

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ Τ.Ε.



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΜΑΧWELL ΚΑΙ ΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ ΣΤΙΣ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ

ΙΩΑΝΝΗΣ ΘΕΟΤΟΚΙΔΗΣ Α.Μ. 1691
ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΟΥΓΙΑΣ

ΑΝΤΙΡΡΙΟ ΜΑΙΟΣ 2016

Στους γονείς μου

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Θεοτοκίδης Ιωάννης, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της πτυχιακής διατριβής από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής Τ.Ε του Τ.Ε.Ι Δυτικής Ελλάδος δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον καθηγητή κύριο Ιωάννη Κούγια που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με την εργασία αυτή, όπως επίσης και για την πολύτιμη και πρόθυμη βοήθειά του σε όλη τη διάρκεια υλοποίησης της.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αλματώδης εξέλιξη που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια στη μετάδοση των πληροφοριών οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη χρησιμοποίηση των οπτικών ινών. Οι οπτικές ίνες μεταδίδουν φωτεινά σήματα υψηλών συχνοτήτων, με υψηλούς ρυθμούς διαμόρφωσης και μεγάλο εύρος συχνοτήτων σε μεγάλες αποστάσεις με μηδενικές σχεδόν απώλειες έχοντας μικρές διαστάσεις και βάρος, ενώ η ταχύτητα μετάδοσης πλησιάζει αυτή με την οποία διαδίδεται το φως. Η κατανόηση του μαθηματικού υποβάθρου (εξισώσεις Maxwell) και των φυσικών αρχών στις οποίες στηρίζεται η λειτουργία των οπτικών ινών, όπως και οι χρήσεις αυτών είναι το αντικείμενο της πτυχιακής εργασίας.

Λέξεις – κλειδιά

Εξισώσεις Maxwell, Οπτικές ίνες, Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, Κυματοδήγηση, Τηλεπικοινωνιακά συστήματα, Εξίσωση Bessel

ABSTRACT

The rapid development seen in recent years in the transmission of information is largely due to the use of fiber optics. The optical fibers transmit light high-frequency signals with high modulation rates and large bandwidth over long distances with virtually zero losses having small dimensions and weight, while the transmission speed approaching the speed of light. The subject of the thesis concerns the mathematical background (Maxwell equations) and physical principles underlying the operation of the optical fibers and the use of them.

Key - Words

Maxwell's equations, Fibre Optics, Electromagnetic radiation, Waveguiding, Telecommunication systems, Bessel equation

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	v
ABSTRACT	vi
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	x
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	xiii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	2
1.1 Στοιχεία απειροστικού λογισμού	2
1.2 Το ολοκλήρωμα.....	2
1.2.1 Η παράγωγος.....	2
1.2.2 Διαφορική εξίσωση.....	3
1.3 Στοιχεία διανυσματικής ανάλυσης	6
1.3.1.Καρτεσιανό Σύστημα Συντεταγμένων	7
1.3.2. Διανυσματικές συναρτήσεις τριών διαστάσεων.....	7
1.3.3 Εξωτερικό (Διανυσματικό) γινόμενο δύο διανυσμάτων	8
1.3.4 Εσωτερικό γινόμενο δύο διανυσμάτων	8
1.3.5 Ροή διανύσματος (flux)	9
1.3.6. Κυκλοφορία διανύσματος (circulation)	9
1.3.7 Τελεστής ανάδελτα	9
1.3.8. Απόκλιση διανυσματικής συναρτησης	10
1.3.9 Κλίση ή βαθμίδα βαθμωτής συνάρτησης	10
1.3.10 Στροβιλισμός διανυσματικής συνάρτησης (rotation, curl)	10
1.3.11 Θεώρημα Gauss.....	11
1.3.12 Θεώρημα Stokes	11
1.3.13 Τελεστής Laplace	12
1.3.14 Κυλινδρικό Σύστημα Συντεταγμένων	12
1.4 Μιγαδικοί αριθμοί	15
2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΥΣΙΚΗΣ	17
2.1 Κυματική	17
2.1.1 Κύμα.....	17
2.1.2 Η διαφορική εξίσωση του κύματος.....	18
2.1.3 Ιδιότητες των κυμάτων.....	20

2.2	Οπτική.....	23
2.2.1	Το φως είναι σωματίδια	23
2.2.2	Το φως είναι κύμα	26
2.2.3.	Το φως είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα.....	28
2.2.4	Το φως είναι σωματίδιο και κύμα.....	30
2.3	LASER.....	30
2.3.1	Περιγραφή.....	30
2.3.2.	Συνεστραμμένο φως.....	31
3.	ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ MAXWELL.....	33
3.1	Τα μεγέθη που συναντάμε στις εξισώσεις Maxwell.....	33
3.2	Εξισώσεις Maxwell.....	35
3.2.1	Εξίσωση 1η	35
3.2.2	Εξίσωση 2 ^η	39
3.2.3	Εξίσωση 3η	40
3.2.4	Εξίσωση 4η	41
3.3	Το φως ως συνέπεια των εξισώσεων Maxwell	44
3.4	Οι λύσεις των εξισώσεων Maxwell.....	45
4.	ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ	46
4.1	Δομή της οπτικής ίνας.....	46
4.2	Μέθοδοι Παραγωγής Οπτικών Ινών.....	47
4.3	Λειτουργία των οπτικών ινών	48
4.4	Ταξινόμηση των οπτικών ινών	48
4.4.1	Ίνες βηματικού δείκτη διάθλασης (step index fiber).....	49
4.4.2	Ίνες διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης (graded index fiber)	49
4.4.3.	Μονότροπες οπτικές ίνες (single - mode)	50
4.4.4	Πολύτροπες (πολυτροπικές) οπτικές ίνες.....	51
4.5	Κυματοδήγηση – Θεώρηση Γεωμετρικής Οπτικής.....	52
4.5.1	Η θεωρία ακτινών	52
4.6	Θεώρηση κυματικής οπτικής.....	56
4.6.1	Η θεωρία των τρόπων	56
4.7	Απόδοση των οπτικών ινών.....	62
4.7.1.	Το εύρος ζώνης.....	62
4.7.2	Τον τρόπο μετάδοσης του σήματος στην ίνα, με το αν, δηλαδή, η ίνα είναι πολύτροπη ή μονότροπη.....	63
4.7.3	Την απώλεια σήματος	63
4.7.4	Μη γραμμικά φαινόμενα	72

4.8 Καλώδια οπτικών ινών	78
4.8.1 Tight buffer	79
4.8.2. Καλώδια τύπου loose tube	81
4.8.3 Δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων	84
4.9 Πλεονεκτήματα οπτικών ινών	84
4.10 Μειονεκτήματα οπτικών ινών	85
4.11 Ιστορία των οπτικών ινών	86
4.12 Εφαρμογές των οπτικών ινών	91
4.12.1 Το οπτικό σύστημα επικοινωνίας.....	93
4.12.2 Δομή των τηλεπικοινωνιακών δικτύων.....	95
4.13 Ευρυζωνική ανάπτυξη και τεχνολογίες στην Ευρώπη	99
4.14 Ευρυζωνική ανάπτυξη και τεχνολογίες στην Ελλάδα.....	101
5.ΟΙ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ MAXWELL ΣΤΙΣ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ.....	103
5.1 Εισαγωγή.....	103
5.2 Επίλυση των εξισώσεων Maxwell στις οπτικές ίνες.....	105
5.2.1 $q^2 > 0$:.....	107
5.2.2 $q_2 < 0$:.....	108
5.2.3 Οι συνιστώσες του πεδίου	110
6.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	112
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ	115
1.Προσομοιώσεις τρόπων διάδοσης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κυκλικού κυματοδηγού.....	115
2. Προσομοιώσεις τρόπων διάδοσης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε οπτική ίνα ...	121
2.1 Προσομοιώσεις τρόπου 0 ηλεκτρικού TE_{0n} και μαγνητικού TM_{0n} πεδίου σε οπτική ίνα διαμέτρου 10nm. Δείκτης διάθλασης πυρήνα 1,4 και μανδύα 1,2. Συχνότητα φωτός 99THz. Χρόνος σε ωt (μοίρες) 90^0	122
2.2 Επίδραση της διαμέτρου στους τρόπους της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.....	125
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	129

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

1.1	Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων	7
1.2	Εξωτερικό γινόμενο δυο διανυσμάτων	8
1.3	Ροή διανύσματος	9
1.4	Κυκλοφορία διανύσματος	9
1.5	Θεώρημα Gauss	11
1.6	Θεώρημα Stokes	12
1.7	Κυλινδρικές συντεταγμένες	12
1.8	Αναπαράσταση μιγαδικού αριθμού	15
1.9	Μελέτη αρμονικής κίνησης	16
2.1	Είδη κυμάτων	17
2.2	Κύματα χώρου –Επίπεδα κύματα	18
2.3	Αρχή του Huygens	20
2.4	Συμβολή κυμάτων	21
2.5	Περίθλαση κυμάτων	22
2.6	Πόλωση μηχανικών κυμάτων	22
2.7	Ανάκλαση του φωτός	24
2.8	Διάχυση του φωτός	24
2.9	Διάθλαση του φωτός	24
2.10	Οριακή γωνία – ολική ανάκλαση	25
2.11	Πείραμα των δυο σχισμών	26
2.12	Περίθλαση	27
2.13	Διπλή διάθλαση	28
2.14	Πόλωση του φωτός με ανάκλαση	28
2.15	Φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας	29
2.16	Αρχή λειτουργίας του L.A.S.E.R.	31
2.17	L.A.S.E.R	31
2.18	Δημιουργία συνεστραμμένου φωτός	32
2.19	Συνεστραμμένο φως για διαφορετικές τιμές του I	32
3.1	Διηλεκτρική σταθερά	33
3.2	Ηλεκτρική ροή	34
3.3	Νόμος του Gauss	36
3.4	Ηλεκτρική ροή που διέρχεται από δυο επιφάνειες	37
3.5	Φορτίο έξω από κλειστή επιφάνεια	37
3.6	Απόκλιση της έντασης	38
3.7	Ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ ετερόσημων σημειακών φορτίων	39
3.8	Νόμος του Gauss σε μαγνητικό πεδίο	39
3.9	Ηλεκτρικό πεδίο από επαγωγή	40
3.10	Μαγνητικό πεδίο γύρω από ηλεκτρικό ρεύμα	41
3.11	Δημιουργία μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου σε πυκνωτή	42
3.12	Ρεύμα μετατόπισης κατά την εκφόρτιση πυκνωτή	43
3.13	Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο	45
4.1	Δομή οπτικής ίνας	46
4.2	α. Μέθοδος ράβδου – σωλήνα β. Μέθοδος διπλής χοάνης	47
4.3	Διάδοση φωτεινής ακτίνας στην οπτική ίνα	48
4.4	Μεταβολή του δείκτη διάθλασης κατά μήκος τομής οπτικής ίνας β.δ.δ.	49
4.5	Οπτική ίνα βηματικού δείκτη διάθλασης	49
4.6	Μεταβολή του δείκτη διάθλασης κατά μήκος τομής οπτικής ίνας δ.δ.δ.	50
4.7	Η πορεία των ακτίνων σε οπτική ίνα δ.δ.δ.	50
4.8	Μονότροπη οπτική ίνα	50
4.9	Η κυματοδήγηση σε μια πολύτροπη ίνα β.δδ	51
4.10	Η κυματοδήγηση σε πολύτροπη ίνα δ.δ.δ.	52

4.11	α. Διαμεσημβρινές – β. Στρεβλές ακτίνες	53
4.12	Γωνία και κώνος αποδοχής	54
4.13	Κατανομή της έντασης σε συνάρτηση με τη γωνία αποδοχής	54
4.14	Μη κυματοδηγούμενες ακτίνες	56
4.15	Αποσβένον πεδίο	57
4.16	Τάξεις τρόπου διάδοσης	58
4.17	Διαδιδόμενα μέτωπα κύματος σε φάση	59
4.18	Πορεία των διαφόρων τάξεων ρυθμών σε μια οπτική ίνα	59
4.19	Εγκάρσιοι τρόποι διάδοσης	60
4.20	Μέγιστη γωνία αποδοχής για ίνα β.δ.δ	61
4.21	Ποιοτική περιγραφή απώλειας ακτινοβολίας κατά μήκος μιας ίνας	61
4.22	Γραφική παράσταση της εξέλιξης της απόσβεσης με το χρόνο	64
4.23	Μηχανισμοί εξασθένησης στις οπτικές ίνες	64
4.24	Εξωγενής απορρόφηση	65
4.25	Διαδρομή προσπιπτουσών ακτίνων στη διεπαφή πυρήνα μανδύα	65
4.26	Είδη σκέδασης	66
4.27	Μηχανισμοί εξασθένησης σε συνάρτηση με το μήκος κύματος	66
4.28	Κακή κατασκευή – τοποθέτηση οπτικών ινών	67
4.29	Παράθυρα λειτουργίας οπτικών ινών	67
4.30	Διασπορά οπτικού παλμού	68
4.31	Εξάρτηση του δ.δ από το μήκος κύματος	68
4.32	Διασπορά υλικού	69
4.33	Διασπορά κυματοδηγού	69
4.34	Χρωματική διασπορά	70
4.35	Διασπορά τρόπων μετάδοσης	71
4.36	Διέγερση πολλαπλών τρόπων	71
4.37	Διασπορά τρόπων πόλωσης	72
4.38	Σκέδαση φωτονίων	73
4.39	Σκέδαση Bragg	74
4.40	Μετατόπιση Doppler	74
4.41	Συνιστώσες σκέδασης σε οπτική ίνα	75
4.42	Αυτοδιαμόρφωση φάσης	76
4.43	Στιγμιαία συχνότητα παλμού με αυτοδιαμόρφωση	76
4.44	Αποτέλεσμα ισχυρής αυτοδιαμόρφωσης φάσης	77
4.45	Αποτέλεσμα ετεροδιαμόρφωσης	77
4.46	FWM με αρχικό αριθμό σημάτων $N=2$ και $N=3$	78
4.47	Δομή καλωδίου οπτικών ινών	78
4.48	Δομή καλωδίου οπτικών ινών εξωτερικής χρήσης	79
4.49	Τομή καλωδίου τύπου Tight Buffer	79
4.50	Καλώδια τύπου Simplex α. Διασύνδεσης β. Patchcord	80
4.51	Καλώδιο τύπου Zipcord	80
4.52	Καλώδιο τύπου Distribution	80
4.53	Καλώδιο τύπου Breakout	81
4.54	Καλώδιο τύπου Loosetube	81
4.55	Καλώδιο τύπου Dry loosetube	81
4.56	Καλώδια τύπου Ribbon	82
4.57	Θωρακισμένο καλώδιο	82
4.58	Υποβρύχιο καλώδιο τηλεπικοινωνιών	82
4.59	Χάρτης διηπειρωτικών υποβρύχιων καλωδίων	83
4.60	Εναέριο καλώδιο	83

4.61	Καλώδιο εμφύσησης	83
4.62	Μικτό καλώδιο	84
4.63	Πείραμα του Tyndall	86
4.64	Συσκευή του Bell	86
4.65	Σύστημα του Wheeler	87
4.66	Μοντέλο ίνας φωτονικών κρυστάλλων	90
4.67	α. Ενδοσκόπιο. β. Τρόπος λειτουργίας του ενδοσκοπίου	92
4.68	Αισθητήρας οπτικών ινών	92
4.69	Βασικές μονάδες τηλεπικοινωνιακού συστήματος	93
4.70	Πηγές οπτικού σήματος	94
4.71	Προφίλ εκπεμπόμενης ακτινοβολίας πηγής φωτός	94
4.72	Αρχιτεκτονική δικτύου οπτικών ινών	96
4.73	Τεχνολογία FTTx	97
4.74	Τεχνολογία WDM	98
4.75	Τεχνολογία ODTM	99
4.76	Συνδρομητές FTTH/B παγκοσμίως 2015	100
4.77	Χρήστες Internet στην Ευρώπη	100
4.78	Εξέλιξη του αριθμού χρηστών Internet παγκοσμίως τα τελευταία 10 χρόνια	101
5.1	Πεδία στον εγκάρσιο ηλεκτρικό τρόπο TE	104
5.2	Πεδία στον εγκάρσιο μαγνητικό τρόπο TM	104
5.3	Λύσεις της εξίσωσης Bessel	108
5.4	Τροποποιημένη συνάρτηση Bessel 1ου είδους – Τροπ. συν Bessel 2ου είδους	108

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

4.1	Είδη οπτικών ινών	52
4.2	Χρωματικός κώδικας καλωδίων.	84
4.3	Ποσοστό διαφόρων τεχνολογιών στην Ελλάδα το 2014	101
4.4	Ποσοστά Διείσδυσης Ευρυζωνικότητας, από τον Ιανουάριο 2004 και μετά, για την Ελλάδα και απόκλιση από το ΜΟ της ΕΕ.	102

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τεχνολογική επανάσταση που βιώνουμε στην εποχή μας οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην γρήγορη, εύκολη πρόσβαση στην πληροφορία. Η κωδικοποίηση της πληροφορίας με τη μορφή φωτός (ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας), και η χρήση των οπτικών ινών ως βασικών αρτηριών για τη μετάδοση των πληροφοριών αποτελούν πάρα πολύ σημαντικούς παράγοντες στη διαδικασία αυτή. Ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι να διερευνηθεί και να γίνει κατανοητή η λειτουργία των οπτικών ινών. Οι εξισώσεις Maxwell που ερμηνεύουν τη φύση του φωτός και η εφαρμογή τους στις οπτικές ίνες αποτελούν τον κεντρικό πυρήνα της εργασίας, παράλληλα με τις αρχές της Φυσικής που υπαγορεύουν τη συμπεριφορά του φωτός στις οπτικές ίνες, καθώς και ο συγκερασμός των δυο αυτών προσεγγίσεων σε κοινά αποδεκτές λύσεις. Γίνεται επίσης μια αναλυτική παρουσίαση των εφαρμογών των οπτικών ινών.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις έννοιες του Μαθηματικού Λογισμού και των Διαφορικών εξισώσεων που είναι απαραίτητες για την κατανόηση των εξισώσεων Maxwell στο ορθογώνιο και στο κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων, επειδή οι οπτικές ίνες που διαδίδεται το φως έχουν κυλινδρικό σχήμα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναδρομή στις θεωρίες του φωτός, που αφορούν στην εξέλιξη των ιδεών για την ερμηνεία της φύσης του φωτός, της διάδοσής του και της αλληλεπίδρασής του με την ύλη, αναφέροντας σε κάθε περίπτωση τις αρχές και τους νόμους που διατυπώθηκαν και ισχύουν μέχρι σήμερα, υπό το πρίσμα της Κυματικής, Οπτικής και του Ηλεκτρομαγνητισμού. Περιγράφονται επίσης τα Laser που αποτελούν την πηγή της ακτινοβολίας που μεταφέρει τις πληροφορίες, όπως και μελλοντικές χρήσεις του φωτός για πολλαπλάσια δυνατότητα μεταφοράς πληροφοριών μέσω των οπτικών ινών.

Στο τρίτο κεφάλαιο μελετώνται οι εξισώσεις Maxwell. Γίνεται επεξήγηση όλων των συμβόλων που υπεισέρχονται σε αυτές, η απόδειξή τους, διατυπώνεται η ερμηνεία τους, αναφέρεται η ταύτιση του φωτός με ηλεκτρομαγνητικά κύματα όπως διατυπώθηκε από τον Maxwell και οι λύσεις των εξισώσεων που περιγράφουν τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των οπτικών ινών, δομή, παραγωγή, λειτουργία, ταξινόμηση, κυματοδότηση από την άποψη της κυματικής και γεωμετρικής οπτικής (τρόποι διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στις οπτικές ίνες), την απόδοση των οπτικών ινών και των παραγόντων που την επηρεάζουν. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά των καλωδίων οπτικών ινών, των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων τους και στις χρήσεις των οπτικών ινών (τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, αισθητήρες)

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται η επίλυση των εξισώσεων Maxwell στις οπτικές ίνες με τους περιορισμούς που τίθενται, στο κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων, που περιγράφουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στις οπτικές ίνες.

Τέλος γίνονται προσομοιώσεις με κατάλληλο λογισμικό <http://demonstrations.wolfram.com> στη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε κυλινδρικούς αγωγούς αλλά και στις οπτικές ίνες λαμβάνοντας υπόψη τις διάφορες παραμέτρους που τις καθορίζουν όπως δείκτης διάθλασης, ακτίνα, συχνότητα, γωνία παρατήρησης.

1. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται οι βασικές μαθηματικές γνώσεις για την κατανόηση των εννοιών που αναγράφονται στις εξισώσεις Maxwell.

1.1 Στοιχεία απειροστικού λογισμού

Απειροστικός λογισμός είναι η μαθηματική μελέτη της αλλαγής. Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται για να δηλώσει τόσο τον διαφορικό λογισμό, σχετικά με τα ποσοστά των αλλαγών και τις κλίσεις των καμπυλών, (differential calculus) όσο και τον ολοκληρωτικό λογισμό, σχετικά με τη σώρευση των ποσοτήτων και τις περιοχές κάτω από τις καμπύλες (integral calculus).

1.2 Το ολοκλήρωμα

Το ολοκλήρωμα αποδίδει αριθμούς σε συναρτήσεις έτσι ώστε να περιγράφουν μετατόπιση, εμβαδόν, όγκο και άλλες έννοιες συνδυάζοντας απειροστικά δεδομένα. Δοθείσης μιας συνάρτησης f μιας πραγματικής μεταβλητής x και ενός κλειστού διαστήματος $[a, b]$ το ορισμένο ολοκλήρωμα

$$\int_a^b f(x)dx \quad (1.1)$$

παριστάνει το εμβαδόν της περιοχής στο επίπεδο $-xy$ που περιορίζεται από τη γραφική παράσταση της f , τον άξονα x και τις κατακόρυφες γραμμές $x = a$ και $x = b$. Η ολοκλήρωση είναι το αντίστροφο της παραγωγίσιμης. Ο όρος "ολοκλήρωμα" μπορεί επίσης να αναφέρεται στην έννοια της αντιπαραγωγού ή παράγουσας συνάρτησης, η οποία είναι μια συνάρτηση F της οποίας η παράγωγος είναι η αρχική f .

$$F(x) = \int f(x)dx \quad (1.2)$$

Σ' αυτή την περίπτωση λέγεται και αόριστο ολοκλήρωμα

1.2.1 Η παράγωγος

Η παράγωγος μιας συνάρτησης $p(x)$, ως προς x γράφεται

$$q(x) = \frac{dp(x)}{dx} \quad (1.3)$$

και εκφράζει το ρυθμό μεταβολής της p ως προς x .

