρώμα μεταυλικών προσαρμοσμένο στο αέρα με δείκτη διάθλασης που να τείνει στο μηδέν. Μια άλλη ενδιαφέρουσα εφαρμογή είναι η μείωση της σύζευξης μεταξύ των μεταυλικών στοιχείων σε διατάξεις μικροταινίας, «στραγγαλίζοντας» τα επιφανειακά κύματα που αναπτύσσονται

5.2.2 Τέλεια οδήγηση ρυθμών μέσω κυματοδηγών

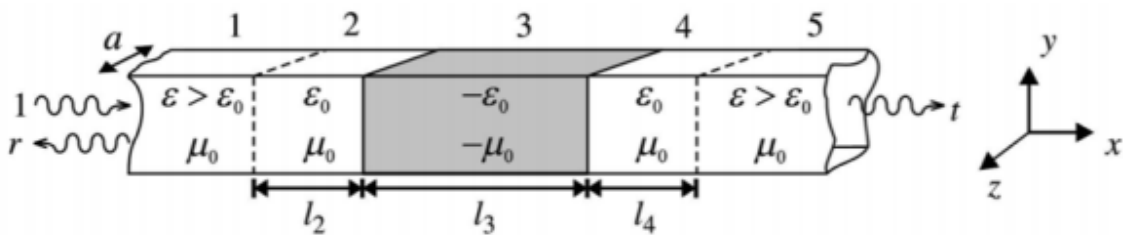
Στη βιβλιογραφία ο όρος “tunneling” αναφέρεται στην οδήγηση ρυθμών μέσω κυματοδηγών, χωρίς να αποκόπτονται εξαιτίας των διαστάσεων τους. Η βασική ιδέα δεν διαφέρει και πολύ από αυτή του τέλει φακού. Και σε αυτή τη περίπτωση επιθυμούμε με χρήση DNG υλικών να ενισχύσουμε τους αποσβεννύμενους ρυθμούς, και ταυτόχρονα να επιτύχουμε «αναπλήρωση» φάσης.

Η βασική δομή φαίνεται στην εικόνα 5.3. Όλοι οι ρυθμοί εισέρχονται από το τμήμα 1. Στα τμήματα 2 και 4 οι ρυθμοί που είναι σε αποκοπή δέχονται απόσβεση. Στο τμήμα 3 τοποθετούμε ΔΝΓ υλικό, προσαρμοσμένο στα τμήματα 2 και 4, στο οποίο οι ρυθμοί σε αποκοπή (στα 2 και 4) δέχονται ενίσχυση. Το μέγεθος (l_3) επιλέγεται κατάλληλα έτσι ώστε να επιτυγχάνεται αντιστάθμιση φάσης. Θεωρητικά τέλει tunneling θα επιτυγχανόταν εφόσον στο τμήμα 5 λαμβάνονταν το σύνολο της πληροφορίας, όλοι οι ρυθμοί και μάλιστα με πλάτος και φάση ίσα με αυτά του εισερχόμενου κύματος στο τμήμα 1. Για να επιτευχθεί το tunneling δεδομένου ότι το μέσο 3 είναι προσαρμοσμένο στα 2 και 4 ($\epsilon_{r3} = \mu_{r3} = -\epsilon_{r2} = -\mu_{r2} = -\epsilon_{r4} = -\mu_{r4}$), θα πρέπει το μήκος του ΔΝΓ τμήματος (l_3) να είναι ίσο με

το άθροισμα των μηκών των τμημάτων που το περιβάλλουν. Δηλαδή

$$l_3 = l_2 + l_4$$

Η ιδιότητα αυτή ανοίγει το δρόμο για την κατασκευή πιο ευέλικτων, μικρότερου μεγέθους (μικρότερης διατομής) κυματοδηγών χαμηλών απωλειών.



