

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΩΝ ΥΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΝΟΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΟΠΤΙΚΗΣ & ΟΠΤΟΜΕΤΡΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μεταϋλικά: Υλικά με αρνητικό δείκτη
διάθλασης. Θεωρία και εφαρμογές.**

Νικόλας Μ Πατέρας

Δρ. Ιωάννης Θανόπουλος Φυσικός Επίκουρος Καθηγητής

ΑΙΓΙΟ 2014

ΠΡΟΛΟΓΟΣ-ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αφορά τα μεταϋλικά, και συγκεκριμένα τα υλικά με αρνητικό δείκτη διάθλασης λαμβάνοντας υπόψη την υπάρχουσα βιβλιογραφική ανασκόπηση που θεωρήθηκε άμεσα ή έμμεσα συνυφασμένη με το πιο πάνω θέμα. Αποτελεί το επιστέγασμα των προπτυχιακών μου σπουδών στο τμήμα Οπτικής και Οπτομετρίας, της Σχολής Υγείας και Πρόνοιας του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος της Δυτικής Ελλάδας.

Η εν λόγω εργασία που έχετε στα χέρια σας απέχει πολύ από το να θεωρηθεί πλήρης. Επιπρόσθετα το ίδιο το θέμα της είναι ιδιαίτερο. Τα μεταϋλικά αποτελούν πεδίο μελέτης, για λιγότερο από είκοσι χρόνια και όμως η βιβλιογραφία βρίθει θεωρητικών και πειραματικών εργασιών και εν γένει πηγών που μπορεί να συμβουλευτεί ο ενδιαφερόμενος μελετητής. Ο επιστημονικός διάλογος βαίνει διαρκώς εντονότερος με νέες ανακαλύψεις και διαφωνίες σε όλους τους τομείς της έρευνας.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Δρ. Ιωάννη Θανόπουλο, για την πολύτιμη επίβλεψη του κατά την διαδικασία διεκπεραίωσης της πτυχιακής μου εργασίας. Δεν περιορίστηκε ο ρόλος του μόνο στην καθοδήγηση και το συντονισμό, αλλά επίσης πρόσφερε την υποστήριξη του, τόσο σε επίπεδο γνώσεων και ιδεών όσο και σε ηθικό. Ακόμη, δεν θα μπορούσα να παραλείψω την πολύτιμη βοήθεια που μου πρόσφερε όσον αφορά τις γνώσεις του στον τομέα των μεταϋλικών και γενικά της φυσικής του φωτός, και επιπλέον για τις πολύ χρήσιμες πηγές που μου σύστησε. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τη κυρία Θωμάς Πετρή, η οποία εκτελεί χρέη αναπληρώτριας προϊστάμενης γραμματείας, για την πολύτιμη βοήθεια που μου έδωσε. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τον προϊστάμενο του τμήματος μας κύριο Δροσόπουλο Αναστάσιο για την κατανόηση που μου είχε δείξει.

Νικόλας Μ Πατέρας

Αίγιο, Νοέμβριος 2014

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αφορά βιβλιογραφική μελέτη που έγινε με θέμα τα μεταϋλικά και συγκεκριμένα των υλικών με αρνητικό δείκτη διάθλασης. Θα γίνει προσπάθεια καταγραφής της γενικής θεωρίας και των εφαρμογών των μεταϋλικών, προσπαθώντας να αποτυπώσουμε με λίγα λόγια την ουσία, αλλά και ομορφιά που μπορούν να προσφέρουν τα εξωτικά αυτά υλικά. Η εν λόγω εργασία περιλαμβάνει όλες τις σημαντικές πληροφορίες γύρω από τα μεταϋλικά, και προσπαθεί να παρουσιάσει τα υλικά με αρνητικό δείκτη διάθλασης, και τις όμορφες, εξωτικές ιδιότητες τους.

Αρχικά στο πρώτο κεφάλαιο θα γίνει μία βιβλιογραφική ανασκόπηση και θα αναφερθούμε στο ιστορικό υπόβαθρο του δείκτη διάθλασης, και της ιδέας των μεταϋλικών. Μετέπειτα, στο δεύτερο κεφάλαιο θα γίνει ανάλυση της θεωρίας των μεταϋλικών, όπως και της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας. Στη συνέχεια θα κατηγοριοποιήσουμε τα μεταϋλικά βάση των παραμέτρων της διηλεκτρικής σταθεράς ϵ και της μαγνητικής διαπερατότητας μ . Ακολούθως στο τρίτο κεφάλαιο θα αναφερθούμε στις πρακτικές εφαρμογές των μεταϋλικών. Και συγκεκριμένα θα μιλήσουμε για τον μανδύα απόκρυψης, και τον τέλειο φακό. Τέλος η εργασία ολοκληρώνεται με τη σύνοψη των θεωρητικών δεδομένων και παρατίθενται τα λογικά συμπεράσματα που προκύπτουν.

Συνοπτικά η πτυχιακή εργασία εμπεριέχει όλες τις χρήσιμες πληροφορίες που αφορούν τα μεταϋλικά, τον αρνητικό δείκτη διάθλασης και τις πρακτικές εφαρμογές τους, όπως αυτές του ηλεκτρομαγνητικού μανδύα και του τέλειου φακού.

ABSTRACT

This dissertation concerns the study of the metamaterials, particularly the materials with negative refractive index. Furthermore we attempt to record the general theory and applications of metamaterials, trying to capture in a few words the essence, and beauty that these exotic materials can provide. Therefore, this dissertation includes all the important information about the metamaterials, and attempts to present the materials with negative refractive index, and all their exotic properties.

Initially, in the first chapter we focus on the historical background of the metamaterials and of the negative refractive index, as also will do a literature review of the subject. In the second chapter we discuss the theoretical background of the media with negative refractive index, and the manufacturing methods. We will mention in detail, in refractive index, paying attention to its properties. Then we categorize the metamaterials based on the parameters of the dielectric constant ϵ and the magnetic permeability μ . Subsequently, in the third chapter we refer to the practical applications of metamaterials. Specifically, the invisibility cloak, and the perfect lens. Finally, the dissertation concludes with a summary of the theoretical data and lists the logical conclusions that arise.

In summary, the dissertation contains, all the relevant information concerning, the metamaterials, negative index of refraction and practical application, such as the electromagnetic cloak and perfect lens.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ-ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	ii
ABSTRACT	iii
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	iv
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	vi
ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ	vii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2. Ιστορικά στοιχεία	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	7
2.1 Εισαγωγή	7
2.2 Ιδιότητες διπλό-αρνητικών υλικών	8
2.2.1 Αρνητική διάθλαση	8
2.2.2 Διάδοση επίπεδου κύματος σε διπλό-αρνητικό υλικό	12
2.2.3 Φαινόμενο Doppler	15
2.2.4 Ακτινοβολία NaviIon-Cerenkov.....	16
2.3 Κατηγοριοποίηση Ηλεκτρομαγνητικών Μεταύλικών.....	17
2.3.1 Διπλό-θετικά.....	18
2.3.2 Διπλό-Αρνητικά	18
2.3.3 Μονό-αρνητικά	18
2.4 Υλοποίηση μεταύλικών	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	22
3.1 Πρακτικές εφαρμογές μεταύλικών	22

3.2 Ηλεκτρομαγνητικός μανδύας	23
3.2.1 Cloaking και αορατότητα.....	24
3.2.2 Τεχνικές cloaking	28
3.3 Τέλειος φακός.....	29
3.4 Άλλες Εφαρμογές και Προοπτικές	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	35
4.1 Κοσμολογικές προεκτάσεις της αρνητικής διάθλασης.....	35
4.2 Σύνοψη	35
Βιβλιογραφία	37

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1 : Το πρώτο μεταλλικό	5
Σχήμα 2 :Σχεδιάγραμμα Δημοσιεύσεων για Αρνητική Διάθλαση.....	6
Σχήμα 3 : «Αντιστροφή» Διάθλασης.....	10
Σχήμα 4 : Αρνητική Διάθλαση.....	11
Σχήμα 5 : Αρνητική Διάθλαση.....	11
Σχήμα 6 : Διάδοση Κύματος.....	14
Σχήμα 7 : Διεύθυνση Διανύσματος.....	14
Σχήμα 8 : Φαινόμενο Doppler.....	15
Σχήμα 9. Ακτινοβολία Vanilov-Cerenkov.....	16
Σχήμα 10 : Κατηγορίες μεταλλικών.....	17
Σχήμα 11 : Δομή Μεταλλικού.....	20
Σχήμα 12 : Θεωρητική Λειτουργία Αόρατου Μανδύα.....	25
Σχήμα 13 : Αόρατος Μανδύας σε Μυκροκυματικές συχνότητες.....	26
Σχήμα 14 :Αόρατος Μανδύας, πειραματικά.....	27
Σχήμα 15 : Τρόπος εστίασης Ακτινών.....	31
Σχήμα 16 : Τρόπος εστίασης Ακτινών.....	32
Σχήμα 17 : Τέλειος Φακός.....	32
Σχήμα 18 : Τέλειος Φακός.....	33

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

n =δείκτης διάθλασης

ϵ = διηλεκτρική σταθερά

μ = σχετική μαγνητική διαπερατότητα

λ = μήκος κύματος

c = ταχύτητα του φωτός

u = ταχύτητα

$\eta\mu$ = ημίτονο

θ = γωνία

DPS= double-positive

ENG = epsilon-negative

MNG= mu-negative

DNG= double negative

ϵ_{eff} = ενεργός διηλεκτρική σταθερά

μ_{eff} = ενεργός διηλεκτρική μαγνητική διαπερατότητα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ

1.1 Εισαγωγή

Στη συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία θα γίνει μια προσπάθεια παρουσίασης των μεταυλικών και συγκεκριμένα, των μεταυλικών που παρουσιάζουν το φαινόμενο του αρνητικού δείκτη διάθλασης. Δυστυχώς ή ευτυχώς, η βιβλιογραφία που αναφέρεται στα μεταυλικά είναι περιορισμένη, λόγω της φρέσκιας ιστορίας τους. Η απόπειρα της συγγραφής έγινε μελετημένα και με σεβασμό προς το εννοιολογικό πλαίσιο του θέματος. Σκοπός μας είναι να μάθουμε όσα περισσότερα γίνεται για τα υλικά με αρνητικό δείκτη διάθλασης. Για να το κάνουμε αυτό πρέπει πρώτα να μπούμε στη διαδικασία σκέψης μεγάλων επιστημών, και για το πώς συνέλαβαν την ιδέα των υλικών αυτών.

Σε όλη την επιστημονική κοινότητα, από την ώρα που ήρθε στο φως ο όρος δείκτης διάθλασης, επικράτησε η αντίληψη πως όλα τα υλικά έχουν θετικό δείκτη διάθλασης και συμπεριφέρονται φυσιολογικά βάσει των εξισώσεων του Maxwell και του Snell, όπως επίσης ότι δε θα μπορούσε ποτέ να υπάρξει υλικό με αρνητικό δείκτη διάθλασης. Έπρεπε να έρθει στα μέσα του εικοστού αιώνα και συγκεκριμένα το 1967, ο Ρώσος Victor Veselago, [Veselago, 1968] να ανατρέψει τα πάντα με μια ιστορική, όπως αποδείχτηκε στη συνέχεια δημοσίευση του. Από τότε το θέμα ξεχάστηκε για τρεις δεκαετίες. Ωσπου επανήλθε στο προσκήνιο το 1996, και έμελλε να μείνει για πάντα και μάλιστα με αμείωτο το ενδιαφέρον όλης της επιστημονικής κοινότητας. Συγκεκριμένα, η επαναφορά της δημοσίευσης Veselago έγινε στο τέλος του εικοστού αιώνα από τον Βρετανό John Pendry [Pendry et al., 1996] [Pendry et al., 1999] στην θεωρία και στη συνέχεια από τους David Smith και Sheldon Schultz [Smith et al., 2000] [Smith and Kroll, 2000] στη πράξη. Η συνέχεια προβλέπεται εντυπωσιακή αν αναλογιστούμε ότι από το 1996 μέχρι και σήμερα οι δημοσιεύσεις για το θέμα διπλασιάζονται κάθε δέκα μήνες [Veselago and Narimanov, 2006].

Μόλις έγινε εφικτή η κατασκευή μεταυλικών, δηλαδή υλικών που δεν υπάρχουν στη φύση, οι επιστήμονες κατάφεραν να κατασκευάσουν υλικά με ιδιότητες μοναδικές, αν αναλογιστούμε ότι δεν τις συναντούμε πουθενά στη φύση. Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία έχει σκοπό στη μελέτη των υλικών, με αρνητικό δείκτη διάθλασης, γνωστών και ως αριστερόστροφων(left-handed), διπλό-αρνητικών, υλικών Veselago, υλικών οπισθοκατευθυντικού κύματος, ή υλικών αρνητικού δείκτη διάθλασης. Θα επιχειρήσουμε να αναφερθούμε λεπτομερώς στη προϊστορία των υλικών αυτών και στον τρόπο κατασκευής τους, όπου πραγματικά μπορεί να θεωρηθεί πολύ περίπλοκος. Επιπλέον, θα μελετήσουμε το θεωρητικό υπόβαθρο των υλικών αυτών και ακόμη θα γίνει ιδιαίτερη μνεία για την πληθώρα των εφαρμογών που έχουν αυτά τα υλικά, όπως ο τέλειος φακός και αόρατος μανδύας.

Ο όρος μεταυλικό χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει υλικά τα οποία εμφανίζουν ιδιότητες, που δεν εμφανίζονται αυτούσιες στη φύση. Η λέξη είναι σύνθετη, το πρόθεμα μετά- εννοεί ότι αυτά τα υλικά έχουν ιδιότητες που δεν έχουν τα συμβατικά υλικά, και αναφέρεται σε τεχνητά υλικά, τα οποία συνθέτουν δομές, των οποίων τα χαρακτηριστικά καθορίζονται όχι από τα ίδια τα υλικά αλλά συνολικά από τον τρόπο διάταξης τους. Τα

μεταϋλικά εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από συντονισμούς για να εμφανίζουν τις ιδιότητες τους. Ενώ σημαντικός παράγοντας είναι επίσης οι διαστάσεις της διάταξης που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό των ηλεκτρομαγνητικών παραμέτρων για δεδομένο εύρος συχνοτήτων. Με κατάλληλη διέγερση των διατάξεων αυτών και ενισχύοντας τους συντονισμούς που εμφανίζονται, είναι δυνατό να πετύχουμε αρνητικές τιμές της επιδεκτικότητας, αλλά και της διαπερατότητας. Κάτι τέτοιο μπορεί αρχικά να φαίνεται παράλογο και να μην συνάδει με την κλασική θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού, έτσι όπως αυτή διατυπώθηκε από το James Maxwell [Maxwell, 1873] στο τέλος του 19^{ου} αιώνα. Παρόλα αυτά η εμφάνιση των ιδιοτήτων αυτών κάθε άλλο παρά παραβιάζει τις αρχές του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου όπως θα δούμε στη συνέχεια, όταν και θα εξετάσουμε αναλυτικά τις γενικές σχέσεις που ισχύουν για τέτοια υλικά.

Σε αυτή την εργασία θα προσπαθήσουμε να αναφερθούμε στον όρο μεταϋλικά γενικότερα, αλλά και στα υλικά αρνητικού δείκτη διάθλασης. Δεδομένου ότι με τον όρο μεταϋλικά ονομάζουμε όποιο υλικό κατασκευάστηκε στο εργαστήριο, θα επιχειρήσουμε να αποδώσουμε την έννοια τους πιο κάτω. Τα μεταϋλικά ήρθαν στο προσκήνιο από πολύ παλιά αλλά η ονομασία τους όπως την ξέρουμε σήμερα, την απέκτησαν πολύ πρόσφατα. Ο όρος μεταϋλικά εντάχθηκε στο λεξιλόγιο μας για πρώτη φορά το 2001 από τον Rodger Walser του πανεπιστημίου του Austin στο Τέξας [Walser, 2001]. Ως ορισμό για τον όρο μεταϋλικά, ο Rodger Walser στη δημοσίευσή του το 2001 ανέφερε τα εξής:

«Μακροσκοπικά σύνθετα υλικά, τα οποία διαθέτουν μια τεχνητή, τρισδιάστατη αρχιτεκτονική αποτελούμενη από περιοδικές δομές (κελιά), σχεδιασμένες με τέτοιο τρόπο ώστε να παράγεται ένας βέλτιστος συνδυασμός, μη διαθέσιμος στη φύση, δύο ή περισσότερων αποκρίσεων σε δεδομένη διέγερση.»

Επομένως, με το ποιο πάνω ορισμό, βλέπουμε ότι τα υλικά αυτά είναι ανθρώπινες κατασκευές οι οποίες είτε μιμούνται αποκρίσεις γνωστών υλικών, είτε εμφανίζουν ιδιότητες που δεν συναντώνται σε φυσικά υλικά. Όπως αντιλαμβάνεστε, ο όρος μεταϋλικά είναι κάτι καινούργιο στο κόσμο των φυσικών και αναμένεται να αλλάξει και τις ζωές όλων μας. Βέβαια κανένας δεν περίμενε τον Rodger Walser να ανακαλύψει τα υλικά αυτά. Υπάρχει ολόκληρο ιστορικό υπόβαθρο πίσω από την δημιουργία των μεταϋλικών, όπου φυσικά θα αναφερθούμε πιο κάτω. Το ενδιαφέρον των ερευνητών για αυτά τα υλικά έχει αυξηθεί εντυπωσιακά τις τελευταίες δεκαετίες λόγω των ξεχωριστών και ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν. Η χρησιμότητα των υλικών αυτών έγκειτο στο γεγονός ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα αποτελέσματά τους για εξοικονόμηση μεγέθους και βάρους, αλλά και βελτίωση της απόδοσης πολλών συσκευών και εξαρτημάτων όπως κεραιών, κυματοδηγών, φίλτρων διαμορφωτών, φακών, αντηχείων κ.α. Βέβαια μπορούμε επίσης να χρησιμοποιήσουμε τα υλικά αυτά, για πάρα πολλές άλλες εφαρμογές.

Η ιστορική αναδρομή για την πρώτη προσπάθεια κατασκευής μεταϋλικών μας πηγαίνει πίσω στο 1898 όταν ο Jadagis Chunder Bose πειραματίστηκε με συνεστραμμένα στοιχεία (constructed twisted elements) που εμφανίζουν ιδιότητες γνωστές σήμερα ως chiral (χειρόμορφα) [Bose, 1898]. Στις αρχές του εικοστού αιώνα ο Karl Ferdinand Lidman μελέτησε την αλληλεπίδραση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με υλικά στα οποία είχε εμφυτεύσει μικρές μεταλλικές έλικες σε υλικά που δρούσαν ως chiral υλικά [Lindell et al., 1992]. Το 1948 ο W.E Kock κατασκεύασε το πρώτο τεχνητό διηλεκτρικό που χρησιμοποιήθηκε για τη σχεδίαση μικροκομματικών φακών μικρού βάρους, τοποθετώντας αγωγίμες σφαίρες, δίσκους και ταινίες σε περιοδική δομή, επιτυγχάνοντας έτσι να ελέγξει τον

ενεργό δείκτη διάθλασης που παρουσίαζε το τεχνητό αυτό μέσο [Kock, 1948]. Προς το τέλος του περασμένου αιώνα μελετήθηκαν chiral υλικά για ραντάρ και άλλες εφαρμογές.

Βέβαια αναμένουμε με ενδιαφέρον τις νέες ανακαλύψεις γύρω από αυτό το ζήτημα, όπου μπορούν πραγματικά να μας εκπλήξουν βρίσκοντας εφαρμογές όπου κανένας δεν φανταζόταν και να αλλάξουν ακόμη και την όλη κοσμοθεωρία μας.