1.2.1.1 Η μερική παράγωγος

Θεωρούμε μια συνάρτηση τριών μεταβλητών : $f(x,y,z)$. Η μερική παράγωγος της f ως προς x γράφεται

$$g(x, y, z) = \frac{\partial f(x,y,z)}{\partial x} \quad (1.4)$$

Η εξίσωση δείχνει ότι ο ρυθμός μεταβολής της συνάρτησης $f(x,y,z)$ σε σχέση με το x είναι μια νέα συνάρτηση, η $g(x,y,z)$. Η μερική παράγωγος εκφράζει το ρυθμό μεταβολής. Αυτό σημαίνει ότι αν παρατηρούμε τη συνάρτηση $f(x,y,z)$ σε οποιοδήποτε σημείο,

μπορούμε να ξέρουμε πόσο γρήγορα η συνάρτηση μεταβάλλεται αν κινούμαστε προς την κατεύθυνση $+x$

1.2.2 Διαφορική εξίσωση

Διαφορική εξίσωση λέγεται κάθε εξίσωση που περιέχει τη μεταβλητή x , μια άγνωστη συνάρτηση $y = f(x)$ και κάποιες από τις παραγώγους της y', y'', \dots . Η τάξη μιας διαφορικής εξίσωσης είναι η τάξη της μεγαλύτερης παραγώγου της συνάρτησης $y(t)$, που εμφανίζεται στην εξίσωση. Βαθμός διαφορικής εξίσωσης ονομάζεται η δύναμη στην οποία είναι υψωμένη η παράγωγος της μεγαλύτερης τάξης, όταν και τα δυο μέλη της διαφορικής εξίσωσης γραφούν σαν πολυώνυμα της άγνωστης συνάρτησης και των παραγώγων της (δηλ. αφού γίνει απαλοιφή τυχόν δυνάμεων)

Η λύση μιας διαφορικής εξίσωσης είναι μια συνεχής συνάρτηση $y(t)$, η οποία, μαζί με τις παραγώγους της, ικανοποιεί την διαφορική εξίσωση. Η γενική λύση μιας Δ.Ε. πρώτης τάξης έχει τη μορφή:

$$y = f(x, c) \quad (1.5)$$

ή

$$F(x, y, c) = 0 \quad (1.6)$$

Αν η πεπλεγμένη μορφή (1.6) μπορεί να λυθεί ως προς y , τότε λύνοντάς την, παίρνουμε την (1.5)

Γενικά: Η γενική λύση μιας Δ.Ε. τάξης n περιέχει n σταθερές. Μια συνάρτηση που περιέχει n σταθερές και επαληθεύει εκ ταυτότητος μια Δ.Ε. τάξης n έχει τη μορφή:

$$y = f(c_1, c_2, \dots, c_n) \quad (1.7)$$

ή την πεπλεγμένη μορφή:

$$F(x, y, c_1, c_2, \dots, c_n) = 0 \quad (1.8)$$

Δίνοντας διάφορες τιμές στα c_1, c_2, \dots, c_n παίρνουμε από την (1.7) ή την (1.8) διάφορες μερικές λύσεις της διαφορικής εξίσωσης. [9]

1.2.2.1 Διαφορική εξίσωση με χωριζόμενες μεταβλητές

Διαφορική εξίσωση με χωριζόμενες μεταβλητές λέγεται κάθε εξίσωση της μορφής

$$\alpha(y) \cdot y' = \beta(x) \quad (1.9)$$

όπου $y = f(x)$ η άγνωστη συνάρτηση, $\alpha(y)$ συνάρτηση του y και $\beta(x)$ συνάρτηση του x . Για να λύσουμε την εξίσωση αυτή ολοκληρώνουμε και τα δύο μέλη της ως προς x . Έχουμε

$$\int \alpha(y) y' dx = \int \beta(x) dx \quad (1.10)$$

Επειδή $y = f(x)$, είναι $dy = f'(x) dx = y' dx$, οπότε έχουμε

$$\int \alpha(y) dy = \int \beta(x) dx \quad (1.11)$$

Αν $A(y)$ είναι μια παράγουσα της $\alpha(y)$ και $B(x)$ μια παράγουσα της $\beta(x)$, τότε η (1.2) γράφεται

$$A(y) = B(x) + c, \quad c \in R \quad (1.12)$$

Από την τελευταία εξίσωση προσδιορίζουμε τη γενική λύση της διαφορικής εξίσωσης.[9]

1.2.2.2 Γραμμική διαφορική εξίσωση πρώτης τάξεως

Είναι κάθε εξίσωση της μορφής:

$$y' + a(x)y = \beta(x) \quad (1.13)$$

όπου $y = f(x)$ είναι η άγνωστη συνάρτηση και $a(x), \beta(x)$ συναρτήσεις του x . [9]
Για τα λύση της εξίσωσης αυτής πολλαπλασιάζουμε την αρχική με τον ολοκληρωτικό παράγοντα $e^{A(x)}$ και έχουμε:

$$\begin{aligned} y' \cdot e^{A(x)} + a(x)e^{A(x)} \cdot y &= \beta(x)e^{A(x)} \\ y'e^{A(x)} + A'(x)e^{A(x)} \cdot y &= \beta(x)e^{A(x)} \\ y'e^{A(x)} + (e^{A(x)})' \cdot y &= \beta(x)e^{A(x)} \\ (ye^{A(x)})' &= \beta(x)e^{A(x)} \\ \int (ye^{A(x)})' dx &= \int \beta(x)e^{A(x)} dx \\ ye^{A(x)} &= B(x) + c \end{aligned} \quad (1.14)$$

1.2.2.3 Μερική διαφορική εξίσωση

Η μερική διαφορική εξίσωση (ΜΔΕ) είναι μια διαφορική εξίσωση η οποία περιέχει άγνωστες συναρτήσεις "πολλαπλών" μεταβλητών και τις μερικές παραγώγους αυτών. (Σε αντίθεση με τις συνήθεις διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες ασχολούνται με τις συναρτήσεις μιας μεταβλητής και τα παράγωγά τους). Οι ΜΔΕ χρησιμοποιούνται για να διαμορφώσουν τα προβλήματα που αφορούν τις συναρτήσεις πολλών μεταβλητών, και είτε λύνονται με το χέρι, ή χρησιμοποιούνται για να δημιουργήσουν ένα σχετικό υπολογιστικό μοντέλο.

Μια μερική διαφορική εξίσωση (ΜΔΕ) για τη συνάρτηση

$$u = u(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1.15)$$

είναι μια εξίσωση της μορφής:

$$F\left(x_1, \dots, x_n, u, \frac{\partial u}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial u}{\partial x_n}, \frac{\partial^2 u}{\partial x_1 \partial x_1}, \dots, \frac{\partial^2 u}{\partial x_1 \partial x_n}, \dots\right) = 0. \quad (1.16)$$

Αν η F είναι μια γραμμική συνάρτηση του u και των παραγώγων του, τότε η ΜΔΕ ονομάζεται γραμμική. Κοινά παραδείγματα των γραμμικών ΜΔΕ είναι η εξίσωση θερμότητας, η κυματική εξίσωση, η εξίσωση Laplace, η εξίσωση Helmholtz, η Klein-Gordon εξίσωση, και η εξίσωση του Poisson. Μια σχετικά απλή ΜΔΕ είναι η:

$$\frac{\partial u}{\partial x}(x, y) = 0 \quad (1.17)$$

Αυτή η σχέση σημαίνει ότι η συνάρτηση $u(x, y)$ είναι ανεξάρτητη του x . Ωστόσο, η εξίσωση δε δίνει καμία πληροφορία σχετικά με την εξάρτηση της συνάρτησης ως προς τη μεταβλητή y . Ως εκ τούτου, η γενική λύση αυτής της εξίσωσης είναι:

$$u(x, y) = f(y) \quad (1.18)$$

όπου f είναι μια αυθαίρετη συνάρτηση του y .

Η ανάλογη συνήθης διαφορική εξίσωση είναι:

$$\frac{du}{dx}(x) = 0 \quad (1.19)$$

η οποία έχει λύση την

$$u(x) = c \quad (1.20)$$

όπου c είναι οποιαδήποτε σταθερή τιμή. Αυτά τα δύο παραδείγματα δείχνουν ότι οι γενικές λύσεις των συνήθων διαφορικών εξισώσεων (Σ.Δ.Ε.) αφορούν αυθαίρετες σταθερές, ενώ οι λύσεις των ΜΔΕ αφορούν αυθαίρετες συναρτήσεις. Μια λύση μιας ΜΔΕ δεν είναι γενικά μοναδική. Πρόσθετοι περιορισμοί πρέπει γενικά να καθορίζονται στα όρια της περιοχής όπου η λύση έχει οριστεί. Για παράδειγμα, στο παραπάνω απλό παράδειγμα, η συνάρτηση $f(y)$ μπορεί να προσδιοριστεί εάν u καθορίζεται στη γραμμή $x = 0$. [9]

1.2.2.5 Μέθοδος Χωρισμού Μεταβλητών

Η μέθοδος χωρισμού μεταβλητών χρησιμοποιείται για την επίλυση διαφορικών και μερικώς διαφορικών εξισώσεων. Η μέθοδος αυτή είναι δυνατή αν μπορούμε να γράψουμε τη διαφορική εξίσωση στη μορφή

$$A(x)dx + B(y)dy = 0 \quad (1.21)$$

όπου $A(x)$ είναι μια συνάρτηση μόνο του x και $B(y)$ είναι μια συνάρτηση μόνο του y . Όταν η εξίσωση γραφεί στην ανωτέρω μορφή, ολοκληρώνουμε για να αποκτήσουμε τη γενική λύση. Τα παραπάνω αφορούν πρώτης τάξης πρώτου βαθμού διαφορικές εξισώσεις. Έτσι στη διαφορική εξίσωση

$$\frac{dy}{dx} = g(x)f(y) \quad (1.22)$$

όπου $f(y)$ είναι μη μηδενική, η λύση δίνεται από την :

$$\int \frac{dy}{f(y)} = \int g(x)dx \quad (1.23)$$

Για μερική διαφορική εξίσωση σε συνάρτηση $F(x, y, \dots)$ ο διαχωρισμός των μεταβλητών μπορεί να εφαρμοσθεί κάνοντας την αντικατάσταση στη μορφή

$$F(x, y, \dots) = X(x)Y(y) \dots \quad (1.24)$$

Χωρίζουμε την εξίσωση που προκύπτει σε μια σειρά ανεξάρτητων διαφορικών εξισώσεων και λύνουμε αυτές για $X(x), Y(y), \dots$ και αντικαθιστούμε στη συνέχεια αυτές στην αρχική εξίσωση. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται και ισχύει επειδή αν το γινόμενο των συναρτήσεων των ανεξάρτητων μεταβλητών είναι σταθερό, κάθε συνάρτηση ξεχωριστά πρέπει να είναι μια σταθερά. Η μέθοδος των χωριστών μεταβλητών χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον L'Hospital το 1750.

1.2.2.6 Η μη ομογενής διαφορική εξίσωση

Αν μια μη μηδενική σταθερά πάρει τη θέση του μηδέν στην εξίσωση (1.22) τότε έχουμε μια μη ομογενή γραμμική διαφορική εξίσωση :

$$\frac{dy}{dx} + ay = b \quad (1.25)$$

Η λύση της εξίσωσης θα αποτελείται από δύο όρους, όπου ο ένας ονομάζεται συμπληρωματική συνάρτηση (y_c) και ο άλλος χαρακτηριστικό ολοκλήρωμα (y_p). Η συμπληρωματική συνάρτηση είναι η λύση της ομογενούς διαφορικής εξίσωσης, δηλαδή

$$y_c(t) = Ae^{-at} \quad (1.26)$$

Το χαρακτηριστικό ολοκλήρωμα είναι μια συνάρτηση που προκύπτει με ευρετικές διαδικασίες.

Δοκιμάζουμε λύσεις με μορφή c , ct , ct^2 μέχρι να βρούμε την κατάλληλη.

Στην περίπτωση αυτή έχουμε:

$$y_p = \frac{b}{a} \quad (a \neq 0) \quad (1.27)$$

Το άθροισμα της συμπληρωματικής συνάρτησης και του χαρακτηριστικού ολοκληρώματος μας δίνει τη γενική λύση της πλήρους εξίσωσης:

$$y(t) = y_c + y_p = Ae^{-at} + \frac{b}{a} \quad (1.28)$$

Εάν υποθέσουμε ότι η y παίρνει την τιμή $y(0)$, όταν $t=0$, τότε προκύπτει :

$$y_0 = A + \frac{b}{a}$$

και

$$A = y_0 - \frac{b}{a} \quad (1.29)$$

Έτσι η σχέση (28), μετασχηματίζεται :

$$y(t) = \left[y(0) - \frac{b}{a} \right] e^{-at} + \frac{b}{a} \quad (1.30)$$

με a διάφορο του μηδενός [9]

1.3 Στοιχεία διανυσματικής ανάλυσης

Ευκλείδειο διάνυσμα ή απλά διάνυσμα ή άνυσμα καλείται γενικά το ευθύγραμμο τμήμα επί του οποίου παριστάνονται τόσο στα μαθηματικά όσο και στις Φυσικές επιστήμες διάφορα μεγέθη περιέχοντας συνάμα και τις έννοιες της διεύθυνσης και της φοράς.

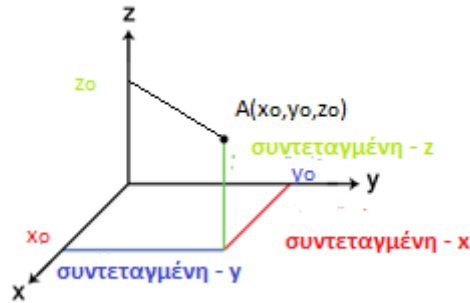
Υπάρχουν ορισμένα μεγέθη όπως η μάζα, η θερμοκρασία και η απόσταση τα οποία προσδιορίζονται μόνο με το μέτρο τους, (στη φυσική χρειάζεται l και η κατάλληλη μονάδα μέτρησης). Τα μεγέθη αυτά ονομάζονται μονόμετρα ή βαθμωτά.

Υπάρχουν όμως και μεγέθη όπως η ταχύτητα, η δύναμη, η ορμή, η μετατόπιση κ.α. τα οποία για να προσδιοριστούν επακριβώς δεν είναι αρκετό να γνωρίζουμε μόνο το μέτρο τους (και τη μονάδα μέτρησης). Αυτά τα μεγέθη για να τα προσδιορίσουμε χρειάζεται να ξέρουμε επιπλέον και τη διεύθυνσή τους στο χώρο και τη φορά τους. Τέτοια μεγέθη ονομάζονται διανυσματικά μεγέθη ή και, απλώς, διανύσματα.

Ευκλείδειο διάνυσμα ή απλά διάνυσμα ή άνυσμα καλείται γενικά το ευθύγραμμο τμήμα επί του οποίου παριστάνονται τόσο στα μαθηματικά όσο και στις Φυσικές επιστήμες διάφορα μεγέθη περιέχοντας συνάμα και τις έννοιες της διεύθυνσης και της φοράς.

1.3.1.Καρτεσιανό Σύστημα Συντεταγμένων

Το Καρτεσιανό Σύστημα Συντεταγμένων καθορίζει την θέση ενός σημείου, του τρισδιάστατου επιπέδου χώρου, με την βοήθεια τριών αποστάσεων από τους άξονες x,y,z.



Εικόνα 1.1 Καρτεσιανό σύστημα συνταγμένων

1.3.2. Διανυσματικές συναρτήσεις τριών διαστάσεων

Η διανυσματική συνάρτηση A είναι συνάρτηση 3 χωρικών μεταβλητών: (x,y,z) . Αυτές είναι συντεταγμένες ενός Καρτεσιανού χώρου 3-διαστάσεων. Η διανυσματική συνάρτηση A γράφεται:

$$\vec{A} = A_x \hat{x} + A_y \hat{y} + A_z \hat{z} \quad (1.31)$$

ή

$$\vec{A} = A_x \hat{i} + A_y \hat{j} + A_z \hat{k} \quad (1.32)$$

ή

$$\vec{A} = A_x \hat{i}_x + A_y \hat{i}_y + A_z \hat{i}_z \quad (34)$$

Όπου $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ ή $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$ ή $\hat{i}_x, \hat{i}_y, \hat{i}_z$ είναι τα μοναδιαία διανύσματα στις διευθύνσεις x, y και z αντίστοιχα.

Στην άλγεβρα πινάκων η ακολουθία αυτή των γράφεται ως ένας πίνακας στήλης, δηλαδή η συνάρτηση (31) γράφεται:

$$\vec{A}(x, y, z) = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} = A_x \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + A_y \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + A_z \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (35)$$

Μπορούμε να γράψουμε το διάνυσμα \vec{A} με όρους 3 μη-διανυσματικών (βαθμωτων) συναρτήσεων A_x, A_y και A_z , όπου A_x είναι το μέτρο του διανύσματος A στη διεύθυνση x , A_y είναι το μέτρο του A στη διεύθυνση y και A_z είναι το μέγεθος στη διεύθυνση z .

[14, 52]

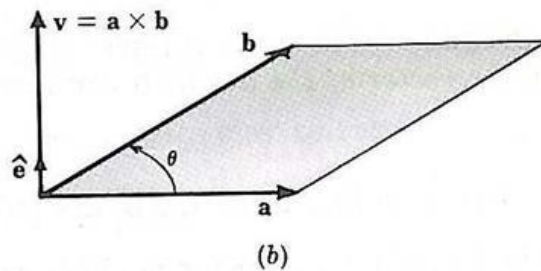
1.3.2.1 Μερική παράγωγος διανυσματικών συναρτήσεων

Για τις εξισώσεις Maxwell, χρησιμοποιούμε διανυσματικές συναρτήσεις 3-διαστάσεων. Η μερική παράγωγος μιας διανυσματικής συνάρτησης είναι φυσική επέκταση της μερικής παραγωγού μιας βαθμωτής. Αν έχουμε μια διανυσματική συνάρτηση A ,

εξίσωση η μερική παράγωγος του A ως προς x είναι η μερική παράγωγος κάθε συνιστώσας ξεχωριστά.[52]

1.3.3 Εξωτερικό (Διανυσματικό) γινόμενο δύο διανυσμάτων

Το εξωτερικό γινόμενο δύο διανυσμάτων είναι ουσιαστικά μια καινούρια πράξη μεταξύ διανυσμάτων. Ως αποτέλεσμα παίρνουμε ένα διάνυσμα.



Εικόνα 1.2: Εξωτερικό γινόμενο δυο διανυσμάτων

Το εξωτερικό γινόμενο έχει νόημα μόνο σε τρισδιάστατους χώρους.

Αν \vec{a} και \vec{b} είναι τα δύο διανύσματα, το εξωτερικό γινόμενο συμβολίζεται ως $\vec{a} \times \vec{b}$ και ορίζεται ως

$$\vec{a} \times \vec{b} = |\vec{a}| |\vec{b}| \sin(\theta) \hat{e} \quad \vec{v} = \vec{a} \times \vec{b} = |\vec{a}| |\vec{b}| \sin \theta \hat{e} \quad (1.36)$$

$|\vec{a}|$ και $|\vec{b}|$ είναι τα μέτρα των διανυσμάτων \vec{a} και \vec{b} , $\sin \theta$ το ημίτονο της γωνίας μεταξύ των δύο διανυσμάτων, και \hat{e} είναι το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στο επίπεδο που ορίζουν τα \vec{a} και \vec{b} .

Το εξωτερικό γινόμενο δυο διανυσματων αναπαρίσταται στη σημειογραφία καρτεσιανών συντεταγμένων ως:

$$\vec{a} \times \vec{b} = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix} = (a_y b_z - a_z b_y) \hat{i} + (a_z b_x - a_x b_z) \hat{j} + (a_x b_y - a_y b_x) \hat{k} \quad (1.37)$$

[52]

1.3.4 Εσωτερικό γινόμενο δύο διανυσμάτων

Ονομάζουμε εσωτερικό γινόμενο δυο μη μηδενικών διανυσμάτων \vec{a} και \vec{b} και το συμβολίζουμε με $\vec{a} \cdot \vec{b}$ τον πραγματικό αριθμό

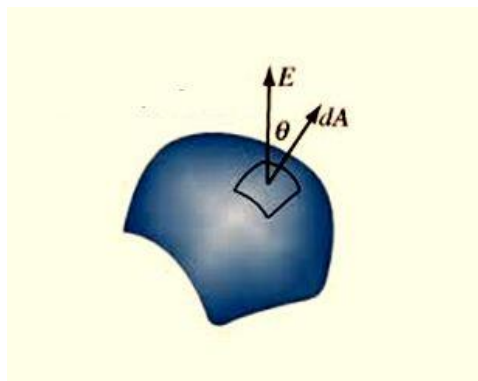
$$v = \vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cos(\theta) = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z \quad (1.38)$$

όπου θ η γωνία των διανυσμάτων \vec{a} και \vec{b} . [52]

1.3.5 Ροή διανύσματος (flux)

Ο όρος ροή διανύσματος \vec{E} σημαίνει το επιφανειακό ολοκλήρωμα της κάθετης προς την επιφάνεια συνιστώσας » του διανύσματος (Εικόνα 1.3). Η ροή Φ είναι μονόμετρο μέγεθος.

$$\Phi = \int \vec{E} \cos\theta \cdot d\vec{A} \quad (1.39)$$

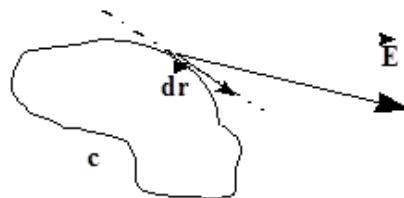


Εικόνα 1.3: Ροή διανύσματος

1.3.6. Κυκλοφορία διανύσματος (circulation)

Ο όρος «κυκλοφορία διανύσματος» σημαίνει το «επικαμπύλιο ολοκλήρωμα της εφαπτομενικής συνιστώσας » του διανύσματος κατά μήκος κλειστής καμπύλης c , που περικλείει επιφάνεια s (Εικόνα 1.4).

$$\Gamma = \oint \vec{E} \cdot d\vec{r} \quad (1.40)$$



Εικόνα 1.4: Κυκλοφορία διανύσματος

1.3.7 Τελεστής ανάδελτα

Με τον όρο τελεστής εννοούμε το μετασχηματισμό από μια συνάρτηση σε μια άλλη (διανυσματική ή μη). Ανάδελτα είναι διανυσματικός διαφορικός τελεστής των μερικών παραγώγων μιας συνάρτησης ως προς τις τρεις διαστάσεις του χώρου. Γενικά, δείχνει τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται ένα μέγεθος στο χώρο. Συμβολίζεται με ∇ , που μοιάζει με

αναποδογουρισμένο κεφαλαίο Δ. Η χρήση του ανάδελτα μοιάζει με εσωτερικό ή εξωτερικό γινόμενο του διανύσματος με τη συνάρτηση, όπου το διάνυσμα είναι πάντα ο πρώτος παράγοντας.[52]

$$\frac{\partial}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{y} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{z} \quad (1.41)$$

1.3.8. Απόκλιση διανυσματικής συνάρτησης

Η απόκλιση μιας διανυσματικής συνάρτησης $\vec{E} = E_x \hat{x} + E_y \hat{y} + E_z \hat{z}$ συμβολίζεται $div \vec{E} \equiv \vec{\nabla} \cdot \vec{E}$ και ορίζεται από τη σχέση:

$$div \vec{E} \equiv \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \left(\frac{\partial}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{y} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{z} \right) \cdot (E_x \hat{x} + E_y \hat{y} + E_z \hat{z}) + \frac{\partial}{\partial z} z (E_x \hat{x} + E_y \hat{y} + E_z \hat{z}) \quad (1.42)$$

(εσωτερικό γινόμενο του διανυσματικού τελεστή ανάδελτα με τη συνάρτηση), ή κάνοντας τις πράξεις:

$$div \vec{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} \quad (1.43)$$

Η απόκλιση ενός διανύσματος σ' ένα σημείο P του χώρου εκφράζει τη ροή του διανύσματος ανά μονάδα όγκου στην περιοχή του P. Η απόκλιση είναι μονόμετρο μέγεθος .[52]

1.3.9 Κλίση ή βαθμίδα βαθμωτής συνάρτησης

Η κλίση ή βαθμίδα μιας βαθμωτής συνάρτησης $f(x, y, z)$ συμβολίζεται με $grad f$ και ορίζεται από τη σχέση:

$$grad f = \vec{\nabla} f = \frac{\partial f}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial f}{\partial y} \hat{y} + \frac{\partial f}{\partial z} \hat{z} \quad (1.44)$$

Η βαθμίδα ή κλίση μιας βαθμωτής συνάρτησης f είναι ένα διάνυσμα το οποίο σε κάθε σημείο:

- Είναι κάθετο στις επιφάνειες σταθερού f
- Έχει κατεύθυνση αυτήν προς την οποία ο ρυθμός αύξησης της f είναι μέγιστος
- Έχει μέτρο που είναι ίσο με το μέγιστο ρυθμό μεταβολής της f στο συγκεκριμένο σημείο
- Έχει προβολή σε κάποια κατεύθυνση, της οποίας το μέτρο ισούται με το ρυθμό μεταβολής της f στην κατεύθυνση αυτή [51]

1.3.10 Στροβιλισμός διανυσματικής συνάρτησης (rotation, curl)

Ο στροβιλισμός μιας διανυσματικής συνάρτησης $\vec{E} = E_x \hat{x} + E_y \hat{y} + E_z \hat{z}$ συμβολίζεται $curl \vec{E} \equiv rot \vec{E} \equiv \vec{\nabla} \times \vec{E}$ και ορίζεται ως :[52]

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \begin{vmatrix} \vec{x} & \vec{y} & \vec{z} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & E_z \end{vmatrix} = \vec{x} \left[\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right] + \vec{y} \left[\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right] + \vec{z} \left[\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right] \quad (1.45)$$

Ο στροβιλισμός είναι διανυσματικό μέγεθος

Ο στροβιλισμός μιας συνάρτησης σ' ένα σημείο P, εκφράζει την κυκλοφορία του διανύσματος ανά μονάδα επιφάνειας στην περιοχή του P. Η κυκλοφορία του \vec{E} γύρω από την καμπύλη C εξαρτάται από τον προσανατολισμό του επιπέδου της C. Η διεύθυνση του στροβιλισμού είναι εκείνη για την οποία έχουμε τη μέγιστη κυκλοφορία.

Αν f διανυσματική συνάρτηση τότε:

- Η απόκλιση του στροβιλισμού είναι μηδέν $\nabla \cdot (\nabla \times f) = 0$ (1.46)

- Ο στροβιλισμός της κλίσης είναι μηδέν $\nabla \times (\nabla \cdot f) = 0$ (1.47)

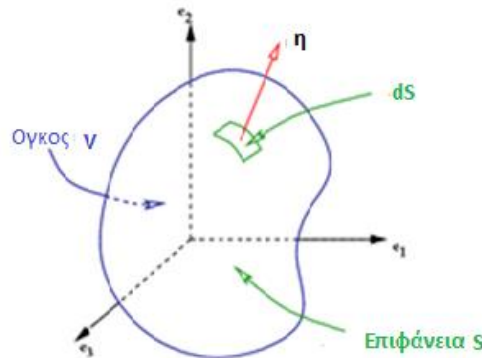
- $\nabla \times (\nabla \times f) = \nabla(\nabla \cdot f) - \nabla^2 f$ (1.48)

1.3.11 Θεώρημα Gauss

Το ολοκλήρωμα της απόκλισης ενός διανυσματικού πεδίου \vec{E} πάνω σε έναν τυχόντα όγκο V ισούται με το επιφανειακό ολοκλήρωμα του πεδίου πάνω στην κλειστή επιφάνεια S που περικλείει αυτόν τον όγκο

$$\int_V (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) dV = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (1.49)$$

όπου s είναι κάθε κλειστή επιφάνεια και V ο όγκος που περιβάλλει. dS είναι η απειροστή περιοχή της κλειστής επιφάνειας και dV ο απειροστός όγκος.