Εικόνα 5.3: Tunneling με DNG υλικά σε ορθογωνικό κυματοδηγό [30]

5.2.3 Κατασκευή επίπεδων φακών

Γεγονός που θα φέρει επανάσταση σε όλες τις οπτικές συσκευές, όπως για παράδειγμα στις φωτογραφικές μηχανές.

5.2.4 Κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μικρότερου μεγέθους

Με τα συνηθισμένα υλικά δεν είναι δυνατόν να απεικονισθεί ένα αντικείμενο με διαστάσεις μικρότερες από το μήκος κύματος του φωτός που χρησιμοποιούμε. Αυτό το γεγονός περιορίζει τις διαστάσεις των συνδέσεων στα «τσιπάκια» των ηλεκτρονικών συσκευών. Τα μεταύλικά όμως δε έχουν αυτόν τον περιορισμό, οπότε η ελάττωση των διαστάσεων των ηλεκτρονικών συσκευών θα είναι δραματική.[3]

5.2.5 Αύξηση της χωρητικότητας των οπτικών ινών

Οι ενσύρματες τηλεπικοινωνίες σήμερα δεν χρησιμοποιούν πια σύρματα από μέταλλο, αλλά ίνες από διαφανή υλικά, μέσα από τις οποίες περνάει το φως ενός λέιζερ. Το χρώμα του λέιζερ που χρησιμοποιούμε εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού της ίνας. Αυτό ισχύει για τα κοινά υλικά, όχι όμως για τα μεταύλικά. Έτσι με

ίνες κατασκευασμένες από μεταλλικά θα μπορούμε να χρησιμοποιούμε ταυτόχρονα λέιζερ διαφορετικών χρωμάτων, γεγονός που θα αυξήσει τη χωρητικότητα των τηλεφωνικών κυκλωμάτων.

5.2.6 Μαγνητική τομογραφία

Θα κυκλοφορήσουν συσκευές μαγνητικής τομογραφίας, στις οποίες ο ασθενής δεν θα χρειάζεται να τοποθετείται σε έναν στενό κυλινδρικό σωλήνα. Το σώμα του θα μπορεί να βρίσκεται 1 μέτρο μακριά από τον μαγνήτη, και πάλι θα φαίνονται περισσότερες λεπτομέρειες από αυτές που είναι ικανά να αποτυπώσουν τα σύγχρονα μηχανήματα. [3]

5.2.7 Κατασκευή μικρότερων κεραιών

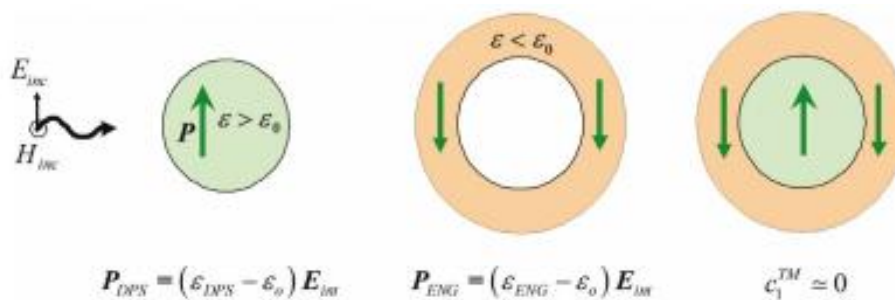
Με τη βοήθεια των μεταλλικών είναι δυνατόν να μειωθεί ως 90% και το μέγεθος και η ισχύς των κεραιών, με προφανές κέρδος τη μείωση της ακτινοβολίας που δέχονται όσοι χρησιμοποιούν ασύρματες συσκευές, όπως για παράδειγμα κινητά τηλέφωνα.