1.2. Ιστορικά στοιχεία

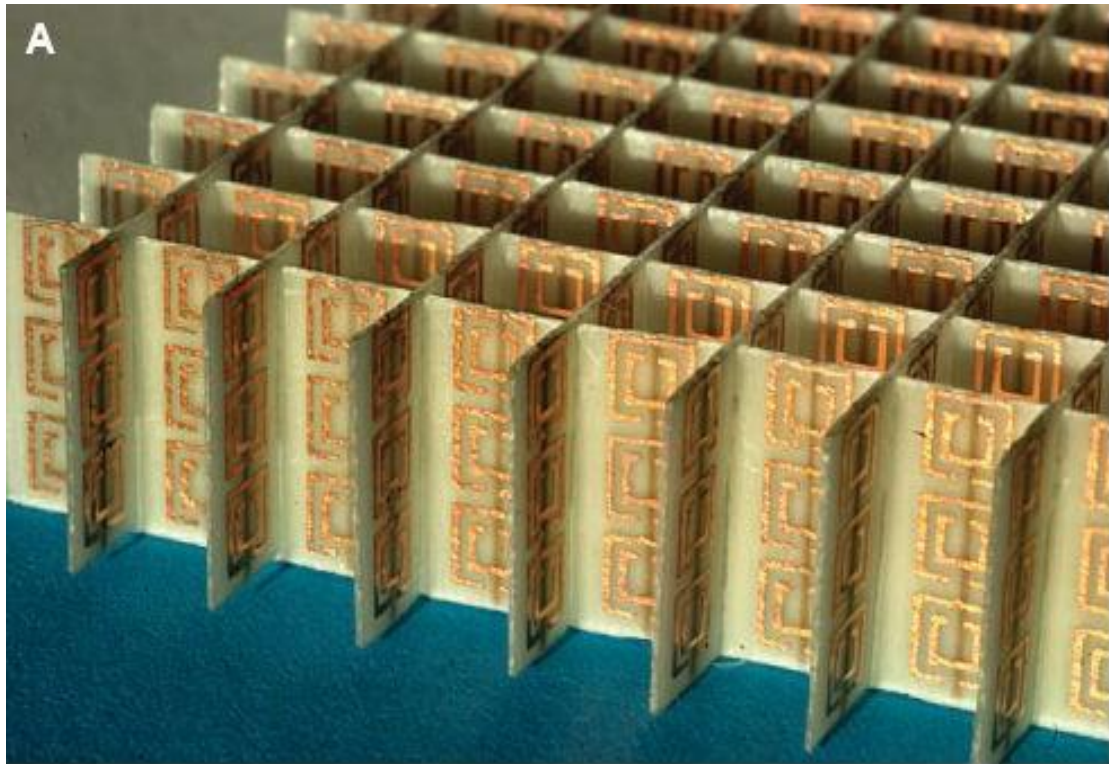
Όταν μια ακτίνα φωτός μεταβαίνει από ένα μέσο σε ένα άλλο, η πορεία της μεταβάλλεται. Αυτό ονομάζεται διάθλαση και είναι ένα από τα θεμελιώδη και πιο γνωστά φαινόμενα της φυσικής του φωτός. Η γωνία που σχηματίζεται από αυτή την μεταβολή περιγράφεται από τους δείκτες διάθλασης n των εμπλεκόμενων υλικών. Για όλα τα γνωστά φυσικά υλικά ο δείκτης διάθλασης n έχει τιμές πάνω από το μηδέν. Στα μέσα του περασμένου αιώνα, ένας Ρώσος φυσικός διερωτήθηκε τι θα γινόταν σε περίπτωση που υπάρξει ένα υλικό με αρνητικό δείκτη διάθλασης. Η απάντηση κρύβει πολλά ερωτήματα που ανατρέπουν ακόμη και τα θεμέλια της φυσικής του φωτός. Τι ακολούθησε μετά από την υπόθεση του Ρώσου φυσικού μέχρι σήμερα, και πως καταφέραμε σήμερα ένα σενάριο επιστημονικής φαντασίας, να το κάνουμε πραγματικότητα θα δούμε πιο κάτω.

Προσπαθώντας να καταγράψουμε το ιστορικό υπόβαθρο των υλικών με αρνητικό δείκτη διάθλασης, πρέπει πρώτα να αναφερθούμε στην προϊστορία της φυσικής του φωτός και συγκεκριμένα στο φαινόμενο της διάθλασης. Σκαλίζοντας λοιπόν το παρελθόν βλέπουμε ότι για το φαινόμενο της διάθλασης έγινε μια πρώτη αναφορά στα τέλη του δέκατου αιώνα, όταν πειραματιζόμενος με φακούς, ο Άραβας μαθηματικός και αστρονόμος Ibn Sahl [Apostolopoulos, 2006] παρατήρησε και κατέγραψε το συγκεκριμένο φαινόμενο. Πέρασε σχεδόν μισή χιλιετία και συγκεκριμένα το 1621 για να βρεθεί ο Willebrord van Roijen Snell, Ολλανδός δικηγόρος και μαθηματικός, ούτως ώστε καταγράψει το νόμο της διάθλασης, γνωστό σήμερα ως νόμο του Snell. Η εργασία του Snell δημοσιεύτηκε μετά το θάνατο του, το 1701 από τον Christian Huygens [Apostolopoulos, 2006]. Διακόσια χρόνια μετά την ανακάλυψη του νόμου της διάθλασης από το Snell, και συγκεκριμένα το 1873, ο Σκωτσέζος φυσικός James Clerk Maxwell [Maxwell, 1873] με μια ιστορική εργασία που δημοσίευσε, θα άλλαζε δια παντός τον τρόπο σκέψης αλλά και τη φιλοσοφία γύρω από τα σημαντικότερα φαινόμενα της φυσικής του φωτός. Στην εργασία «Πραγματεία στον Ηλεκτρισμό και Μαγνητισμό» ο Maxwell συνέδεσε το φως με τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα αλλάζοντας ριζικά το εννοιολογικό πλαίσιο στα διάφορα φαινόμενα της οπτικής, όπως η διάθλαση. Όπως θα δούμε πιο κάτω οι εξισώσεις του Maxwell έκρυβαν κάτι συναρπαστικό, που δεν το αντιλήφθηκε κανένας για αρκετά χρόνια.

Τον οραματισμό ή καλύτερα την πρόβλεψη ότι είναι δυνατή η ύπαρξη ενός υλικού με αρνητικό δείκτη διάθλασης, έκανε το 1967(στα ρωσικά, το 1968 η αγγλική μετάφραση) σε μια δημοσίευση του, ο Ρώσος φυσικός Victor Veselago του Ινστιτούτου Φυσικής Lebedev της ακαδημίας επιστημών της πρώην Σοβιετικής Ένωσης [Veselago, 1968]. Ο Veselago υιοθετώντας της εξισώσεις του Maxwell υπέθεσε ότι η ύπαρξη ενός τέτοιου υλικού είναι δυνατή, αφού δεν παραβιάζει κανένα φυσικό νόμο. Ο Veselago χρησιμοποιώντας τις

σταθερές μ και ϵ από τις εξισώσεις του Maxwell απέδειξε ότι η ύπαρξη υλικού με δείκτη διάθλασης αρνητικό, είναι εφικτή. Μάλιστα προέβλεπε και τη πληθώρα των νέων οπτικών φαινομένων που θα επιδείκνυε αυτό το θαυμαστό υλικό. Ο Veselago, αφού, αρχικά, απέδειξε τη συμβατότητα των υλικών αυτών με τις εξισώσεις του Maxwell, μελέτησε θεωρητικά, μερικές βασικές ιδιότητες τους όπως, είναι οι αντιπαράλληλες διευθύνσεις κυματικού διανύσματος και διανύσματος Poynting, η αντιστροφή της ακτινοβολίας Vavilov-Cerenkov και του φαινομένου Doppler, η αρνητική διάθλαση και η υποχρεωτική παρουσία χρονικής διασποράς. Επιπλέον, μελέτησε το φαινόμενο, όπου οι ακτίνες που προσπίπτουν σε ένα πλακίδιο που χαρακτηρίζεται από $\epsilon=\mu=-1$ από τα αριστερά, εστιάζουν σε ένα σημείο στα δεξιά του πλακιδίου. Παρόλα αυτά μέχρι πρόσφατα, λόγω του ότι τέτοια υλικά δεν υπάρχουν στη φύση(μέχρι τώρα δηλαδή) και λόγω τεχνολογίας κανένας δεν επέδειξε ενδιαφέρον, ούτε δοκίμασε να κατασκευάσει τέτοια υλικά, αφήνοντας την ιδέα του Veselago μία άσκηση στα πλαίσια της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας.

Ωστόσο τη τελευταία δεκαετία του περασμένου αιώνα τα υλικά με αρνητικό δείκτη διάθλασης έγιναν το επίκεντρο ζωνρών συζητήσεων και μερικές φορές έντονων αντιπαραθέσεων μεταξύ των ερευνητών. Συγκεκριμένα το 1996 ο John Pendry καθηγητής στο Imperial College του Λονδίνου πρότεινε μια σύνθετη περιοδική δομή, η οποία επιδεικνύει το φαινόμενο της αρνητικής διάθλασης [Pendry et al., 1996]. Ο John Pendry ασχολήθηκε εκτενώς με το συγκεκριμένο θέμα, εμπνευσμένος φυσικά από τον Veselago, αφήνοντας τη σφραγίδα του με δεκάδες δικά του άρθρα και εργασίες. Συγκεκριμένα στις εργασίες του Pendry, αποδείχτηκε ότι η περιοδική τοποθέτηση λεπτών συρμάτων στο χώρο οδηγεί σε μία ισοδύναμη διηλεκτρική σταθερά που ακολουθεί το μοντέλο διασποράς Drude, δηλαδή λαμβάνει αρνητικές τιμές για συχνότητες μικρότερες της συχνότητας πλάσματος. Έτσι με τη χρήση συντονιστών διακεκομμένου δακτυλίου(split-ring resonators, SRR) επιτυγχάνουμε την εμφάνιση μαγνητικού συντονισμού στις μικροκυματικές συχνότητες, όπως επίσης και την επίτευξη αρνητικών τιμών μαγνητικής διαπερατότητας για συχνότητες μεγαλύτερες από τη συχνότητα συντονισμού. Εμπνευσμένοι από τον Pendry, ο David Smith και οι ομάδα του στο πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας στο San Diego, πρότειναν ένα σύνθετο μέσο το οποίο παρουσίαζε ασυνήθιστες ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες [Smith et al., 2000] (σχήμα 1). Το παραπάνω υλικό χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα της ομάδας του Smith και του Kroll το 2000, επιβεβαιώνοντας ότι μια ακτίνα μικροκομματικής ακτινοβολίας υπέστη αρνητική διάθλαση διαπερνώντας τη διαχωριστική επιφάνεια του υλικού με τον αέρα σε μια συγκεκριμένη συχνотική περιοχή [Smith and Kroll, 2000]. Το πιο πάνω φαινόμενο δεν έχει παρατηρηθεί σε κανένα μέχρι τότε υλικό. Μετά τη δημοσίευση της εργασίας των Smith et al., ακολούθησαν άλλες εργασίες, όπως αυτή του Lindell [Lindell et al., 2001], όπου έγινε μια θεωρητική μελέτη των υλικών αρνητικού δείκτη διάθλασης. Το ίδιο διάστημα, επετεύχθη μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων, η επιβεβαίωση των θεωρητικών ευρημάτων του υλικού του Smith, με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (FDTD) [Ziolkowski and Heyman, 2001], με τις μεθόδους των πεπερασμένων στοιχείων (FE) [Caloz et al., 2001] και του πίνακα μεταφοράς (Tmatrix) [Markos and Soukoulis, 2001], [Markos and Soukoulis, 2002]. Επιστέγασμα αυτών των ερευνών ήταν η κατασκευή του πρώτου υλικού με αρνητικό δείκτη διάθλασης και η πειραματική επιβεβαίωση της αντιστροφής του νόμου του Snell [Shelby et al., 2001].



Σχήμα 1 : Το πρώτο μεταϋλικό

Σχήμα 1. Μεταϋλικό με αρνητικό δείκτη διάθλασης. Του David Smith [Smith et al., 2004].

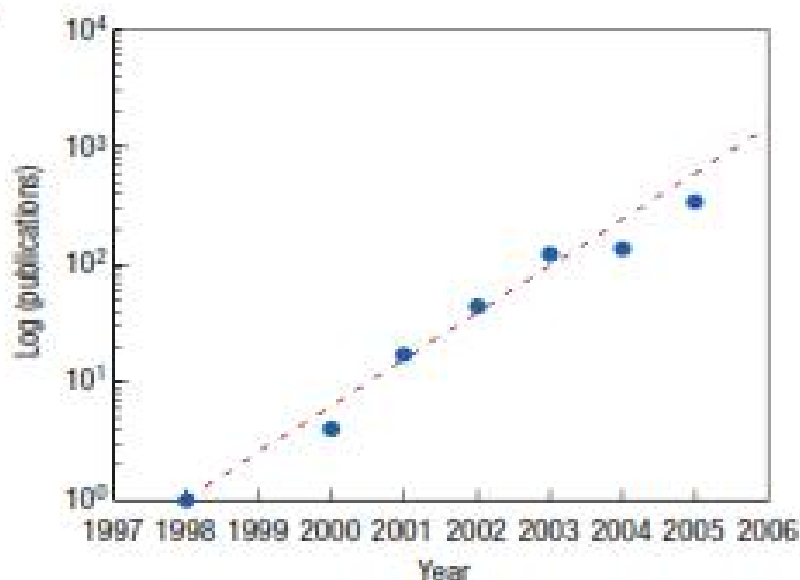
Το 2000 ο Pendry, σε μια από τις πιο προκλητικές προτάσεις του, και εμπνευσμένος από τον Veselago προέβλεπε ότι επίπεδο πλακίδιο ενός υλικού με αρνητικό δείκτη διάθλασης θα εστίαζε τις ακτίνες μιας κοντινής πηγής φωτός με ακρίβεια μεγαλύτερη από τη διακριτή ικανότητα οποιουδήποτε μέχρι τότε γνωστού υλικού [Pendry, 2000]. Η ονομασία που έδωσε ο Pendry σε αυτούς τους «εξωτικούς» (λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων που δεν εμφανίζονται στη φύση) φακούς ήταν «τέλειοι φακοί». Η ιδέα των τέλειων φακών εντυπωσίασε και αναμενόμενα ώθησε μια πλειάδα φυσικών και μηχανικών στην μελέτη τους και στην προσπάθεια κατασκευής τους. Στην ουσία ο τέλειος φακός ήταν και η πρώτη, και ίσως, η πιο ενδιαφέρουσα εφαρμογή των υλικών αυτών.

Η δυνατότητα αυτών των υλικών προκάλεσε σκεπτικισμό γενικότερα, και προκάλεσε την αμφισβήτηση από μέρος της επιστημονικής κοινότητας. Η ικανότητα τους να αντιστρέφουν τη διάθλαση δημιούργησε αρκετά ερωτηματικά όσον αφορά τη βασική φυσική εξήγηση των φαινομένων, όσο και για τις εφαρμογές τις οποίες πιθανόν να έβρισκαν. Συγκεκριμένα αμφισβητήθηκε η δυνατότητα επίτευξης αρνητικής διάθλασης για πραγματικούς διαμορφωμένους παλμούς στο πεδίο του χρόνου. Ακόμη θεωρήθηκαν λανθασμένα τα συμπεράσματα πειραματικών μελετών όσο αφορά την αντιστροφή του νόμου του Snell [Valanju et al., 2002]. Διαφωνίες εκφράστηκαν και για την ορθότητα της ανάλυσης του Pendry όσο αφορά τον τέλειο φακό και την ικανότητα του να ενισχύει τα αποσβεσμένα κύματα [Hooft, 2001] [Williams, 2001] [Garcia and Nieto-Vesperinas, 2002]. Την εμφάνιση

τους έκαναν σειρά μελετών προς απόρριψη ή επιβεβαίωση των ισχυρισμών αυτών. Όλες οι βασικές ιδιότητες επιβεβαιώθηκαν ξανά, όπως αυτή της διάθλασης [Smith et al., 2002] [Foteinopoulou et al., 2003] [Houck et al., 2003] και η ανάλυση του Pendry επιβεβαιώθηκε και κατανοήθηκε ως μια αργή διαδικασία στο πεδίο του χρόνου [Gomez-Santos, 2003]. Η τεκμηρίωση των βασικών ιδιοτήτων αυτών των υλικών, ξεκαθάρισε το τοπίο και άνοιξε τον δρόμο προς την καλύτερη μελέτη των υλικών αυτών.

Το 2004 οι Lakhtakia και Mackay, θεώρησαν ότι η αρνητική διάθλαση μπορεί να παρατηρηθεί και στις μεγάλες κλίμακες, όπως αυτές του διαστήματος [Mackay and Lakhtakia, 2004] [Mackay and Lakhtakia, 2004]. Αμφιλεγόμενη πρόταση που αντίκρουσε αντιδράσεις, που όμως μπορεί να έχει επαναστατικές συνέπειες σε όσον αφορά τη γνώση μας για τη σύσταση του σύμπαντος.

Γενικά η σύντομη και ακόμη φρέσκια προϊστορία των μεταϋλικών εντυπωσιάζει αν αναλογιστούμε ότι το ενδιαφέρον των μελετητών γύρω από το θέμα, πήρε και παίρνει διαστάσεις χρόνο με το χρόνο. Συγκεκριμένα οι δημοσιεύσεις που αφορούν τα μεταϋλικά και τον αρνητικό δείκτη διάθλασης ακολουθούν το νόμο του Moore, αφού τα τελευταία δεκαέξι χρόνια ο αριθμός τους διπλασιάζεται κάθε δέκα μήνες [Veselago and Narimanov, 2006] (σχήμα 2). Ευχή μας, είναι η συνεχής έρευνα των υλικών αυτών αλλά και η σωστή για την ανθρωπότητα χρήση τους.



Σχήμα 2 :Σχεδιάγραμμα Δημοσιεύσεων για Αρνητική Διάθλαση.

Σχήμα 2. Ιστορία της αρνητικής διάθλασης. Το σχεδιάγραμμα δείχνει τον αριθμό των ερευνητικών δημοσιεύσεων που αφορούν τα υλικά αρνητικού δείκτη διάθλασης και την αρνητική διάθλαση (σε λογαριθμική κλίμακα) [Veselago and Narimanov, 2006].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα επιχειρήσουμε να καταγράψουμε το θεωρητικό υπόβαθρο των υλικών με αρνητικό δείκτη διάθλασης. Θα προσπαθήσουμε να αναφέρουμε όλες τις ιδιότητες τους. Όπως επίσης και τους τρόπους κατασκευής τους. Επίσης θα γίνει απόπειρα κατηγοριοποίησης τους με βάση τις καταστατικές τους παραμέτρους. Το γενικό θέμα της εργασίας αυτής έχει να κάνει με τον αρνητικό δείκτη διάθλασης και θα γίνει προσπάθεια καταγραφής της θεωρίας πίσω από τον δείκτη διάθλασης.

Πρέπει εξ αρχής, να καθορίσουμε ένα όνομα για τα υλικά με αρνητικές καταστατικές παραμέτρους, όπου θα μας βοηθήσει στη συνέχεια της εργασίας μας, μιας και η λέξη μεταυλικά δεν αντιπροσωπεύει μόνο τα υλικά με αρνητικές καταστατικές παραμέτρους, αλλά μια μεγάλη γκάμα υλικών όπως θα δούμε και πιο κάτω. Ανατρέχοντας λοιπόν στη βιβλιογραφία, συναντούμε ένα πρόβλημα σχετικά με την ονομασία των υλικών αυτών, και είναι η έλλειψη μιας κοινώς χρησιμοποιούμενης ονομασίας. Γενικά οι όροι που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία για να εκφράσουν τα υλικά αυτά είναι πολλοί. Συγκεκριμένα είναι υλικά Veselago, αριστερόστροφα υλικά(left-handed), διπλό-αρνητικά υλικά, υλικά οπισθοκατευθυντικού κύματος, και υλικά αρνητικού δείκτη διάθλασης. Ο πρώτος όρος αποτυπώνει το γεγονός ότι ο πρώτος που αναφέρθηκε σε αυτά τα υλικά ήταν ο Ρώσος φυσικός Veselago, και ο δεύτερος είναι απόρροια της ονομασίας που τους δόθηκε από τον ίδιο το Veselago. Τον όρο αριστερόστροφα υλικά συναντήσαμε για πρώτη φορά το 1968 στην ιστορική κατά πολλούς δημοσίευση του Ρώσου φυσικού Victor Veselago του Ινστιτούτου Φυσικής Lebedev της ακαδημίας επιστημών της πρώην Σοβιετικής Ένωσης [Veselago, 1968]. Στην εργασία του ο Victor Veselago αναφερόμενος στα υλικά με αρνητικούς παραμέτρους ϵ και μ , τα ονόμασε αριστερόστροφα (left-handed). Ο λόγος είναι γιατί το διανυσματικό γινόμενο του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου ενός κύματος με ϵ και μ θετικά, είναι δεξιόστροφο. Ενώ σε ένα υλικό με αρνητικές παραμέτρους ϵ και μ , θα είναι αντιπαράλληλο, δηλαδή αριστερόστροφο, όπως θα δούμε και στη συνέχεια. Ο όρος διπλό-αρνητικά αποτυπώνει το αρνητικό πρόσημο των καταστατικών τους παραμέτρων ϵ και μ . Οι άλλοι δύο όροι είναι απόρροια μερικών εκ των βασικών ιδιοτήτων τους. Λόγω του ότι μερικές ιδιότητες εμφανίζονται και σε άλλες διατάξεις, αποκλείουμε τις ονομασίες αυτές, όπως και την ονομασία αριστερόστροφα, γιατί στην ουσία χαρακτηρίζει ιδιότητα. Οι όροι υλικά Veselago και διπλό-αρνητικά αντιπροσωπεύουν απόλυτα τα υλικά αυτά και λόγω του ότι ο όρος υλικά Veselago δεν είναι σύνηθες στη βιβλιογραφία, θα ονοματίσουμε τα υλικά αυτά ως διπλό-αρνητικά.