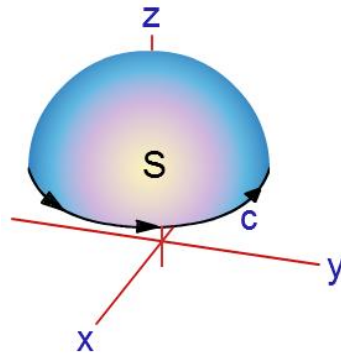
Εικόνα 1.5: Θεώρημα Gauss

1.3.12 Θεώρημα Stokes

Το επιφανειακό ολοκλήρωμα του στροβιλισμού ενός διανυσματικού πεδίου πάνω σε μια τυχούσα επιφάνεια S ισούται με το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα του πεδίου πάνω στην κλειστή γραμμή C στην οποία καταλήγει η επιφάνεια:

$$\int_S (\vec{\nabla} \times \vec{E}) \cdot d\vec{s} = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{r} \quad (1.50)$$

Η καμπύλη c περιβάλλει την επιφάνεια τριών διαστάσεων s στο διανυσματικό πεδίο E . C είναι η καμπύλη στα όρια της επιφάνειας, όπως φαίνεται στο διάγραμμα.



Εικόνα 1.6: Θεώρημα Stokes

1.3.13 Τελεστής Laplace

Ο τελεστής ∇^2 καλείται τελεστής Laplace και είναι μονόμετρος. Έχει τη μορφή: [52]

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (1.51)$$

Όταν ο τελεστής Laplace εφαρμόζεται σε διάνυσμα τότε υπονοείται ότι εφαρμόζεται στις αντίστοιχες συνιστώσες του διανύσματος.

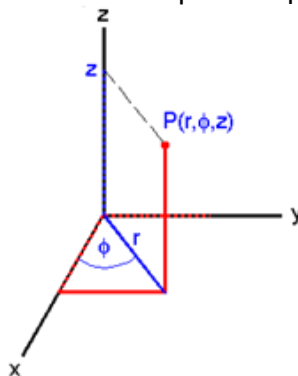
Είναι δηλαδή:

$$\nabla^2 \vec{E} = (\nabla^2 E_x, \nabla^2 E_y, \nabla^2 E_z) \quad (1.52)$$

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} \quad (1.53)$$

1.3.14 Κυλινδρικό Σύστημα Συντεταγμένων

Επειδή οι οπτικές ίνες έχουν τη μορφή κυλινδρικών διηλεκτρικών κυματοδηγών είναι χρήσιμο το κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων. Το Κυλινδρικό Σύστημα Συντεταγμένων καθορίζει την θέση ενός σημείο του τρισδιάστατου επίπεδου χώρου (δηλ. σε ένα επίπεδο) με την βοήθεια μίας γωνίας, μίας απόστασης από την αρχή O , και μίας απόστασης από άξονα. Ο μετασχηματισμός από τις κυλινδρικές συντεταγμένες (r, ϕ, z) στις καρτεσιανές συντεταγμένες (x, y, z) βασίζεται στην αντικατάσταση των παρακάτω συμβόλων:



Εικόνα 1.7: Κυλινδρικές συντεταγμένες

$$x = r \cos \varphi \quad (1.54)$$

$$y = r \sin \varphi \quad (1.55)$$

$$z = z \quad (1.56)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (1.57)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad (1.58)$$

$$dx \rightarrow dr \quad (1.59)$$

$$dy \rightarrow r d\varphi \quad (1.60)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \rightarrow \frac{\partial}{\partial r} \quad (1.61)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \rightarrow \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \quad (1.62)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \rightarrow \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \quad (1.63)$$

Το στοιχείο μήκους είναι: $d\vec{r} = dr\hat{r} + r d\varphi\hat{\varphi} + dz\hat{z}$ (1.64)

Το στοιχείο όγκου είναι: $dV = r dr d\varphi dz$ (1.65)

Το στοιχείο επιφάνειας σε επιφάνεια σταθερής ακτίνας ρ (κατακόρυφος κύλινδρος) είναι:
 $dS_\rho = r d\varphi dz$ (1.66)

Το στοιχείο επιφάνειας σε επιφάνεια σταθερού αζιμούθιου φ (κατακόρυφο ημιεπίπεδο) είναι:
 $dS_\varphi = r dr dz$ (1.67)

Το στοιχείο επιφάνειας σταθερού ύψους z , (οριζόντιο επίπεδο) είναι:
 $dS_z = r dr d\varphi$ (1.68)

Αν f είναι βαθμωτή συνάρτηση και A είναι διανυσματική συνάρτηση των ανεξάρτητων μεταβλητών x, y, z τότε για την κλίση, απόκλιση, στροβιλισμό και Λαπλασιανή έχουμε:

$$\nabla f = \frac{\partial f}{\partial r} \hat{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \varphi} \hat{\varphi} + \frac{\partial f}{\partial z} \hat{z} \quad (1.69)$$

$$\nabla \cdot \vec{A} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial r} (r A_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial A_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \quad (1.70)$$

$$\nabla \times \vec{A} = \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial A_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial A_\varphi}{\partial z} \right) \hat{r} + \left(\frac{\partial A_r}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial r} \right) \hat{\varphi} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} (r A_r) - \frac{\partial A_r}{\partial \varphi} \right) \hat{z} \quad (1.71)$$

$$\nabla^2 f = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial f}{\partial r} \right) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \quad (1.72)$$

1.3.14.1 Εξίσωση κύματος σε κυλινδρικές συντεταγμένες

Η κυματική εξίσωση είναι μια υπερβολική μερική διαφορική εξίσωση. Αφορά συνήθως μια μεταβλητή χρόνου t , μία ή περισσότερες χωρικές μεταβλητές x_1, x_2, \dots, x_n , και μία βαθμωτή συνάρτηση $v = v(x_1, x_2, \dots, x_n; t)$, τιμές της οποίας θα μπορούσαν να διαμορφώσουν την μετατόπιση ενός κύματος. Η κυματική εξίσωση για το q είναι

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \nabla^2 v \quad (1.73)$$

όπου ∇^2 είναι ο τελεστής Λαπλάς και c μια σταθερά.

Για να εκφράσουμε την εξίσωση κύματος σε κυλινδρικές συντεταγμένες, επιχειρούμε πρώτα να εκφράσουμε τον τελεστή Laplace, ∇^2 , (1.51) σε κυλινδρικές συντεταγμένες (r, φ, z) , που συνδεονται με τις καρτεσιανές με τις σχέσεις (1.56), (1.57) και (1.58).

Για να εκφράσουμε την ∇^2 σε κυλινδρικές συντεταγμένες θεωρούμε μια συνάρτηση $f(r, \varphi, z)$ την οποία θεωρούμε ως συνάρτηση των x, y, z μέσω των μεταβλητών r, φ, z .

$$\text{Έτσι μπορούμε να τη γράψουμε: } f = f\{r(x, y, z), \varphi(x, y, z), z(x, y, z)\} \quad (1.74)$$

Άρα
$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial x} \quad (1.75)$$

Απο τις σχέσεις όμως (1.56), (1.57) και (1.58), προκύπτει ότι $r=r(x,y)$, $\varphi=\varphi(x,y)$ και $z=z(z)$ και έτσι η εξίσωση (1.72) γίνεται:

$$f = f\{r(x, y), \varphi(x, y), z(z)\} \quad (1.76)$$

Και η εξίσωση (1.73) γίνεται:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (1.77)$$

Απο την (1.75) υπολογίζουμε την δεύτερη παράγωγο $\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial f}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \quad (1.78)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \left(\frac{\partial^2 f}{\partial r^2} \frac{\partial r}{\partial x} + \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi \partial r} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \frac{\partial r}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial r} \frac{\partial^2 r}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial^2 f}{\partial r \partial \varphi} \frac{\partial r}{\partial x} + \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi^2} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial \varphi} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \quad (1.79)$$

που ισοδυναμεί με

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} \left(\frac{\partial r}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi \partial r} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{\partial r}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial r} \frac{\partial^2 r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial r \partial \varphi} \frac{\partial r}{\partial x} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi^2} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial f}{\partial \varphi} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \quad (1.80)$$

Από τη σχέση (1.57) έχουμε:
$$\frac{\partial r}{\partial x} = \frac{\partial [(x^2+y^2)^{1/2}]}{\partial x} = \frac{1}{2} (x^2 + y^2)^{-1/2} 2x = \frac{x}{(x^2+y^2)^{1/2}} \quad (1.81)$$

Επειδή $x=r\cos\varphi$ και $r^2 = x^2 + y^2$

Η σχέση (79) γίνεται:
$$\frac{\partial r}{\partial x} = \frac{r\cos\varphi}{r} = \cos\varphi \quad (1.82)$$

Επίσης από τη σχέση (1.58) έχουμε:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial [\arctan(\frac{y}{x})]}{\partial x} = \frac{1}{1+(\frac{y}{x})^2} \cdot \frac{-y}{x^2} = -\frac{y}{x^2+y^2} \quad (1.83)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις: $y=r\sin\varphi$ και $r^2 = x^2 + y^2$

Η σχέση (1.83) γίνεται:
$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{-r\sin\varphi}{r^2} = \frac{-\sin\varphi}{r} \quad (1.84)$$

Επίσης από την (1.81):
$$\frac{\partial^2 r}{\partial x^2} = \frac{\sin^2\varphi}{r} \quad (1.85)$$

Και απο την (1.83)
$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = \frac{2\cos\varphi\sin\varphi}{r^2} \quad (1.86)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις: (1.82),(1.84),(1.85),(1.86) στην (1.80) έχουμε:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} \cos^2\varphi - \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi \partial r} \frac{\sin\varphi\cos\varphi}{r} + \frac{\partial f}{\partial r} \frac{\sin^2\varphi}{r} - \frac{\partial^2 f}{\partial r \partial \varphi} \frac{\sin\varphi\cos\varphi}{r} + \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi^2} \frac{\sin^2\varphi}{r^2} + \frac{\partial f}{\partial \varphi} \frac{2\sin\varphi\cos\varphi}{r^2} \quad (1.87)$$

Εργαζόμενοι σύμφωνα με τον παραπάνω τρόπο καταλήγουμε στις εξής αποτελέσματα:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} \sin^2\varphi + \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi \partial r} \frac{\sin\varphi\cos\varphi}{r} + \frac{\partial f}{\partial r} \frac{\cos^2\varphi}{r} + \frac{\partial^2 f}{\partial r \partial \varphi} \frac{\sin\varphi\cos\varphi}{r} + \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi^2} \frac{\cos^2\varphi}{r^2} - \frac{\partial f}{\partial \varphi} \frac{2\sin\varphi\cos\varphi}{r^2} \quad (1.88)$$

και
$$\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \quad (1.89)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (1.87),(1.88) και (1.89) στην $\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \quad (1.90)$$

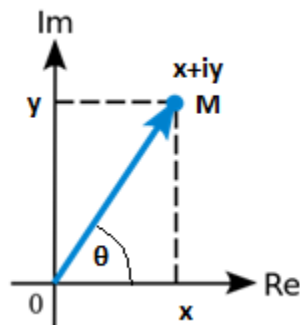
Έτσι η εξίσωση κύματος στις κυλινδρικές συντεταγμένες γίνεται:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (1.91)$$

Όπου $v = v(r, \varphi, z, t)$
[61].

1.4 Μιγαδικοί αριθμοί

Οι μιγαδικοί αριθμοί αποτελούν μια επέκταση του συνόλου των πραγματικών αριθμών. Ένας μιγαδικός αριθμός z αποτελείται από το πραγματικό μέρος a και από το φανταστικό b , $z = x + iy$ όπου i είναι η τετραγωνική ρίζα του -1 . Εάν το πραγματικό μέρος ενός μιγαδικού αριθμού είναι 0 , τότε ο αριθμός καλείται φανταστικός αριθμός. Εάν το φανταστικό μέρος είναι 0 , τότε ο αριθμός είναι ένας πραγματικός αριθμός. Η αναπαράσταση των μιγαδικών αριθμών σε ένα διδιάστατο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων γίνεται με την χρήση του μιγαδικού επιπέδου. Στον οριζόντιο άξονα αντιστοιχεί το μέρος x και στον κάθετο το μέρος y , ενώ ο μιγαδικός αριθμός είναι ένα διάνυσμα όπως φαίνεται στο σχήμα 1.8.



Εικόνα 1.8 Αναπαράσταση μιγαδικού αριθμού

Ο μιγαδικός αριθμός αντιστοιχίζεται στο σημείο $M(x, y)$. Λόγω της παραπάνω αντιστοίχισης μιγαδικού με σημείο, κάθε μιγαδικός αριθμός z μπορεί να αναπαρασταθεί στο μιγαδικό επίπεδο με το διάνυσμα \vec{OM} , που έχει αρχή το κέντρο O των αξόνων και τέλος το σημείο $M(x, y)$. Το μέτρο του μιγαδικού αριθμού ορίζεται ως το μέτρο του διανύσματος \vec{OM} ή, ισοδύναμα, ως η απόσταση του M από το κέντρο O του μιγαδικού επιπέδου:

$$|r| = \sqrt{x^2 + y^2} \geq 0 \quad (1.92)$$

Εισάγοντας πολικές συντεταγμένες (r, θ) με $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$, $\tan \theta = y/x$, ο αριθμός z γράφεται ως εξής :

$$z = x + iy = r \cos \theta + r i \sin \theta = r(\cos \theta + i \sin \theta) \quad (1.93)$$

Επίσης μπορούμε να έχουμε και την εξής πολική μορφή για το μιγαδικό αριθμό z χρησιμοποιώντας τον τύπο του Euler:

Για κάθε πραγματικό αριθμό θ (μετρημένο σε ακτίνια), ο τύπος του Euler αναφέρει ότι η σύνθετη εκθετική συνάρτηση ικανοποιεί τη σχέση:

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta \quad (1.94)$$

Έτσι ένας μιγαδικός αριθμός z μπορεί να γραφεί με τη μορφή:

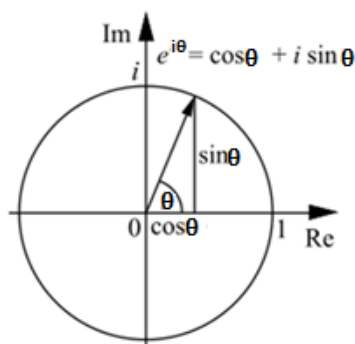
$$z = r e^{i\theta} \quad (1.95)$$

θ είναι το όρισμα ή πολική γωνία ή φάση του z
Επίσης ισχύει η σχέση:

$$e^{inx} = \cos nx + i \sin nx \quad (1.96)$$

(τύπος του DeMoivre)

Οι παραγωγίσεις ή οι ολοκληρώσεις της συνάρτησης e^{ix} αντιστοιχούν σε πολλαπλασιασμό με i ή με $-i$ αντίστοιχα. [10]



Εικόνα 1.9: Μελέτη αρμονικής κίνησης

Τα μεγέθη που μεταβάλλονται αρμονικά συναρτήσει του χρόνου, όπως η εξίσωση απλής αρμονικής κίνησης σε ευθεία γραμμή)

$$x(t) = x_m \cdot \cos(\omega t + \theta) \quad (1.97)$$

μπορούν να περιγραφούν σαν μια προβολή επάνω σε μια διάμετρο της ομαλής κυκλικής κίνησης. Το σημείο M (σχήμα 1.9) που διαγράφει την ομαλή κυκλική κίνηση κινείται κατά την αντίθετη της φοράς των δεικτών του ωρολογίου, με γωνιακή ταχύτητα ω , σε περιφέρεια με ακτίνα ίση με x_m . Η προβολή της ακτίνας OM επάνω στον άξονα x', x περιγράφεται από τη συνάρτηση (5.2.1). Εάν θεωρηθεί ότι η κίνηση περιγράφεται στο μιγαδικό επίπεδο όπου ο άξονας x', x είναι ο πραγματικός άξονας και ο y', y ο φανταστικός, τότε η θέση του σημείου M παριστάνεται από ένα άνυσμα της μορφής:

$$\vec{x} = x_m \cos(\omega t + \theta) + j x_m \sin(\omega t + \theta) = x_m e^{j(\omega t + \theta)} \quad (1.98)$$

Από τη σχέση (5.2.2) φαίνεται ότι το $x(t)$ είναι ίσο με το πραγματικό μέρος του ανύσματος

$$\vec{X}, \text{ δηλαδή: } x(t) = \text{Re}(\vec{x}) \quad (1.99)$$

2. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

2.1 Κυματική

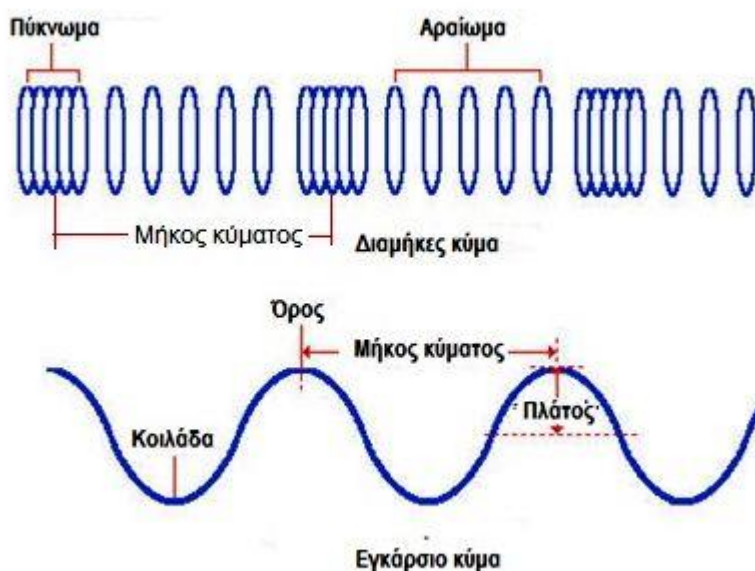
2.1.1 Κύμα

Το κύμα μπορεί να ορισθεί ως " μία διαταραχή που μεταφέρει ενέργεια προοδευτικά από σημείο σε σημείο σε ένα μέσο και ότι μπορεί να λάβει τη μορφή μιας ελαστικής παραμόρφωσης ή μιας παραλλαγής της πίεσης, ηλεκτρική ή μαγνητική ένταση, ή τη θερμοκρασία .Για τη δημιουργία ενός κύματος απαιτείται μια πηγή διαταραχής και ένα μέσο διάδοσης του κύματος.

Τα κύματα διακρίνονται σε:

- εγκάρσια όταν η διεύθυνση κίνησης των σωματιδίων είναι κάθετη στην διεύθυνση διάδοσης και σε
- διαμήκη όταν η διεύθυνση κίνησης σωματιδίων είναι παράλληλη με τη διεύθυνση διαδοσης του κύματος.

(εικ.2.1)

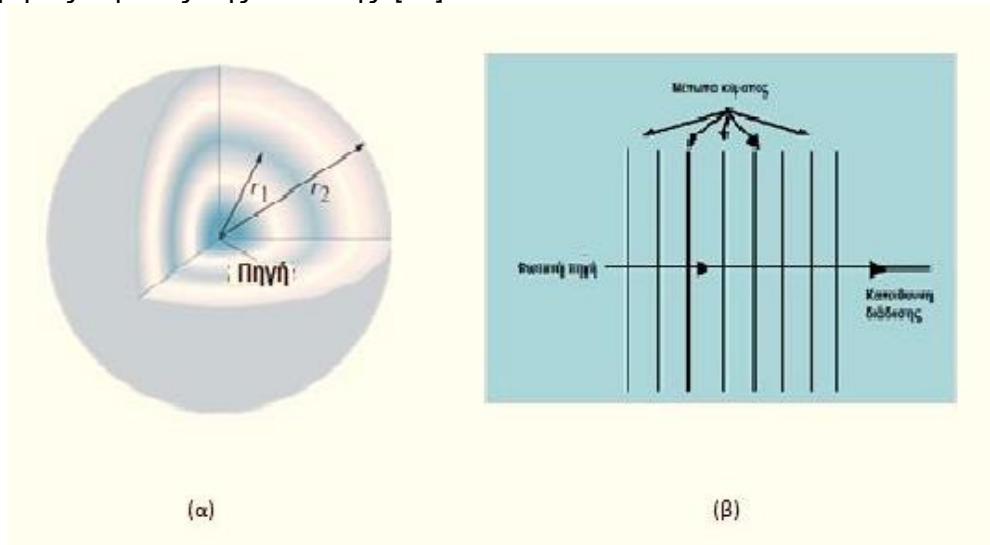


Εικόνα 2.1: Είδη κυμάτων

Ανάλογα με το χώρο διάδοσης τα κύματα διακρίνονται σε:

- γραμμικά, όταν διαδίδονται σε μια διάσταση,
- κύματα επιφάνειας όταν διαδίδονται σε δυο διαστάσεις και σε
- κύματα χώρου όταν διαδίδονται σε τρεις διαστάσεις.
- Επίπεδο κύμα είναι ένα κύμα του οποίου οι επιφάνειες της σταθερής φάσης είναι άπειρα παράλληλα επίπεδα κάθετα προς την κατεύθυνση της διάδοσης.
- Το μέτωπο κύματος είναι μια φανταστική επιφάνεια στο χώρο, η οποία ορίζεται από τον γεωμετρικό τόπο όλων των σημείων στα οποία η φάση της ταλάντωσης είναι η ίδια. Σε ένα επίπεδο κύμα όλα τα μέτωπα κύματος είναι επίπεδα κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης. Σε ένα σφαιρικό κύμα είναι ομόκεντρες σφαίρες. (εικ.2)
- Συμφασικά ή σε φάση ονομάζονται δυο σημεία του κύματος που συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο, Αν η φάση του ενός είναι ϕ_1 η φάση του άλλου θα είναι $\phi_2 = \phi_1 + 2k\pi$.

Επίπεδα κύματα. Ένα επίπεδο κύμα περιγράφεται από την κατεύθυνσή του, πλάτος, μήκος κύματος της διάδοσης. [36].



Εικόνα 2.2: (α) Κύματα χώρου, (β) επίπεδα κύματα

2.1.2 Η διαφορική εξίσωση του κύματος

Πρόκειται για μία γραμμική δεύτερης τάξης μερική διαφορική εξίσωση η οποία χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη διάδοση εγκάρσιου κύματος με ταχύτητα u σε γραμμικό ελαστικό μέσο. Μια μεταβαλλόμενη ποσότητα y έχει τη μορφή γραμμικού κύματος διαδιδόμενου κατά τη διεύθυνση x με ταχύτητα u εφόσον ισχύει :

$$\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

$y(x,t)$ είναι η απομάκρυνση, από τη θέση ισορροπίας του σημείου που τη χρονική στιγμή t βρίσκεται στη θέση x . Γενικότερα μια ποσότητα y έχει τη μορφή κύματος εφόσον:

$$\partial^2 y / \partial t^2 = c^2 \nabla^2 y \quad (2.2)$$

Οι λύσεις της εξίσωσης (2.1) έχουν τη μορφή:

$$y^- = f(x - ut) \quad (2.3)$$

$$y^+ = g(x + ut) \quad (2.4)$$

u : η ταχύτητα του κύματος

και η γενική λύση είναι:

$$y = y^- + y^+ = f(x - ut) + g(x + ut) \quad (2.5)$$

f και g δηλώνουν οποιαδήποτε συνάρτηση των $x-ut$ και $x+ut$ αντίστοιχα

Αν θεωρήσουμε αρμονική (ημιτονοειδή) εξάρτηση από το χρόνο $e^{j\omega t}$ τότε οι εξισώσεις (2.3,2.4,2.5) γίνονται:

$$y^- = B e^{j(\omega t + \beta z)} \quad (2.6)$$

$$y^+ = Ae^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.7)$$

$$\text{και } y = Ae^{j(\omega t - \beta z)} + Be^{j(\omega t + \beta z)} \quad (2.8)$$

A και B είναι πραγματικές σταθερές

Αν πάρουμε τη λύση (2.7) σύμφωνα με τον τύπο του Euler έχουμε:

$$y = Ae^{j(\omega t - \beta z)} = A[\cos(\omega t - \beta x) + j\sin(\omega t - \beta x)] \quad (2.9)$$

το φανταστικό μέρος της εξίσωσης αυτής είναι

$$y = A\sin(\omega t - \beta x) \quad (210)$$

και παριστάνει ένα ημιτονοειδές κύμα με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Είναι αρμονική συνάρτηση του χρόνου επειδή θεωρήσαμε εξάρτηση από το χρόνο $e^{j\omega t}$
- Το A λέγεται πλάτος του κύματος και εκφράζει την καθ' ύψος μέγιστη μετατόπιση ενός σημείου, από το σημείο ισορροπίας του κατά τη διέλευση ενός κύματος (m)
- $(\omega t - \beta x)$ είναι η φάση του κύματος σε ακίνια, εξαρτάται από t, x. Με τον όρο φάση κύματος χαρακτηρίζεται το μέγεθος που εκφράζει την απομάκρυνση ενός σώματος που εκτελεί ταλάντωση από τη θέση ισορροπίας του σε κάποιο δεδομένο χρόνο.
- f: είναι η συχνότητα του κύματος, και εκφράζει τον αριθμό των επαναλήψεων ενός γεγονότος στη μονάδα του χρόνου. Η συχνότητα του κύματος είναι η συχνότητα της πηγής Η συχνότητα ενός (1) Hz (Hertz), ή ενός κύκλου, ισοδυναμεί με μία ταλάντωση ανά δευτερόλεπτο
- Ταχύτητα διάδοσης (u) είναι η ταχύτητα που διαδίδεται το κύμα στο μέσο (m/s)
- ω είναι η κυκλική συχνότητα και εκφράζει τον αριθμό των επαναλήψεων ενός φαινομένου σε χρόνο 2π sec. Η κυκλική συχνότητα είναι μονόμετρο μέγεθος και είναι ίση με το μέτρο της γωνιακής ταχύτητας στην ομαλή κυκλική κίνηση (rad/s). Εκφράζει το ρυθμό μεταβολής της στιγμιαίας φάσης ως προς τον χρόνο, $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ Συνδέεται με την περίοδο με τη σχέση $\omega = \frac{2\pi}{T}$
- $\beta = \omega/u = 2\pi/\lambda$ είναι ο κυματάρηθος (σταθερά φάσης) σε m^{-1} .
- Τ η περίοδος ενός κύματος, είναι ο ελάχιστος χρόνος που απαιτείται για να επανέλθει ένα σταθερό σημείο του κύματος στην ίδια φάση, Μετρείται σε μονάδες χρόνου (s)
- λ είναι το μήκος κύματος. χαρακτηρίζεται η μικρότερη απόσταση μεταξύ δύο σημείων με την ίδια απομάκρυνση από τη θέση ισορροπίας και την ίδια κατεύθυνση κίνησης.