5.3 Τεχνικές μεταλλικών

i. Τεχνικές ακύρωσης σκέδασης

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 αντικειμένου 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. [19]

Εικόνα 5.4: Αρχή ακύρωσης σκέδασης [37]

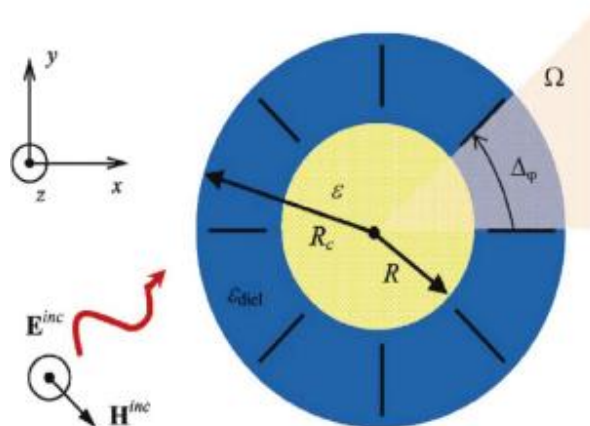


Εικόνα 5.4 μας δίνει ένα παράδειγμα της αρχής ακύρωσης σκέδασης. Εδώ είναι

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 διπόλου. 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. [9]

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 (πλάσμονικά υλικά όπως το ασήμι και ο χρυσός). Η χρησιμοποίηση αυτών των πλάσμονικών υλικών περιορίζεται από τις απώλειες τους και από το γεγονός ότι οι ιδιότητές 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 μεταυλικό, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.5.



Εικόνα 5.5: Συσκευή ακύρωσης σκέδασης [37]

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 μεταυλικών με τις απαιτούμενες ιδιότητες, αν δεν είναι διαθέσιμα πλασματικά υλικά, οι περιορισμοί του bandwidth που είναι εγγενείς στα μεταυλικά, 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). [9]

ii. Τεχνική μετασχηματισμού συντεταγμένων

Πρόσφατα οι Leonhardt και Pendry πρότειναν τη δημιουργία ενός μανδύα από μεταυλικά, ο οποίος επιτρέπει την παρουσία σωμάτων με μηδενικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία, μέσα σε μια συσκευή από τέτοια υλικά. 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. [9]

Το cloaking για σώματα στον ελεύθερο χώρο, με την τεχνική μετασχηματισμού συντεταγμένων, απαιτεί οπωσδήποτε τη χρήση ανισότροπων μεταυλικών χωρίς απώλειες με ορισμένες ιδιότητες, όπως της ενεργής διηλεκτρικής σταθεράς (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. [9]

Μία από τις μεγάλες προκλήσεις για την υλοποίηση των μανδύων μεταϋλικών 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 συχνότητες 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 μεταϋλικά 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 πεδριακών ασταθειών και καθιστά τον σχεδιασμό των απαραίτητων τύπων μεταϋλικών 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. [9]

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. [9]