Διπλό-αρνητικά υλικά λοιπόν, πως επιτυγχάνεται αυτή η συνθήκη και ποιες ξεχωριστές ιδιότητες έχουν; Είναι ερωτήματα που θα προσπαθήσουμε να δώσουμε απαντήσεις στη συνέχεια του κεφαλαίου.

2.2 Ιδιότητες διπλό-αρνητικών υλικών

Ο Ρώσος φυσικός Victor Veselago κατάφερε να αποδείξει στην εργασία του το 1967 [Veselago, 1968] ότι ένα μονοχρωματικό ομοιόμορφο επίπεδο κύμα μπορεί να διαδοθεί σε ένα υλικό με αρνητική διηλεκτρική σταθερά ϵ , και αρνητική σχετική μαγνητική διαπερατότητα μ , με κάποιες πολύ ενδιαφέρουσες ιδιότητες. Συγκεκριμένα οι ιδιότητες, οι οποίες παρουσιάζουν τα διπλό-αρνητικά υλικά είναι:

- Ø Αρνητική διάθλαση
- Ø Αντιπαράλληλο δiάνυσμα Poynting και κυματικό δiάνυσμα
- Ø Αντιστροφή ολίσθησης Doppler
- Ø Αντίθετη διεύθυνση ακτινοβολίας Vavilov-Cerenkov
- Ø Υποχρεωτική παρουσία Χρονικής Διασποράς
- Ø Επίπεδο πλακίδιο $\epsilon=\mu=-1$, εστιάζει με μεγάλη διακριτική ικανότητα

Μερικές από αυτές τις επαναστατικές ιδιότητες που ανέφερε ο Victor Veselago το 1967 αλλά και στη συνέχεια ο Βρετανός John Pendry το 1996 [Pendry, 1996] θα αναλύσουμε στη συνέχεια.

2.2.1 Αρνητική διάθλαση

Ο δείκτης διάθλασης ενός υλικού μετρά πόσο γρήγορα διαδίδεται το φως μέσα σε ένα υλικό. Όταν το φως εισέρχεται σε ένα υλικό αλλάζει ταχύτητα, επιβραδύνει ή επιταχύνει και αυτό έχει επίδραση στην πορεία διάδοσης του. Άρα μπορούμε να πούμε ότι ο δείκτης διάθλασης n υπολογίζει πως το φως κάμπτεται όταν μεταδίδεται από ένα υλικό σε ένα άλλο. Ο δείκτης διάθλασης ορίζεται ως ο λόγος της ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο κενό, γνωστό ως c (ταχύτητα του φωτός), προς την ταχύτητα διάδοσης στο υπό εξέταση διαπερατό μέσο U (ταχύτητα). Ισχύει δηλαδή η εξίσωση:

$$n = c/u \quad (1.)$$

Με την πιο πάνω εξίσωση αντιλαμβανόμαστε ότι ο δείκτης διάθλασης στο κενό είναι $n = 1$. Ο δείκτης διάθλασης της ατμόσφαιρας είναι περίπου 1 αφού η διαφορά με το κενό είναι αμελητέα. Για να βρούμε το δείκτη διάθλασης ενός υλικού χρησιμοποιούμε το νόμο του Snell:

$$n_1 \eta \mu \theta_1 = n_2 \eta \mu \theta_2 \quad (2.)$$

Όπου θ_1 είναι η γωνία πρόσπτωσης και θ_2 η γωνία διάθλασης.

Από την άλλη το φως είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα και η διάδοση του δίνεται από τις εξισώσεις του Maxwell. Η απόκριση ενός υλικού στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο περιγράφεται από την διηλεκτρική σταθερά ϵ και τη σχετική μαγνητική διαπερατότητα μ , όπου αν πολλαπλασιαστούν μας δίνουν το τετράγωνο του δείκτη διάθλασης.

$$n^2 = \epsilon \mu \quad (3.1)$$

Άρα:

$$n = \sqrt{\epsilon \mu} \quad (3.2)$$

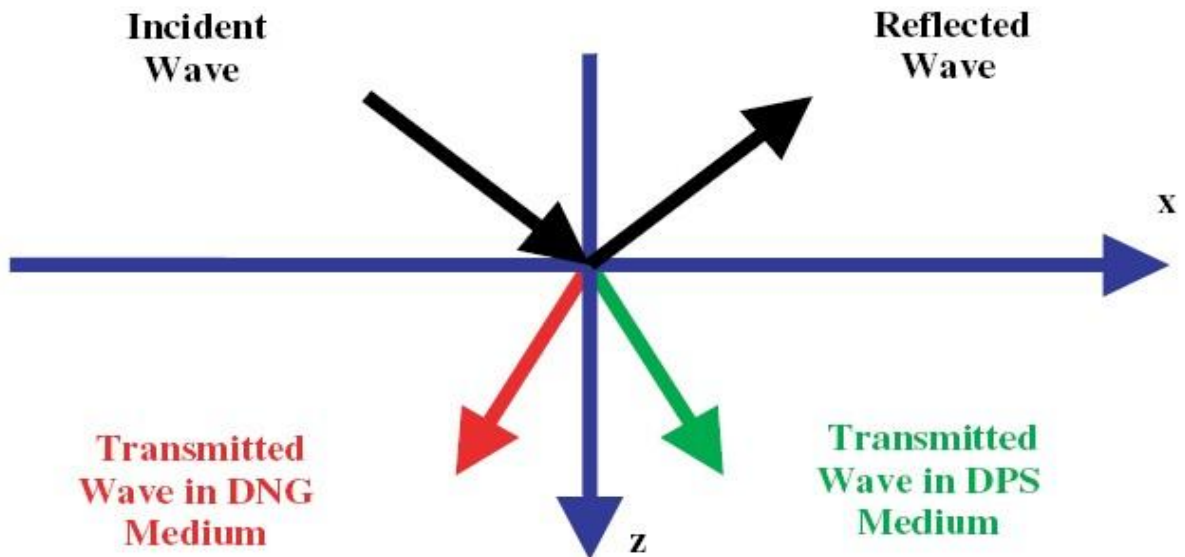
Αυτές οι δύο παράμετροι χαρακτηρίζουν ένα υλικό και βρίσκονται στις εξισώσεις του Maxwell. Σε όλα τα γνωστά υλικά η διηλεκτρική σταθερά έχει τιμές μεγαλύτερες του μηδέν πλην μερικών εξαιρέσεων (όπως το ασήμι και ο χρυσός) και η σχετική μαγνητική διαπερατότητα, μεγαλύτερη του μηδέν σε όλα τα γνωστά φυσικά υλικά. Εφαρμόζοντας τώρα τις πιο πάνω εξισώσεις γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι σε όλα τα γνωστά φυσικά μέσα έχουμε θετικό δείκτη διάθλασης.

Το ερώτημα τώρα είναι αν μπορεί να υπάρξει ένα υλικό με αρνητικό δείκτη διάθλασης και ποιες συνθήκες πρέπει να υπάρχουν ούτως ώστε να υπάρξει αυτό το υλικό. Εύλογα με τον πιο πάνω συνειρμό καταλαβαίνουμε ότι για να έχουμε αρνητικό δείκτη διάθλασης σε ένα υλικό πρέπει οι καταστατικοί παράμετροι ϵ και μ να έχουν αρνητικές τιμές. Αυτό είναι όμως αρκετό; Γνωρίζοντας ότι ο δείκτης διάθλασης ισούται με τη τετραγωνική ρίζα του γινομένου των καταστατικών παραμέτρων ϵ και μ , όπως είδαμε και πιο πάνω και υποθέτοντας πως τα ϵ και μ είναι αρνητικά, δημιουργείται μία απορία. Θα μπορούσε να αναρωτηθεί κάποιος, γνωρίζοντας ότι το γινόμενο ομόσημων ποσοτήτων είναι πάντοτε θετικό, σε τι διαφέρει ένα υλικό που χαρακτηρίζεται από αρνητικές παραμέτρους, από ένα με θετικές παραμέτρους; Μελετώντας προσεκτικά τις παραμέτρους ϵ και μ , διαπιστώνουμε ότι τα ϵ και μ είναι αναλυτικές συναρτήσεις και γενικά έχουν μιγαδικές τιμές. Δηλαδή γράφονται σαν ποσότητες με ένα πραγματικό και ένα φανταστικό μέρος. Στην περίπτωση των αρνητικών παραμέτρων, το πραγματικό τους μέρος είναι μια αρνητική ποσότητα και αν η τετραγωνική ρίζα είτε του ϵ , είτε του μ ξεχωριστά έχει θετικό φανταστικό μέρος, τότε και η τετραγωνική ρίζα του γινομένου δύο τέτοιων ποσοτήτων προκύπτει αρνητική.

$$n = -\sqrt{\epsilon\mu} \text{ εάν } \epsilon_{\text{πραγματικό}} < 0, \mu_{\text{πραγματικό}} < 0 \quad (3.2.1)$$

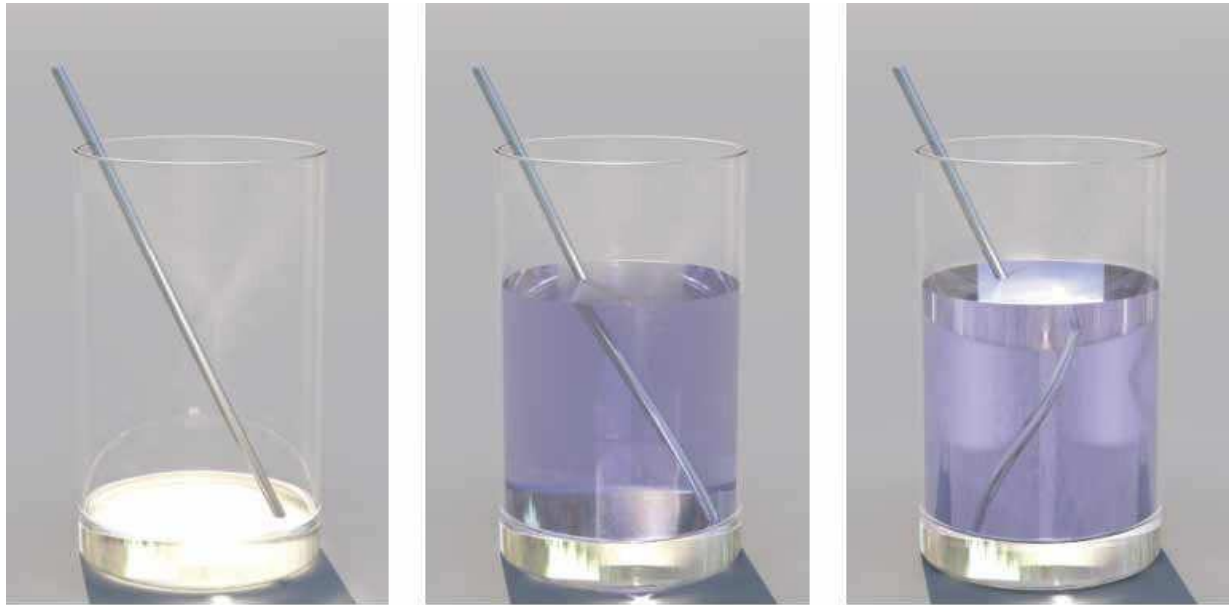
Επομένως με τα πιο πάνω γίνεται αντιληπτή η μοναδικότητα των υλικών που αρχικά είχε μελετήσει ο Ρώσος φυσικός Victor Veselago. Αφού ο δείκτης διάθλασης τους, αν και προκύπτει ως η τετραγωνική ρίζα δύο ομόσητων ποσοτήτων, θα είναι αρνητικός.

Ο νόμος του Snell, όπου είδαμε και πιο πάνω, ο οποίος περιγράφει ποσοτικά την αλλαγή πορείας ενός κύματος καθώς διαδίδεται από ένα μέσο σε ένα άλλο, επιβεβαιώνει την αλλαγή της κυματικής διάθλασης. Στην περίπτωση των διπλό-αρνητικών υλικών, αφού αποδείξαμε πιο πάνω την ιδιότητα του αρνητικού δείκτη διάθλασης, σύμφωνα με τον νόμο του Snell, το φως θα κάμπτεται κατά την αντίθετη κατεύθυνση από ό,τι θα συνέβαινε σε ένα συμβατικό υλικό με θετικό δείκτη διάθλασης. Αν ο δείκτης διάθλασης του μέσου είναι αρνητικός, τότε η γωνία διάθλασης σύμφωνα με το νόμο του Snell θα είναι αρνητική, πράγμα που σημαίνει ότι η γωνία διάθλασης θα είναι στην ίδια πλευρά (ως προς την κάθετη στη διαχωριστική επιφάνεια) με τη γωνία πρόσπτωσης, όπως μπορούμε να δούμε σχηματικά στο σχήμα 3. Ο νόμος του Snell, αφού δεν παραβιάζεται σε αυτήν την περίπτωση, μπορεί να αποτελέσει τη βάση για την απευθείας μέτρηση του δείκτη διάθλασης ενός υλικού, είτε πειραματικά, είτε υπολογιστικά. Μια πολύ χαρακτηριστική απεικόνιση της ιδιότητας της αρνητικής διάθλασης παρουσιάζεται στα σχήματα 4 και 5.



Σχήμα 3: «Αντιστροφή» Διάθλασης.

Σχήμα 3. Γεωμετρία της σκέδασης ενός κύματος που προσπίπτει πλάγια σε μια συμβατική (DPS) και μια διπλό-αρνητική (DNG) διαχωριστική επιφάνεια.



(a)

(b)

(c)

Σχήμα 4 : Αρνητική Διάθλαση.

Σχήμα 4.α) Άδειο ποτήρι. β) Ποτήρι νερού με $n > 0$. γ) Ποτήρι "νερού" με $n < 0$.
[\[https://www.cfn.kit.edu/440.php\]](https://www.cfn.kit.edu/440.php)



Σχήμα 5 : Αρνητική Διάθλαση.

Σχήμα 5: Αριστερά ποτήρι με νερό με $n > 0$ και δεξιά ποτήρι με αδιαφανές υλικό με $n < 0$.

2.2.2 Διάδοση επίπεδου κύματος σε διπλό-αρνητικό υλικό

Η μελέτη της διάδοσης ενός κύματος μέσα σε ένα υλικό, είναι αναγκαία για την κατανόηση των ιδιοτήτων του υλικού. Έτσι, θα προσπαθήσουμε να μελετήσουμε τις εξισώσεις του Maxwell και να εξάγουμε τα βασικά χαρακτηριστικά των διπλό-αρνητικών υλικών. Η ανάλυση που θα προσπαθήσουμε να κάνουμε, θα ξεκινήσει από τη διαφορική μορφή των δύο πρώτων εξισώσεων του Maxwell:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -i\omega\mu\mathbf{H} \quad (4.)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = i\omega\varepsilon\mathbf{E} \quad (5.)$$

Από τις εξισώσεις αυτές προκύπτει, μια γενική μορφή της ηλεκτρικής και μαγνητικής πεδιακής έκτασης ενός επίπεδου κύματος, όπου είναι $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i(kr - \omega t)}$ και $\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 e^{i(kr - \omega t)}$. Και όπου H_0 και E_0 τα αντίστοιχα πλάτη, με r το διάνυσμα θέσης και k το κυματικό διάνυσμα. Αν αντικαταστήσουμε τα παραπάνω στις εξισώσεις (4) και (5), τότε θα έχουμε τις πιο κάτω εξισώσεις Maxwell, γραμμένες σε πιο απλή μορφή:

$$k \times \mathbf{E} = \omega\mu\mathbf{H} \quad (6.)$$

$$k \times \mathbf{H} = -\omega\varepsilon\mathbf{E} \quad (7.)$$

Από τα τις πιο πάνω εξισώσεις προκύπτει ότι εάν έχουμε θετικό ε και θετικό μ , τότε τα διανύσματα \mathbf{E} , \mathbf{H} , και k σχηματίζουν μία δεξιόστροφη τριάδα διανυσμάτων (Right-Handed). Δηλαδή ένα δεξιόστροφο σύστημα συντεταγμένων. Αν όμως μελετήσουμε τη διάδοση επίπεδου κύματος σε ένα διπλό-αρνητικό μέσο, τότε οι εξισώσεις ξαναγράφονται ως:

$$\mathbf{k} \times \mathbf{E} = -\omega|\mu|\mathbf{H} \quad (8.)$$

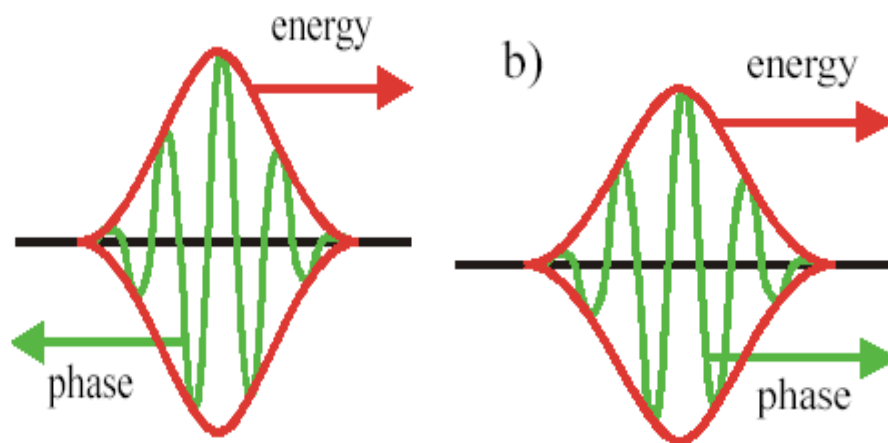
$$\mathbf{k} \times \mathbf{H} = \omega|\varepsilon|\mathbf{E} \quad (9.)$$

Σε αυτή τη περίπτωση είναι φανερό ότι τα διανύσματα \mathbf{E} , \mathbf{H} και \mathbf{k} σχηματίζουν ένα αριστερόστροφο σύστημα συντεταγμένων (left-handed). Δηλαδή αντίθετα, από ότι συμβαίνει σε ένα συμβατικό διπλό-θετικό μέσο. Την πιο πάνω απόδειξη είχε κάνει και ο Veselago το 1967, και οδηγήθηκε στην ονομασία των υλικών αυτών, ως αριστερόστροφα και συγκεκριμένα left-handed.