Το αρνητικό πρόσημο χρησιμοποιείται για ένα κύμα που ταξιδεύει στον θετικό x κατεύθυνση και το θετικό πρόσημο χρησιμοποιείται για ένα κύμα που ταξιδεύει στην αρνητική x κατεύθυνση

$$\text{Σχέση συχνότητας και περιόδου: } f = \frac{1}{T} \quad (2.11)$$

$$\text{Σχέση συχνότητας – κυκλικής συχνότητας: } \omega = 2\pi f \quad (2.12)$$

Για το μήκος κύματος ισχύει η σχέση $\lambda = u \cdot T$ (2.13)

.Απο τις σχέσεις (2.11) και (2.12) η (2.13) γίνεται:

$$v = \lambda \cdot f \quad (2.14)$$

Δηλαδή: Η ταχύτητα διάδοσης κύματος σε ένα μέσο ισούται με το γινόμενο του μήκους κύματος επί τη συχνότητα του κύματος. (Θεμελιώδης νόμος της κυματικής).

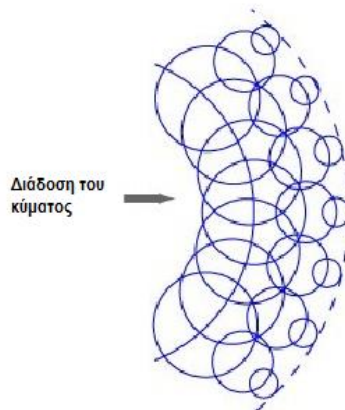
Λόγω των 2.11,2.12,2.14 ή εξίσωση (2.10) γίνεται:

$$y = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \quad (2.15)$$

2.1.3 Ιδιότητες των κυμάτων

Οι κυματικές ιδιότητες ερμηνεύονται με την αρχή Huygens και την αρχή των Huygens-Fresnel

- **Αρχή του Huygens (1665)**



Εικόνα 2.3: Αρχή του Huygens

Κάθε σημείο ενός πρωτεύοντος μετώπου κύματος αποτελεί πηγή σφαιρικών δευτερευόντων κυμάτων έτσι ώστε σε μια μεταγενέστερη χρονική στιγμή το κύριο μέτωπο κύματος να είναι η περιβάλλουσα αυτών των κυμάτων.

Επίσης τα δευτερεύοντα κύματα διαδίδονται με ταχύτητα και συχνότητα που είναι ίσες με τις αντίστοιχες του πρωτεύοντος κύματος σε κάθε σημείο στο χώρο. Με τη θεωρία του ο Huygens μπορούσε να ερμηνεύσει και τα φαινόμενα ανάκλασης και διάθλασης. [36]

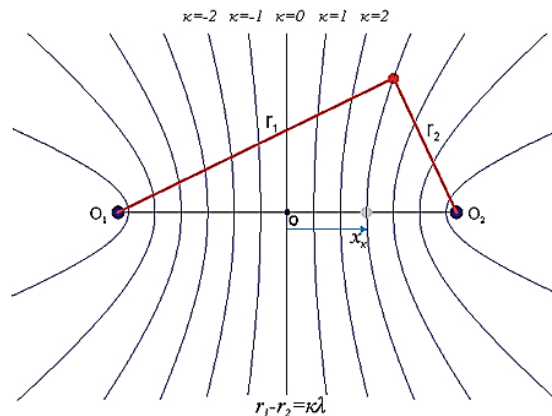
- **Αρχή των Huygens-Fresnel (1820)**

Το πλάτος του κύματος σε κάθε σημείο μια μεταγενέστερη χρονική στιγμή προκύπτει από την υπέρθεση όλων των δευτερευόντων κυμάτων λαμβάνοντας υπόψη τα πλάτη τους και τις σχετικές τους φάσεις. (Αρχή της επαλληλίας ή υπέρθεσης:)

2.1.3.1. Συμβολή των Κυμάτων

Συμβολή ονομάζεται η ταυτόχρονη διάδοση δύο κυμάτων στην ίδια περιοχή του μέσου. Για να παρατηρηθούν φαινόμενα συμβολής θα πρέπει οι κυματικές πηγές να είναι

σύμφωνες και μονοχρωματικές, δηλαδή να εκπέμπουν αποκλειστικά κύμα μίας συγκεκριμένης συχνότητας και μήκους κύματος. [36].



Εικόνα 2.4. Συμβολή των κυμάτων

Η αρχή της επαλληλίας μπορεί να εφαρμοσθεί σε κύματα όποτε δύο (ή περισσότερα) κύματα ταξιδεύουν μέσω του ίδιου μέσου την ίδια στιγμή. Χρησιμοποιώντας την αρχή της επαλληλίας, η προκύπτουσα μετατόπιση μπορεί να γραφεί ως

$$y = 2A \cos 2\pi \frac{r_1 - r_2}{2\lambda} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r_1 + r_2}{2\lambda} \right) \quad (2.16)$$

που παριστάνει ένα διαδιδόμενο κύμα του οποίου το πλάτος εξαρτάται από την διαφορά φάσης ($\Delta\phi$). Όταν τα δύο κύματα είναι σε φάση συμβάλουν ενισχυτικά και το αποτέλεσμα έχει δύο φορές το πλάτος των μεμονωμένων κυμάτων. Όταν τα δύο κύματα έχουν αντίθετη φάση συμβάλουν αναιρετικά και αλληλοεξουδετερώνονται. Όταν έχουν διαφορά φάσης διαφορετική ταλαντώνονται με ενδιάμεσο Ισχύει δηλαδή:

$$\Delta\phi = \begin{cases} 2n\pi, & \text{ενισ.} \\ (2n + 1)\pi, & \text{κατ.} \end{cases} \quad (2.17)$$

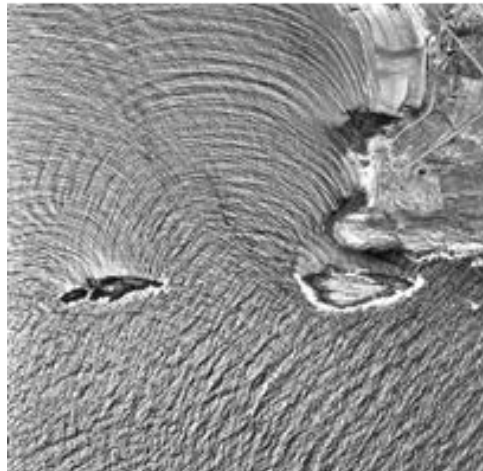
ή αλλιώς για την διαφορά δρόμων των ακτίνων από κάθε σχισμή σε ένα σημείο ισχύει:

$$r_1 - r_2 = \begin{cases} n\lambda, & \text{ενισ.} \\ (n + \frac{1}{2})\lambda, & \text{κατ.} \end{cases} \quad (2.18)$$

2.1.3.2. Περίθλαση των κυμάτων

Είναι η απόκλιση από τις προβλέψεις της γεωμετρικής οπτικής για την ευθύγραμμη διάδοση του φωτός, οφείλεται στην κυματική φύση του φωτός και παρατηρείται όταν το κύμα διέρχεται

μέσω οπών ή προσκρούει σε εμπόδια, οι διαστάσεις των οποίων είναι της τάξης του μήκους

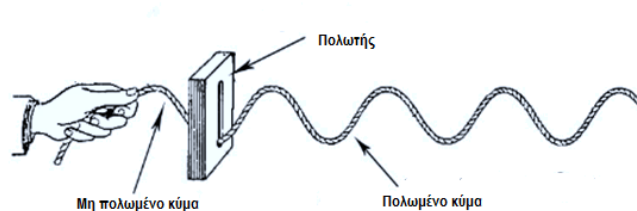


Εικόνα 2.5. Περίθλαση κυμάτων της θάλασσας

κύματός του. Η περίθλαση, συναντάται σε όλα τα κυματικά φαινόμενα. Στην περίπτωση κυμάτων στη θάλασσα όπως φαίνεται στην εικόνα 2.5 είναι ορατά τα φαινόμενα περίθλασης τόσο λόγω του βράχου στο αριστερό μέρος της εικόνας, όσο και λόγω του στενού περάσματος από το οποίο περνάνε τα κύματα στο κέντρο. Ερμηνεύεται από τις αρχές Huygens και Huygens-Fresnel. [36].

2.1.3.3 Πόλωση των κυμάτων.

Στο πείραμα όπως φαίνεται στο σχέδιο κρατάμε με το χέρι μας ένα σχοινί που περνάει μέσα από μια σχισμή ορισμένου μήκους και πλάτους περίπου ίσου με τη διάμετρο



Εικόνα 2.6 Πόλωση μηχανικών κυμάτων

του σχοινιού. Κουνάμε το σχοινί τυχαία προς οποιαδήποτε κατεύθυνση πάνω σε ένα επίπεδο που είναι παράλληλο με αυτό του επιπέδου της σχισμής, αλλά πάντα με την ίδια συχνότητα. Θα παρατηρήσουμε ότι ενώ πριν τη σχισμή δεν μπορούσαμε να προσδιορίσουμε, συγκεκριμένο επίπεδο πάνω στο οποίο διαταράσσεται το σχοινί,, μετά από αυτή βλέπουμε καθαρά την αρμονική κίνησή του, χωρικά και χρονικά. Παρατηρούμε επίσης ότι η κίνηση αυτή γίνεται πλέον πάνω σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο. Το επίπεδο αυτό προσδιορίζεται από τη διεύθυνση διάδοσης και τη διεύθυνση της εγκάρσιας ταλάντωσης του σχοινιού, δηλ. περιλαμβάνει τη σχισμή και είναι κάθετο στο επίπεδό της. Η κυματική διαταραχή του σχοινιού που έχει τα παραπάνω χαρακτηριστικά ονομάζεται γραμμικά πολωμένη και το σύστημα της σχισμής, πολωτής. Η πόλωση είναι χαρακτηριστικό των εγκάρσιων κυμάτων. [36].

2.2 Οπτική

Φως ονομάζεται η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που ανιχνεύεται από το ανθρώπινο μάτι και που εκλαμβάνεται ως αίσθηση (αντίληψη) αυτής. Συνεπώς είναι το αίτιο της όρασης. Οι ακτίνες φωτός είναι γραμμές κατά τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, κάθετες στο μέτωπο κύματος. Αν το φωτεινό κύμα είναι μονοδιάστατο, το μέτωπο κύματος είναι επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση διάδοσης και οι ακτίνες αποτελούν δέσμη παραλλήλων ευθειών, τότε έχουμε επίπεδο κύμα. Για την ερμηνεία της φύσης του φωτός διατυπώθηκαν οι παρακάτω θεωρίες.

2.2.1 Το φως είναι σωματίδια

- **Ιστορικά στοιχεία.** Πρώτοι οι αρχαίοι Έλληνες είχαν αντιληφθεί και διατυπώσει αυτό που εμείς σήμερα ονομάζουμε «σωματιδιακή φύση» του φωτός. Πίστευαν δηλαδή ότι το φως που εκπέμπει ο Ήλιος, αλλά και κάθε φωτοβολούσα πηγή, αποτελείται από μικρά σωματίδια τα οποία κινούνται με πολύ μεγάλη ταχύτητα και, όταν πέφτουν στο μάτι του παρατηρητή, διεγείρουν το αισθητήριο όργανο της όρασης. Η πρώτη επιστημονική προσέγγιση της Οπτικής έγινε στις αρχές του ενδέκατου αιώνα από τον Πέρση Alhazen (965-1040), σε ένα σύγγραμμα με τίτλο “Βιβλίο της Οπτικής”. Αυτός ερεύνησε πειραματικά τις ιδιότητες των φωτεινών ακτίνων χρησιμοποιώντας φακούς και πρίσματα και διετύπωσε την υπόθεση ότι το φως αποτελείται από ελάχιστα σωματίδια, τα οποία ταξιδεύουν με πεπερασμένη ταχύτητα και μεταφέρουν ενέργεια. Ο Isaac Newton δεχόταν επίσης ότι τα φωτεινά σώματα εκπέμπουν σωματίδια, τα οποία κινούνται ευθύγραμμα και με ταχύτητα ίση με την ταχύτητα διάδοσης του φωτός. Με εφαρμογή των νόμων της Μηχανικής διατύπωσε το νόμο της ανάκλασης του φωτός. (1665) και με αρκετές αυθαίρετες παραδοχές εξηγούσε και το φαινόμενο της διάθλασης, Ο, πρώτος που θεωρείται ότι μελέτησε και διατύπωσε τους νόμους του φαινομένου της διάθλασης φέρεται ο Κλαύδιος Πτολεμαίος περί το 2ο αιώνα μ.Χ. στην Αλεξάνδρεια. Ο νόμος του Snell περιγράφεται για πρώτη φορά από τον Ibn Sahl σε ένα χειρόγραφο γραμμένο γύρω στο 984. Ο Willebrord van Roijen Snell αστρονόμος και μαθηματικός διατύπωσε το 1621 τον νόμο της διάθλασης, που οποία αφορά το βαθμό της κάμψης του φωτός σε σχέση με τις ιδιότητες του διαθλαστικού υλικού. Αυτός ο νόμος είναι βασικός στη σύγχρονη γεωμετρική οπτική (περιγραφή των οπτικών φαινομένων με την παράσταση ενός φωτεινού κύματος με τη βοήθεια φωτεινών ακτίνων). Ο Fermat κατέληξε στην ίδια λύση βασιζόμενος αποκλειστικά στην αρχή του ελαχίστου χρόνου. Σύμφωνα με αυτή, το φως κατά τη διαδρομή του μέσα σε ένα μέσο από ένα σημείο A σε ένα σημείο B, ακολουθεί τον οπτικό δρόμο που θα του επιτρέψει να μεταβεί από το A στο B στο μικρότερο δυνατό χρόνο

Οι ιδιότητες του φωτός που ερμηνεύθηκαν πρώτα με τη σωματιδιακή θεωρία και στη συνέχεια και με την κυματική θεωρία του φωτός είναι η ανάκλαση, η διάχυση και η διάθλαση του φωτός. Όταν μια φωτεινή δέσμη που διαδίδεται σε ένα μέσο (1) στην πορεία της συναντήσει μια διαχωριστική επιφάνεια πέρα από την οποία υπάρχει ένα διαφορετικό οπτικό μέσο (2) τότε μπορεί να: [39]

- ανακλασθεί
- διαθλασθεί
- διαχυθεί

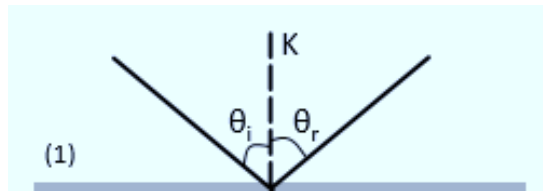
2.2.1.1. Ανάκλαση

Συμβαίνει όταν το φως επιστρέφει πάλι στο αρχικό μέσο.[36]

Νόμοι της ανάκλασης

- i. Η προσπίπτουσα ακτίνα, η ανακλώμενη και η κάθετη στο σημείο πρόσπτωσης βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο

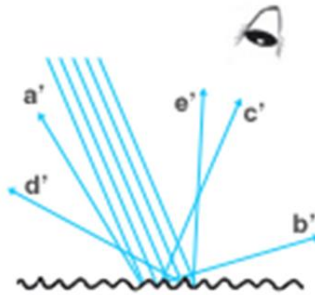
- ii. Για τις γωνίες πρόσπτωσης θ_i , ανάκλασης θ_r ισχύει: $\theta_1 = \theta_2$



Εικόνα 2.7. Ανάκλαση του φωτός

2.2.1.2. Διάχυση

Είναι ειδική περίπτωση του φαινομένου της ανάκλασης που παρατηρείται όταν φωτεινά κύματα κατά τη πρόσπτωσή τους σε σώματα με ακανόνιστες επιφάνειες ανακλώνται προς διάφορες κατευθύνσεις. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην ύπαρξη ενός εξαιρετικά μεγάλου αριθμού λείων μικροσκοπικών επιφανειών που απαρτίζουν τις ακανόνιστες ή τραχιές επιφάνειες των σωμάτων. Έτσι η ανάκλαση από τις μικροσκοπικές αυτές επιφάνειες παρουσιάζεται και αυτή ακανόνιστη με συνέπεια το φως να διαχέεται και να ονομάζεται " διάχυτο φως".

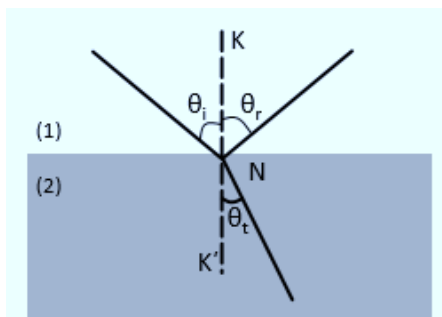


Εικόνα 2.8. Διάχυση του φωτός

Σκέδαση Rayleigh συμβαίνει όταν τα φωτεινά κύματα έρχονται σε επαφή με σωματίδια μικρότερα από το μήκος κύματος του φωτός .

2.2.1.3. Διάθλαση

Συμβαίνει όταν μια φωτεινή δέσμη διαδίδεται σε κάποιο οπτικό μέσο 1 και συναντά μια διαχωριστική επιφάνεια πέρα από την οποία υπάρχει ένα διαφορετικό οπτικό μέσο 2, τότε ένα μέρος της ανακλάται πάλι στο αρχικό οπτικό μέσο 1 και ένα μέρος διέρχεται στο οπτικό μέσο 2, αλλάζοντας διεύθυνση.[37]



Εικόνα 2.9. Διάθλαση του φωτός

Νόμοι της διάθλασης

- i. Η προσπίπτουσα ακτίνα, η διαθλώμενη και η κάθετη στο σημείο πρόσπτωσης βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο.
- ii. Για τις γωνίες πρόσπτωσης θ_i , ανάκλασης θ_r και διάθλασης θ_t που σχηματίζει η ακτίνα με την κάθετο στο σημείο πρόσπτωσης ισχύει:

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (2.19)$$

(Νόμος του Snell για τη διάθλαση)

θ_i : γωνία πρόσπτωσης, θ_t : γωνία διάθλασης

n_i : δείκτης διάθλασης του μέσου (1),

n_t : δείκτης διάθλασης του μέσου (2)

Δείκτης διάθλασης ενός υλικού ονομάζεται το πηλίκο της ταχύτητας διάδοσης του κύματος στο κενό προς την ταχύτητα διάδοσης του κύματος στο συγκεκριμένο μέσο για κάθε συχνότητα.

$$n = \frac{c_0}{c} = \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad (2.20)$$

λ είναι το μήκος κύματος στο μέσο και λ_0 στο κενό

Θεωρώντας ότι το φως διαδίδεται από οπτικώς αραιότερο σε οπτικώς πυκνότερο σώμα ($n_1 < n_2$) η γωνία διάθλασης θα είναι πάντα μικρότερη από τη γωνία πρόσπτωσης όπως προκύπτει από το νόμο του Snell:

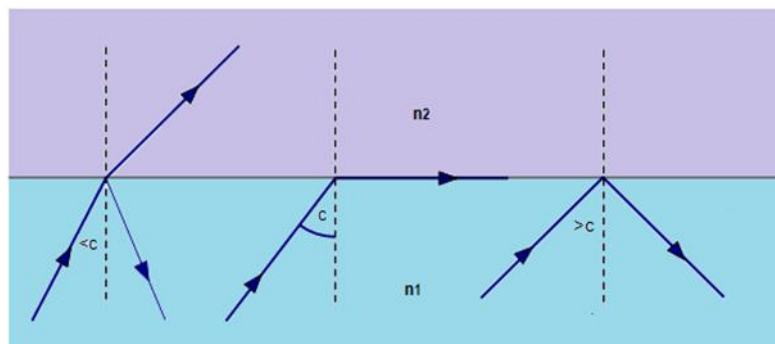
Αυξάνοντας τη γωνία πρόσπτωσης όταν $\theta_i = 90^\circ$, $\sin \theta_i = 1$, οπότε

$$\sin \theta_t = n_1/n_2 \quad (2.21)$$

Η αντίστοιχη γωνία διάθλασης ονομάζεται οριακή γωνία (θ_{op}):

$$\theta_{op} = \arcsin(n_1/n_2) \quad (2.22)$$

Η οριακή γωνία λοιπόν είναι εκείνη η γωνία πρόσπτωσης για την οποία το φως που εξέρχεται προς το οπτικώς αραιότερο μέσο, κινείται παράλληλα προς τη διαχωριστική



Εικόνα 2.10. Οριακή γωνία - ολική ανάκλαση

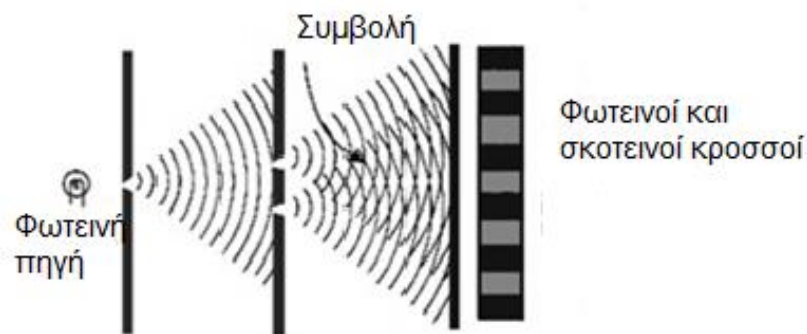
επιφάνεια των δυο μέσων. Σε μια τέτοια περίπτωση για γωνίες πρόσπτωσης μικρότερες της οριακής γωνίας έχουμε και ανακλώμενη δέσμη προς το οπτικώς πυκνότερο μέσο και [36]

2.2.2 Το φως είναι κύμα

Η συμβατή συμπεριφορά του φωτός με τις ιδιότητες των κυμάτων, πόλωση, συμβολή, περίθλαση, που δεν μπορούσε να ερμηνευθεί με τη σωματιδιακή θεωρία του φωτός, επαλήθευσε την κυματική φύση του. Βασικής σημασίας για την ερμηνεία των κυματικών φαινομένων είναι η αρχή του Huygens και η αρχή των αρχή του Huygens-Fresnel που αποτελούν και τη βάση της φυσικής Οπτικής (περιγραφή οπτικών φαινομένων με βάση την κυματική συμπεριφορά του φωτός).