iii. Τεχνική γραμμής μετάδοσης

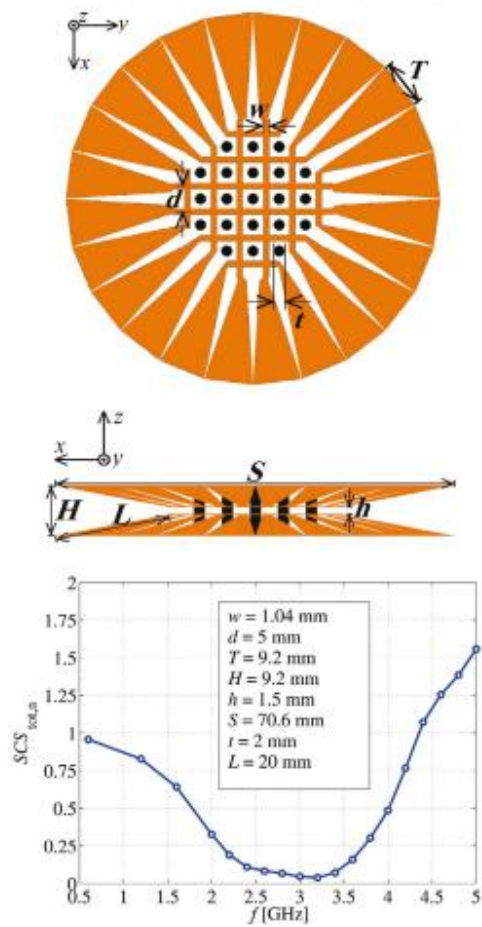
Πρόσφατα έχει προταθεί μια τεχνική cloaking, η οποία είναι ριζικά διαφορετική. Η τεχνική αυτή βασίζεται στη χρήση των ογκομετρικών δομών, που αποτελούνται από δισδιάστατα ή τρισδιάστατα δίκτυα γραμμών μετάδοσης. Σε αυτές τις δομές, τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία διαδίδονται στο εσωτερικό των γραμμών μεταφοράς, αφήνοντας έτσι τον όγκο μεταξύ αυτών των γραμμών αποτελεσματικά cloaked.[9] 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. Στο σχήμα 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 τέλειο 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 απόαγωγίμες ράβδους. [9]

Τα αποτελέσματα μπορούν να ερμηνευθούν με τον ακόλουθο τρόπο: επειδή ο «μανδύας» είναι απόλυτα ταυτισμένος με τον περιβάλλοντα ελεύθερο χώρο, μόνο σκέδαση προς τα εμπρός μπορεί να συμβεί. Αυτή η σκέδαση προς τα εμπρός γίνεται ισχυρότερη όσο αυξάνεται το ηλεκτρικό μέγεθος του μανδύα, όπως αναμενόταν. Από την εικόνα 16 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.

Ένας κυλινδρικός μανδύας όπως φαίνεται στην εικόνα 5.6 έχει πρόσφατα μελετηθεί αριθμητικά. Για να υπολογιστεί η συνολική διατομή σκέδασης των cloaked και uncloaked αντικειμένων, φωτίζεται το υπόδειγμα στην εικόνα 16 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.



Εικόνα 5.6: Κυλινδρικός μανδύας μελετημένος αριθμητικά [37]

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. [9]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Συμπεράσματα

6.1 Κριτική μεταύλικων

Παρά το γεγονός ότι τα τελευταία χρόνια έχει προκύψει ένα πλήθος δημοσιεύσεων που αφορούν την υλοποίηση των μεταύλικών και τις μελλοντικές εφαρμογές τους, έχουν ταυτόχρονα παρουσιαστεί και κάποιοι “πολέμιοι” του συγκεκριμένου πεδίου έρευνας. Πιο σημαντικός από αυτούς ήταν ο Munk, ο οποίος θεωρεί την υλοποίηση υλικών με αρνητικό δείκτη διάθλασης αδύνατη. Συγκεκριμένα ο Munk θεωρεί ότι ενώ η άποψη που διατυπώθηκε από τον Veselago, περί αρνητικού δείκτη διάθλασης, είναι μαθηματικά σωστή, στην πράξη δεν συμφωνεί με τους νόμους της φυσικής, καθώς κατά την εφαρμογή των συγκεκριμένων προτάσεων του Veselago προκύπτει αρνητικός χρόνος. Αυτό ενώ είναι μαθηματικά αποδεκτό, δεν ευσταθεί στη φύση. Επιπλέον υποστήριζει ότι οι περιοδικές δομές, που θεωρούνται ως μεταύλικά, δεν μπορούν να έχουν ούτε αρνητικό δείκτη διάθλασης, ούτε να δημιουργούν αριστερόστροφα πεδία. Κατά τον Munk δεν υφίσταται αρνητικός δείκτης διάθλασης και στην πραγματικότητα η παρατήρηση του σε κάποιες πειραματικές εφαρμογές οφείλεται στην περιοδικότητα των δομών που χρησιμοποιούνται και που υπό κάποιες ακραίες συνθήκες μπορεί να παρουσιάζουν τέτοια συμπεριφορά. Αναλυτικά τα σημεία που αμφισβητεί ο Munk είναι:

- η ύπαρξη αρνητικού δείκτη διάθλασης
- ότι η φάση του σήματος προηγείται καθώς αυτό απομακρύνεται από την πηγή
- ότι το οδεύον κύμα αυξάνεται καθώς απομακρύνεται από την πηγή
- η ύπαρξη αριστερόστροφης πεδιακής τριπλέτας

Συνοψίζοντας ο Munk ισχυρίζεται ότι τέτοια υλικά όπως περιγράφηκαν από τον Veselago δεν υπάρχουν στη φύση και αυτό από μόνο του αποτελεί ικανή αιτιολογία για το γεγονός ότι δεν είναι δυνατό να υπάρχουν τέτοια υλικά.

Βιβλιογραφία

- [1] J.B. Pendry, S. Anantha Ramakrishna, "Refining the perfect lens," 2003 Elsevier B.V
- [2] P. M. Valanju, R. M. Walter, and A. P. Valanju, "Wave refraction in negative index media: Always positive and very inhomogeneous," Phys. Rev. Lett. 88, 187401 (2002).
- [3] Τρα'ιανού Β.Γιούλτση, "Συστήματα Κυματοδότησης," Θεσσαλονίκη 2003.
- [4] N. Engheta R. Ziolkowski, "Metamaterials-Physics and Engineering Explorations," IEEE Press, Published by John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [5] Θ. Δ. Τσιμπούκη, "Εισαγωγή στη βασική θεωρία του Ηλεκτρομαγνητικού Πεδίου, Τόμοι I-IV,," University Studio Press, Θεσσαλονίκη, 1991
- [6] Αθανάσιος Πολυμερίδης, "Διατύπωση των ολοκληρωτικών εκφράσεων των συναρτήσεων Green σε επίπεδα στρωματοποιημένα μέσα," ΤΗΜΜΥ, Θεσσαλονίκη, 2006.
- [7] Filippo Capolino, "Theory and Phenomena of Metamaterials", CRC Press, 2009.
- [8] Pekka Alitalo, Sergei Tretyakov, "Electromagnetic cloaking with metamaterials", Materials Today, March 2009, Volume 3, Number 3 pp. 22-29
- [9] Ben Wood, "Metamaterials and invisibility", Elsevier C.R. Physique 10 (2009) pp. 379-390
- [10] Δήμητρα Κετζάκη, Τεχνική αναφορά: "Συντονιζόμενα Μεταϊλικά Αρνητικού Δείκτη Διάθλασης με τη Χρήση Ανισοτροπικού Υγρού Κρυστάλλου", Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, (2011).
- [11] V.G. Veselago, "The electrodynamics of substance with simultaneously negative values of ϵ_r and μ_r ", Sov. Physics. Usp., Vol.10, No.4 509-514, (1968).
- [12] T. M. Grzegorzcyk, C. D. Moss, J. Pacheco, Jr. and J. A. Kong "Properties of left-handed metamaterials: transmission, backward phase, negative refraction, and focusing", IEEE Trans. Microw. Theory Tech., Vol.53, No.9, pp.2956-2967, 2005.

[13] Christophe Caloz and Tatsuo Itoh, "Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications", Wiley-Interscience, 2006.

[14] David J. Griffiths, Εισαγωγή στην Ηλεκτροδυναμική, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, (2007).

[15] Xiande Wang, Do-Hoon Kwon, Douglas H. Werner, Iam-Choon-Khoo, Alexander V. Kildishev and Vladimir M. Shalaev, "Tunable optical negative-index refractive metamaterials employing anisotropic liquid crystals", Applied Physics Letters 91,143122, (2007).