Στο σημείο αυτό θα εξετάσουμε τη μεταφορά ενέργειας σε ένα διπλό-αρνητικό υλικό, όπου η διεύθυνση διάδοσης ενός κύματος δίδεται από το διάνυσμα Poynting. Το διάνυσμα Poynting εξακολουθεί να δίδεται από τη πιο κάτω σχέση:

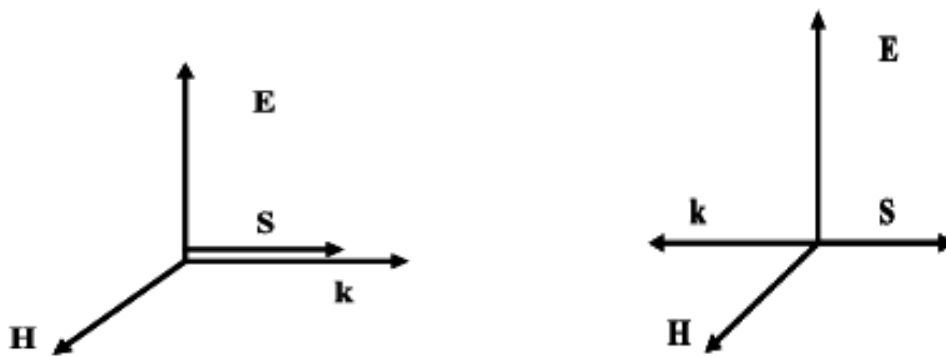
$$\mathbf{S} = \frac{1}{2}\mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \quad (10.)$$

Η πιο πάνω σχέση, φανερώνει ότι η τριπλέτα $\mathbf{E}, \mathbf{H}, \mathbf{k}$ εξακολουθεί να ακολουθεί τον κανόνα του δεξιού χεριού, δηλαδή το διάνυσμα Poynting παραμένει ανεπηρέαστο όταν τα ε και το μ είναι αρνητικά. Το σημαντικότερο εύρημα αυτή τη φορά, είναι ότι το διάνυσμα Poynting \mathbf{S} έχει αντίθετη φορά από αυτή του \mathbf{k} . Με άλλα λόγια η διεύθυνση ροής της ισχύος είναι αντίθετη προς τη διεύθυνση διάδοσης των μετώπων κύματος. Αυτή η ιδιαίτερη ιδιότητα είναι πάρα πολύ σημαντική και εμφανίζει ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά. Το γεγονός ότι τα διανύσματα \mathbf{k} και \mathbf{S} είναι αντίρροπα διανύσματα, έδωσε την ευκαιρία σε μεγάλη μερίδα επιστημών να υιοθετήσουν τον όρο μέσα οπισθοκατευθυντικού κύματος ή backward-wave media για τα υλικά με αρνητικές τις καταστατικές παραμέτρους ε και μ . Το πιο πάνω χαρακτηριστικό, κάνει τα κύματα να φαίνονται ότι κινούνται πίσω στο χρόνο. Στα πιο κάτω σχήματα μπορούμε να δούμε την χαρακτηριστική ιδιότητα των διπλό-αρνητικών υλικών.



Σχήμα 6 : Διάδοση Κύματος.

Σχήμα 6α και 6β. Στο σχήμα 6α βλέπουμε με κόκκινο χρώμα τη ροή της ενέργειας και με πράσινο τη ταχύτητα του κύματος, σε διπλό-αρνητικό υλικό. Δεξιά και στο σχήμα 6β. βλέπουμε τα ίδια χαρακτηριστικά σε ένα συμβατικό υλικό [Pendry, 2004].

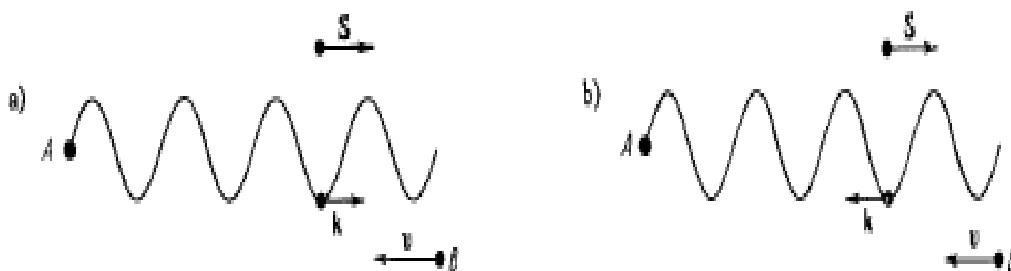


Σχήμα 7 : Διεύθυνση Διανύσματος.

Σχήμα 7α και 7β. Βλέπουμε τις σχετικές διευθύνσεις των διανυσμάτων σε ένα συμβατικό μέσο (αριστερά) όπου παρατηρείται ο κανόνας του δεξιού χεριού. Όπως και σε ένα διπλό-αρνητικό μέσο όπου παρατηρείται ο κανόνας του αριστερού χεριού.

2.2.3 Φαινόμενο Doppler

Το γεγονός ότι στα διπλό-αρνητικά το φως διαδίδεται προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτή της ροής ενέργειας, έχει ως αποτέλεσμα κάποια πολύ ενδιαφέροντα φαινόμενα, όπως η αντιστροφή του φαινομένου Doppler. Η ολίσθηση Doppler είναι η διαφορά ανάμεσα στη συχνότητα που ακτινοβολεί μία πηγή και σε αυτήν που μετράει ένας παρατηρητής, όταν αυτός βρίσκεται σε σχετική κίνηση ως προς την πηγή. Το φαινόμενο μπορεί να είναι γνωστό στους περισσότερους από τα ηχητικά κύματα, όπως για παράδειγμα, όταν έρχεται προς το μέρος μας ένα αυτοκίνητο κορνάροντας και καθώς αυτό μας προσπερνά, η οξύτητα του ήχου ελαττώνεται. Αυτό το φαινόμενο αλλαγής συχνότητας του κύματος, όταν υπάρχει κίνηση μεταξύ της πηγής και του ακροατή, παρουσιάζεται και στην περίπτωση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Ας υποθέσουμε ότι ένας παρατηρητής κινείται προς το μέρος μιας πηγής, με σταθερή ταχύτητα και φορά. Η συχνότητα που μετράει ο παρατηρητής καθορίζεται από το χρόνο που χρειάζεται για να συναντήσει ένα μέτωπο κύματος. Σε ένα συμβατικό υλικό, τα μέτωπα κύματος διαδίδονται με φορά αντίθετη από τη φορά κίνησης του παρατηρητή. Σε ένα διπλό-αρνητικό υλικό, τα κύματα που ακτινοβολούνται είναι οπισθοκατευθυντικά και τα μέτωπα κύματος διαδίδονται αντίστροφα από τα συνηθισμένα, δηλαδή διαδίδονται με φορά προς την πηγή, όπως ακριβώς κινείται ο παρατηρητής. Εν ολίγοις, η συχνότητα μιας πηγής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που κατευθύνεται προς μια κατεύθυνση, θα εμφανίζεται μειωμένη καθώς πλησιάζει τον παρατηρητή, και αυξημένη καθώς απομακρύνεται. Ενώ σε ένα συμβατικό μέσο συμπεριφέρεται αντίθετα. Ένα παράδειγμα του φαινομένου μπορούμε να δούμε στο πιο κάτω σχήμα.

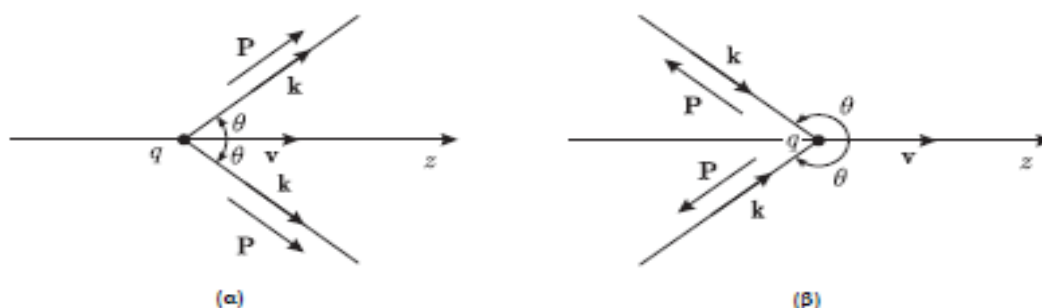


Σχήμα 8 : Φαινόμενο Doppler.

Σχήμα 8α. και 8β. Στα σχήμα 8α βλέπουμε το αποτέλεσμα του φαινομένου Doppler σε συμβατικό υλικό και στο 8β σε διπλό-αρνητικό υλικό. Το γράμμα A είναι η πηγή της ακτινοβολίας και το γράμμα B, ο παρατηρητής [Veselago, 1968].

2.2.4 Ακτινοβολία Vavilov-Cerenkov

Μία άλλη ιδιότητα που ο ίδιος ο Veselago προέβλεπε στην εργασία του το 1967, είναι η αντιστροφή της ακτινοβολίας Vavilov-Cerenkov. Τα αποτελέσματα της ακτινοβολίας Vavilov-Cerenkov θα είναι αντίστροφα, όπως ακριβώς αυτά του φαινομένου Doppler. Η ακτινοβολία Vavilov-Cerenkov είναι το φαινόμενο που παρουσιάζεται όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο κινείται μέσα σε ένα υλικό με ταχύτητα μεγαλύτερη από τη ταχύτητα του φωτός για το συγκεκριμένο υλικό και έπειτα εκπέμπεται ενέργεια προς την ίδια κατεύθυνση με αυτή της κατεύθυνσης του σωματιδίου, σχηματίζοντας ένα κώνο συγκεκριμένης γωνιάς. Κλασικό παράδειγμα στα ηχητικά κύματα είναι ο ήχος έκρηξης που παρατηρείται όταν ένα μαχητικό αεροσκάφος διασπά το φράγμα του ήχου στον αέρα. Όταν λοιπόν, ένα φορτισμένο σωματίδιο κινείται μέσα σε ένα διπλό-αρνητικό υλικό, με ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτή του φωτός του υλικού, θα ακτινοβολήσει ισχύ με φορά αντίθετη προς την φορά κίνησης του. Βέβαια, μία εργασία [Lu et al.,2003] αναλύει ότι λόγω του ότι κάθε διπλό-αρνητικό μέσο εμφανίζει διασπορά, θα υπάρχει ισχύς η οποία θα κινείται προς την κατεύθυνση που κινείται το σωματίδιο. Όπως φαίνεται στην πιο πάνω εργασία, η ισχύς που θα κατευθύνεται στη φορά του σωματιδίου αντιστοιχεί στις συχνότητες στις οποίες οι καταστατικές παράμετροι ϵ και μ του υλικού είναι θετικές. Στα επόμενα δύο σχήματα μπορούμε να δούμε πως συμπεριφέρεται το φαινόμενο Vavilov-Cerenkov, όπως και το διάνυσμα Poynting και το κυματικό διάνυσμα k . Βλέπουμε ότι σε ένα διπλό-αρνητικό υλικό, ο κώνος ακτινοβολίας είναι αντίθετος από ότι σε ένα συμβατικό.



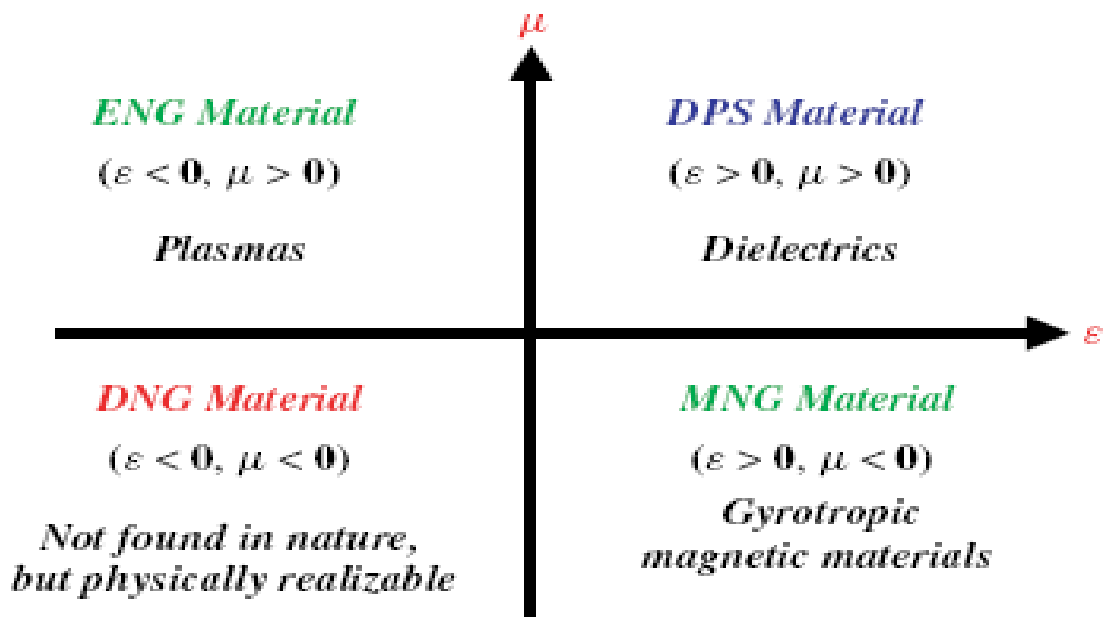
Σχήμα 9. Ακτινοβολία Vavilov-Cerenkov.

Σχήμα 9α και 9β. Ακτινοβολία Vavilov-Cerenkov σε ένα συμβατικό υλικό (σχήμα 9α) και σε ένα διπλό-αρνητικό (σχήμα 9β).

2.3 Κατηγοριοποίηση Ηλεκτρομαγνητικών Μεταύλικών

Στο κεφάλαιο αυτό θα προσπαθήσουμε να χωρίσουμε τα μεταύλικά σε κατηγορίες. Βέβαια υπάρχουν αρκετοί τρόποι κατηγοριοποίησης, αλλά εμείς θα επιχειρήσουμε να κάνουμε την κατηγοριοποίηση μας βάση των μακροσκοπικών παραμέτρων της διηλεκτρικής σταθεράς ϵ και της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας μ .

Είναι γνωστό ότι η απόκριση ενός συστήματος παρουσία ηλεκτρομαγνητικού πεδίου καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τις ιδιότητες των υλικών που εμπλέκονται. Θα περιγράψουμε τις ιδιότητες αυτές μέσω του καθορισμού των μακροσκοπικών παραμέτρων ϵ και μ . Αυτό μας επιτρέπει τις ακόλουθες κατηγοριοποιήσεις όσον αφορά το υλικό. Η κατηγοριοποίηση αυτών των υλικών παρουσιάζεται γραφικά στο σχήμα 10. Εδώ πρέπει να πούμε, ότι ενώ συνήθως περιγράφουμε ένα υλικό με σταθερές τιμές διηλεκτρικής σταθεράς και μαγνητικής διαπερατότητας, δηλαδή ανεξάρτητες τις συχνότητας, στην πραγματικότητα οι ιδιότητες των υλικών εξαρτώνται από τη συχνότητα.



Σχήμα 10 : Κατηγορίες μεταύλικών.

Σχήμα 10. Κατηγοριοποίηση υλικών. Στον οριζόντιο άξονα η διηλεκτρική σταθερά ϵ και στον κάθετο η μαγνητική διαπερατότητα μ . [Paudyal et al., 2013]

2.3.1 Διπλό-θετικά

Στην κατηγορία αυτή κατατάσσονται όλα τα υλικά με θετική διηλεκτρική σταθερά και σχετική μαγνητική διαπερατότητα ($\epsilon > 0$ και $\mu > 0$), και χαρακτηρίζονται ως διπλό-θετικά ή καλύτερα double-positive υλικά. Για συντομογραφία τα γράφουμε DPS. Τα περισσότερα, αδιαφανή υλικά που βρίσκονται στη φύση εμπίπτουν σε αυτή τη κατηγορία. Επίσης τα υλικά αυτά μπορούν να διαδώσουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία κινούνται προς τα εμπρός, δηλαδή ακολουθούν τον κανόνα του δεξιού χεριού.

2.3.2 Διπλό-Αρνητικά

Τα διπλό-αρνητικά υλικά αναφέρονται ως υλικά με αρνητική διηλεκτρική σταθερά και αρνητική σχετική μαγνητική διαπερατότητα ($\epsilon < 0$ και $\mu < 0$). Στην αγγλική ορολογία εμφανίζονται ως double negative υλικά. Σε συντομογραφία γράφονται ως DNG. Μέχρι και σήμερα δεν έχει βρεθεί στη φύση ένα τέτοιο υλικό, και η συγκεκριμένη κατηγορία περιλαμβάνει μόνο τεχνητά κατασκευασμένα υλικά. Τα διπλό-αρνητικά υλικά, είναι τα υλικά τα οποία μελέτησε ο Veselago και στις μέρες μας αποτελούν τα υλικά με τις πιο αξιοθαύμαστες ιδιότητες, όπου βέβαια οι επιστήμονες προσπαθούν να τελειοποιήσουν. Στα διπλό-αρνητικά υλικά μπορεί να γίνει διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, όπου, φαίνονται να κινούνται προς τα πίσω. Τα υλικά αυτά έχουν αρνητικό δείκτη διάθλασης.

2.3.3 Μονό-αρνητικά

Τα μονό-αρνητικά υλικά, έχουν μία καταστατική παράμετρο αρνητική. Είτε τη διηλεκτρική σταθερά ϵ , είτε τη σχετική μαγνητική διαπερατότητα μ , όχι και τα δύο. Αυτά τα υλικά έχουν ξεχωριστές ιδιότητες, και διαφέρουν από τις δύο άλλες κατηγορίες. Σε συντομία μπορούμε να τα δούμε γραμμένα ως SNG. Ας δούμε ξεχωριστά τα υλικά αυτά.

- Ø ENG: Είναι τα υλικά που έχουν αρνητική διηλεκτρική σταθερά και θετική σχετική μαγνητική διαπερατότητα ($\epsilon < 0$ και $\mu > 0$). Χαρακτηρίζονται ως έψιλον αρνητικά ή καλύτερα epsilon-negative, και συντομογραφικά ENG. Σε ορισμένες περιοχές συχνοτήτων πολλά είδη υλικών εμφανίζουν αυτό το χαρακτηριστικό. Για παράδειγμα, τα ευγενή μέταλλα όπως ασήμι και χρυσός, συμπεριφέρονται με αυτό τον τρόπο στην περιοχή των υπέρυθρων και των οπτικών συχνοτήτων.
- Ø MNG: Είναι τα υλικά με θετική διηλεκτρική σταθερά και αρνητική σχετική μαγνητική διαπερατότητα ($\epsilon > 0$ και $\mu < 0$). Χαρακτηρίζονται ως μι-αρνητικά ή mu-negative, εν συντομία MNG. Σε ορισμένες συχνοτήτες μερικά γυροτροπικά υλικά εμφανίζουν αυτό το χαρακτηριστικό. Επίσης, πρέπει να πούμε ότι υπάρχουν υλικά που έχουν κατασκευαστεί στο εργαστήριο και εμφανίζουν DPS, ENG και MNG ιδιότητες.

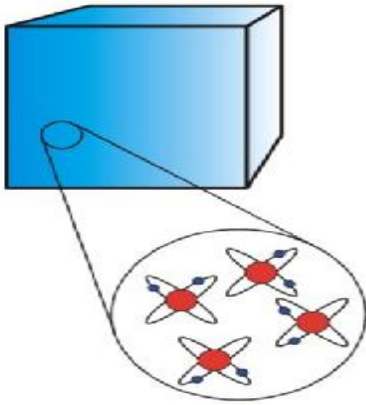
2.4 Υλοποίηση μεταϋλικών

Τα τελευταία χρόνια η ανακάλυψη νέων τεχνικών σύνθεσης και κατασκευής καινούργιων, σύνθετων υλικών έχει δώσει μεγάλη ώθηση στην έρευνα γύρω από τα μεταϋλικά. Το αποτέλεσμα της έρευνας που γίνεται από όλη τη επιστημονική κοινότητα έχει βοηθήσει να αναπτυχθεί η τεχνογνωσία κατασκευής τέτοιων υλικών. Το θέμα αυτής της εργασίας δεν έχει να κάνει με τους τρόπους υλοποίησης των μεταϋλικών, αλλά θα ήταν παράληψη μου να μην αναφερθώ εν συντομία σε αυτούς [Smith and Pendry, 2006] [Ziolkowski and Heyman, 2001] [Caloz et al., 2001] [Markos and Souloukis, 2001] [Shelby et al., 2001].

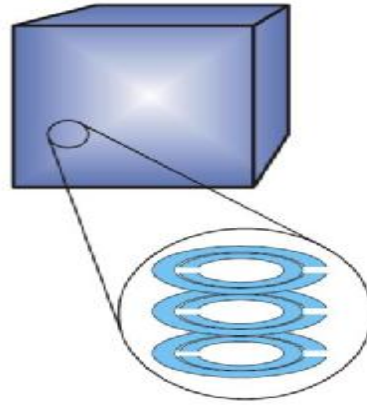
Τα μεταϋλικά είναι τεχνητά υλικά που έχουν κατασκευαστεί για να παρέχουν ιδιότητες οι οποίες δεν μπορούν να είναι άμεσα διαθέσιμες στη φύση. Συνήθως αυτά τα υλικά αποκτούν τις ιδιότητες τους από τη δομή και όχι από τη σύνθεση, με τη συμμετοχή ανομοιογενειών, ώστε να παρουσιάζουν αποτελεσματική μακροσκοπική συμπεριφορά. Η πρωτογενής έρευνα στα μεταϋλικά ασχολείται με υλικά με αρνητικό δείκτη διάθλασης, όπου φαίνεται να έχει καταστεί δυνατή η δημιουργία υπερφαικών, που μπορούν να έχουν χωρική ανάλυση μικρότερη από το μήκος κύματος. Σε κάποιες μελέτες έχει αποδειχτεί ότι επιτυγχάνεται ένα είδος αορατότητας, τουλάχιστον πάνω σε μια στενή περιοχή μηκών κύματος με υλικά βαθμιαίου δείκτη. Αν και τα πρώτα μεταϋλικά ήταν ηλεκτρομαγνητικά, τα ακουστικά και τα σεισμικά αποτελούν επίσης τομείς της ενεργούς έρευνας.