2.2.2.1. Συμβολή

Το 1801 ο Τόμας Γιανγκ πραγματοποίησε το πείραμα με τις δυο σχισμές (εικ.11) που επιβεβαίωσε την κυματική φύση του φωτός, το πείραμα της διπλής σχισμής. Ο Young χρησιμοποίησε μια ακτίνα φωτός, η οποία διέρχονταν από ένα φράγμα με μια σχισμή και στη συνέχεια περνούσε από ένα φράγμα με δυο σχισμές, για να καταλήξει στο τέλος σε



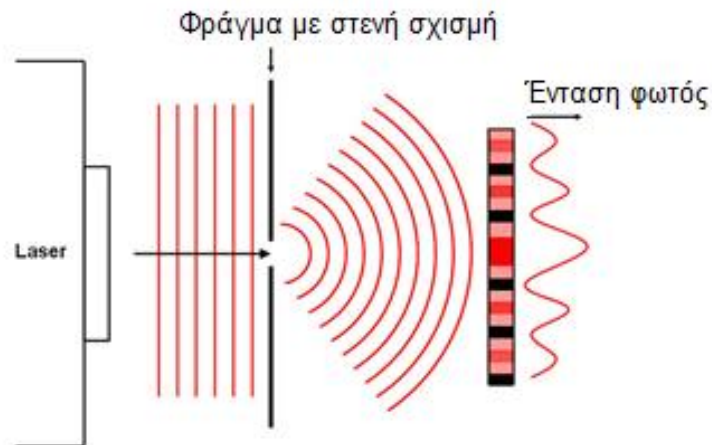
Εικόνα 2.11. Πείραμα των δυο σχισμών

να καταλήξει στο τέλος σε ένα πέτασμα (οθόνη). Ο Young παρατηρώντας το φως που έφτανε στο πέτασμα, διαπίστωσε πως όταν οι σχισμές του δεύτερου φράγματος ήταν μεγάλες, σε μεγάλη μεταξύ τους απόσταση και κοντά στο πέτασμα, εμφανίζονταν δυο ξεκάθαρες φωτεινές γραμμές. Αντίθετα, όταν η απόσταση των σχισμών ήταν μικρότερη και το εύρος τους μικρότερο, το φως σχημάτιζε στο πέτασμα φωτεινούς και σκοτεινούς κροσσούς. Το σχήμα με τους εναλλασσόμενους φωτεινούς και σκοτεινούς κροσσούς ονομάζεται και εικόνα συμβολής. Το 1818 ο Fresnel έδωσε εξήγηση στο φαινόμενο χρησιμοποιώντας την αρχή του Huygens. Κάθε σχισμή δρα ως πηγή κυμάτων και τα κύματα από τις δυο πηγές συμβάλουν ενισχυτικά. Η θεωρία του Fresnel ενίσχυσε την άποψη πως το φως έχει κυματική φύση [39]

2.2.2.2. Περίθλαση

Όταν μονοχρωματική ακτίνα φωτός περάσει μέσα από λεπτή σχισμή της τάξης του μήκους κύματος του φωτός και προσπέσει σε μια οθόνη παρατηρείται το χαρακτηριστικό σχήμα της περίθλασης. Η περίθλαση είναι αποτέλεσμα της αρχής της επαλληλίας, δηλ. είναι ένα φαινόμενο συμβολής. Η χαρακτηριστική εικόνα των φωτεινών και σκοτεινών περιοχών

συμβολής ερμηνεύεται αν θεωρήσουμε το κάθε σημείο του μετώπου κύματος που περνάει από τη σχισμή σαν δευτερεύουσα πηγή σφαιρικών κυμάτων. Στο σχήμα 2.12 φαίνονται οι



Εικόνα 2.12. Περίθλαση

δρόμοι από τρεις δευτερεύουσες πηγές. Ο κεντρικός φωτεινός κροσσός είναι συνέπεια της ενισχυτικής συμβολής όλων των δευτερευουσών πηγών. Συνήθως, διακρίνονται δύο είδη περίθλασης, που αποκαλούνται με βάση το όνομα του επιστήμονα που τα εξήγησε. Έτσι, υπάρχει η περίθλαση Fresnel και η περίθλαση Fraunhofer. Στην πρώτη περίπτωση, η πηγή του κύματος (συνήθως σημειακή φωτεινή πηγή) και το πέτασμα, όπου σχηματίζεται η εικόνα περίθλασης, απέχουν πεπερασμένες αποστάσεις από το εμπόδιο. Στη δεύτερη περίπτωση, οι αποστάσεις μεταξύ πηγής, εμποδίου και πετάσματος είναι τόσο μεγάλες, ώστε όλες οι ευθείες από την πηγή στο εμπόδιο και από το εμπόδιο στο πέτασμα θεωρούνται παράλληλες. Θα πρέπει να τονιστεί ότι δεν υπάρχει θεμελιακή διαφορά μεταξύ περίθλασης και συμβολής, καθώς και οι δυο διέπονται από τις αρχές της επαλληλίας και του Huygens [39].

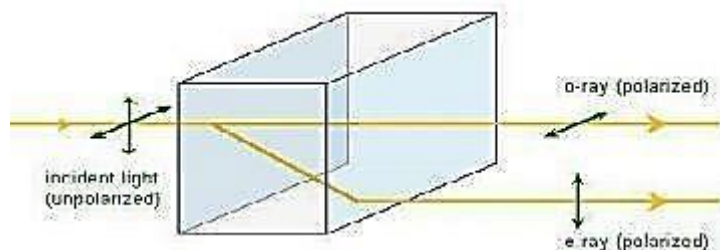
2.2.2.3. Πόλωση.

Πόλωση του φωτός ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο το επίπεδο ταλάντωσης του ηλεκτρικού πεδίου του φωτός είναι το ίδιο για όλα τα φωτόνια. Αυτό το φως ονομάζεται πολωμένο. Το φυσικό φως είναι σύνθεση πολλών κυμάτων με διάφορα επίπεδα ταλάντωσης των ηλεκτρικών τους πεδίων και τυχαίες διευθύνσεις διάδοσης και συνεπώς δεν είναι πολωμένο. Για την πόλωση του φυσικού φωτός χρησιμοποιούμε ειδικά πολωτικά φίλτρα. Μετά τη χρήση του φίλτρου το επίπεδο ταλάντωσης του κύματος είναι αυτό που καθορίζεται από το υλικό του φίλτρου. Η γωνία ολικής πόλωσης του φωτός, για κάθε μέσο, είναι εκείνη η γωνία πρόσπτωσης για την οποία η ανακλώμενη ακτίνα και η διαθλώμενη είναι κάθετες μεταξύ τους. Ο David Brewster διετύπωσε τον ομώνυμο νόμο λέγοντας ότι όταν η επαπτομένη της προσπίπτουσας γωνίας του φωτός ισούται με το δείκτη διαθλάσεων του ανακλώντος υλικού το ανακλώμενο φως είναι εκατό τοις εκατό γραμμικά πολωμένο. (Εικ.2.14).

$$\theta_B = \arctan \frac{n_2}{n_1} \quad (2.23)$$

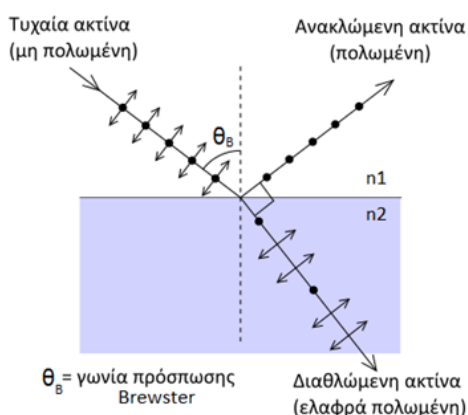
Η παρατήρηση της πόλωσης του φωτός άρχισε με το Δανό Φυσικό Erasmus Bartholinus που ανακάλυψε το 1669 το φαινόμενο της διπλής διάθλασης στο ορυκτό ασβεστίτης. (Εικ.2.13). Όταν μια ακτίνα φυσικού φωτός συναντά κάθετα μια έδρα του

κρυστάλλου χωρίζεται σε δύο ακτίνες. Η μια από αυτές η τακτική (-o- ordinary wave) περνά μέσα από τον κρύσταλλο χωρίς εκτροπή όπως προβλέπει και ο νόμος της διάθλασης, ενώ η άλλη η έκτακτη (-e-extraordinary wave) παρά το γεγονός της κάθετης πρόσπτωσης, εκτρέπεται χωρίς να φαίνεται ότι υπακούει στο νόμο της διάθλασης. Και οι δύο ακτίνες είναι γραμμικά πολωμένες . Ο Christian Huygens το 1690 ανακάλυψε ότι κάθε μια από τις δυο ακτίνες που προκύπτουν με τη διάθλαση του φωτός από τον ασβεστίτη μπορεί να αποσβεσθεί αν περάσει από δεύτερο κρύσταλλο του ίδιου υλικού όταν αυτός περιστραφεί γύρω από τη διεύθυνση διάδοσης της ακτίνας.



Εικόνα 2.13. Διπλή διάθλαση

Την εξήγηση για τη διπλή διάθλαση έδωσαν οι Thomas Young και ο Γάλλος Augustine-Jean Fresnel, υποθέτοντας ότι τα κύματα του φωτός ήταν εγκάρσια. [39]



Εικόνα 2.14. Πόλωση του φωτός με ανάκλαση

Από όλα όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα αυτή φαίνεται καθαρά:

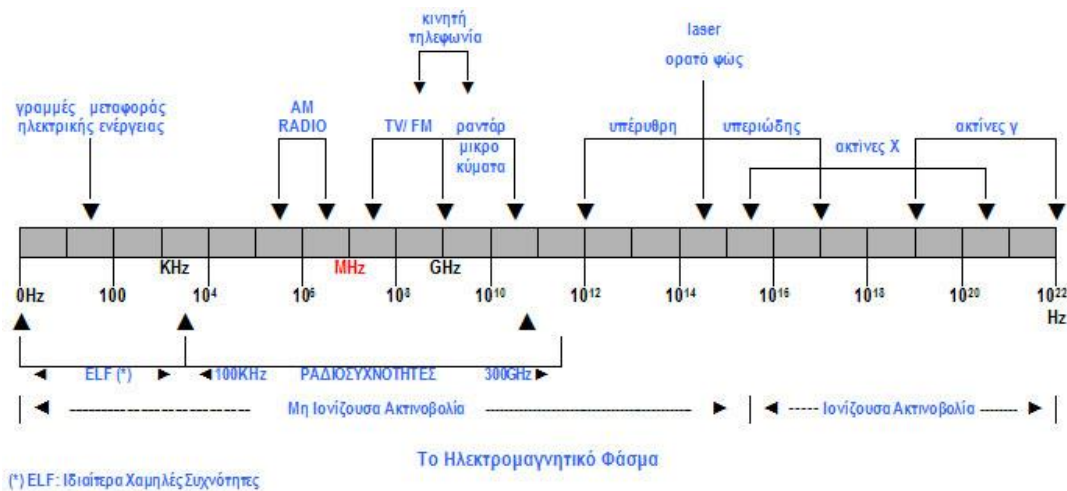
- Η κυματική φύση του φωτός
- Το φως από τελείται από εγκάρσια κύματα.

2.2.3. Το φως είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

Το αποκορύφωμα της έρευνας για τη φύση του φωτός ήρθε το 1865, όταν ο Maxwell αναπτύσσοντας τη θεωρία του, απέδειξε ότι το φως είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Προηγήθηκε το 1830 ο Faraday που έθεσε τα θεμέλια της Φυσικής του Ηλεκτρομαγνητισμού. Την εποχή εκείνη οι περισσότεροι φυσικοί που εργάζονταν στον ηλεκτρισμό και στον μαγνητισμό αναζητούσαν αναλογίες με τη βαρύτητα, την οποία έβλεπαν ως μια δύναμη που επενεργεί σε δύο σώματα τα οποία βρίσκονται σε απόσταση μεταξύ τους. Ο Faraday είχε μια διαφορετική ιδέα: για να εξηγήσει τη σειρά των πειραμάτων που έκανε σε σχέση με τον ηλεκτρισμό και τον μαγνητισμό. Υποστήριξε ότι και τα δύο φαινόμενα είναι πεδία τα οποία

διαχέονται στον χώρο, αλλάζουν με τον χρόνο και μπορούν να ανιχνευθούν από τις δυνάμεις που παράγουν. Ο Faraday διετύπωσε τις θεωρίες του με τους όρους γεωμετρικών σχημάτων, όπως οι γραμμές μαγνητικής δύναμης.

Ο Maxwell επαναδιατύπωσε τις ιδέες του Faraday κατ' αναλογία με τα Μαθηματικά της ροής των ρευστών. Υποστήριξε ότι οι γραμμές της δύναμης ήταν ανάλογες με τις διαδρομές που ακολουθούν τα μόρια ενός ρευστού και ότι η ένταση του ηλεκτρικού ή του μαγνητικού πεδίου ήταν ανάλογη με την ταχύτητα του ρευστού. Βασίζοντας τη μελέτη και την έρευνά του στα πορίσματα μίας περιόδου πειραματισμών και εμπειρικής γνώσης 150 ετών, σε μία ομάδα απλών εξισώσεων (Νόμοι των Ampere, Gauss, Faraday), ανέπτυξε τη θεωρία του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου σε μαθηματική βάση και κατέστησε δυνατή μια πολύ μεγαλύτερη κατανόηση των φαινομένων σε αυτόν τον τομέα. Στην περίπου πενταετούς διάρκειας εργασία του στο βιβλίο *Treatise on Electricity and Magnetism*, το 1864 ο Maxwell κατάφερε να συμπεριλάβει μέσα σε τέσσερις εξισώσεις τις βασικές αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στα ηλεκτρικά και στα μαγνητικά πεδία το σύνολο της νομοτέλειας του Ηλεκτρομαγνητισμού. Οι εξισώσεις Maxwell σηματοδότησαν και την πρώτη ενοποίηση δυνάμεων. Μέχρι τον 19ο αιώνα οι επιστήμονες θεωρούσαν την ηλεκτρική και τη μαγνητική δύναμη ως δυο τελείως διαφορετικές δυνάμεις. Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο – που ευθύνονται για την ηλεκτρική και τη μαγνητική δύναμη – απεδείχθη ότι αποτελούν τις δύο όψεις του ίδιου νομίσματος. Κάνοντας μερικές απλές μετατροπές στις εξισώσεις του, μπόρεσε να εξαγάγει την κυματική εξίσωση και συμπέρανε ότι το φως θα πρέπει να είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Κανείς ως τότε δεν είχε φανταστεί μια τόσο θεμελιώδη σχέση ανάμεσα στο φως, στον ηλεκτρισμό και στον μαγνητισμό. Δεν ήταν όμως μόνον αυτό. Το φως υπάρχει σε διάφορα χρώματα, αντίστοιχα με διαφορετικά μήκη κύματος. Τα μήκη κύματος που εμείς βλέπουμε περιορίζονται από τη χημεία των χρωστικών του ματιού που ανιχνεύουν το φως. Οι εξισώσεις του Maxwell οδήγησαν σε μια συγκλονιστική πρόβλεψη – ότι ήταν δυνατόν να υπάρχουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα όλων των μηκών κύματος. Κάποια από αυτά, με μήκη κύματος μεγαλύτερα από αυτά που μπορούμε να δούμε, θα άλλαζαν τον κόσμο: τα ραδιοκύματα. Το 1887 ο Hertz πέτυχε να δημιουργήσει στο εργαστήριο τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, που είχε προβλέψει ο Maxwell, χρησιμοποιώντας ταλαντούμενο ηλεκτρικό δίπολο. Μέτρησε την ταχύτητα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και την βρήκε, όπως είχε πει ο Maxwell, ίση με την ταχύτητα του φωτός και απέδειξε ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα έχουν τις ιδιότητες του φωτός: ανάκλαση, διάθλαση, πόλωση και συμβολή. Δεν υπολόγισε όμως την πιο επαναστατική εφαρμογή τους. Αν μπορούσε κανείς να εντυπώσει ένα σήμα επάνω σε ένα τέτοιο κύμα θα μπορούσε να μιλήσει στον κόσμο. Ο Tesla, ο Markoni και άλλοι έκαναν το όνειρο αυτό πραγματικότητα και ολόκληρη η τεχνολογία των σύγχρονων επικοινωνιών, από το ραδιόφωνο και την τηλεόραση ως το ραντάρ και τις ζεύξεις μικροκυμάτων για τα κινητά τηλέφωνα, ήταν ένα φυσικό επακόλουθο.



Εικόνα 2.15. Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Όλα προήλθαν από τέσσερις εξισώσεις και δύο σύντομους υπολογισμούς. Πριν το Maxwell υπήρχε μόνο το ορατό φως. Τώρα υπάρχει ένα απεριόριστο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα που περιλαμβάνει ραδιοκύματα, μικροκύματα, υπέρυθρο, ορατό φως, υπεριώδες, ακτίνες X, ακτίνες γ. Οι επιπτώσεις είναι τεράστιες. Οι εξισώσεις του Maxwell δεν άλλαξαν απλώς τον κόσμο. Ανοίξαν έναν καινούργιο.[39]

2.2.4 Το φως είναι σωματίδιο και κύμα

Το 1900 ο Planck, για να ερμηνεύσει την ακτινοβολία που παράγει ένα θερμαινόμενο σώμα, εισήγαγε τη θεωρία των κβάντα φωτός, την οποία εφάρμοσε αργότερα ο Einstein, για να ερμηνεύσει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Σύμφωνα με την κβαντική θεωρία του Planck, το φως (και γενικότερα κάθε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία) εκπέμπεται και απορροφάται από τα άτομα της ύλης όχι κατά συνεχή τρόπο αλλά ασυνεχώς. Δηλαδή κάθε άτομο εκπέμπει ή απορροφά στοιχειώδη ποσά ενέργειας, που ονομάζονται κβάντα φωτός ή φωτόνια. Από το άτομο λοιπόν δεν εκπέμπονται συνεχώς κύματα αλλά φωτόνια, καθένα από τα οποία χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη συχνότητα και έχει συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας E.

Όταν το φως προσπίπτει πάνω στην ύλη, τα άτομα της ύλης απορροφούν την ακτινοβολία ασυνεχώς, που σημαίνει ότι κάθε άτομο απορροφά μεμονωμένα φωτόνια. Κάθε φωτόνιο μιας ακτινοβολίας έχει ενέργεια που δίνεται από τη σχέση

$$E=h\cdot f \quad (2.24)$$

Το h είναι μια σταθερά, που ονομάζεται σταθερά του Planck, και έχει τιμή $h=6,63\cdot 10^{-34}$ J • s και f η συχνότητα. Η θεωρία των κβάντα δεν αναιρεί την κυματική φύση του φωτός. Το φωτόνιο έχει και κυματικές ιδιότητες, για παράδειγμα η ενέργειά του εξαρτάται από τη συχνότητα του, που είναι κατ' εξοχήν κυματική ιδιότητα. Ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες το φως εκδηλώνει ιδιότητες είτε φωτεινού κύματος, (φωτεινή ακτίνα), είτε δέσμης σωματιδίων, (φωτεινή δέσμη ή δέσμες). Στη μελέτη της διάδοσης του φωτός σε ένα μέσο (οπτική ίνα) το θεωρούμε ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα

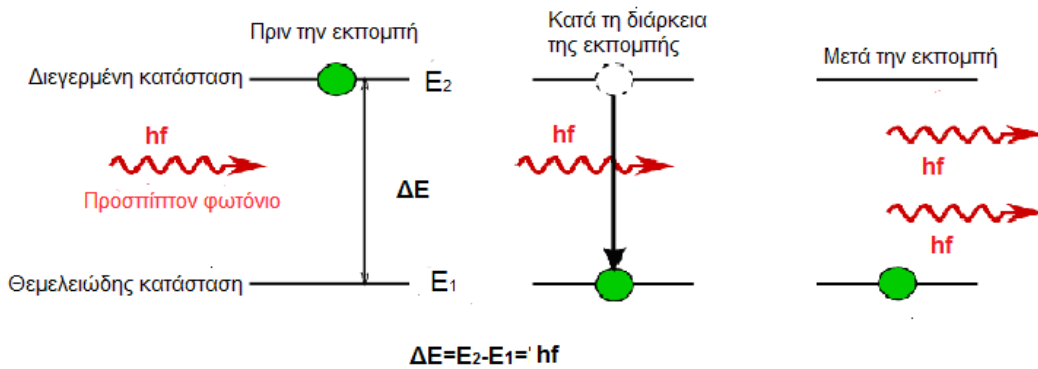
2.3 LASER

- Ο όρος **λείζερ** ή **λέιζερ Laser**: (**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation) που αποδίδεται στα ελληνικά ως *ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας* και καλύπτει τόσο τις συσκευές που την παράγουν όσο και την αντίστοιχη ακτινοβολία. Τα λείζερ παράγουν συμφασικό, μονοχρωματικό φως (δηλαδή φως με συγκεκριμένο μήκος κύματος-χρώμα), το οποίο διαδίδεται σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση, σχηματίζοντας στενές δέσμες.

2.3.1 Περιγραφή

Τα λείζερ αποτελούνται από το ενεργό υλικό και την οπτική κοιλότητα. Το ενεργό υλικό μετατρέπει την εξωτερική ενέργεια σε δέσμη φωτός. Συνήθως είναι υλικό με συγκεκριμένο μέγεθος, σύσταση, καθαρότητα και μορφή, που παράγει φως μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής. Το ενεργό υλικό αντλεί ενέργεια από μία εξωτερική πηγή. Τέτοιες πηγές μπορεί να είναι ηλεκτρικές ή φωτεινές, όπως η λυχνία έκλαμψης (flash lamp) ή κάποια άλλη πηγή λείζερ. Η ενέργεια που απορροφάται αποτίθεται στα σωματίδια του ενεργού υλικού, ώστε αυτά να οδηγηθούν σε μία διεγερμένη κβαντική κατάσταση. Όταν ο αριθμός των σωματιδίων που βρίσκονται στη διεγερμένη κατάσταση είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των ατόμων που

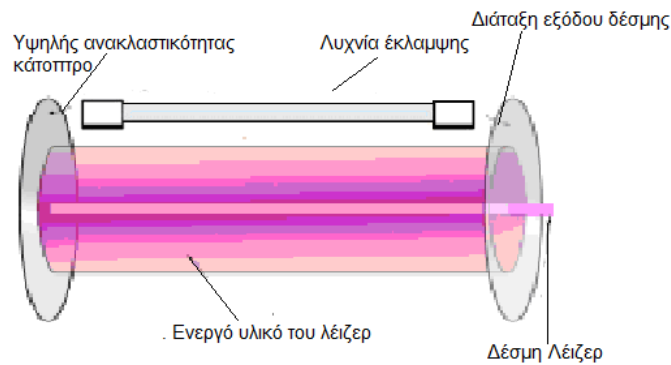
βρίσκεται στη βασική κατάσταση, επιτυγχάνεται αντιστροφή πληθυσμού.



Εικόνα 2.16. Αρχή λειτουργίας του laser

Τότε μία δέσμη φωτός που περνάει μέσα από το υλικό έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να οδηγήσει σε εξαναγκασμένη εκπομπή φωτονίων από ό,τι σε εξαναγκασμένη απορρόφηση, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται ενίσχυση της δέσμης. Ένα διεγερμένο ενεργό υλικό μπορεί να λειτουργήσει επίσης και ως οπτικός ενισχυτής.

Η οπτική κοιλότητα αποτελεί παράδειγμα κοιλότητας ταλάντωσης και περιέχει μια σύμφωνη δέσμη φωτός μεταξύ δύο ανακλαστικών επιφανειών, έτσι ώστε κάθε φωτόνιο να περνά τουλάχιστον δύο φορές από το ενεργό υλικό προτού φύγει από την οπή εξόδου της πηγής λέιζερ ή χαθεί λόγω απορρόφησης ή περίθλασης. Αν η ενίσχυση που προέρχεται από την επαναλαμβανόμενη διέλευση του φωτός μέσα από το ενεργό υλικό είναι μεγαλύτερη από τις απώλειες της κοιλότητας, τότε εμφανίζεται εκθετική αύξηση της ισχύος του φωτός μέσα στην κοιλότητα. Όμως, κάθε εξαναγκασμένη εκπομπή αναγκάζει ένα σωματίδιο να επιστρέψει από την διεγερμένη κατάσταση στην βασική, μειώνοντας έτσι την ικανότητα του ενεργού υλικού για επιπλέον ενίσχυση



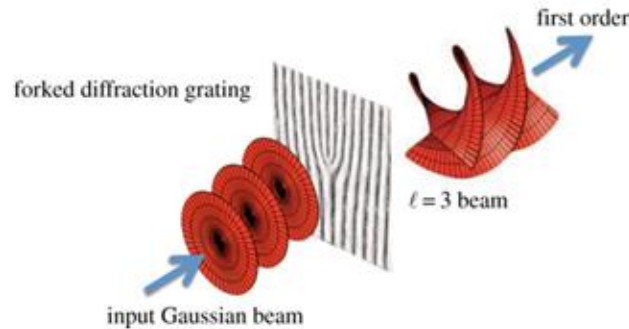
Εικόνα 2.17. Laser

Τα χαρακτηριστικά του φωτός που παράγεται από εξαναγκασμένη εκπομπή είναι παρόμοια με αυτά του αρχικού φωτός, ως προς το μήκος κύματος, την πόλωση και τη φάση. Το φως του λέιζερ που παράγεται είναι σύμφωνο, ενώ η σταθερότητα της πόλωσης και η μονοχρωματικότητα εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της οπτικής κοιλότητας

2.3.2. Συνεστραμμένο φως

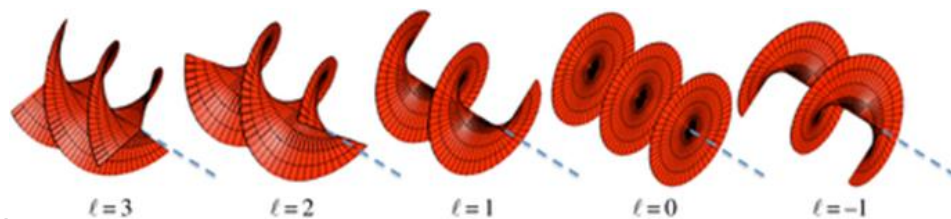
Το συνεστραμμένο φως είναι μια δέσμη φωτός, η οποία δημιουργείται όταν μια δέσμη laser φωτίζει ένα διχαλωτό φράγμα περίθλασης. Η διαθλώμενη δέσμη πρώτης τάξης έχει ελικοειδή μέτωπα κύματος και καθώς διαδίδεται περιστρέφεται γύρω από την ευθεία

διάδοσής της, μεταφέροντας ενέργεια, ορμή και στροφορμή. Η στροφορμή μπορεί να διαχωριστεί σε σπιν και τροχιακή στροφορμή. Η τροχιακή στροφορμή (OAM) είναι η συνιστώσα της στροφορμής της δέσμης φωτός που εξαρτάται από την χωρική κατανομή του πεδίου, και όχι από πόλωση. Μπορεί να χωριστεί περαιτέρω σε μια εσωτερική και μια εξωτερική OAM. Η εσωτερική OAM μπορεί να συνδέεται με ένα ελικοειδές ή συνεστραμμένο μέτωπο κύματος. Η εξωτερική OAM μπορεί να ληφθεί ως γινόμενο της θέσης δέσμης φωτός



Εικόνα 2.18 Δημιουργία συνεστραμμένου φωτός

(κέντρο της δέσμης) και της συνολικής γραμμικής ορμής του. Η ελικοειδής στροφορμή χαρακτηρίζεται από έναν ακέραιο αριθμό m , θετικό ή αρνητικό. Εάν $m = 0$, τότε έχουμε παράλληλα μέτωπα κύματος, επίπεδο κύμα. Εάν $m = \pm 1$, η φορά καθορίζεται από το πρόσημο του m , το μέτωπο κύματος διαμορφώνεται ως μια ενιαία ελικοειδής επιφάνεια, με βήμα ίσο με το μήκος κύματος λ . Αν $|m| > 2$, το μέτωπο κύματος αποτελείται από $|m|$ διακριτές αλλά αλληλένδετες έλικες, με το μήκος βήματος της έλικας κάθε επιφάνειας ίσο με $|m| \lambda$. Ακτίνες φωτός που βρίσκονται σε ελικοειδή κατάσταση φέρουν μη μηδενική OAM. Τα συνεστραμμένα ηλεκτρομαγνητικά πεδία έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν ταυτόχρονα πολλές σειρές δεδομένων πάνω στην ίδια ασύρματη. Σύμφωνα με δοκιμές ακτίνα φωτός που χωρίζεται σε 8 διαφορετικές κυκλικές πολώσεις απέδειξε την ικανότητα να μεταφέρει μέχρι και 2,5 terabits δεδομένων ανά δευτερόλεπτο. Ανάλογα με τον τρόπο που γυρίζει η έλικα του μετώπου κύματος οι τιμές του αριθμού m μπορεί να είναι θετικές ή αρνητικές όπως και στην πόλωση. Αλλά αντίθετα από την πόλωση η τιμή της συστροφής μπορεί να είναι όχι μόνο +1 και -1 αλλά και +2, -5, +12 κ.λ.π. Άρα μπορεί να έχει μεγαλύτερη χωρητικότητα πληροφοριών από την πόλωση στροφορμής. Η πολυπλεξία OAM δίνει (θεωρητικά τουλάχιστον) πρόσβαση σε μια δυναμικά απεριόριστη σειρά από OAM κβαντικές καταστάσεις, και έτσι να προσφέρουν ένα πολύ μεγαλύτερο αριθμό των καναλιών, που υπόκειται μόνο στους περιορισμούς του πραγματικού κόσμου. [4,30,46]



Εικόνα 2.19. Συνεστραμμένο φως με διαφορετικές τιμές l .