[16] D. R. Smith, D. Schurig, M. Rosenbluth, S. Schultz, S. Anantha Ramakrishna, and J. B. Pendry, "Limitation on subdiffraction imaging with a negative refractive index slab," Appl. Phys. Lett., vol. 82, no. 10, pp. 1506–1508, Mar. 2003.

[17] R. A. Shelby, D. R. Smith, and S. Schultz, Science 292, 77 ~2001.

[18] X.D. Zhang and Z.Y. Liu, Phys. Rev. Lett. 101 (2008), p. 264303

[19] Nader Engheta, Richard W. Ziolkowski, "A positive future for double-Negative Metamaterials", IEEE Transaction on microwave theory and techniques, Volume 53, Number 4, April 2005, pp. 1535-1556

[20] P.B Johnson and R.W. Christy, "Optical constants of the noble metals", Phys. Rev. B 6, 4370, (1972).

[21] D.R. Smith, D.C. Vier, Th. Koschny and C.M. Soukoulis, "Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials", Phys. Rev. E, Vol.71,036617, (2005).

[22] Κ.Δ. Αλεξοπούλου: Γενική Φυσική – Οπτική.

[23] Η.Δ. Young: Φυσική, Τόμος Β΄.

[24] Paul G. Hewitt: Οι έννοιες της Φυσικής.

[25] Serway: Physics for scientists and engineers.

[26]

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CE%AC%CE%BA%CE%BB%CE%B1%CF%83%CE%B7>

[27] http://users.auth.gr/katsiki/7B_Optikh.pdf

[28] <https://perifysikhs.files.wordpress.com/2011/05/waves-part3.pdf>

[29]

http://vivliothmmy.ee.auth.gr/306/1/%CE%94%CE%B9%CF%80%CE%BB%CF%89%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%B5%CF%81%CE%B3%CE%B1%CF%83%CE%AF%CE%B1.pdf

[30] http://vivliothmmy.ee.auth.gr/1640/1/al_ap_boulogeorgos_6416.pdf

[31]

http://vivliothmmy.ee.auth.gr/404/1/%CE%94%CE%B9%CF%80%CE%BB%CF%89%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%B5%CF%81%CE%B3%CE%B1%CF%83%CE%AF%CE%B1_%CE%A7%CE%B1%CE%BB%CE%AF%CE%BB_%CE%9D%CF%84%CF%87%CE%AD%CE%B9%CE%BD%CF%84%CE%B5%CE%BB.pdf

[32]

<http://vivliothmmy.ee.auth.gr/918/1/%CE%B4%CE%B9%CF%80%CE%BB%CF%89%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE5.pdf>

[33]

https://www.google.gr/search?q=%CE%BA%CE%B1%CF%84%CE%B7%CE%B3%CE%BF%CF%81%CE%B9%CE%B5%CF%82+%CF%85%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CF%89%CE%BD&espv=2&biw=1366&bih=643&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0CAYQ_AUoAWoVChMIjs2z0_-8yAIVhA8sCh3I6gSK#tbm=isch&q=%CE%BA%CE%B1%CF%84%CE%B7%CE%B3%CE%BF%CF%81%CE%B9%CE%B5%CF%82+%CF%85%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CF%89%CE%BD+%CE%BC%CE%B5+%CE%B2%CE%B1%CF%83%CE%B7+%CF%84%CE%BF+%CF%80%CF%81%CE%BF%CF%83%CE%B7%CE%BC%CE%BF&imgsrc=ZSptO6UEEGK8dM%3A

[34] <http://www.physics4u.gr/faq/dd.html>

[35]

http://www.inf.uth.gr/wp-content/uploads/formidable/kampitakis_thesis.pdf

[36] <https://optiki.files.wordpress.com/2013/12/metamaterials1.pdf>

[37] <https://optiki.files.wordpress.com/2013/12/metamaterials.pdf>

[38] <http://www.cyprus-find.com/science1/images/imerides/metaulika.pdf>