Όπως αναφερθήκαμε και πιο πάνω, τα μεταϋλικά είναι ουσιαστικά περιοδικές δομές που αποτελούνται από θεμελιώδη συστατικά στοιχεία, σε αντιστοιχία με τα μόρια των φυσικών υλικών, τοποθετημένα σε συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ τους, τα οποία μπορούν να έχουν διάφορες γεωμετρικές μορφές αν και συνήθως αυτά είναι απλά μεταλλικά δίπολα ή βρόχοι. Οι διαστάσεις αυτών των στοιχείων (που ονομάζονται κελιά) πρέπει να είναι μικρότερες του μήκους κύματος λ(μήκος κύματος) της ακτινοβολίας με την οποία αλληλοεπιδρούν, έτσι ώστε το ηλεκτρομαγνητικό κύμα να μην υφίσταται σημαντικές μεταβολές φάσης πάνω στο κελί. Δηλαδή να αντιμετωπίζει το υλικό όχι ως ξεχωριστά εμπόδια με διαφορετικές ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες, αλλά ως ένα συμπαγές και ομογενές μέσο. Ως ένα υλικό δηλαδή που εμφανίζει ένα ενιαίο ενεργό συντελεστή διάθλασης σε όλες τις διευθύνσεις. Θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε μια αναλογία μεταξύ αυτών των κελιών με τα άτομα από τα οποία αποτελείτε ένα αντικείμενο. Μπορούμε να δούμε ένα παράδειγμα στην επόμενη εικόνα. (σχήμα 11)

Conventional materials: properties derive from their constituent *atoms*.



Metamaterials: properties derive from their constituent *units*. These units can be engineered as we please.



Σχήμα 11 : Δομή Μεταϊλικού.

Σχήμα 11. Σύγκριση δομής μεταξύ ενός συμβατικού φακού και ενός μεταϊλικού [Pendry, 2004].

Όπως τα άτομα δεν είναι ορατά με γυμνό μάτι, αφού το μήκος κύματος του φωτός είναι μεγαλύτερο από τις διαστάσεις των ατόμων, με τον ίδιο τρόπο και η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία δεν μπορεί να «δει» αυτά τα μετά-άτομα που έχουν διαστάσεις μικρότερες του μήκους κύματος. Με όρους θεωρίας κυκλωμάτων θα μπορούσαμε να χαρακτηρίσουμε ως ένα συγκεντρωμένο στοιχείο που παρουσιάζει μια αυτεπαγωγή και μια χωρητικότητα. Για να δώσουμε μια τάξη μεγέθους των κελιών σε αυτά τα υλικά, μπορούμε να αναφέρουμε ότι για το ορατό φως θα πρέπει να έχουν διαστάσεις μικρότερες του 1μm, ενώ για το μικροκυματικό φάσμα μικρότερες από 1mm, κάτι που καθιστά την υλοποίησή τους σε αυτή την περιοχή του φάσματος πολύ πιο απλή. Όταν λοιπόν έχουμε αλληλεπίδραση ενός υλικού με ηλεκτρομαγνητικά κύματα, δύο είναι οι ιδιότητες του υλικού που καθορίζουν το αποτέλεσμα αυτής της αλληλεπίδρασης, βάση των εξισώσεων του Maxwell. Η διηλεκτρική σταθερά ϵ και η μαγνητική διαπερατότητα μ . Τα κελιά αλληλοεπιδρούν με το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο, τα οποία επάγουν ηλεκτρικές και μαγνητικές ροπές. Σε μακροσκοπική κλίμακα αυτό σημαίνει ότι επηρεάζουν και εντέλει καθορίζουν την ενεργό διηλεκτρική σταθερά ϵ_{eff} (ενεργό διηλεκτρική σταθερά) και την ενεργό μαγνητική διαπερατότητα μ_{eff} (ενεργό μαγνητική διαπερατότητα) του μέσου. Η μέθοδος υπολογισμού των ϵ_{eff} και μ_{eff} ονομάζεται ομογενοποίηση. Κάτι ακόμα που θα πρέπει να γίνει κατανοητό από την αρχή, είναι ότι τα μεταϊλικά διαφέρουν από άλλες περιοδικές δομές όπως οι φωτονικοί κρύσταλλοι. Ο λόγος είναι ότι οι στοιχειώδεις δομές των φωτονικών κρυστάλλων έχουν διαστάσεις παρόμοιου μεγέθους με το μήκος κύματος και επομένως δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν ως ομογενή υλικά. Η φιλοσοφία κατασκευής αυτών των υλικών, επιτρέπει στον σχεδιαστή να κινηθεί με αρκετή ελευθερία για τη λύση του εκάστοτε προβλήματος. Υπάρχουν διάφοροι ανεξάρτητοι παράμετροι που μπορούν να αξιοποιηθούν. Μερικοί από αυτούς είναι οι διαστάσεις του υλικού «ξενιστή», όπως επίσης και η διάταξη τους στο χώρο όσον αφορά την πυκνότητα, την κατεύθυνση κ.ο.κ. Όλες αυτές οι μεταβλητές μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στη διαδικασία σύνθεσης για να προκύψει το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Οι πιθανές εφαρμογές των μεταλλικών είναι ποικίλες 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 της μάχης, σε φακούς και σε κεραιές υψηλής απολαβής. Βελτιωμένους αισθητήρες υπέρηχων, ακόμα και σε θωράκιση κατασκευών από σεισμούς. Και φυσικά πολλά άλλα, όπως καμουφλάζ κ.τ.λ. όπου φυσικά η έρευνα τους είναι σε εξέλιξη. Η έρευνα των μεταλλικών είναι διεπιστημονική 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, η νανοεπιστήμη και άλλες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΙΘΑΝΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

3.1 Πρακτικές εφαρμογές μεταϋλικών

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε στις πρακτικές εφαρμογές που μπορούν να έχουν τα μεταϋλικά. Πλειάδα εφαρμογών που πρακτικά σήμερα εφαρμόζονται αλλά και άλλων, όχι τόσο συνηθισμένων, όπου ακόμη βρίσκονται στα χαρτιά, όπου δέχονται την αμφισβήτηση από πολλούς.

Πίσω στο 1968, ο Victor Veselago αναφέρθηκε, μέσα από την ιστορική πλέον εργασία του, στις εξωτικές ιδιότητες των αριστερόστροφων (left-handed) μεταϋλικών, όπου φυσικά τις αναφέραμε και πιο πάνω. Μια από αυτές τις ιδιότητες είναι και η αντιστροφή του φαινομένου Doppler, όπου όπως όλα δείχνουν είναι εξαιρετικά δύσκολο να παραχθεί πειραματικά. Ένα φαινόμενο που μοιάζει πολύ με την αντιστροφή της ακτινοβολίας Vavilov-Cerenkov έχει εφαρμοστεί σε κεραίες διάδοσης κύματος. Η αντιστροφή της διάθλασης, και κατά συνέπεια του νόμου Snell έχει αποδειχτεί. Το φαινόμενο του τέλει φακού όπως τον είχε αναλύσει ο Veselago και ο Pendry, μετά τις αρχικές διαφωνίες, έχει επικυρωθεί θεωρητικά και πειραματικά από αρκετούς ερευνητές. Ωστόσο, λίγες πρακτικές εφαρμογές προέκυψαν, κυρίως λόγω της δυσκολίας της μαζικής κατασκευής αποδοτικών διπλό-αρνητικών μεταϋλικών. Το 2000, ο Βρετανός John Pendry είχε μια συναρπαστική ιδέα [Pendry, 2000], όπου συγκέντρωσε τεράστια προσοχή, καθώς αρχικά θεωρήθηκε από πολλούς ότι αποτελεί μια επαναστατική ανακάλυψη για την υποκυματική απεικόνιση. Συγκεκριμένα ο Pendry είχε αναφερθεί στο φαινόμενο της υπερ-εστίασης, αξιοποιώντας μια επιφάνεια συντονισμού στις διεπαφές της αριστερόστροφης (left-handed) πλάκας του Veselago [Veselago, 1968] για να ενισχύσει τα οδεύοντα κύματα και έτσι να ξεπεράσει το όριο της περίθλασης. Παρόλα αυτά, και λόγω σοβαρών περιορισμών για το πείραμα αυτό, δεν έγινε ποτέ ο υπερφακός, όπου φαίνεται να μην είναι έτοιμος ακόμη, για πρακτικούς σκοπούς στην οπτική. Μια άλλη πρόσφατη εφαρμογή των μεταϋλικών, είναι το cloaking, που βασίζεται είτε στην ακύρωση σκέδασης, είτε στο μετασχηματισμό συντεταγμένων. Η συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ιδιαίτερα ελκυστική, και προσελκύει μαζικά τους επιστήμονες, που κάνουν μάχη για το ποιος θα το πετύχει πρώτος. Η πρακτική τους εφαρμογή είναι εξαιρετικά δύσκολη σε μικροκύματα και σχεδόν αδύνατη στο οπτικό φάσμα. Υπάρχουν πάρα πολλοί περιορισμοί, όπως προβλήματα κατασκευής, απαγορευτικές απώλειες, ο περιορισμός του εύρους ζώνης και η περίθλαση, όπου θα έχει ως αποτέλεσμα περισσότερο παραμορφωμένες εικόνες παρά πραγματική διαφάνεια.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούμε συγκεκριμένα σε δύο εφαρμογές των διπλό-αρνητικών υλικών, όπου είναι και οι πιο ελκυστικές και αυτές που μαζεύουν όλα τα φώτα της δημοσιότητας πάνω τους. Θα περιγράψουμε τον τέλει φακό του Pendry και την προοπτική του αόρατου μανδύα ή αλλιώς cloaking.

3.2 Ηλεκτρομαγνητικός μανδύας

Ο ηλεκτρομαγνητικός μανδύας προκαλεί αυξημένο ενδιαφέρον σε όλη την επιστημονική κοινότητα, ιδίως μεταξύ των ερευνητών οι οποίοι θεωρούν τα διπλό-αρνητικά μεταύλικά, ως τεχνητές κατασκευές με εξωτικές ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες. Η ιδέα για κατασκευή μιας συσκευής, που να μπορεί να κάνει τα αντικείμενα αόρατα με γυμνό μάτι έχει μια πολύ μεγάλη ιστορία, ξεκινώντας από την λαογραφία πολλών λαών, και συνεχίζει μέχρι τις μεγάλες αίθουσες του κινηματογράφου. Για παράδειγμα ποιος δεν θυμάται τον αόρατο μανδύα του Harry Potter, τον κεντρικό χαρακτήρα στις νουβέλες της κυρίας Τζ. Κ. Ρόουλινγκ. Φυσικά το έναυσμα για περεταίρω έρευνα στο τομέα του αόρατου μανδύα, έδωσε η πειραματική απόδειξη των ιδιοτήτων των διπλό-αρνητικών υλικών, από πολλούς επιστήμονες, όπως αναφέραμε και πιο πάνω. Κάπως έτσι συνελήφθη και η ιδέα του αόρατου μανδύα με ορισμένους ερευνητές να υποστηρίζουν ότι μια τέτοια συσκευή μπορεί να είναι υλοποιήσιμη, τουλάχιστον σε ένα περιορισμένο φάσμα συχνοτήτων. Το ερώτημα που προκύπτει είναι αν μπορεί ένα φυσικό σώμα, να γίνει αόρατο, τουλάχιστον σε ένα περιορισμένο εύρος συχνοτήτων. Η ερώτηση αυτή απασχολεί για αρκετά μεγάλο διάστημα τους επιστήμονες. Στις μέρες μας υπάρχουν διάφορες τεχνικές που μπορούν να δημιουργήσουν ένα αόρατο μανδύα, τόσο για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ή για τα ακουστικά κύματα, πράγμα που έχει κάνει τον αόρατο μανδύα πραγματικότητα και όχι παραμύθι.

Η ιστορία του αόρατου μανδύα συνδέεται με την ιστορία των διπλό-αρνητικών υλικών, όμως το 1961, πριν δημοσιευτεί η εργασία του Veselago, κάποιος επιστήμονας, και συγκεκριμένα ο Dollin δημοσίευσε μια εργασία, όπου περιγράφεται μια ανομοιογενείς και ανισότροπη μαγνητό-διηλεκτρική δομή, έτσι ώστε ένα επίπεδο κύμα που έρχεται από το άπειρο σε αυτό το σώμα να διέρχεται μέσα από αυτό χωρίς παρεμβολές [Dollin, 1961]. Πιο πρόσφατα τώρα, έχουν προταθεί μια σειρά εργασιών από τους Leonhardt [Leonhardt, 2006a][Leonhardt, 2006b], Pendry [Pendry, 2006], Greenleaf [Greenleaf, 2003a][Greenleaf, 2003b] και άλλους [Schurig et al., 2006][Li and Pendry, 2008] που περιγράφουν, ή προτείνουν τρόπους επίτευξης του φαινομένου του αόρατου μανδύα, όμως κάποιος άλλος, πολύ νωρίτερα από αυτούς, δημοσίευσε μια εργασία, η οποία ενέπνευσε σειρά επιστημών. Πρόκειται για τον Kerker [Kerker, 1975][Chew and Kerker, 1976], όπου δημοσίευσε μια εργασία με τίτλο «Αόρατα Σώματα» το 1975, η οποία ήταν ένας πρόδρομος μιας άλλης πιο πρόσφατης σειράς δημοσιεύσεων από τους Alu και Engheta [Alu and Engheta, 2005], σχετικά με τις αόρατες δομές που βασίζονται στην ακύρωση διασποράς. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι τεχνικές cloaking σχετικές με τον μετασχηματισμό συντεταγμένων, καθώς και η χρήση τεχνητών υλικών που υλοποιούνται ως πυκνοί βρόγχοι γραμμών μεταφοράς. Βέβαια υπάρχουν και κάποιες άλλες τεχνικές, όπως η χρήση τεχνητών ηλεκτρομαγνητικών επιφανειών, οι οποίες επιτρέπουν να κρύβονται αντικείμενα ορισμένων σχημάτων, για μόνο μία κατεύθυνση φωτισμού [Paudyal et al., 2013]. Η πειραματική υλοποίηση του αόρατου μανδύα έγινε τόσο στη μικροκυματική κλίμακα, τόσο και στο ορατό

φάσμα. Ωστόσο η πειραματική υλοποίηση πραγματοποιήθηκε σε δύο διαστάσεις(2D), δηλαδή αν κάποιος παρατηρήσει το αντικείμενο από την τρίτη διάσταση, τότε το αντικείμενο θα είναι εμφανές. Με λίγα λόγια ο αόρατος μανδύας δουλεύει μόνο σε ένα επίπεδο. Πιο πρόσφατα μια ομάδα σχεδίασε και πραγματοποίησε ένα τρισδιάστατο αόρατο μανδύα για λειτουργία στο οπτικό φάσμα, βασιζόμενο στον οπτικό μετασχηματισμό [Ergin et al., 2010].

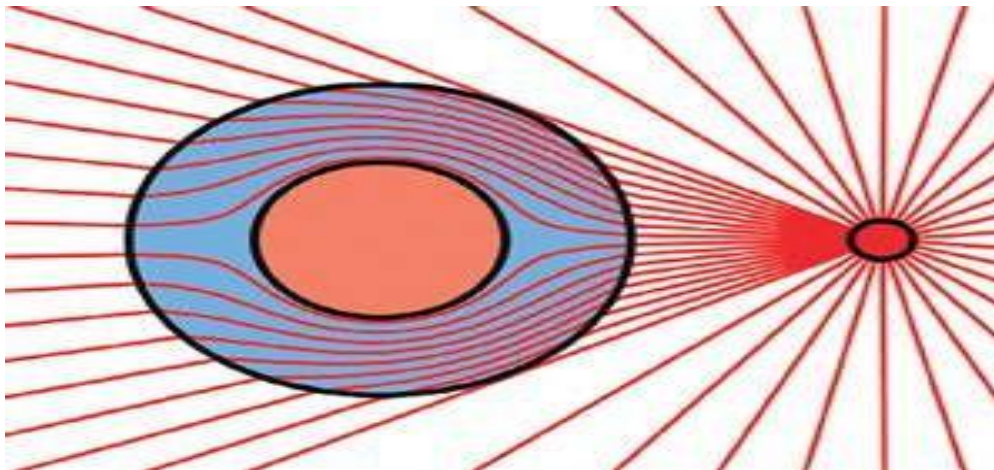
Η καρδιά τώρα της όλης έρευνας βρίσκεται στα μεταϋλικά, τα υλικά με τις μοναδικές ιδιότητες που δεν απαντώνται στη φύση και τον αρνητικό δείκτη διάθλασης. Το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο για τα Τεχνητά Ηλεκτρομαγνητικά υλικά και τα μεταϋλικά (Metamorphose VI AISBL) ορίζει το μεταϋλικό ως «μια διάταξη τεχνητών δομικών στοιχείων, με στόχο την επίτευξη επιθυμητών και ασυνήθιστων ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων» (<http://www.metamorphose-vi.org/index.php/metamaterials>). Εάν ορισμένες ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες ενός υλικού 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. Ας πάρουμε για παράδειγμα μια εφαρμογή που είναι στο φάσμα 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 συνηθισμένα, αμελητέα σε αυτό το μήκος κύματος μόρια. Φυσικά, αν η 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 και μικρότερο, γεγονός που καθιστά την υλοποίηση, ένα σοβαρό τεχνολογικό στοίχημα.

Οι λειτουργικές ιδιότητες των μεταϋλικών ορίζονται από τα 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 εφαρμογής, επιτρέποντας την πραγματοποίηση τεχνητών μέσων με αρκετά εξωτικές και ακραίες ιδιότητες, όπως απαιτείται για την υλοποίηση των συσκευών απόκρυψης, γνωστές ως cloaking. Αν και η έρευνα σχετικά με τα μεταϋλικά ξεκίνησε μόλις πρόσφατα, τα αποτελέσματα καλύπτουν αρκετά αυτό το θέμα. Ένας μεγάλος αριθμός δημοσιεύσεων που αφορούν τον αόρατο μανδύα, έρχεται στο προσκήνιο κάθε χρόνο και δεν είναι δυνατό να τους αναφέρουμε όλους. Θα επικεντρωθούμε στις κύριες εργασίες που αφορούν το θέμα και έχουν μεγάλη επίδραση στη φυσική, οπτική και μηχανική.