3.ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ MAXWELL

3.1 Τα μεγέθη που συναντάμε στις εξισώσεις Maxwell

- Ένταση E σε ένα σημείο του ηλεκτρικού (ηλεκτροστατικού) πεδίου, ονομάζουμε το φυσικό διανυσματικό μέγεθος που έχει μέτρο ίσο με το πηλίκο του μέτρου της δύναμης που ασκείται σε φορτίο q που βρίσκεται σ' αυτό το σημείο προς το φορτίο αυτό και κατεύθυνση την κατεύθυνση της δύναμης, αν αυτή ασκείται σε θετικό φορτίο.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (3.1)$$

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου δείχνει πόσο ισχυρό είναι το ηλεκτρικό πεδίο στο σημείο αυτό. Μονάδα μέτρησης της έντασης στο S.I. είναι το $1\text{N/C} = 1\text{V/m}$

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που οφείλεται σε σημειακό φορτίο q [C] σε απόσταση R :

$$|E| = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2} \quad (3.2)$$

ϵ_0 είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού, $\epsilon_0 \approx 8,854 \times 10^{-12}$ F/m.

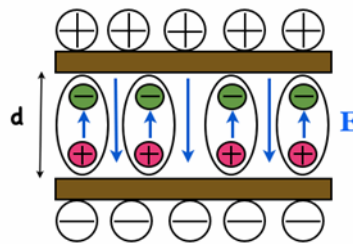
Σε περίπτωση που υπάρχει κάποιο υλικό η ένταση μειώνεται λόγω των μορίων του υλικού:

$$|E| = \frac{q}{4\pi\epsilon R^2} \quad (3.3)$$

ϵ : η διηλεκτρική σταθερά του μέσου

- Διηλεκτρική σταθερά

Η, διηλεκτρική σταθερά είναι μια από τις βασικές παραμέτρους που επηρεάζει τη διάδοση του ηλεκτρικού πεδίου. Συμβολίζεται με το ϵ .



Εικόνα 3.1 Διηλεκτρική σταθερά

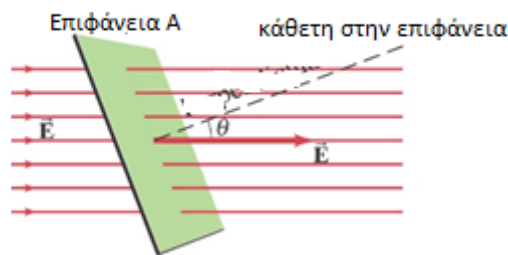
Στο σχήμα 3.1 δυο φορτισμένες πλάκες με ίσα και αντίθετα φορτία σε απόσταση d μεταξύ τους. Θεωρούμε ότι μεταξύ των πλακών υπάρχει κενό. Μεταξύ των πλακών υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο. Αν τοποθετηθεί κάποιο υλικό ανάμεσα στις δυο πλάκες που αποτελείται από άτομα τα οποία δημιουργούν μόρια. Στα μόρια δημιουργούνται συχνά ηλεκτρικά δίπολα τα οποία έχουν τυχαίο προσανατολισμό. Αν το υλικό αυτό τοποθετηθεί ανάμεσα στις φορτισμένες πλάκες τα μόρια- δίπολα προσανατολίζονται όπως στο σχήμα: Το ηλεκτρικό πεδίο που οφείλεται στη διπολική ροπή των μορίων του υλικού είναι αντίθετο στο εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο E . Το αποτέλεσμα είναι ότι το ηλεκτρικό πεδίο μειώνεται μέσα στο υλικό.

Η διηλεκτρική σταθερά είναι μέτρο του πόσο τα μόρια αντιτίθενται στο εξωτερικό πεδίο E και μεταβάλλεται με τη συχνότητα τη θερμοκρασία και την υγρασία. Στην περίπτωση που αναφέρεται στο κενό συμβολίζεται με ϵ_0 και ισούται περίπου με: $\epsilon_0 \approx 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

- **Ηλεκτρική ροή:** Είναι ανάλογη με το πλήθος των δυναμικών γραμμών που διέρχονται κάθετα από μια επιφάνεια σε ηλεκτρικό πεδίο.

$$\Phi_E = E \cdot S \cdot \cos\theta \quad (3.4)$$

θ : Η γωνία που σχηματίζει η κάθετη στην επιφάνεια με την κατεύθυνση της έντασης.



Εικόνα 3.2 Ηλεκτρική ροή

- **Διάνυσμα της πυκνότητας της ηλεκτρικής ροής ή της Διηλεκτρικής μετατόπισης, D**

Είναι διάνυσμα κάθετο στη στοιχειώδη επιφάνεια dS και μέτρο ίσο με το εμβαδόν της στοιχειώδους επιφάνειας. Συνδέεται με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E μέσω της διηλεκτρικής σταθεράς ϵ ως εξής:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (3.5)$$

Μονάδα μέτρησης [As / m^2]

- **Πυκνότητα ηλεκτρικού φορτίου (ρ_v)**

$$\text{Ορίζεται από τη σχέση: } \rho_v = \frac{q}{V} \quad (3.6)$$

Μετράται σε C / m^3 .

- **Πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος**

Η πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος (J) είναι διάνυσμα που το μέτρο του ορίζεται από το πηλίκο

$$j = I/S. \quad (3.7)$$

Το j έχει την κατεύθυνση της ταχύτητας ενός υποθετικού θετικού φορέα ή αντίθετη από εκείνη της ταχύτητας των ηλεκτρονίων και μετράται σε A/m^2 . Εκφράζει τη συνολική ροή του φορτίου ανά μονάδα χρόνου από διατομή επιφάνειας 1 τετραγωνικού μέτρου.

Το συνολικό ρεύμα (I) προκύπτει από την πυκνότητα ρεύματος (J) αν αθροίσουμε (ή ολοκληρώσουμε) την πυκνότητα του ρεύματος στην επιφάνεια ροής του φορτίου:

$$I = \int \vec{j} \cdot d\vec{s} \quad (3.8)$$

- **Η ηλεκτρική αγωγιμότητα σ** είναι το αντίστροφο της αντίστασης ανά μονάδα μήκους και μετράται σε Siemens/meter. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα εκφράζει την ευκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα περνάει μέσα από κάποιο αντικείμενο. Υλικά όπως ο αέρας και το κενό δεν έχουν ηλεκτρική αγωγιμότητα. Αν υλικό έχει ηλεκτρική αγωγιμότητα σ τότε η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος συνδέεται με το ηλεκτρικό πεδίο με την εξίσωση

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (3.9)$$

Η εξίσωση αυτή δείχνει ότι σε υλικό με αγωγιμότητα διαφορετική του μηδενός ένα ηλεκτρικό πεδίο θα δημιουργήσει ηλεκτρικό ρεύμα..

- **Ένταση μαγνητικού πεδίου H**

Ένταση μαγνητικού πεδίου H σ' ένα σημείο αυτού ονομάζεται η μαγνητική δύναμη που επενεργεί επί της μονάδας της βόρειας μαγνητικής μάζας όταν αυτή βρίσκεται στο σημείο αυτό του πεδίου. Η Ένταση μαγνητικού πεδίου μετριέται σε Βέμπερ (W). Η μονάδα W έχει διαστάσεις έντασης ηλεκτρικού ρεύματος ανά μονάδα μήκους (A/m). Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου δείχνει πόσο ισχυρό είναι το ηλεκτρικό πεδίο στο σημείο αυτό

- **Η πυκνότητα μαγνητικής ροής ή Μαγνητική επαγωγή B**

Είναι ένα διανυσματικό μέγεθος που μας καθορίζει πόσο πυκνές είναι οι δυναμικές γραμμές σε κάποιο σημείο του πεδίου. Μονάδα μέτρηση 1 T.

- **Μαγνητική διαπερατότητα μ**

Είναι ο λόγος της έντασης της μαγνητικής επαγωγής προς την ένταση του μαγνητικού πεδίου σε ένα σημείο του χώρου

$$\mu = B/H. \quad (3.10)$$

Η μαγνητική διαπερατότητα είναι καθαρός αριθμός, και είναι μέτρο της ικανότητας ενός υλικού να υποστηρίξει το σχηματισμό μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του. Είναι μέτρο της μαγνήτισης που αποκτά το υλικό όταν εφαρμοσθεί μαγνητικό πεδίο. Η μαγνητική διαπερατότητα του κενού είναι $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$

- **Μαγνητική ροή Φ**

Σε αντιστοιχία με την ηλεκτρική ροή, ορίζεται και η μαγνητική ροή από τη σχέση:

$$\Phi_B = B \cdot S \cos\theta \quad (3.11)$$

μονάδα μέτρησης το 1 Wb

- **Η ταχύτητα του φωτός στο κενό $c = 3 \cdot 10^8 \text{m/s}$**

3.2 Εξισώσεις Maxwell

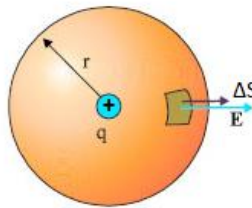
3.2.1 Εξίσωση 1η

Η πρώτη εξίσωση του Maxwell είναι ο νόμος του Gauss που διατυπώθηκε από το Karl Friedrich Gauss το 1835 αλλά δημοσιεύθηκε το 1867. Η πρώτη παρατήρηση των δυνάμεων μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων έγινε από τους αρχαίους Έλληνες μελετώντας τη συμπεριφορά του ήλεκτρου όταν το έτριβαν με ένα μάλλινο ρούχο.

• **Διατύπωση:** Ο νόμος συνδέει την ηλεκτρική ροή που διέρχεται από μια κλειστή επιφάνεια με το φορτίο που περικλείει η επιφάνεια σύμφωνα με τη σχέση::

$$\Phi_E = q_{\text{ολ}} / \epsilon_0 \quad (3.12)$$

• **Απόδειξη:** Θεωρούμε ένα σημειακό θετικό φορτίο q . Υποθέτουμε μια σφαίρα ακτίνας r , όπως στο παρακάτω σχήμα, που έχει κέντρο το σημείο στο οποίο βρίσκεται το φορτίο. Θα υπολογίσουμε την ηλεκτρική ροή που διέρχεται από την σφαίρα.



Εικόνα 3.3 Νόμος του Gauss

A. Το σημειακό φορτίο q βρίσκεται στο κέντρο σφαίρας ακτίνας

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια της σφαίρας έχει μέτρο:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad (3.13)$$

Χωρίζουμε την επιφάνεια της σφαίρας σε στοιχειώδη τμήματα ΔS , τόσο μικρά ώστε το καθένα από αυτά να μπορεί να θεωρηθεί επίπεδο. Οι δυναμικές γραμμές του πεδίου που δημιουργεί το q τέμνουν κάθετα κάθε στοιχειώδη επιφάνεια ΔS και το κάθετο διάνυσμα ΔS σε κάθε τέτοια επιφάνεια είναι παράλληλο με τις δυναμικές γραμμές.

Η ολική ροή που διέρχεται από την επιφάνεια της σφαίρας είναι:

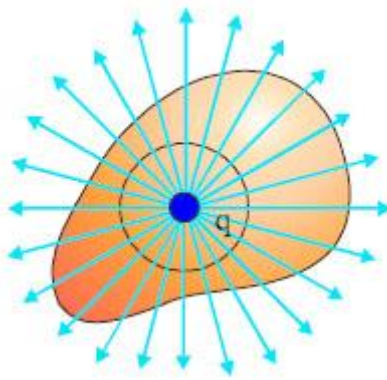
$$\Phi_E = \sum E_i \Delta S_i \cos\theta_i = \sum E \Delta S = E \sum \Delta S \quad (3.14)$$

Ο όρος $\sum \Delta S$ δίνει το εμβαδόν της σφαιρικής επιφάνειας που είναι ίσο με $4\pi \cdot r^2$.

Από τις τελευταίες σχέσεις παίρνουμε:

$$\Phi_E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = \frac{q}{r^2} 4\pi r^2 = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (3.15)$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι η ηλεκτρική ροή (Φ_E) είναι ανεξάρτητη της ακτίνας r της σφαίρας που επιλέξαμε, όπως και από το σχήμα της επιφάνειας γιατί, το πλήθος των δυναμικών γραμμών που περνά από οποιαδήποτε κλειστή επιφάνεια που περιβάλλει το φορτίο q είναι ίδιο ανεξάρτητα από την ακτίνα και το σχήμα της.



Εικόνα 3.4 Η ηλεκτρική ροή που διέρχεται από τις δυο επιφάνειες

Η ηλεκτρική ροή που διέρχεται από τις δύο επιφάνειες (εικ.3.4) είναι ίδια. Επομένως, η ηλεκτρική ροή για κάθε κλειστή επιφάνεια που περικλείει το φορτίο q είναι ίση με αυτή που βρήκαμε για τη σφαίρα

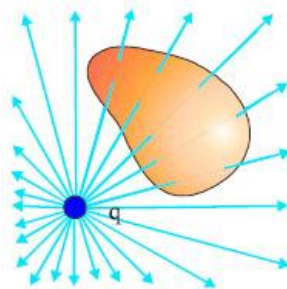
$$\Phi_E = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (3.16)$$

Το συμπέρασμα στο οποίο καταλήξαμε γενικεύεται και στην περίπτωση που έχουμε πολλά σημειακά φορτία ,ή φορτισμένα σώματα .Με την αρχή της επαλληλίας αποδεικνύεται ότι η ηλεκτρική ροή που διέρχεται από μια οποιαδήποτε κλειστή επιφάνεια είναι ίση με $Q_{ολ}/\epsilon_0$ όπου $Q_{ολ}$ το φορτίο που περικλείεται από την κλειστή επιφάνεια.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \oint \Sigma (d\vec{E}_i) \cdot d\vec{S} = \frac{\Sigma q_i}{\epsilon_0} = \frac{Q_{ολ}}{\epsilon_0} \quad (3.17)$$

Η παραπάνω πρόταση αποτελεί το νόμο του Gauss για το ηλεκτρικό πεδίο. Η κλειστή επιφάνεια που επιλέγουμε για να εφαρμόσουμε το νόμο του Gauss ονομάζεται επιφάνεια Gauss.

B. Το φορτίο q βρίσκεται έξω από την επιφάνεια. (Εικόνα 3.5)



Εικόνα 3.5. Φορτίο έξω από κλειστή επιφάνεια

Οι δυναμικές γραμμές του πεδίου που δημιουργεί και εισέρχονται στην επιφάνεια αυτή εξέρχονται από κάποιο άλλο σημείο απ' αυτή. Η συνολική ηλεκτρική ροή που περνάει από την επιφάνεια είναι ίση με μηδέν. Στην περίπτωση αυτή ο νόμος του Gauss είναι:

$$\Phi_E = 0 \quad (3.18)$$

Κατά την εφαρμογή του νόμου του Gauss το φορτίο $Q_{ολ}$ είναι το φορτίο που βρίσκεται μέσα στην επιφάνεια Gauss, ενώ E είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που οφείλεται τόσο σε

φορτία που βρίσκονται μέσα στην επιφάνεια όσο και σε φορτία που βρίσκονται έξω από αυτήν.

- **Διαφορική μορφή του νόμου του Gauss**

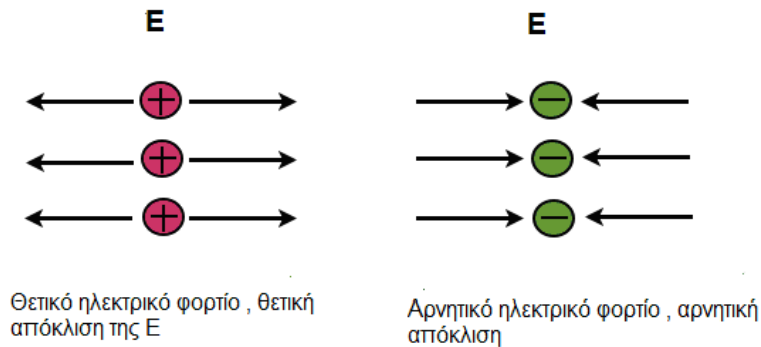
Σε διαφορική μορφή στο κενό ή τον αέρα η εξίσωση γίνεται:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3.19)$$

Δηλ. η απόκλιση της έντασης είναι ανάλογη της πυκνότητας φορτίου που αποτελεί την πηγή του.

- **Ερμηνεία του νόμου του Gauss**

Η \vec{E} στη σχέση (3.19) πρέπει να έχει τη σωστή απόκλιση. Αν δεν υπάρχει ηλεκτρικό φορτίο δεν υπάρχει και πεδίο E. Αν το συνολικό φορτίο είναι αρνητικό πρέπει η απόκλιση της \vec{E} να είναι αρνητική, αν το συνολικό φορτίο είναι θετικό πρέπει η απόκλιση να είναι θετική.



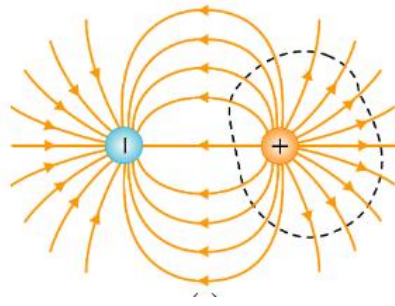
Εικόνα 3.6 Απόκλιση της έντασης

Αν παρατηρήσουμε τον τρόπο που συμπεριφέρεται το πεδίο \vec{E} γύρω από φορτίο παρατηρούμε ότι ο νόμος του Gauss ισοδυναμεί με το νόμο του Coulomb για σημειακά φορτία:

$$|F| = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (3.20)$$

$$|E| = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (3.21)$$

Η εξίσωση δείχνει ότι τα φορτία ασκούν δυνάμεις μεταξύ τους και αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν δυναμικές γραμμές που απομακρύνονται από θετικά φορτία και κατευθύνονται προς αρνητικά (Εικόνα 3.7).

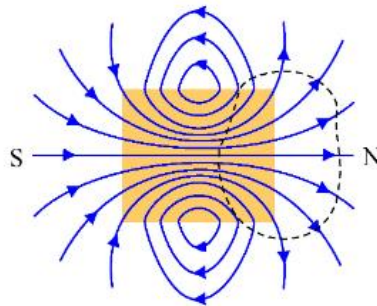


Εικόνα 3.7: Ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ ετερόσημων σημειακών φορτίων

Δηλαδή τα αντίθετα φορτία έλκονται και τα και τα ομόσημα φορτία απωθούνται. Στην πραγματικότητα ο νόμος του Gauss και ο νόμος του Coulomb δεν είναι δυο ανεξάρτητοι φυσικοί νόμοι, αλλά ο ίδιος νόμος που εκφράζεται με δύο διαφορετικούς τρόπους

- **Η φυσική σημασία του νόμου του Gauss** είναι ότι συνδέει το ηλεκτρικό πεδίο E σε κάποιο σημείο του χώρου με την κατανομή φορτίου, που εκφράζεται με την πυκνότητα ρ , στο ίδιο σημείο του χώρου. Εκφράζει δηλαδή, μια τοπική σχέση μεταξύ των δυο αυτών φυσικών ποσοτήτων. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι τα ηλεκτρικά φορτία είναι οι πηγές του ηλεκτρικού πεδίου και ότι η κατανομή και το μέγεθός τους ορίζουν το ηλεκτρικό πεδίο σε κάθε σημείο του χώρου.
- Ο νόμος του Gauss μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ναδειχθεί ότι δεν υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο μέσα σε μια περιοχή όπου απουσιάζουν ηλεκτρικά φορτία.[28,29,47]

3.2.2 Εξίσωση 2^η



Εικόνα 3.8: Νόμος του Gauss στο μαγνητικό πεδίο

Είναι ο νόμος του Gauss για το μαγνητικό πεδίο. Η πρώτη παρατήρηση των μαγνητικών ιδιοτήτων της ύλης έγινε από τους αρχαίους Έλληνες που τις παρατήρησαν σε ορυκτά της περιοχής Μαγνησίας στην Ιωνία.

- **Διατύπωση:** η μαγνητική ροή που διέρχεται μέσα από μια κλειστή επιφάνεια είναι πάντοτε μηδέν

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (3.22)$$

- **Η διαφορική μορφή** θα είναι:

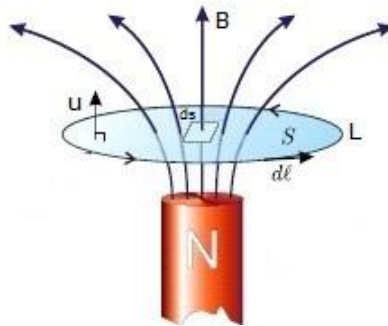
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.23)$$

- **Φυσική σημασία:** Ο νόμος του Gauss για το μαγνητισμό είναι συνέπεια του γεγονότος ότι οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές είναι κλειστές (αφού δεν υπάρχουν μαγνητικά μονόπολα ακόμα και σε υποατομικό επίπεδο) (Εικόνα 3.8). Αυτό ισχύει και στα επίπεδα κύματα, στην περίπτωση αυτή η κλειστή διαδρομή έχει άπειρη ακτίνα. Η απόκλιση των \vec{B} και \vec{H} είναι πάντα μηδέν σε κάθε όγκο. [28,29,47]

3.2.3 Εξίσωση 3η

Είναι ο νόμος του Faraday-Henry ή νόμος της επαγωγής

- **Διατύπωση:** Ένα μαγνητικό πεδίο που μεταβάλλεται με τον χρόνο δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο, τέτοιου ώστε η κυκλοφορία του (αλλιώς, η ηλεκτρεγερτική δύναμη) κατά μήκος ενός αυθαίρετου κλειστού δρόμου, να ισούται με τον (αρνητικό) ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής μέσα από μια επιφάνεια που ορίζεται από τον δρόμο.



Εικόνα 3.9: Ηλεκτρικό πεδίο από επαγωγή

$$\mathcal{E}_{\text{επ}} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (3.24)$$

- Σε διαφορική μορφή γράφεται

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.25)$$

- **Απόδειξη:** Η συνολική μαγνητική ροή Φ_B είναι το ολοκλήρωμα της μαγνητικής επαγωγής B του πεδίου στην επιφάνεια που περικλείεται από το μεταλλικό δακτύλιο:

$$\Phi_B(t) = \int_S B(t) dS \quad (3.26)$$

Η συνολική ΗΕΔ που επάγεται στον αγωγό ισούται με το άθροισμα των ΗΕΔ που επάγονται σε κάθε σημείο του αγωγού:

$$\mathcal{E}_{\text{επ}} = \oint_{\text{κύκλωμα}} d\mathcal{E}_{\text{επ}} \quad (3.27)$$

$d\mathcal{E}_{\text{επ}}$ είναι οι συνεισφορές κάθε σημείου του κυκλώματος

Επειδή είναι γνωστή η σχέση μεταξύ διαφοράς δυναμικού και έντασης μεταξύ δυο σημείων σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο

$$V = \int E \cdot dl \quad (3.28)$$

Και η Εεπ έχει διαστάσεις διαφοράς δυναμικού η σχέση γίνεται:

$$E_{επ} = \int_{\text{κύκλωμα}} E \cdot dl \quad (3.29)$$

Εφαρμόζοντας το θεώρημα του Stokes

$$\oint_{\text{κύκλωμα}} \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{\nabla} \times \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (3.30)$$

Από τις σχέσεις (25) και (31) έχουμε:

$$\int_S \vec{\nabla} \times \vec{E} \cdot d\vec{S} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B}(t) \cdot d\vec{S} = \int_S \frac{-d\vec{B}(t)}{dt} \cdot d\vec{S} \quad (3.31)$$

Άρα:

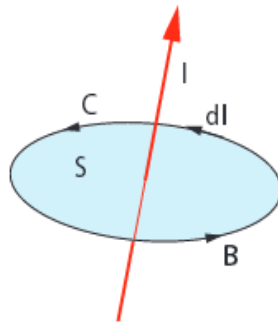
$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}(t)}{\partial t} \quad (3.32)$$

Με τον τρόπο αυτό παίρνουμε την τελική μορφή του νόμου του Faraday όπως καταγράφεται στις εξισώσεις Maxwell

- **Φυσική σημασία:** Μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργεί μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο. [28, 29, 47]

3.2.4 Εξίσωση 4η

Πρόκειται για το νόμο Ampere-Maxwell. Ο νόμος του Ampere συσχετίζει ένα ηλεκτρικό ρεύμα με το μαγνητικό πεδίο που παράγει.



Εικόνα 3.10: Μαγνητικό πεδίο γύρω από ηλεκτρικό ρεύμα

Περιγράφει τη σχέση ανάμεσα την πηγή του μαγνητικού πεδίου και στο πεδίο. Χρησιμοποιεί τη γεωμετρική έννοια «κλειστή γραμμή» και τις έννοιες της Φυσικής «ένταση ρεύματος», ολοκλήρωμα $B \cdot dl$ και σταθερά μαγνητικής διαπερατότητας, μ_0 . Αν θεωρήσουμε ότι η κλειστή γραμμή είναι κύκλος ακτίνας r και οι αγωγοί διέρχονται από το κέντρο του κύκλου και κάθετα προς το επίπεδό τους τότε ο νόμος του Ampere είναι:

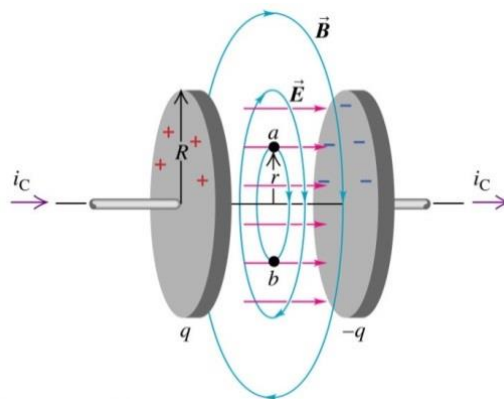
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I \quad (3.33)$$

Το I συμβολίζει το άθροισμα όλων των ρευμάτων που περνάνε μέσα από την κλειστή γραμμή. B είναι η μαγνητική επαγωγή του πεδίου που δημιουργείται γύρω από τους αγωγούς.

Διατύπωση : Ο νόμος του Ampere με την προσθήκη του Maxwell δηλώνει ότι τα μαγνητικά πεδία μπορούν να δημιουργηθούν με δύο τρόπους:

- i) με ηλεκτρικό ρεύμα (αυτός ήταν ο αρχικός «νόμος του Ampere» σχέση 3.33) και
- ii) με μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία (αυτή ήταν η "προσθήκη του Maxwell").

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} = \mu_0 (I + I_E) \quad (3.34)$$



Εικόνα 3.11: Δημιουργία μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου στο χώρο μεταξύ οπλισμών πυκνωτή

Ο δεύτερος όρος στην 4η εξίσωση είναι συνεισφορά του Maxwell και αποτελεί το ρεύμα μετατόπισης I_E .

$$I_E = \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (3.35)$$

Το ρεύμα μετατόπισης δεν συνεπάγεται κίνηση φορέων ρεύματος (όπως στην περίπτωση ενός αγωγού) αλλά μάλλον τον σχηματισμό ηλεκτρικών διπόλων (διηλεκτρική πόλωση).

• **Η διαφορική μορφή του νόμου του Ampere:** Από τη σχέση (3.33) αν χρησιμοποιήσουμε το θεώρημα του Stokes έχουμε:

$$I \varepsilon \pi = \frac{1}{\mu_0} \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \frac{1}{\mu_0} \oint (\vec{\nabla} \times \vec{B}) \cdot d\vec{S} \quad (3.36)$$

Μπορούμε επίσης να γράψουμε το συνολικό επαγωγικό ρεύμα $I \varepsilon \pi$ ως το επιφανειακό ολοκλήρωμα της πυκνότητας ρεύματος (J).

$$I \varepsilon \pi = \int_s \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad (3.37)$$

Επομένως η σχέση (3.36) γίνεται:

$$\frac{1}{\mu_0} \oint (\vec{\nabla} \times \vec{B}) \cdot d\vec{S} = \int_s \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad (3.38)$$

Ο νόμος του Ampere μπορεί να γραφεί:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \quad (3.39)$$

όπου το διάνυσμα \vec{J} είναι η πυκνότητα του ελεύθερου ηλεκτρικού ρεύματος.

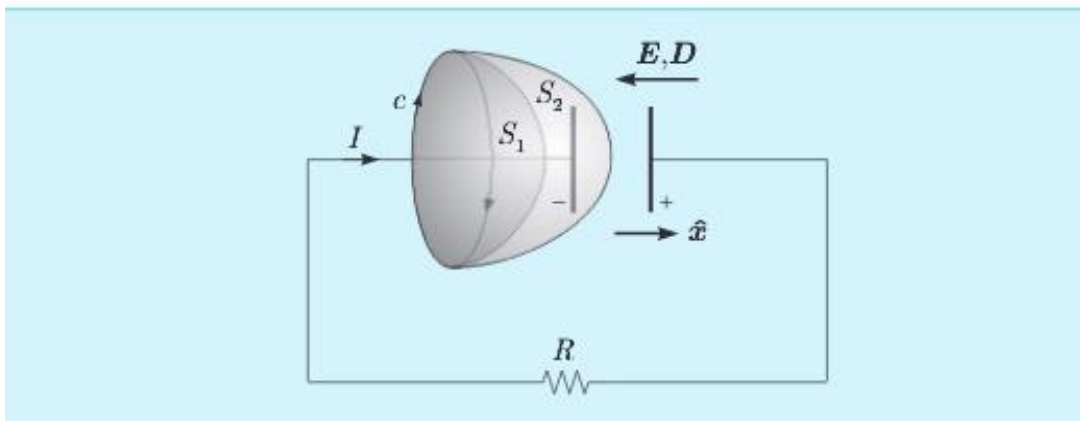
- **Ερμηνεία της 4^{ης} εξίσωσης του Maxwell**

Όπως γνωρίζουμε η απόκλιση του στροβιλισμού οποιοδήποτε διανύσματος είναι μηδέν. Άρα από τη σχέση (3.39):

$$\vec{\nabla}(\vec{\nabla} \times \vec{B}) = \mu_0 \vec{\nabla} \vec{J} = 0 \quad (3.40)$$

$$\vec{\nabla} \vec{J} = 0 \quad (3.41)$$

Η εξίσωση (3.41) μας λέει ότι η απόκλιση του ρεύματος πυκνότητας είναι πάντα μηδέν. Αν ίσχυε αυτό θα έπρεπε το ηλεκτρικό ρεύμα που εισέρχεται σε μια περιοχή να είναι ίσο με το ηλεκτρικό ρεύμα που εξέρχεται από την περιοχή για να μην υπάρχει απόκλιση. Αυτό δεν ισχύει στην περίπτωση που φορτίζεται ή εκφορτίζεται πυκνωτής που αποτελεί μέρος ενός κλειστού κυκλώματος. Τότε δεν μπορεί να κυκλοφορήσει ρεύμα αγωγιμότητας μεταξύ των οπλισμών. Όπως γνωρίζουμε όμως από τη θεωρία όταν το δυναμικό δεν είναι σταθερό υπάρχει ροή ρεύματος στον πυκνωτή



Εικόνα 3.12: Ρεύμα μετατόπισης κατά την εκφόρτιση πυκνωτή

Αν ελέγξουμε την απόκλιση του ρεύματος πυκνότητας στον αγωγό που περικλείεται από την επιφάνεια s_1 (σχ.3.12) η απόκλιση είναι μηδέν επειδή όσο ρεύμα εισέρχεται στον αγωγό τόσο ρεύμα εξέρχεται, σε αντίθεση με την πλάκα που περικλείεται από την επιφάνεια s_2 όπου ενώ εισέρχεται ρεύμα στον οπλισμό δεν εξέρχεται ρεύμα στον αέρα. Έτσι η απόκλιση είναι διαφορετική από το μηδέν. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την εξίσωση (42). Στο σημείο αυτό υπήρξε η παρέμβαση του Maxwell ο οποίος γνώριζε ότι υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο E και πυκνότητα ηλεκτρικής ροής $(5), D$ στον πυκνωτή. Γνώριζε επίσης ότι ένα μεταβαλλόμενο χρονικά μαγνητικό πεδίο δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο (από το νόμο του Faraday σχέση 3.32.) Γιατί λοιπόν ένα χρονικά μεταβαλλόμενο πεδίο D να μη δημιουργεί μαγνητικό πεδίο.

Ο Maxwell ονόμασε τον όρο αυτό πυκνότητα ρεύματος μετατόπισης : [28]

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J}_d \quad (3.42)$$

Η εισαγωγή του όρου αυτού τακτοποιεί το πρόβλημα στο κύκλωμα της εικόνας και έκανε περισσότερο συμμετρικούς τους νόμους Faraday και Ampere. Αυτή ήταν η μεγάλη

συνεισφορά του Maxwell. Έτσι αν προσθέσουμε το ρεύμα μετατόπισης στο νόμο του Ampere παίρνουμε την τελική μορφή του:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \vec{J}_d \quad (3.43)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.44)$$

• **Φυσική σημασία:** Ο νόμος αυτός λέει ότι εκτός από το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το ηλεκτρικό ρεύμα υπάρχει και το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το ρεύμα μετατόπισης, όπως από το μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των οπλισμών πυκνωτή. Ο χώρος μεταξύ δυο οπλισμών πυκνωτή που φορτίζονται συμπεριφέρεται με παρόμοιο τρόπο με το χώρο γύρω από έναν αγωγό που μεταφέρει ηλεκτρικό ρεύμα. Ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο χωρίς να είναι απαραίτητη η ύπαρξη ηλεκτρικού ρεύματος αγωγιμότητας. Αυτό με τη σειρά του δημιουργεί ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργεί ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό κ.ο.κ. Τα πεδία αυτά διαδίδονται στο κενό με την ταχύτητα του φωτός. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μπορεί να «αυτοσυντηρηθεί» χωρίς να χρειάζεται την ύπαρξη της αρχικής πηγής του, του φορτίου και του ρεύματος. Η αναγνώριση από τον Maxwell του γεγονότος ότι ένα ρεύμα μετατόπισης σε ένα διηλεκτρικό δημιουργεί μαγνητικά φαινόμενα ισοδύναμα με αυτά που δημιουργούνται από ένα συνηθισμένο ρεύμα αγωγιμότητας αποτελεί τη βάση της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας του φωτός. [28, 29, 47]

3.3 Το φως ως συνέπεια των εξισώσεων Maxwell

Οι εξισώσεις του Maxwell αποτελούν ένα σύνολο συζευγμένων πρωτοβάθμιων μερικών διαφορικών εξισώσεων ως προς τα πεδία E και B. Μπορούν να αποσυζευχθούν εύκολα, θεωρώντας περιοχές του χώρου (κενό), όπου δεν υπάρχουν πηγές και εφαρμόζοντας το στροβιλισμό στους νόμους Faraday και Ampère. [11,23,28,29,19,38]

Στο νόμο Faraday: $\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = \vec{\nabla} \times \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right)$ (3.45)

ή $\vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t}(\vec{\nabla} \times \vec{B})$ (3.46)

Στο νόμο Ampere: Από τις σχέσεις (3.5) και (3.44) έχουμε:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3.47)$$

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{B}) = \vec{\nabla} \times \left(\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\right) \quad (3.48)$$

$$\vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{B}) - \nabla^2 \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t}(\vec{\nabla} \times \vec{E}) \quad (3.49)$$

Από τις εξισώσεις (3.46) και (3.47) έχουμε

$$0 - \nabla^2 \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t}(\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}) \Leftrightarrow \nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (3.50)$$

Από τις εξισώσεις (3.32) και (3.49) έχουμε:

$$0 - \nabla^2 \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) \Rightarrow \nabla^2 \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (3.51)$$

Οι εξισώσεις (3.50) και (3.51) συμφωνούν με την εξίσωση του κύματος σε τρεις διαστάσεις

$$\nabla^2 \mathbf{y} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{y}}{\partial t^2} \quad (3.52)$$

Στις συναρτήσεις αυτές η ποσότητα $\mu_0 \epsilon_0$ είναι ίση με την $1/c^2$, όπου c η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος :

$$\text{Συνεπώς:} \quad c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}} = 299,792,458 \text{ m/s} \quad (3.53)$$

από τις οποίες συμπεραίνεται ότι τόσο το μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο όσο και το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο διαδίδονται με μηχανισμό κύματος. Η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος ήταν περίπου ίση με την γνωστή την εποχή εκείνη ταχύτητα του φωτός όπως την υπολόγισε ο M. Foucault 298.000.000 m/s.

3.4 Οι λύσεις των εξισώσεων Maxwell

Οι απλούστερες λύσεις στις διαφορικές εξισώσεις, όταν το κύμα διαδίδεται κατά τη διεύθυνση x , είναι ημιτονοειδείς κυματοσυναρτήσεις:[47]
για το κύμα του ηλεκτρικού πεδίου

$$E(x, t) = E_0 \sin(\omega t - kx) \hat{j} \quad (3.54)$$

$$E = E_0 \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \quad (3.55)$$

και για το κύμα του μαγνητικού πεδίου.

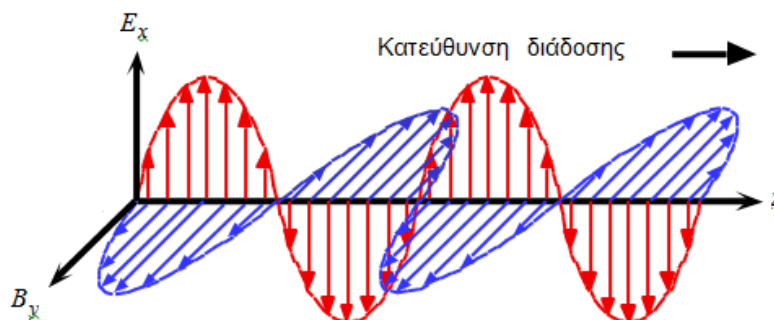
$$B(x, t) = B_0 \sin(\omega t - kx) \hat{k} \quad (3.56)$$

ή

$$B = B_0 \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \quad (3.57)$$

$K=2\pi/\lambda$ είναι ο κυματάριθμος

Στην εικόνα 3.14 φαίνεται η γραφική παράσταση των εξισώσεων αυτών, που αναπαριστούν

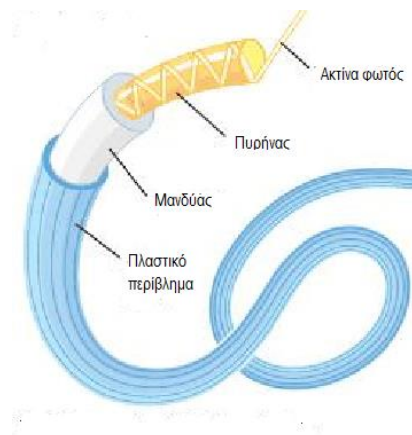


Εικόνα 3.13: Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο

το διαδιδόμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα με χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδία που είναι κάθετα το ένα προς το άλλο και προς την διεύθυνση διάδοσης z . [23, 29].

4.ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ

Οι οπτικές ίνες είναι το πιο προηγμένο, από τεχνολογικής πλευράς, φυσικό μέσο που χρησιμοποιείται στις τηλεπικοινωνίες και σε διαφόρων τύπων δίκτυα για τη μετάδοση σημάτων και πληροφοριών. [34]. Η οπτική ίνα είναι ένας διηλεκτρικός κυματοδηγός ο οποίος αποτελείται από πολύ λεπτά νήματα από πλαστικό ή γυαλί υψηλής καθαρότητας όπου από μέσα τους, μεταδίδονται ψηφιακά δεδομένα, υπό μορφή φωτός. Οι οπτικές ίνες έχουν την ιδιότητα να εγκλωβίζουν τις φωτεινές ακτίνες του οπτικού φάσματος (υπέρυθρου ή ορατού) και να τις οδηγούν προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση με την ταχύτητα του φωτός. Γι' αυτό λέμε ότι μία οπτική ίνα είναι ένας φωτοαγωγός ή φωτοοδηγός. Με τις ακτίνες λέιζερ, ένα σήμα μπορεί να μεταδοθεί δια μέσου οπτικών ινών σε απόσταση μεγαλύτερη από 50 χλμ



Εικόνα 4.1: Δομή οπτικής ίνας

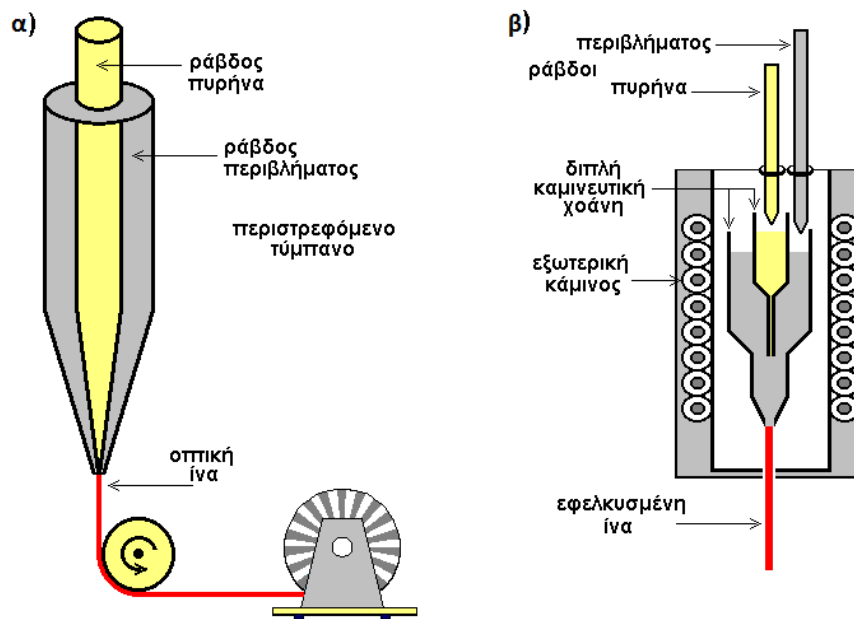
4.1 Δομή της οπτικής ίνας

Κάθε οπτική ίνα αποτελείται από εξής τρία μέρη (εικόνα 4.1):

- Την κεντρική γυάλινη κυλινδρική ίνα, που ονομάζεται πυρήνας και είναι το τμήμα στο οποίο διαδίδεται το φως. Ο πυρήνας μπορεί να είναι από γυαλί ή πλαστικό. Το γυαλί έχει μικρότερη απόσβεση, είναι όμως ακριβότερο και πιο εύθραυστο.
- Το μανδύα που είναι ένας ομόκεντρος με τον πυρήνα γυάλινος κύλινδρος που έχει μικρότερο δείκτη διάθλασης από τον πυρήνα λόγω της διαφορετικότητας του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο. Ο μανδύας, περιβάλλει την οπτική ίνα και κρατάει το φως στον πυρήνα, εμποδίζοντας το σήμα να διασκορπιστεί και να χάσει την ισχύ του.
- Το περίβλημα, που είναι ένα αδιαφανές εξωτερικό προστατευτικό υλικό πλαστικό που περιβάλλει τον μανδύα και προστατεύει την ίνα από τους περιβαλλοντικούς κινδύνους

Ο τρόπος αναφοράς των μεγεθών για τις οπτικές ίνες είναι να αναφέρουμε πρώτα τη διάμετρο του πυρήνα και στη συνέχεια τη διάμετρο του μανδύα. Οι μετρήσεις των παραπάνω μεγεθών γίνονται σε 10^{-6} μέτρα (μm , μικρόμετρα). [11,3,5,6].

4.2 Μέθοδοι Παραγωγής Οπτικών Ινών



Εικόνα 4.2: α. Μέθοδος Ράβδου - Σωλήνα – β. Μέθοδος διπλής χοάνης

Στην περίπτωση ινών για οπτικές εφαρμογές, η βασική τεχνική παραγωγής βασίζεται στη μέθοδο του Ράβδου-Σωλήνα (εικ.4.2, περίπτωση α), όπου μπορεί ταυτόχρονα να εφελκυστεί ένα ζεύγος συστατικών με διαφορετικούς δ.δ. Χημική αντίδραση σε κατάλληλη θερμοκρασία του κλιβάνου δίνει τη μορφή της ίνας. Πρόκειται για ένα γυάλινο κύλινδρο μήκους 0.5-2m, από τον οποίο στη συνέχεια προέρχεται ένα κομμάτι συνεχούς οπτικής ίνας μήκους μερικών χιλιομέτρων. Η μορφή τοποθετείται σε κατακόρυφη θέση σε «πύργο» όπου η άκρη της αρχίζει σε κατάλληλη θερμοκρασία να λιώνει. Από αυτήν την άκρη γίνεται ο εφελκυσμός της ίνας από ένα περιστρεφόμενο τύμπανο ελεγχόμενης ταχύτητας.

Η μέθοδος της διπλής χοάνης (εικ.4.2, περίπτωση β) χρησιμοποιείται σε ίνες, που προσδιορίζονται για τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές. Σε αυτές τις εφαρμογές απαιτείται η βαθμιαία κατανομή του δ.δ μέσα στον πυρήνα (graded-index). Η πρώτη χοάνη περιέχει το υλικό του πυρήνα και τοποθετείται μέσα στη δεύτερη που περιέχει το υλικό περιβλήματος. Τα υλικά τήκονται στην κάμινος. Τα στόμια και των δυο χοανών βρίσκονται στην ίδια κατακόρυφο και καθώς το υλικό του πυρήνα ρέει προς τα κάτω (εξ αιτίας της βαρύτητας) συμπαρασύρει και το υλικό του περιβλήματος, δημιουργώντας την ίνα. Στις γυάλινες οπτικές ίνες, ως βασικό υλικό παραγωγής χρησιμοποιείται το οξειδίο του πυριτίου (SiO_2). Η διοχέτευση και καύση μίγματος οξυγόνου, αλογονιδίου του πυριτίου και άλλων προσμίξεων παράγουν μίγμα οξειδίων, που επικάθεται στο SiO_2 δημιουργώντας ένα είδος πηλού (πρόπλασμα). Το πρόπλασμα τήκεται μαζί με τα άλλα συστατικά και εφελκύεται ταυτόχρονα με την ίνα. Το ανάγλυφο του προπλάσματος αποτελείται από λεπτές επιστρώσεις προοδευτικά μεταβαλλόμενης συγκέντρωσης των προσμίξεων έτσι ώστε να επιτυγχάνεται βαθμιαία κατανομή του δ.δ στον πυρήνα της ίνας.

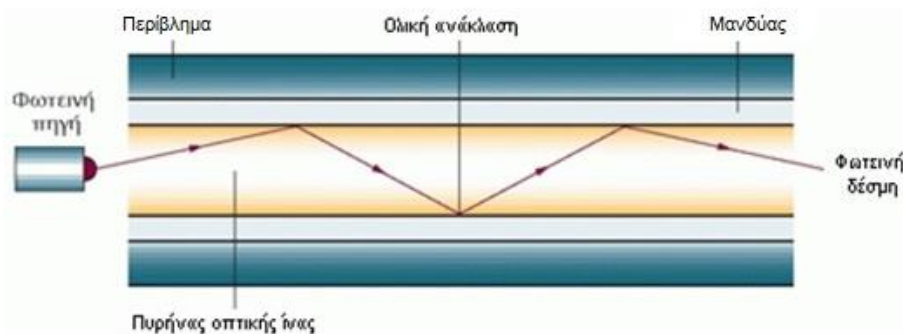
Σήμερα κατασκευάζονται ίνες με απόσβεση 0,2 dB/km. Κατασκευάζονται όμως και φτηνότερες ίνες με απόσβεση 500 έως 1000 dB/km για μικρές αποστάσεις.[6,8,26].