3.2.1 Cloaking και αορατότητα

Τι είναι το cloaking; Πρόκειται για μια επινόηση που κάνει ένα αντικείμενο αόρατο για τις ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες σε μια συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων. Φυσικά η πιο συναρπαστική εφαρμογή του είναι αυτή η οποία το επιτυγχάνει στο ορατό τμήμα του φάσματος. Ένα αντικείμενο είναι ορατό όταν καταφέρει να διαδίδει και αντανακλά ηλεκτρομαγνητικά κύματα στο θεατή. Τώρα, οι προϋποθέσεις που πρέπει να υπάρχουν, για να είναι ένα αντικείμενο αόρατο πρέπει να μην αντανακλά ηλεκτρομαγνητικά κύματα πίσω

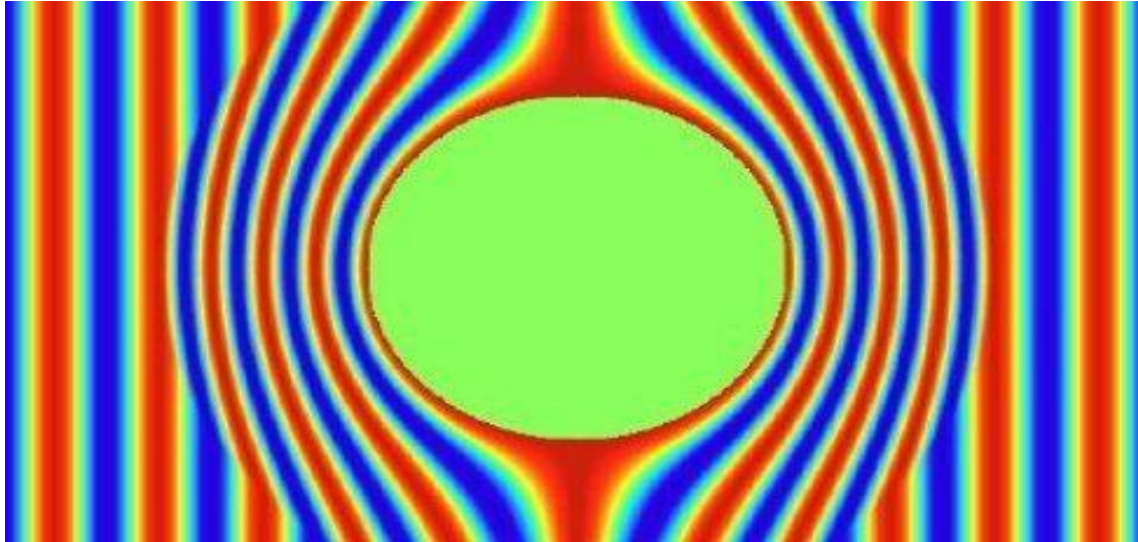
στο θεατή και επιπλέον να μην διασπείρει κύματα προς άλλες κατευθύνσεις. Ακόμη πρέπει το αντικείμενο αυτό να μην δημιουργεί καμιά σκιά, δηλαδή να μην υπάρχει σκέδαση με κατεύθυνση προς τα εμπρός. Κατά τη θεωρία της σκέδασης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, η δημιουργία αόρατου μανδύα για ένα αντικείμενο σημαίνει τη μείωση της συνολικής διατομής σκέδασης του στο μηδέν. Και η συνολική διατομή σκέδασης ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής σκεδαζόμενης ισχύος προς την ποσότητα ισχύος. Από αυτές τις συνθήκες προκύπτει ότι το αντικείμενο δεν θα πρέπει να απορροφά οποιαδήποτε ενέργεια. Στα πιο κάτω σχήματα μπορούμε να δούμε τη θεωρητική λειτουργία ενός μανδύα αφάνειας. (σχήμα 12) (σχήμα 14)



Σχήμα 12 : Θεωρητική Λειτουργία Αόρατου Μανδύα.

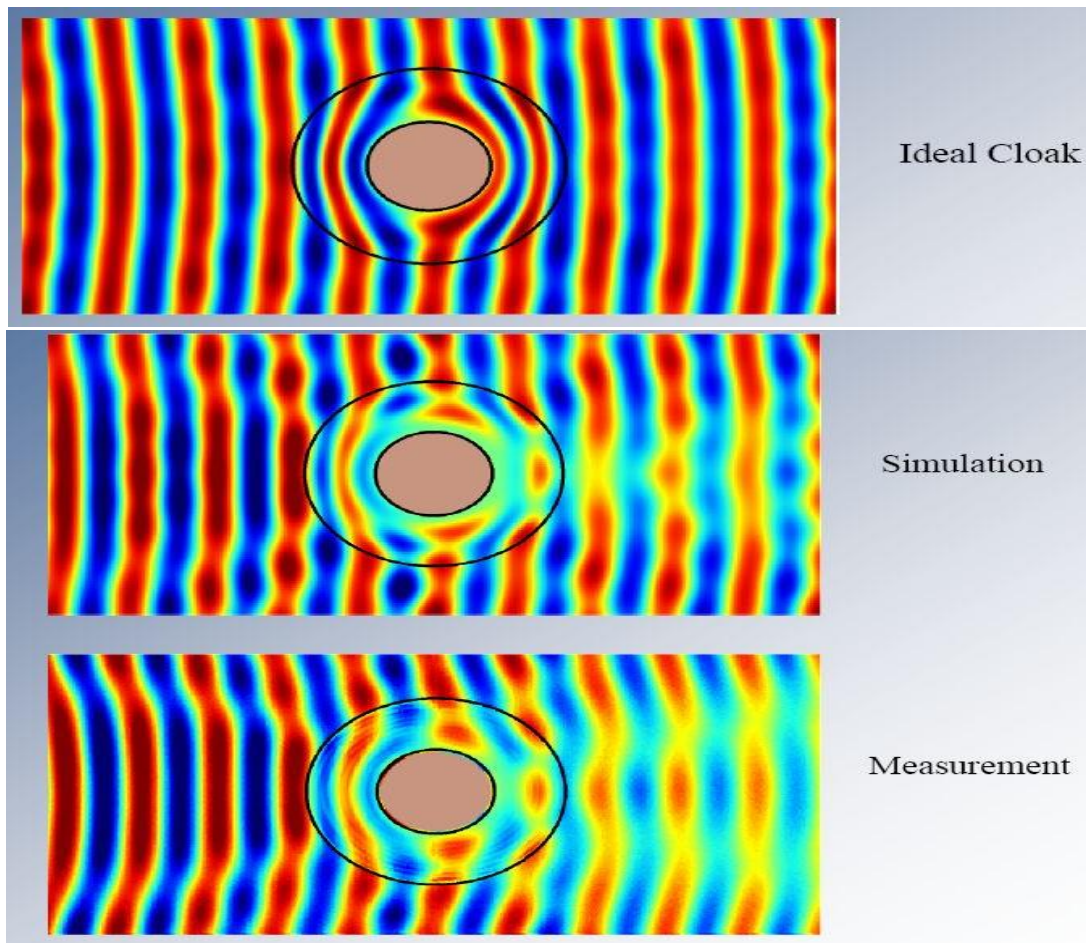
Σχήμα 12. Θεωρητική λειτουργία αόρατου μανδύα. Οι ακτίνες κάμπτονται γύρω από το αντικείμενο και ο θεατής νομίζει πως βλέπει διαμέσου του. [Paudyal et al., 2013]

Ο ηλεκτρομαγνητικός αόρατος μανδύας δεν πρέπει να συγχέεται με τη τεχνολογία stealth. Οι τεχνολογίες stealth ελαχιστοποιούν την ισχύ που ανακλάται πίσω στο ραντάρ ανίχνευσης. Αυτό γίνεται είτε με την κάλυψη ενός αντικειμένου με ένα στρώμα απορρόφησης, ή με τη διαμόρφωση του αντικειμένου, έτσι ώστε το πεδίο σκέδασης στη κατεύθυνση του φωτισμού να είναι ελάχιστο. Ακόμη και ένα ιδανικό αεροσκάφος stealth δεν μπορεί να είναι εντελώς αόρατο από τα ραντάρ, αν παρατηρείτε από πίσω ή από τα πλάγια. Αποδεικνύετε πειραματικά ότι τα απορροφητικά καλύμματα και η διαμόρφωση του αντικειμένου δεν μπορούν να μειώσουν τη συνολική διατομή σκέδασης πάνω από το 50%.



Σχήμα 13 : Αόρατος Μανδύας σε Μικροκυματικές συχνότητες.

Σχήμα 13. Απεικόνιση εφαρμογής αόρατου μανδύα σε μικροκυματικές συχνότητες.
[Paudyal et al., 2013]



Σχήμα 14 :Αόρατος Μανδύας, πειραματικά.

Σχήμα 14. α) Μορφή δέσμης σε ένα ιδανικό μανδύα. β) μορφή δέσμης στην προσομοίωση. γ) μορφή δέσμης στη μέτρηση. [Paudyal et al., 2013]

Με βάση τη πιο πρόσφατη βιβλιογραφία η έννοια αορατότητα έχει στενή σχέση με τον ηλεκτρομαγνητικό μανδύα. Δεν σηκώνει αμφισβήτηση ότι η ελπίδες για επίτευξη του αόρατου μανδύα στηρίζονται στα μεταλλικά. Βέβαια θα πρέπει να πούμε ότι μερικές δομές μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως αόρατοι μανδύες, αν το αντικείμενο που πρέπει να γίνει αόρατο αποτελείται από ένα τέλεια κοίλο θάλαμο, αφού μέσα σε αυτό το περίβλημα δεν υπάρχουν πεδία. Κάτι τελευταίο που πρέπει να αναφέρουμε είναι ότι μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις για την επίτευξη του αόρατου μανδύα, στηρίζετε στην αυθαίρετη πόλωση των προσπίπτοντος πεδίων. Αυτό που χρειάζεται για να επιτευχθεί, είναι ο σχεδιασμός μεταλλικού όπου η διηλεκτρική σταθερά να είναι ίση με την σχετική μαγνητική διαπερατότητα.

3.2.2 Τεχνικές cloaking

Για να επιτευχθεί τέλεια απόκρυψη ενός αντικειμένου, δηλαδή ένας αόρατος μανδύας φτιαγμένος από μεταϋλικά χρησιμοποιούμε μερικές τεχνικές, όπου βασίζονται στις εξωτικές ιδιότητες των μεταϋλικών. Θα επιχειρήσουμε να κάνουμε μια απλή αναφορά των τεχνικών αυτών.

Μία πολύ ενδιαφέρουσα τεχνική είναι η τεχνική ακύρωσης σκέδασης [Chen et al.2007][Edwards et al., 2009]. Το ενδιαφέρον για αυτή τη τεχνική αναζωπυρώθηκε μετά από πρόταση για χρήση πλασματικών υλικών για διαφάνεια. Πως λειτουργεί αυτή η τεχνική; Η σκέδαση από ένα αντικείμενο μπορεί να μετριαστεί με τη προσθήκη στο σύστημα ενός άλλου αντικειμένου, η σκέδαση του οποίου είναι συμπληρωματική σε σχέση με τον κύριο σκεδαστή. Για παράδειγμα μπορούμε να ελαχιστοποιήσουμε τη σκέδαση, καλύπτοντας το κυρίως αντικείμενο με μία ή πολλαπλές στρώσεις διηλεκτρικού υλικού. Τα προβλήματα της αξιοποίησης αόρατων μανδύων, με βάση την τεχνική σκέδασης, αφορούν την υλοποίηση των υλικών με τις απαραίτητες εξωτικές παραμέτρους.

Άλλη μια τεχνική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι η τεχνική μετασχηματισμού συντεταγμένων [Rahm et al., 2008]. Πρόσφατα οι Leonhardt [Leonhardt, 2006] και Pendry [Pendry et al., 2006] πρότειναν τη δημιουργία ενός μανδύα από μεταϋλικά ο οποίος επιτρέπει την παρουσία σωμάτων με μηδενικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία, μέσα σε μια συσκευή από τέτοια υλικά. Δηλαδή, ως πάρουμε για παράδειγμα ένα σημείο στον ηλεκτρομαγνητικό χώρο όπου μετασχηματίζεται σε σφαίρα στο φυσικό χώρο, κάνοντας έτσι δυνατή τη δημιουργία ενός σφαιρικού όγκου, όπου δεν υφίστανται μαγνητικά πεδία αλλά οδηγούνται γύρω από το σώμα. Η απόκρυψη για σώματα στον ελεύθερο χώρο με αυτή την τεχνική, απαιτεί τη χρήση ανισότροπων μεταϋλικών χωρίς απώλειες σε ορισμένες παραμέτρους, όπως της ενεργής διηλεκτρικής σταθεράς και της ενεργής μαγνητικής διαπερατότητας με τιμές μικρότερες από τις αντίστοιχες στον ελεύθερο χώρο. Τα οφέλη της τεχνικής μετασχηματισμού συντεταγμένων είναι η απλότητα του θεωρητικού σχεδιασμού και το ότι υπάρχει ελευθερία στη σύσταση και στο σχήμα του αντικειμένου ανεξάρτητα από τον μανδύα. 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 είναι υποχρεωτική.

Πρόσφατα έχει προταθεί μια τεχνική cloaking, η οποία είναι εξολοκλήρου διαφορετική. Πρόκειται για τη τεχνική γραμμής μετάδοσης και βασίζεται στη χρήση ογκομετρικών δομών, που αποτελούνται από δισδιάστατα ή τρισδιάστατα δίκτυα γραμμών μετάδοσης [Alitalo and Tretyakov, 2009]. Σε αυτές τις δομές τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία διαδίδονται στο εσωτερικό των γραμμών μεταφοράς, αφήνοντας έτσι τον όγκο μεταξύ αυτών των γραμμών αποτελεσματικά cloaked. Τα πεδία που εισέρχονται από τον περιβάλλον μέσο στον μανδύα πρέπει να «πιέζονται» ανάμεσα στις γραμμές μεταφοράς, έτσι χρειάζεται ένα στρώμα ζεύξης να συνδυάσει τα πεδία μεταξύ αυτού του μέσου και του δικτύου. Και βέβαια έχει δημιουργηθεί ένα στρώμα, λεγόμενο και στρώμα μετάβασης όπου η λειτουργία του έχει επιβεβαιωθεί αριθμητικά και πειραματικά σε διάφορες δομές. Η τεχνική γραμμής μετάδοσης έχει απλή δομή, ευκολία κατασκευής και συναρμολόγησης, και τέλος λειτουργία ευρείας

ζώνης. Όμως υπάρχει ένα σημαντικό μειονέκτημα, ιδιαίτερα αν συγκρίνουμε με τις προηγούμενες τεχνικές που αναφέραμε, και είναι ο περιορισμός σχετικά με το μέγεθος και το σχήμα του αντικειμένου.

Οι τρεις πιο πάνω τεχνικές cloaking θεωρούνται ως οι πιο αποτελεσματικές, και ότι μπορούν να δώσουν καλύτερα αποτελέσματα στο μέλλον. Υπάρχουν φυσικά και άλλες τεχνικές cloaking που προτάθηκαν από διάφορους επιστήμονες αλλά δεν αντιμετωπίστηκαν με την ίδια σοβαρότητα. Μια από αυτές τις τεχνικές προτάθηκε από τον Per-Simon Kildal το 1987. Η εν λόγω τεχνική βασίζεται στην επικάλυψη ενός αντικειμένου με τη λεγόμενη σκληρή επιφάνεια, σε επίμηκες σχήμα προς την κατεύθυνση διάδοσης των κυμάτων. Η τεχνική αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για τη μείωση της συνολικής διατομής σκέδασης. Βασικό μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι το ότι το αποτέλεσμα μας εξαρτάται από τη γωνία άφιξης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Όμως αυτή η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απόκρυψη σε εφαρμογές όπου η γωνία άφιξης είναι γνωστή, όπως για παράδειγμα στη μείωση σκέδασης από κεραία υποστήριξης. [Alitalo and Tretyakov, 2009]

Μια άλλη τεχνική cloaking, προτάθηκε από τους Graeme W Milton και Nicolae-Alexandrou P Nicoronici το 2006 και βασίζεται στη χρήση ενός λεγόμενου υπερφακού, ως μανδύα σκέδασης αντικειμένων που τοποθετούνται κοντά σε ένα μηχανισμό με υπερφακούς. Η τεχνική εξαρτάται από την ανώμαλη τοπική απόκριση που μπορεί να προκληθεί από τη επιφάνεια του υπερφακού. Η συγκεκριμένη μέθοδος cloaking, βασίζεται σε ένα ανώμαλο φαινόμενο συντονισμού και ως εκ τούτου αναμένεται πολύ ευαίσθητο σε απώλειες [Milton et al., 2006].

Επί του παρόντος, η σχετική έρευνα για το cloaking αποσκοπεί στο να επεκτείνει το εφικτό εύρος ζώνης, καθώς και να επεκταθεί η κατασκευή τέτοιων συσκευών και στο οπτικό φάσμα. Από τη θέση του παρατηρητή, μπορούμε να πούμε ότι λόγω του ενδιαφέροντος που έχει κερδίσει ο αόρατος μανδύας από την επιστημονική κοινότητα, είναι θέμα χρόνου να γίνει πραγματικότητα, τουλάχιστον στην μικροκυματική συχνότητα. Αυτή τη φορά βέβαια χωρίς περιορισμούς.

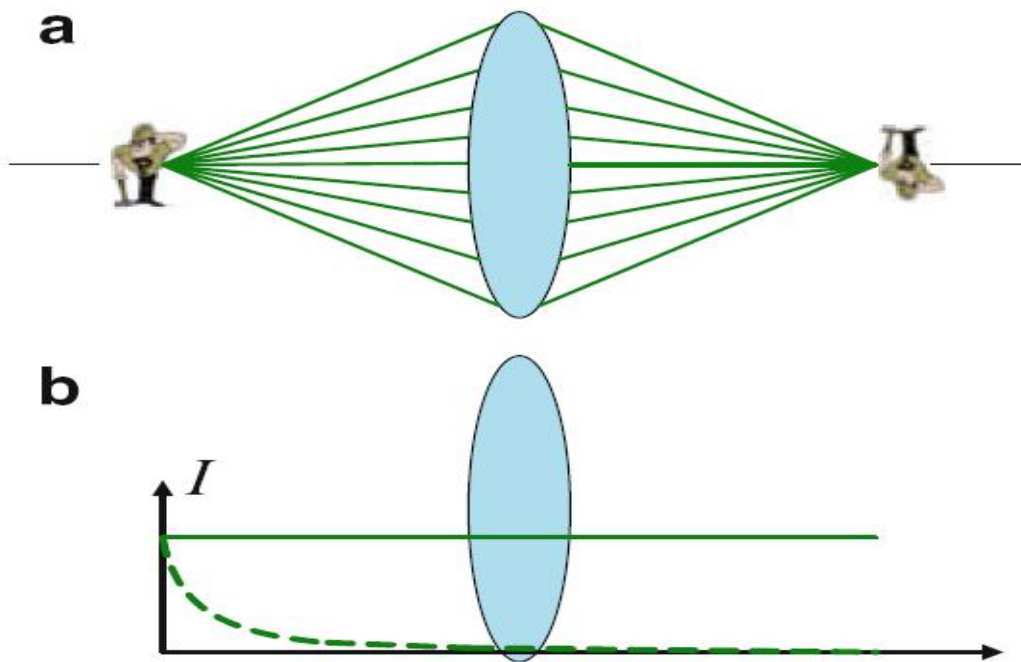
3.3 Τέλειος φακός

Πιο πάνω, αναφερθήκαμε σε μια από τις πιο προκλητικές προτάσεις του Βρετανού επιστήμονα John Pendry, καθηγητή του Imperial College του Λονδίνου. Συγκεκριμένα, σε αυτό που ο Pendry ονόμασε τέλειος φακός. Ο Pendry παρατήρησε ότι με τις ιδιότητες των μεταλλικών και συγκεκριμένα αυτή του αρνητικού δείκτη διάθλασης, μπορεί να πετύχει καλύτερη διακριτική ικανότητα ενός ειδώλου από κοντινό πεδίο. Επί της ουσίας ο Pendry προτείνει ένα επίπεδο πλακίδιο με αρνητικό δείκτη διάθλασης, που μπορεί να εστιάσει το αποσβεσμένο φάσμα μιας σημειακής πηγής, και να αναπαράγει στο πεδίο εστίασης τέλεια τη μορφή που έχει το πεδίο στο επίπεδο της πηγής. Αυτό το φαινόμενο για να μπορέσει να γίνει πραγματικότητα χρειαζόμαστε ένα επίπεδο πλακίδιο με $\epsilon = \mu = -1$, [Pendry, 2000]. Πριν να γίνει η δημοσίευση του Pendry και συγκεκριμένα τριάντα χρόνια πριν Veselago [Veselago,

1968] ανέφερε στο άρθρο του ότι μια πλάκα μπορεί να εστιάσει πλήρως το διαδεδομένο φάσμα μιας πηγής. Το φαινόμενο του τέλει φακού κερδίζει έδαφος από την ημέρα που ήλθε στο προσκήνιο και πιστεύεται ότι βρισκόμαστε κοντά στην πρακτική εφαρμογή του.

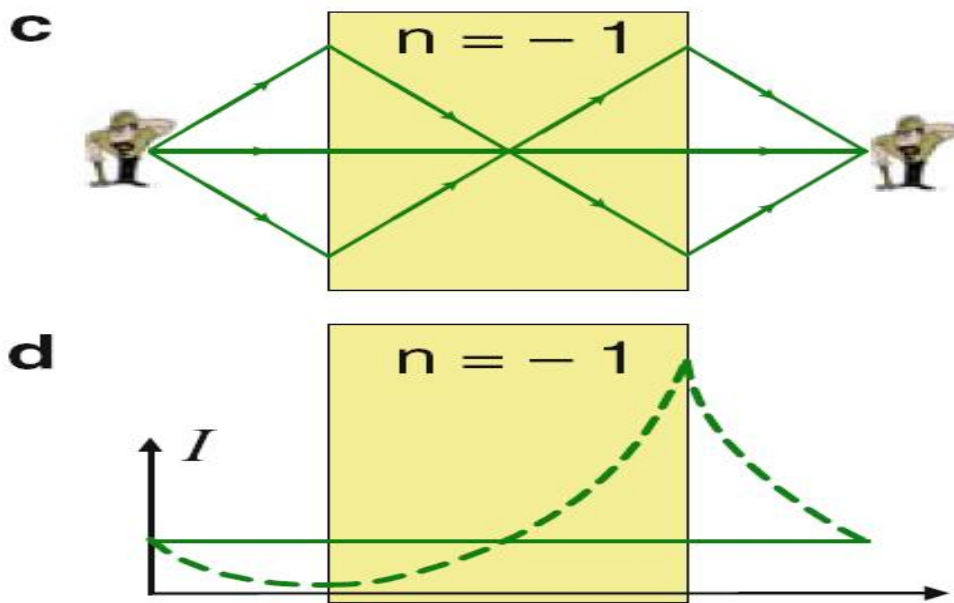
Ως γνωστόν η λειτουργία των συμβατικών φακών στηρίζεται στην διάθλαση. Μέσο της διάθλασης μπορούμε να επιτύχουμε εστίαση του φωτός και διαμόρφωση του ειδώλου ενός αντικειμένου. Κάθε φορά που μια φωτεινή ακτίνα περνά από ένα φακό έχουμε δύο συνιστώσες. Η μια βρίσκεται κατά μήκος του άξονα του φακού, και η άλλη εγκάρσια προς τον ίδιο άξονα. Προκειμένου τώρα να επιτύχουμε καλή διακριτική ικανότητα σε ένα φακό, η εγκάρσια συνιστώσα πρέπει να είναι όσο το δυνατό μεγαλύτερη. Αρα για την κατασκευή ενός συμβατικού φακού με καλή διακριτική ικανότητα, απαιτείται μεγάλο άνοιγμα. Επίσης, με χρήση της θεωρίας οπτικής Fourier, αντιλαμβανόμαστε ότι με τους συμβατικούς φακούς περιορίζεται η ανάλυση που μπορεί να παραχθεί από τα όρια της περίθλασης ή το λεγόμενο σφάλμα περίθλασης. Το περιθλαστικό όριο λοιπόν, εμποδίζει τους φακούς να συγκεντρώσουν το φως μιας σημειακής πηγής σε εστία διαμέτρου μικρότερης από το ήμισυ του μήκους κύματος του χρησιμοποιούμενου φωτός. Το πρόβλημα που έχουμε μπροστά μας είναι ότι δεν μεταβιβάζεται όλη η πληροφορία του αντικειμένου στο είδωλο. Η χαμένη πληροφορία περιέχει όλες τις χωρικές λεπτομέρειες του αντικειμένου, που βρίσκονται κάτω από το μήκος κύματος και συνήθως αυτό ονομάζεται εγγύς-κοντινό οπτικό πεδίο. Το στοίχημα τώρα, που έχει βάλει η επιστήμη είναι με κάποιο τρόπο να καταφέρουμε να ενισχύσουμε το φως από τα κοντινά πεδία, και ταυτόχρονα να συλλέξουμε το φως από τα μακρινά. Αν γινόταν αυτό θα καταφέραμε να διαμορφώσουμε ένα ακριβές είδωλο του αντικειμένου με σχεδόν τέλεια ευκρίνεια. Σύμφωνα με τους ισχυρισμούς του Pendry, αυτό μπορούμε να το επιτύχουμε με ένα επίπεδο πλακίδιο με αρνητικό δείκτη διάθλασης. Η εργασία του Pendry βασίζεται στο θεωρητικό κομμάτι σε ένα επίπεδο πλακίδιο με $\epsilon = \mu = -1$, άρα $n = -1$, και είναι θεωρητικά εφαρμόσιμο μόνο σε μία συχνότητα. Λόγω της ικανότητας του τέλει φακού να εστιάζει το διαδιδόμενο και αποσβεσμένο φάσμα μιας πηγής, αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης πολλών επιστημών. Μετά από την εργασία του Pendry παρουσιάστηκαν αρκετές δοκιμές στο εργαστήριο και μερικές εξ αυτών ήταν αρκετά σοβαρές. Όμως λόγω του ότι δεν παρουσίαζαν μεγάλη απορρόφηση ή έχουν κάποια κατασκευαστικά προβλήματα δεν μπορούν να θεωρηθούν «τέλειοι» τέλει φακοί. Αφού ξεπεράστηκαν οι πρώτες διαφωνίες σχετικά με τη λειτουργία διάταξης τους, εξετάστηκε ο ρόλος των απωλειών, της διασποράς και της εγγενούς περιοδικότητας που υπάρχει σε ένα πρακτικά υλοποιήσιμο μεταλλικό και διαπιστώθηκε ο περιορισμός της ανάλυσης του φακού σε πεπερασμένες τιμές αντίθετα από την άπειρη αναλυτικότητα του τέλει φακού που πρότεινε ο Pendry. Μολονότι, υπήρχε μεγαλύτερη ανάλυση από το όριο περίθλασης των συμβατικών φακών [Smith et al., 2003], [Ye, 2003], [Marques et al., 2003], [Merlin, 2004]. Σε μια εργασία του Ισπανού Mesa και των συνεργατών του, το 2005, παρατηρήθηκε η αδυναμία πλήρους εστίασης του πεδίου στον τρισδιάστατο χώρο [Mesa et al., 2005], όπου αποδείχτηκε αριθμητικά και πειραματικά η αδυναμία ταυτόχρονης εξαγωγής από το διαδεδομένο πεδίο της θέσης της πηγής και της μορφής. Με την πιο πάνω άποψη συμφώνησε και ο Veselago [Veselago, 2005] θεωρώντας ότι μία επίπεδη πλάκα μπορεί να λειτουργήσει σαν τέλειος φακός, μόνο για πλάτη μεγαλύτερα του μήκους κύματος, στα οποία δεν παρατηρείται ενίσχυση των αποσβεσμένων κυμάτων. Για την ιστορία, η πρώτη πρακτική υλοποίηση του τέλει φακού βασίστηκε σε σπειροειδείς συντονιστές για την επίτευξη αρνητικής μαγνητικής διαπερατότητας και σε παράλληλα λεπτά σύρματα για την αρνητική διηλεκτρική σταθερά και χρησιμοποίησε δύο δίπολα ως πηγές για τον έλεγχο της αναλυτικότητας της διάταξης [Lagarkov and Kissel, 2004]

Στις επόμενες δύο εικόνες μπορούμε να δούμε τις ουσιαστικές διαφορές ενός συμβατικού φακού με τους τέλειους φακούς. Συγκεκριμένα βλέπουμε στο a και c τον τρόπο που σχηματίζεται το είδωλο όταν περάσει από συμβατικό φακό και τέλειο φακό αντίστοιχα, από μακρινό πεδίο. Όπως μπορείτε να δείτε στο τέλειο φακό δεν έχουμε αναστραμμένο είδωλο, και βέβαια έχουμε ένα ακριβές είδωλο του αντικειμένου. Στο b και d βλέπουμε πως σχηματίζεται το είδωλο από κοντινά πεδία. Στον τέλειο φακό γίνεται εφικτό να συλλέξουμε πληροφορίες από το κοντινό πεδίο σε αντίθεση με τον συμβατικό φακό, όπου δεν μπορούμε.



Σχήμα 15 : Τρόπος εστίασης Ακτινών.

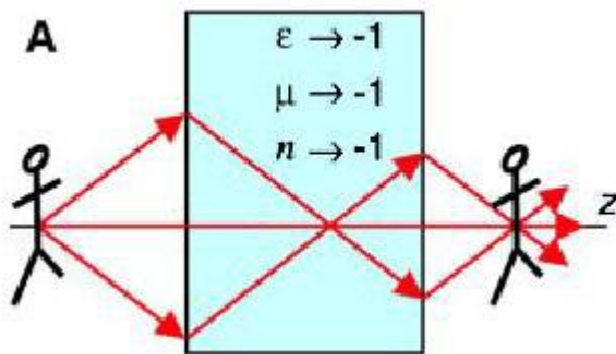
Σχήμα 15. Συμβατικός φακός. [Pendry and Smith, 2004]



Σχήμα 16 : Τρόπος εστίασης Ακτινών.

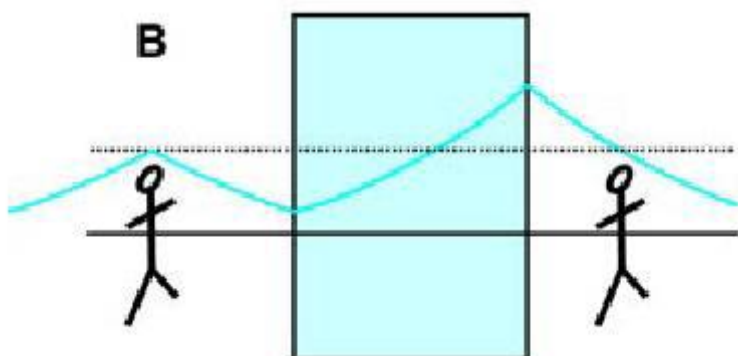
Σχήμα 16. Τέλειος φακός. [Pendry and Smith, 2004]

Πιο κάτω μπορούμε να δούμε τον τρόπο λειτουργίας του τέλειου φακού και πως καταφέρνει να μαζεύει τις πληροφορίες από το μακρινό πεδίο και πως από το κοντινό.



Σχήμα 17 : Τέλειος Φακός

Σχήμα 17. Βλέπουμε πως επιτυγχάνεται εστίαση του μακρινού πεδίου (διαδομένα ηλεκτρομαγνητικά κύματα), μέσα από ένα τέλειο φακό. Αυτό συμβαίνει λόγω αρνητικής διάθλασης και θετικής εμπέδωσης [Smith et al., 2004].



Σχήμα 18: Τέλειος Φακός

Σχήμα 18. Βλέπουμε πως επιτυγχάνεται εστίαση του κοντινού πεδίου (φθίνοντα ηλεκτρομαγνητικά κύματα) [Smith et al., 2004].

Με την πρακτική εφαρμογή των τέλειων φακών θα καταφέρουμε να πετύχουμε καλύτερη διακριτική ικανότητα, όπου θα μπορεί να παρέχει σημαντικές βελτιώσεις στο χώρο της τεχνολογίας. Συγκεκριμένα μπορούν να επιφέρουν σημαντικές βελτιώσεις στην απεικόνιση βιολογικών συστημάτων, σε συσκευές ανίχνευσης στα συστήματα ασφαλείας, στην ανίχνευση και ταυτοποίηση βίο-μορίων, στην παρασκευή νέων φαρμάκων, στην αποθηκευτική ικανότητα των ψηφιακών δίσκων, στις νάνο-κατασκευές, στην οπτική λιθογραφία, στην καθοδήγηση οχημάτων και συσκευών σε συνθήκες μηδενικής ορατότητας και άλλα πολλά όπου οι νέοι τέλειοι φακοί θα δημιουργήσουν νέες συναρπαστικές προσδοκίες. Ακόμη οι εφαρμογές των ηχητικών φακών περιλαμβάνουν υψηλής ανάλυσης ανίχνευση υπέρηχων καθώς και ανίχνευση θραυσμάτων σε μηχανικές δομές. Όπως γίνεται αντιληπτό η μελέτη της αρνητικής διάθλασης, αγνοήθηκε για περίπου τριάντα χρόνια, σε μερικές περιπτώσεις υπέστη και «χλευασμό», αλλά έρχεται η ίδια η έρευνα της αρνητικής διάθλασης και των διπλό-αρνητικών υλικών να μας διαψεύσει. Βέβαια η πορεία των ερευνών δεν έχει τελειώσει και αναμένονται τεράστιες εκπλήξεις τόσο στις ήδη γνωστές εφαρμογές, τόσο και στις εφαρμογές που δεν γνωρίζουμε ακόμη.

3.4 Άλλες Εφαρμογές και Προοπτικές

Σίγουρα εκτός από τις εφαρμογές που αναφέραμε πιο πάνω και έχουν να κάνουν με τον αόρατο μανδύα και τον τέλειο φακό, υπάρχουν ένα σωρό άλλες εφαρμογές που πιθανόν να βρίσκουν πρακτική εφαρμογή ακόμη και σήμερα. Ένα μεγάλο κομμάτι της έρευνας που ασχολείται με τα διπλό-αρνητικά μεταϋλικά είναι αφιερωμένο στις εφαρμογές κεραιών. Διάφορα χαρακτηριστικά των κεραιών αποδεδειγμένα ακόμη και πειραματικά, έχουν δείξει ότι βελτιώνονται με τη επιπρόσθετη χρήση διπλό-αρνητικών υλικών. Η μοναδική ιδιότητα των διπλό-αρνητικών μεταϋλικών, να εμφανίζουν αρνητική διάθλαση, που δεν συναντάται πουθενά στη φύση, αλλά και να παρέχουν μια αρνητική χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση, διευκολύνει τη προσαρμογή της κεραίας με την τροφοδοσία. Επίσης οι διατάξεις των μεταϋλικών επιτρέπουν τον έλεγχο συχνότητας συντονισμού, γεγονός που είναι πιθανόν να

οδηγήσει στην κατασκευή μικρότερων και συμπαγέστερων κεραιών με χαμηλότερες συχνότητες λειτουργίας. Ακόμη μπορούμε να πετύχουμε μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων, χωρίς καν να μεγαλώσουμε τη κεραία μας ή να την μετακινήσουμε [Τσιμπούκης, 2011].

Πρόσφατα έχει σημειωθεί αρκετά μεγάλη πρόοδος όσον αφορά τη βελτίωση του σχεδιασμού και της κατασκευής διπλό-αρνητικών μεταϊλικών, και αυτό μας δημιουργεί την αίσθηση προσμονής νέων πρακτικών εφαρμογών. Πολλές εφαρμογές περιμένουμε να υλοποιηθούν στο εγγύς μέλλον, όπως για παράδειγμα αυτές που ασχολούνται με το κοντινό πεδίο, όπως οι φωτονικοί κρύσταλλοι, ασύρματα και φωτονικά κυκλώματα που μας δίνουν την προοπτική για ολοκληρωμένα συστήματα, όπως χημικούς και βιολογικούς αισθητήρες, ιατρικούς σαρωτές, βελτιωμένη τεχνολογία εικόνας και οθόνης, όπου σίγουρα μπορούν να δημιουργήσουν αρκετές και υποσχόμενες εμπορικές ευκαιρίες. Επίσης η γρήγορη εξέλιξη που παρατηρείται στις δομές κατασκευής μεταϊλικών, που χρησιμοποιούν εξαιρετικά αγώγιμα στοιχεία, και η εφαρμογή τους στα μεταϊλικά, τα κάνουν ιδανικούς υποψήφιους για πραγματοποίηση πολλών θεωρητικών προβλέψεων, όπως ενίσχυση αποσβεσμένου κύματος, υλοποίηση της οπτικής μεταμόρφωσης και οπτικής ψευδαίσθησης αλλά και δημιουργίας συσκευών αποθήκευσης ενέργειας με μεγαλύτερο αποθηκευτικό χώρο κτλ. Και αυτό οφείλεται, στη χαμηλή απώλεια που έχουν σε σχέση με πιο πριν, πιο συμπαγές δόμηση, και την μη γραμμική ιδιότητα τους [Paudyal et al., 2013].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 Κοσμολογικές προεκτάσεις της αρνητικής διάθλασης

Κάθε προσεκτικός αναγνώστης θα πρόσεξε σε όσα αναφέραμε πιο πάνω, ότι η έρευνα για τα μεταϋλικά και τον αρνητικό δείκτη διάθλασης επικεντρώνεται στις μικρότερες κλίμακες, όπως αυτές των μικροκυμάτων. Οι προσπάθειες για κατασκευή αλλά και για μελέτη των μεταϋλικών από την πλειονότητα της επιστημονικής κοινότητας έχουν να κάνουν με ολοένα μικρότερες μικρό-δομές και νάνο-διατάξεις. Δύο επιστήμονες δεν παρασύρθηκαν από τη τάση αυτή, και έστρεψαν τον ενδιαφέρον τους προς την αντίθετη κατεύθυνση. Πρόκειται για τους Akhlesh Lakhtakia, ηλεκτρολόγο μηχανικό του πανεπιστημίου Penn State στην Pennsylvania, και του μαθηματικού Tom Mackay, του πανεπιστημίου του Εδιμβούργου [Mackay and Lakhtakia, 2004], [Lakhtakia and Mackay, 2004]. Οι δυο τους λοιπόν έστρεψαν το ενδιαφέρον τους στις μεγάλες κλίμακες μεγεθών και συγκεκριμένα στο διάστημα.

Οι ουράνιοι χάρτες που κρατούν στα χέρια τους οι αστρονόμοι, βασίζονται στην υπόθεση ότι οι διάφορες ακτινοβολίες που εκπέμπουν τα άστρα ταξιδεύουν προς τη Γη, ακολουθώντας ευθεία τροχιά. Μπορεί όμως οι ερμηνείες των αστρονόμων να είναι λανθασμένες. Οι Lakhtakia και Mackay προσέφυγαν στη γενική θεωρία της σχετικότητας, που ανέπτυξε ο Αϊνστάιν. Σύμφωνα με τη θεωρία η μάζα και η ενέργεια στρεβλώνουν το χώρο και το χρόνο, δημιουργώντας τη βαρύτητα. Σε αυτή τη θεωρία βασίζεται το φαινόμενο των βαρυτικών φακών, όπου κατευθυνόμενο το φως από μακρινούς γαλαξίες προς τη Γη, εκτρέπεται από το βαρυτικό πεδίο μαζικών αντικειμένων που βρίσκονται στη πορεία του. Κάπου εδώ μπορεί η βαρύτητα να δημιουργεί περιοχές αρνητικής διάθλασης. Οι Lakhtakia και Mackay το 2004, πείσθηκαν ότι οι εξισώσεις που περιγράφουν τη περιοχή κοντά και γύρω από μια περιστρεφόμενη μαύρη τρύπα παρουσιάζουν εξαιρετική ομοιότητα με αυτές των υλικών που επιδεικνύουν αρνητική διάθλαση. Αν με κάποιο τρόπο, επιβεβαιωθεί ότι κάπου στο σύμπαν υπάρχει αρνητική διάθλαση, ανατρέπεται η όλη κοσμοθεωρία μας.

Ο δρόμος για έρευνα της αρνητικής διάθλασης κάπου στο σύμπαν είναι στρωμένος με πολλές εκπλήξεις και προσδοκίες. Βέβαια θα πρέπει να θεωρηθεί αρκετά δύσκολο να αποδειχθεί πειραματικά η πιο πάνω υπόθεση. Αλλά ποτέ δεν ξέρεις τι μπορεί να συμβεί.

4.2 Σύνοψη

Τις τελευταίες δεκαετίες αναπτύσσεται έντονη ερευνητική δραστηριότητα στον τομέα των μεταϋλικών όπως βέβαια είδαμε και πιο πάνω. Ο λόγος βέβαια, είναι οι εξωτικές

ιδιότητες που έχουν τα διπλό-αρνητικά μεταϋλικά. Αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ότι υπάρχει και μια σειρά από εφαρμογές που ακόμη πρακτικά, τουλάχιστον στο οπτικό φάσμα, δεν έχουν εφαρμοστεί.

Αξιοσημείωτη είναι η συμβολή της έρευνας των διπλό-αρνητικών υλικών και της αρνητικής διάθλασης στην ιατρική και όχι μόνο. Λαμβάνοντας υπόψιν τα όσα αναφέραμε σχετικά με τις εφαρμογές της αρνητικής διάθλασης πιο πάνω, μπορούμε να πούμε ότι η πρακτική εφαρμογή ενός τέλει φακού για παράδειγμα, μπορεί να βοηθήσει την ιατρική στα μέγιστα, με διάφορους τρόπους. Ως προπτυχιακός φοιτητής οπτικής και οπτομετρίας, μπορώ να πω ότι η πρακτική εφαρμογή ενός τέλει φακού, μπορεί να βοηθήσει στο μέλλον ως ένα βοήθημα χαμηλής όρασης, ή σαν ένας ενδοφακός, εξαιτίας της καλύτερης διακριτικής ικανότητας που μπορεί να προσφέρει. Ακόμη τα υλικά αυτά εξαιτίας των ιδιοτήτων τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κατασκευή φακών (όχι απαραίτητα οφθαλμικών), με λιγότερο βάρος, αλλά και πιο επίπεδη επιφάνεια, δηλαδή χωρίς καμπύλες. Όπου θα προσφέρουν και καλύτερη διακριτική ικανότητα. Επίσης τα υλικά αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κυματοδηγοί και να βοηθήσουν στην τεχνολογία λέιζερ. Και πραγματικά σε αυτό το σημείο βρίσκεται η σημαντικότητα των υλικών αυτών, λόγω των άπειρων εφαρμογών που μπορούν να βρουν.

Ο Veselago στην ιστορική εργασία του το 1967, ανέφερε ότι το γεγονός ότι δεν υπάρχει στη φύση ένα υλικό με αρνητικό δείκτη διάθλασης, δεν είναι καθόλου τυχαίο. Πραγματικά, κανείς δεν περίμενε ότι τριάντα και πλέον χρόνια μετά θα είχαμε υλικά κατασκευασμένα από τον άνθρωπο, βασισμένα στην ιδέα του Ρώσου φυσικού. Το μέλλον προβλέπεται εξίσου αξιόλογο και στην συνέχεια και εναπόκειται στην ανθρωπότητα πως θα χρησιμοποιηθούν οι εφαρμογές των μεταϋλικών, προς το καλό ή προς το κακό.

Βιβλιογραφία

- Αποστολόπουλος, Ν. (2006) Το φαινόμενο της αρνητικής διάθλασης. **Το περισκόπιο της επιστήμης**.
- Τσιμπούκης, Θ. Δ. (2011) **Ηλεκτρομαγνητικό Πεδίο**. 960-524-325-3768. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
- Acher, O., Lerat, J. M., Mallejac, N. (2007) Evaluation and illustration of the properties of Metamaterials using field summation. **Optics Express**. **Vol. 15**. (No.3).
- Alitalo Pekka., Tretyakov Sergei. (2009) Electromagnetic cloaking with metamaterials. **Materials Today**. **Volume 12** (No 3), pp. 22-29.
- Alitalo, P., and Tretyakov, S. (2009). Electromagnetic cloaking with metamaterials. **Materials today**, **vol. 12** (no. 3), pp. 22-29.
- Alu, A. and Engheta, N. (2005) Achieving transparency with plasmonic and metamaterial coatings **Phys. Rev.** **E72**
- Boltasseva A., Shalaev V. M. (2008) Fabrication of optical negative- index metamaterials: Recent advances and outlook. **Elsevier Metamaterials 2**, pp. 1-17.
- Bose, J. C. (1898) On the rotation of plane of polarization of electric waves by a twisted structure. **Proc. Roy. Soc.** **Vol. 63**, pp. 146-152.
- Caloz, C. (2009) Perspectives on EM metamaterials. **Materials Today**. **Volume 3** (No. 3), pp. 12-20.
- Caloz, C., Chang, C. and Itoh, T. (2001) Full-wave verification of the fundamental properties of left-handed materials in waveguide configurations. **J. Appl. Phys.** **Vol. 90** (no.11), pp. 5483-5486.
- Chen, H., Wu, B. I., Zhang, B., & Kong, J. A. (2007) Electromagnetic wave interactions with a metamaterial cloak. **Physical Review Letters**, pp. 99-105.
- Chew, H. and Kerker, M. (1976). Abnormally low electromagnetic scattering cross sections **J. Opt. Soc. Am.** **Vol. 66**, pp. 445-449.
- Cui, T. J., Cheng, Q., Lu, W. B., Jiang, Q. & Kong, J. A. (2005) Localization of electromagnetic energy using a left-handed-medium slab. **Phys. Rev. B (Solid State)** **71**, 045 114.

- Cummer, S. A., Smith, D. R., Rahm, M., Pendry, J. B., Schurig, D., and Starr, A. (2008) Scattering theory derivation of a 3D acoustic cloaking shell. **Physical Review Letters**, **vol. 100**, 024301.
- Dollin, L. S. (1961). On the possibility of comparison of three dimensional electromagnetic systems with non-uniform anisotropic filling. **Izy. VUZov Radiofizika**. **Vol. 4 (no. 5)**, pp. 964-967.
- Dolling, G., Enkrich, C., Wegener, M., Soukoulis, C. M., & Linden, S. (2006). Simultaneous negative phase and group velocity of light in a metamaterial. **Science**, **312(5775)**, 892-894.
- Dolling, G., Wegener, M. and Linden, S. (2007) Realization of a three-functional-layer negative-index photonic metamaterial. **Opt. Lett.** **Vol. 32**, pp. 551-553
- Edwards, B., Alù, A., Silveirinha, M. G. and Engheta, N. (2009) Experimental Verification of Plasmonic Cloaking at Microwave Frequencies with Metamaterials. **Phys. Rev. Lett.**, **vol. 103** (no. 15), pp. 153901.
- Eleftheriades, G. V. (2009) EM transmission-line metamaterials. **Materials Today**, **Volume 3** (No 3), pp. 30-41.
- Eleftheriades, G. V., Balmain, K. G. (2005) Negative- refraction Metamaterials. Fundamental Principles and Applications. **IEEE Press, Wiley- Interscience**. New Jersey.
- Engheta, N., & Ziolkowski, R. W. (2005). A positive future for double-negative metamaterials. **Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on**, **53(4)**, 1535-1556.
- Engheta, N., Ziolkowski, R. W. (2006) **METAMATERIALS: Physics and Engineering Explorations**. IEEE Press.
- Engheta, Nader., Ziolkowski, Richard W. (2005) A positive future for double-Negative Metamaterials. **IEEE Transaction on microwave theory and techniques**. **Vol 53** (No 4), pp. 1535-1556.
- Ergin, T., Stenger, N., Brenner, P., Pendry, J. B., & Wegener, M. (2010). Three-dimensional invisibility cloak at optical wavelengths. **Science**, **328(5976)**, 337-339.
- Foteinopoulou, S., Economou, E. N. and Soukoulis C.M. (2003). Refraction in media with negative refractive index. **Phys. Rev. Letters**. **Vol. 90** (no.10).
- G. W. 't Hoot. (2001) Comment on "Negative refraction makes a perfect lens". **Phys. Rev. Lett.** **Vol. 87** (no. 24), pp. 249701.
- Garcia, N. & Nieto-Vesperinas, M. (2002) Left-handed materials do not make a perfect lens. **Phys. Rev. Lett.** **88**, 207 403.

- Garcia-Vidal, F. J. and Pendry J. B. (1996) Collective theory of surface enhanced Raman scattering. **Phys. Rev. Lett. Vol. 77**, pp. 1163-1166.
- Gómez-Santos, G. (2003) Universal features of the time evolution of evanescent modes in a left-handed perfect lens. **Phys. Rev. Lett. Vol. 90** (no.7), pp. 077401.
- Greenleaf, A., Lassas, M. and Uhlmann, G. (2003) On non-uniqueness for Calderón's inverse problem **Math. Res. Lett. vol. 10**, pp.685–693.
- Greenleaf, A., Lassas, M. and Uhlmann, G. (2003) Anisotropic conductivities that cannot be detected. **By EIT Physiol. Meas. 24**, pp. 413–419.
- Guenneau, S., Gralak, B. and Pendry, J. B. (2005) Perfect corner reflector. *Opt. Lett.* 30, pp. 1204–1206.
- Houck, A. A., J. B. Brock, and I. L. Chuang. (2003) Experimental observations of a left-handed material that obeys Snell's law. **Phys. Rev. Lett. vol 90** (no. 13).pp. 137401
- Hrabar, S., Bartolic, S. and Sipus, Z. (2005) Waveguide miniaturization using uniaxial negative permeability meta-material. **IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 53** (no. 1), pp. 110–119.
- Jackson, J. D. (1999) **Classical Electrodynamics**. 3rd Edition Wiley.
- Kerker, M. (1975) Invisible bodies. **J. Opt. Soc. Am. Vol. 65**, pp. 376–379.
- Kildal, P. S. (1988) Definition of artificially soft and hard surfaces for electromagnetic waves. **Electronics Letters. vol. 24**, pp. 168-70.
- Kock, W. (1948) Metallic delay lenses. **Bell syst. Tech J. vol. 27**, pp. 58-82.
- Lagarkov, A. N., & Kissel, V. N. (2004). Near-perfect imaging in a focusing system based on a left-handed-material plate. **Physical review letters, vol. 92** (no. 7), pp. 077401.
- Lakhtaki, A., Mackay, T. G. (2004) Towards gravitationally assisted negative refraction of light by vacuum. **J. Phys. A32**.
- Lakhtakia, A. (2004). On the genesis of post constraint in modern electromagnetism. **Optik. Vol. 115**, pp. 151-158.
- Lapine, M. Tretyakov, S. (2007) Contemporary notes on metamaterials. **Microwaves, Antennas & Propagation, IET. vol.1** (no. 1), pp. 3-11.
- Leonhardt, U. (2006) Notes on conformal invisibility devices. **New J. Phys.** 8-118.
- Leonhardt, U. (2006) Optical conformal mapping. **Science. Vol. 312**, pp. 77-80.
- Lerat, J. M., Mallejac, N. and Acher, O. (2006) Determination of the effective parameters of a metamaterial by field summation method. **Journal of Applied Physics 100**, 084908.

- Li, J., & Pendry, J. B. (2008). Hiding under the carpet: a new strategy for cloaking. **Physical Review Letters**, vol. **101** (no. 20), pp. 203901.
- Lindell, I. V., Sihvola, A. H., Kurkijärvi, J. (1992) The last Hertzian, and a Harbinger of electromagnetic chirality. **Antennas Propag. Vol. 34** (no. 3), pp. 24-30.
- Lindell, I. V., Tretyakov, S. A., Nikoskinen, K. I. and Ilvonen, S. (2001). BW media with negative parameters, capable of supporting backward waves. **Microwave Opt. Tech. Lett. Vol. 31** (no. 2), pp. 129-133.
- Lourtioz Jean-Michel Lourtioz. (2009) Photonic crystals and metamaterials. **Elsevier C.R. Physique 9**, pp. 4-15.
- Lu, J., Grzegorzczak, T. M., Zhang, Y., Pacheco Jr, J., Wu, B. I., Kong, J. A. and Chen, M. (2003). Cerenkov radiation in materials with negative permittivity and permeability. **Opt. Express**, vol. **11** (no. 7), pp. 723-734.
- Lu, Ming-Hui., Feng, Liang., Chen, Yan-Feng. (2009) Phononic crystals and acoustic metamaterials. **Materials Today. Volume 12** (Number 12) pp. 34-42.
- Mackay, T. G., Lakhtakia, A. (2004) Negative refraction in outer space?. **Current Science. 86** (1593).
- Mahmoud, S. F. and Viitanen, A. J. (2002). Surface wave character on a slab of metamaterial with negative permittivity and permeability. **Progress In Electromagn. Research. Vol. 51**, pp 127-137.
- Markos, P. and Soukoulis, C. M. (2001). Transmission studies of left-handed materials. **Phys. Rev. B. vol. 65** (no. 3), pp. 033401.
- Markos, P. and Soukoulis, C. M. (2002). Numerical studies of left-handed materials and arrays of split ring resonators. **Phys. Rev. E. vol. 65** (no. 3), pp. 036622.
- Marques, R., Medina, F. and Ruffini-El-Idrissi, R. (2002) Role of anisotropy in negative permeability and left-handed metamaterials. **Phys. Rev. B, vol. 65**, pp. 1–6.
- Marqués, R., Mesa, F., Martel, J. and Medina, F. (2003) Comparative analysis of edge- and broadside-coupled split ring resonators for metamaterial design – theory and experiments. **IEEE Trans. Antennas Propag. vol. 51** (no. 10). Pp 2572–2581.
- Maxwell, J. C. (1873) Treatise on electricity and magnetism. **Clarendon Press**.
- Maxwell, J. C. (1890). On physical lines of force *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell* ed W. D. Niven (**Cambridge: Cambridge University Press**) chapter **23**, pp. 477.
- Merlin, R. (2004) Analytical solution of the almost-perfect-lens problem. **Appl. Phys. Lett. 840**, pp. 1290–1292.

- Mesa, F., Freire, M. J., Marqués, R. and Baena, J. D. (2005). Three-dimensional superresolution in metamaterial slab lenses: Experiment and theory. **Phys. Rev. B.** vol. **72** (no. 23), pp.235117.
- Milton G. W. and Nicorovici N. A. (2006) On the cloaking effects associated with anomalous localized resonance. **Proc. R. Soc. London A** **462**, pp. 3027-3059.
- Munk, Ben. A. (2009) *Metamaterials, Critique and Alternatives*. **Wiley**. pp. 12-20. New Jersey.
- Nefedov, I. S. and Tretryakov, S. A. (2003). Waveguide containing a backward-wave slab. **Radio Science.** vol.**38** (no. 6), pp. 1101.
- Paudyal, H., Johrib, M., and Tiwari, A. (2013). From Left Handed Materials to Invisible Cloak: Recent Advances. **Himalayan Physics**, vol. **4**, pp. 18-26.
- Penciu, R. C., Kafesaki, M., Gundogdu, T. F., Economou, E.N., Soukoulis, C.M. (2006) Theoretical study of left-handed behavior of composite metamaterials. **Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications.** Vol. **4**, pp. 12-16.
- Pendry, J. B. (2000) Negative Refraction Makes a Perfect Lens. **Phys. Rev. Lett.** vol. **85** (No 18) pp. 3966-3969.
- Pendry, J. B. (2004) Negative refraction. **Contemp. Phys.** Vol. **45**, pp. 191–202.
- Pendry, J. B., & Smith, D. R. (2004). Reversing light with negative refraction. **Physics Today**, vol. **57**, pp. 37-43.
- Pendry, J. B., A. J. Holden, W. J. Stewart, and I. Youngs. (1996). Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures. *Phys. Rev. Lett.* Vol. 76 (no. 25), pp. 4773–4776.
- Pendry, J. B., Holden, A., Robbins, J. D. and Stewart, J. W. (1999) Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. **IEEE Trans. MTT**, vol. **47** (no. 11), pp. 2075–2084.
- Pendry, J. B., Holden, J. A. Robbins, J. D and Stewart, J. W. (1998) Low frequency plasmons in thin-wire structures. **J. Phys. Condensed Matter**, vol. **10**, pp. 4785– 4809.
- Pendry, J. B., Schurig, D. and Smith, D. R. (2006) Controlling electromagnetic fields. **Science.** Vol. **312**, pp.1780–1782.
- Podolskiy, V. A. & Narimanov, E. E. (2005) Near-sighted superlens. **Opt. Lett.** **30**, pp. 75–77.
- Podolskiy, V. A., Kuhta, N. A. & Milton, G. W. (2005) Optimizing the superlens: manipulating geometry to enhance the resolution. **Appl. Phys. Lett.** Vol. **87**, pp. 231 113.

- R. W. Ziolkowski and E. Heyman. (2001) Wave propagation in media having negative permittivity and permeability. **Phys. Rev. E.** vol. **64** (no. 5), pp. 056625.
- Rahm, M., Schurig, D., Roberts, D. A., Cummer, S. A., Smith, D. R., & Pendry, J. B. (2008). Design of electromagnetic cloaks and concentrators using form-invariant coordinate transformations of Maxwell's equations. **Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications**, vol. **6** (no. 1), pp. 87-95.
- Ramakrishna, S. A. (2005) Physics of negative refractive index materials. **Rep. Prog. Phys.** **68**, 449–521.
- Ramakrishna, S. A., Pendry, J. B., Schurig, D., Smith, D. R. & Schultz, S. (2002) The asymmetric lossy near-perfect lens. **J. Modern Opt.** **490**, 1747–1762.
- Ramakrishna, S. Anantha. (2005) Physics of negative refractive index materials. **Reports on progress in Physics.** vol. **68**, pp. 449-521.
- Schurig, D., Mock, J. J., Justice, B. J., Cummer, S. A., Pendry, J.B., Starr, A. F., Smith, D. R. (2006) Demonstration of a Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies. **Science.** **314**, pp. 977-80.
- Shelby, R. A., D. R. Smith, and S. Schultz. (2001) Experimental verification of a negative index of refraction. **Science.** vol. **292**, pp. 77–79.
- Silveirinha Mario G., Alu Andrea, Engheta Nader. (2007) Parallel-plate metamaterial for cloaking structures. **Physical Review E** **75**.
- Simovski, C. R., Belov, P. A. and Sailing, H. (2003) Backward wave region and negative material parameters of a structure formed by lattices of wires and split-ring resonators. **IEEE Trans. Antennas Propag.**, vol. **51** (no. 10), pp. 2582–2591.
- Smith, D. R. and N. Kroll. (2000). Negative refractive index in left-handed materials. **Phys. Rev. Lett.** Vol. **85** (no. 14), pp. 2933–2936.
- Smith, D. R., D. C. Vier, T. Koschny, and C. M. Soukoulis. (2005) Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials. **Phys. Rev. E**, **71** (no. 3), pp. 036617.
- Smith, D. R., D. Schurig, and J. B. Pendry. (2002) Negative refraction of modulated electromagnetic waves. **Appl. Phys. Lett.** Vol. **81** (no. 15), pp. 2713–2715.
- Smith, D. R., Padilla W. J., Vier D. C., Nemat-Nasser D. C. and Schultz, S. (2000) A composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. **Phys. Rev. Lett.**, vol. **84** (no. 18), pp. 4184–4187.
- Smith, D. R., Pendry, J. B. (2006) Homogenization of metamaterials by field averaging (invited paper). **J. Opt. Soc. Am. B.** Vol. **23** (No.3), pp. 391-403.

Smith, D. R., Pendry, J. B., & Wiltshire, M. C. K. (2004). Metamaterials and negative refractive index. **Science**, **305**(5685), 788-792.

Smith, D. R., Rye, P. M., Mock, J. J., Vier, D. C. and A. F. Starr.(2004) Enhanced diffraction from a grating on the surface of a negative-index metamaterial. **Phys. Rev. Lett.** **Vol. 93** (no 13) pp. 137405.

Smith, D. R., Schurig, D., Rosenbluth, M. and S. Schultz. (2003) Limitations on sub diffraction imaging with a negative refractive index slab. **Appl. Phys. Lett.** **Vol. 82** (no. 10), pp. 1506–1508.

Smith, D.R., Vier, D. C., Koschny, Th. and Soukoulis C. M. (2005) Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials, **Physical Review E** **71**, 036617.

Tretyakov, (S. 2003) Analytical Modeling in Applied Electromagnetics. **Artech House, Norwood. MA.**

Valanju, P. M., R. M. Walser, and A. P. Valanju. (2002) Wave refraction in negative-index media: Always positive and very inhomogeneous. **Phys. Rev. Lett.** **Vol. 88** (no. 18), pp. 187401.

Veselago, V. G. (1968) The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . **Sov. Phys. Uspekhi.** **Vol. 10** (no. 4), pp. 509-514. [*Usp. Fiz. Nauk.* **Vol. 92**, pp. 517-526. (1967)]

Veselago, V. G. (2005). Some remarks regarding electrodynamics of materials with negative refraction. **Appl. Phys. B.** **vol. 81**, pp. 403–407.

Veselago, V. G. and Narimanov, E. E. (2006). The left hand of brightness. Past, present and future of negative index materials. **Nature Materials.** **Vol. 5**, pp. 759.

Walser, R. M. (2001) Electromagnetics metamaterials. **Proc. SPIE.** **4467**, pp. 1-15.

Williams, J. M. (2001). Some problems with negative refraction. **Phys. Rev. Lett.** **Vol. 87** (no. 24), pp. 249703.

Wood Ben. (2009) Metamaterials and invisibility, **Elsevier C.R. Physique** **10**, pp. 379-390.

Ye, Z. (2003) Optical transmission and reflection of perfect lenses by left-handed materials. **Phys. Rev. B.** **vol. 67** (no. 19), pp. 193106.

Zheludev, N. I. (2010). The road ahead for metamaterials. **Science**, **vol. 328** (no. 5978), pp. 582-583.

Ziolkowski, R. W. (2003) Pulsed and CW Gaussian beam interactions with double negative metamaterial slabs. **Opt. Express.** **vol. 11**, pp. 662–681.

Ziolkowski, R. W. and Heyman, E. (2001) Wave propagation in media having negative permittivity and permeability. **Phys. Rev. E**, vol. **64** (no.5), pp. 056625.