4.3 Λειτουργία των οπτικών ινών

Η λειτουργία των οπτικών ινών στηρίζεται στο φαινόμενο της ολικής ανάκλασης. Τα κύματα φωτός, ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός μέσα από την οπτική ίνα, με διαδοχικές ολικές ανακλάσεις στα τοιχώματα της οπτικής ίνας, στην επιφάνεια διαχωρισμού πυρήνα - μανδύα. Έτσι φθάνουν μέχρι το άλλο άκρο, χωρίς να βγαίνουν έξω από την ίνα. Μία αντιπροσωπευτική τιμή δείκτη διάθλασης για το γυαλί είναι $n_1=1,5$. Θεωρώντας τον δείκτη διάθλασης του αέρα $n_2=1$, μπορούμε να υπολογίσουμε την οριακή γωνία στη γυάλινη ράβδο, από το νόμο του Snell:

$$\sin\theta_{ορ} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1,0}{1,5} = 0,66 \quad (4.1)$$

$$\theta_{ορ} = 42^\circ \quad (4.2)$$



Εικόνα 4.3: Διάδοση φωτεινής ακτίνας στην οπτική ίνα

Επομένως το φως θα ταξιδεύει μέσα στη γυάλινη ράβδο, χωρίς απώλειες, όσο οι κάμψεις της είναι περιορισμένες για να διατηρούνται οι γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες των 42° . Έτσι η συνολική φωτεινή ενέργεια παραμένει εγκλωβισμένη στο εσωτερικό της οπτικής ίνας, με αποτέλεσμα ένα αποστελλόμενο φωτεινό σήμα να μπορεί να διανύσει πολύ μεγάλες αποστάσεις με ελάχιστες απώλειες σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο μέσο μετάδοσης. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα να διαδίδονται πολλές διαφορετικές ακτίνες αρκεί να στέλλονται με διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης αρκεί η γωνία αυτή να είναι μεγαλύτερη της οριακής. [11,3,5,6].

4.4 Ταξινόμηση των οπτικών ινών

Το φως μπορεί να ακολουθήσει διάφορες διαδρομές στον πυρήνα της ίνας. Κάθε διαδρομή έχει διαφορετικό μήκος και λέμε ότι αποτελεί διαφορετικό τρόπο διάδοσης. Ανάλογα με τη διάμετρο του πυρήνα και, από τον τρόπο μετάδοσης του σήματος σε αυτές, οι οπτικές ίνες διακρίνονται σε: [3,5,6].

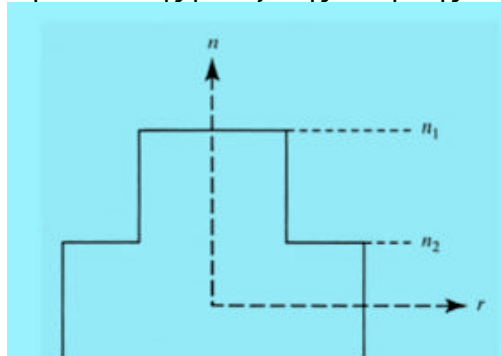
- Μονότροπες ή μονοτροπικές (Single mode-SMF)
- Πολύτροπες ή πολυτροπικές (Multi mode-MMF).

Οι οπτικές ίνες ανάλογα με το τρόπο μεταβολής του δείκτη διάθλασης του πυρήνα, κατά μήκος μιας διαμέτρου του διακρίνονται σε:

- Ίνες βηματικού δείκτη διάθλασης (step index fiber).
- Ίνες διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης (graded index fiber)

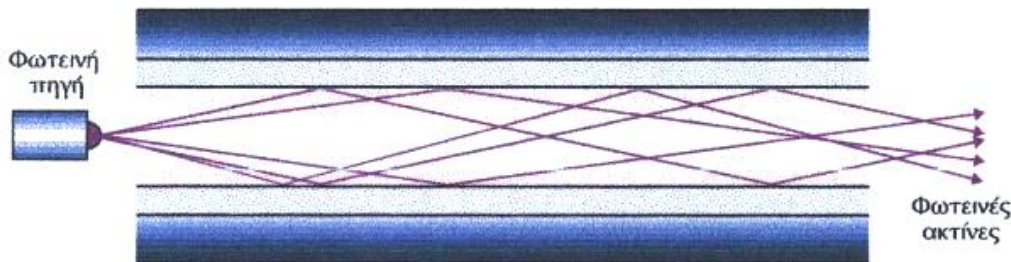
4.4.1 Ίνες βηματικού δείκτη διάθλασης (step index fiber)

Είναι οι ίνες που έχουν ομοιόμορφο πυρήνα με σταθερό δείκτη διάθλασης n_1 και ομοιόμορφο μανδύα με μικρότερο δείκτη διάθλασης n_2 (εικ.4.4). Στις ίνες αυτές συμβαίνει απότομη μεταβολή του δείκτη διάθλασης μεταξύ της κεντρικής ίνας και του μανδύα. Στο



Εικόνα 4.4: Μεταβολή του δ.δ. κατά μήκος τομής οπτικής ίνας βηματικού δ.δ

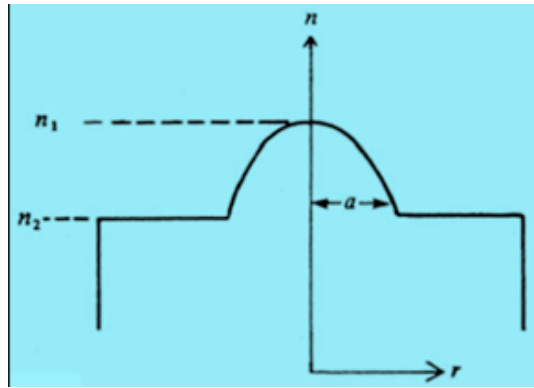
σχήμα 4.5 φαίνεται η πορεία των ακτίνων στις ίνες αυτές. Έχουν διαστάσεις διαμέτρου πυρήνα 50 μm και 62.5 μm και εξωτερική διάμετρο της ίνας 125 μm . Η εξασθένηση για τις ίνες βηματικού δείκτη διάθλασης είναι 10-50 db ανά χιλιόμετρο. Είναι οι πιο απλές και φθηνές οπτικές ίνες για εφαρμογές που δεν έχουν μεγάλες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης.



Εικόνα 4.5: Οπτική ίνα βηματικού δείκτη διάθλασης

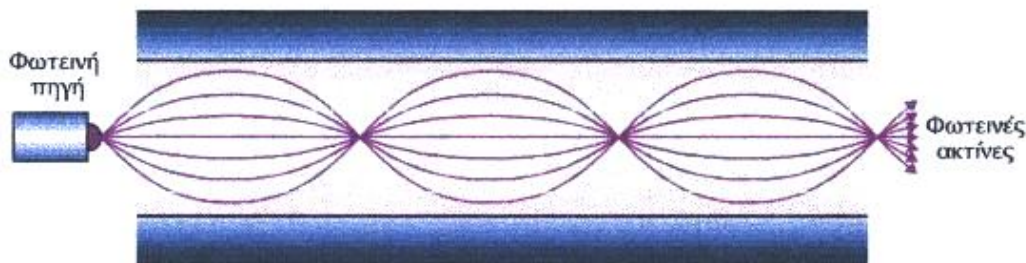
4.4.2 Ίνες διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης (graded index fiber)

Στις ίνες διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης, η ίνα περιβάλλεται από ένα περίβλημα με δείκτη διάθλασης μικρότερο από εκείνο του πυρήνα. Ο δείκτης διάθλασης του μανδύα είναι σταθερός n_1 , ενώ στον πυρήνα ελαττώνεται βαθμιαία από το κέντρο στην περιφέρεια (εικ.4.6). Η διαφορά αυτή στο δείκτη διάθλασης αναγκάζει τις ακτίνες να φθάσουν ταυτόχρονα στην άλλη άκρη της οπτικής ίνας, παρόλο που η κάθε μια διανύει διαφορετική απόσταση. (εικ.4.7). Οι συνηθισμένες διαστάσεις για τις ίνες διαβαθμισμένου δείκτη είναι διάμετρος πυρήνα 50 μm ή 62.5 μm και διάμετρος μανδύα 125 μm .



Εικόνα 4.6: Μεταβολή του δ.δ. κατά μήκος τομής οπτικής ίνας διαβαθμισμένου δ.δ

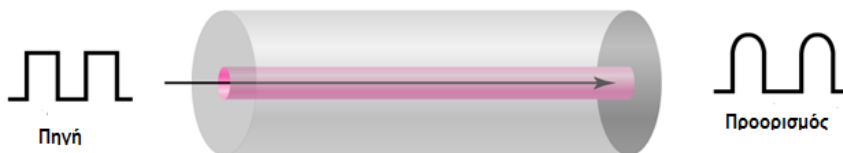
Η εξασθένιση για τις ίνες διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης είναι 7-15 db ανά χιλιόμετρο. Οι ίνες αυτές χρησιμοποιούνται σε δίκτυα υπολογιστών και σε εφαρμογές που απαιτούν μεγάλο εύρος ζώνης.



Εικόνα 4.7: Η πορεία των ακτίνων σε οπτική ίνα διαβαθμισμένου δ.δ.

4.4.3. Μονότροπες (μονοτροπικές) οπτικές ίνες (single - mode)

Οι μονότροπες οπτικές ίνες είναι ίνες βηματικού δείκτη διάθλασης. Έχει αποδειχθεί πως όσο μικρότερη είναι η διάμετρος του πυρήνα, τόσο λιγότεροι τρόποι μετάδοσης υπάρχουν. Όταν αυτή η διάμετρος μειωθεί και γίνει παραπλήσια με το μήκος κύματος του οπτικού σήματος, απομένει μόνο ένας τρόπος μετάδοσης, ο αξονικός. Στις μονότροπες οπτικές ίνες, τα κύματα φωτός προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνεια της διατομής των οπτικών ινών, ταξιδεύουν σε ευθεία γραμμή μόνο κατά μήκος του άξονα του πυρήνα και μπορούμε να στείλουμε δεδομένα σε μεγάλες αποστάσεις.



Εικόνα 4.8: Μονότροπη οπτική ίνα

Οι μονότροπες οπτικές ίνες έχουν πυρήνες διάμετρου από 5μm έως 10μm με συνηθέστερη τιμή τα 8,3 μm, και η εξωτερική διάμετρος της ίνας είναι 125 μm..(εικ.4.8) Επειδή απαιτείται συγκέντρωση φωτός μεγάλης έντασης σε πυρήνα μικρής διαμέτρου, ως πηγή φωτός

χρησιμοποιούνται Laser. Η μονότροπη ίνα είναι η καταλληλότερη για ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων και εκεί όπου απαιτούνται υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης. Η μονότροπη χρειάζεται επαναλήπτη κάθε 8 έως 150 χλμ. Οι μονότροπες οπτικές ίνες είναι δύσχρηστες, λόγω των μικρών διαστάσεων αλλά σε αυτές ανήκει το μέλλον. [11,3,5,6].

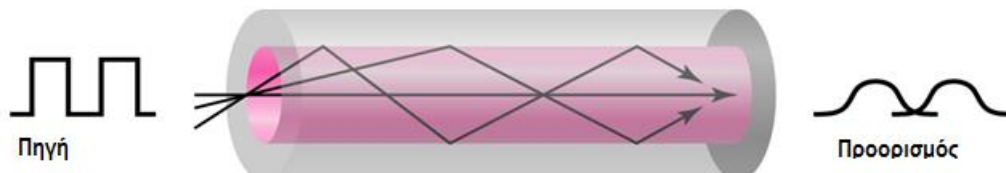
4.4.4 Πολύτροπες (πολυτροπικές) οπτικές ίνες

Οι πολύτροπες οπτικές ίνες έχουν πυρήνα μεγαλύτερης διαμέτρου και επιτρέπουν πολλούς τρόπους μετάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ταυτόχρονα. Η αρχή μετάδοσης σε πολύτροπη οπτική ίνα είναι ότι οι διάφορες ακτίνες του οπτικού σήματος ανάλογα με την είσοδο τους στην οπτική ίνα ταξιδεύουν ακολουθώντας διαφορετικούς δρόμους, ανακλώμενες υπό διαφορετικές γωνίες. Αυτός ο τρόπος μετάδοσης ονομάζεται πολυτροπικός (multimode) και οι τρόποι μετάδοσης, αντιστοιχούν στις διαφορετικές γωνίες ανάκλασης. Οι πολύτροπες οπτικές ίνες έχουν τυπικά μεγέθη 50μm/125μm, που χρησιμοποιείται κυρίως σε στρατιωτικές εφαρμογές, 62,5/125, που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση δεδομένων και βίντεο σε χαμηλή και μέτρια ταχύτητα, 85/125 ή 100/140 που έχει πια λίγες εφαρμογές. Ο συνηθέστερος τύπος, ο οποίος κυκλοφορεί, είναι ο 62,5/125. Η ολική διάμετρος της οπτικής ίνας συμπεριλαμβανομένων των ενισχυτικών συνθετικών ινών και του εξωτερικού περιβλήματος φτάνει τα 900μm [3,5,6,21].

Οι πολύτροπες οπτικές ίνες διακρίνονται σε:

4.4.4.1 Πολύτροπες ίνες βηματικού δείκτη διάθλασης (step index fiber).

Όταν είναι γνωστοί οι δείκτες διάθλασης του πυρήνα, του μανδύα και του αέρα μπορούμε να βρούμε τη μέγιστη γωνία πρόσπτωσης, για να έχουμε εγκλωβισμό της ακτίνας στον πυρήνα.

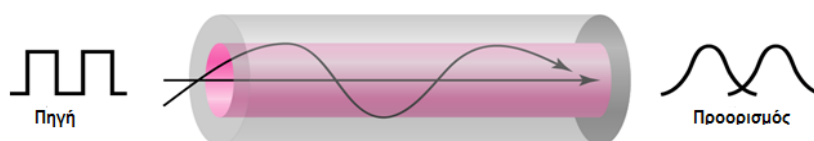


Εικόνα 4.9: Η κυματοδήγηση σε μια πολύτροπη ίνα βηματικού δ.δ.

Επειδή ο κάθε τρόπος μετάδοσης έχει διαφορετικό μήκος, η κάθε ακτίνα φτάνει σε διαφορετικό χρόνο στην άλλη άκρη της οπτικής ίνας (εικ.4.9). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική παραμόρφωση του σήματος. Ακτίνες φωτός που προσπίπτουν στην επιφάνεια επαφής πυρήνα - μανδύα με ακραίες γωνίες μικρότερες από την κρίσιμη γωνία εισέρχονται στο μανδύα όπου απορροφώνται, γιατί τα υλικά του έχουν μεγάλη απόσβεση και αυτό επιφέρει κάποια πρόσθετη εξασθένηση στο φωτεινό σήμα. Οι πολύτροπες χρειάζονται επαναλήπτες κάθε λίγα χιλιόμετρα και θεωρούνται ξεπερασμένες

4.4.4.2 Ίνες διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης (graded index fiber)

Οι ίνες διαβαθμισμένου δείκτη χρησιμοποιούν διαφορετικούς δείκτες διάθλασης στην ίνα. Αυτός ο σχεδιασμός αντισταθμίζει την τροπική διασπορά επιτρέποντας τις ακτίνες φωτός στις εξωτερικές ζώνες του πυρήνα να ταξιδεύουν γρηγορότερα από εκείνους που στο κέντρο του πυρήνα ώστε όλοι οι τρόποι να φθάνουν μαζί (εικ.4.10). Χρησιμοποιούνται συνήθως για τη μετάδοση δεδομένων σε απόσταση λίγων χιλιομέτρων



Εικόνα 4.10: Η κυματοδήγηση σε πολύτροπη ίνα κλιμακωτού δείκτη διάθλασης

Πίνακας 4.1 Είδη οπτικών ινών

Χαρακτηριστικά	Πολυτροπικές	Μονοτροπικές
Διάμετρος πυρήνα	50–100 μm	2–10 μm
Τρόποι Διάδοσης	Εκατοντάδες ή χιλιάδες	Μικρός αριθμός
Κατανομή του δ.δ	Βηματική ή βαθμιαία	Βηματική
Ποσοστό εξασθένησης	Υψηλό	Χαμηλό
Ποιότητα διάδοσης παλμών	Χαμηλή (λόγω διασποράς)	Υψηλή
Δυνατότητα σύζευξης	Εύκολη	Δύσκολη
Κόστος αγοράς	Χαμηλό	Υψηλό
Τεχνικές απαιτήσεις	Περιορισμένες	Υψηλές

4.5 Κυματοδήγηση – Θεώρηση Γεωμετρικής Οπτικής

Το “φως” είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με κυματικά αλλά και σωματιδιακά χαρακτηριστικά. Τα τελευταία γίνονται πιο έντονα όσο αυξάνει η συχνότητά του. Για να κατανοήσουμε τις βασικές αρχές στη διάδοση του οπτικού σήματος μέσω της οπτικής ίνας θα χρησιμοποιήσουμε τη γεωμετρική οπτική (σωματιδιακή προσέγγιση) όπου θεωρούμε το φως ως ακτίνες που διαδίδονται ευθύγραμμα. Τα δύο φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε μια τέτοια προσέγγιση είναι η ανάκλαση και η διάθλαση του φωτός (θεωρία των ακτινών). Αντίθετα για μια βαθύτερη ανάλυση της διάδοσης του φωτός στις οπτικές ίνες απαιτείται η αντιμετώπιση του φωτός ως H/M κύμα. Σε μια τέτοια προσέγγιση (κυματική προσέγγιση) λαμβάνουμε υπ’ όψη και άλλα φαινόμενα (θεωρία των τρόπων). [11,3,5,6].

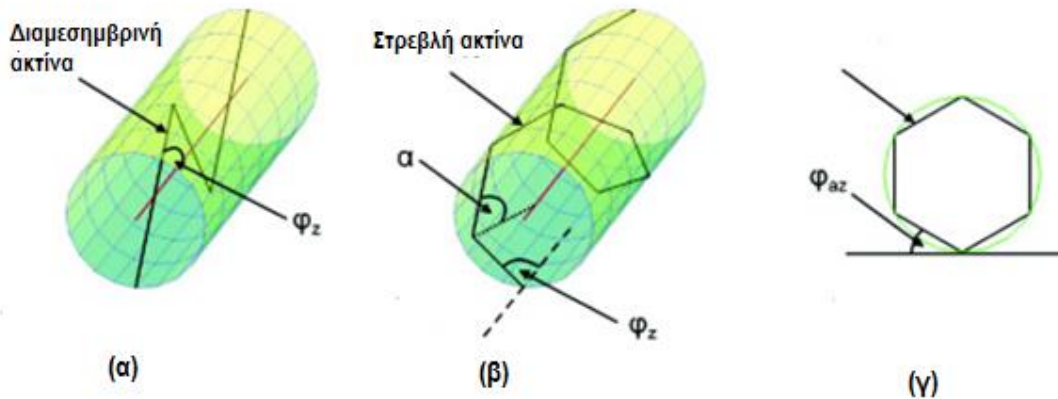
4.5.1 Η θεωρία ακτινών

Η θεωρία ακτινών ή γεωμετρική οπτική προσέγγιση, χρησιμοποιείται για να έχουμε μια καθαρή εικόνα της διάδοσης του φωτός μέσα στην οπτική ίνα. Η θεωρία αυτή είναι έγκυρη

όταν ο πυρήνας έχει ακτίνα a πολύ μεγαλύτερη από το μήκος κύματος λειτουργίας λ (πολύτροπες οπτικές ίνες). Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή δυο τύποι ακτινών διαδίδονται κατά μήκος του καλωδίου της οπτικής ίνας:

- Διαμεσημβρινές ακτίνες (Meridional Rays) που βρίσκονται σε επίπεδο που περιλαμβάνει τον άξονα συμμετρίας της ίνας
- Στρεβλές ακτίνες (skew rays) που διαδίδονται δια μέσω της ίνας χωρίς να περνούν δια μέσω του κεντρικού άξονα του πυρήνα.

Οι διαμεσημβρινές ακτίνες παραμένουν στο διαμεσημβρινό επίπεδο (εικ.4.11.α) ενώ οι στρεβλές εισέρχονται στην ίνα έξω από το διαμεσημβρινό επίπεδο (εικ. 4.11.β και γ).



Εικόνα 4.11: (α) Διαμεσημβρινές και (β) στρεβλές ακτίνες

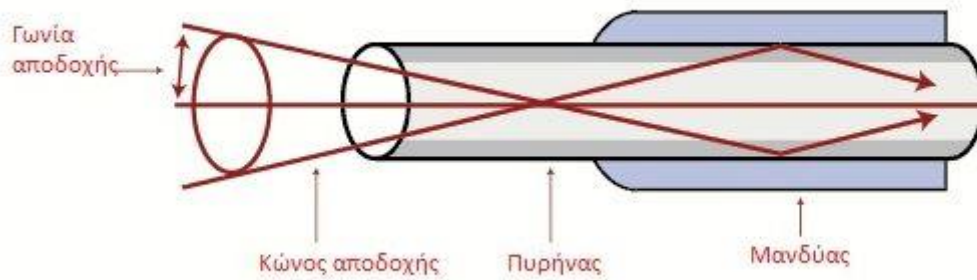
Οι διαμεσημβρινές ακτίνες ταξινομούνται σε:

- Κυματοδηγούμενες ακτίνες που διαδίδονται στον πυρήνα με ολική εσωτερική ανάκλαση και θεωρητικά διαδίδονται σε άπειρη απόσταση χωρίς απώλειες.
- Μη κυματοδηγούμενες ακτίνες που διαθλώνται από τον πυρήνα στο εσωτερικό του μανδύα και τελικά διαφεύγουν από το καλώδιο. [3,5,6].

4.5.1.1. Κυματοδηγούμενες ακτίνες.

Για να αποφευχθεί η δημιουργία μη κυματοδηγούμενων ακτίνων οι ακτίνες πρέπει να εισέρχονται στον πυρήνα με γωνία πρόσπτωσης ίση ή μεγαλύτερη από την οριακή γωνία. Οι γωνίες που δημιουργούν κυματοδηγούμενες ακτίνες βρίσκονται στο **κώνο αποδοχής** (εικόνα 4.12). Ο κώνος αποδοχής είναι ένας φανταστικός κώνος με μια γωνία 2α που καθορίζεται από την οριακή γωνία και ουσιαστικά εκφράζει την ικανότητα σύζευξης φωτός στην οπτική ίνα καθώς όλα τα κύματα που εισέρχονται στην οπτική ίνα δια μέσου αυτού του κώνου, μπορούν να διαδοθούν στην ίνα. Όλες οι ακτίνες που εισέρχονται στον πυρήνα με γωνία μικρότερη από τη μισή γωνία του κώνου αποδοχής (γωνία αποδοχής) χάνονται στο μανδύα. Για τη μέγιστη γωνία εισόδου α στον πυρήνα από τον αέρα για την οποία το ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει υπο οριακή γωνία στη διαχωριστική πυρήνα μανδύα ισχύει ο νόμος του Snell :

$$n_0 \sin \alpha = n_1 \left(\sin \frac{\pi}{2} - \theta_c \right) = n_1 \cos \theta_c \quad (4.3)$$



Εικόνα 4.12: Γωνία και κώνος αποδοχής

Οι ακτίνες λέιζερ συνήθως δεν έχουν απότομα όρια Η ένταση (ροή της ακτινοβόλου ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας κάθετα προς την κατεύθυνση της ροής της ακτινοβόλου ενέργειας) μέσω ενός μέσου πέφτει σταδιακά σε συνάρτηση με την απόσταση από το κέντρο της δέσμης. Έτσι μπορεί να θεωρηθεί ότι η ακτίνα έχει μια Gaussian κατανομή (εικόνα 4.13). Για το λόγο αυτό συνηθίζεται να ορίζουμε το **αριθμητικό άνοιγμα NA** για κάθε τύπο οπτικής ίνας που υπολογίζεται ως εξής:

Για τη γωνία a αντικαθιστώντας $\cos \theta_c$ με $\sin \theta_c$ από το νόμο του Snell έχουμε :

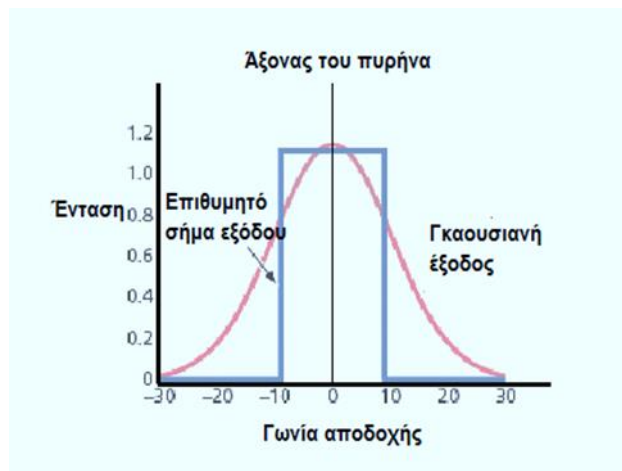
$$\frac{n_0}{n_1} \sin a = \cos \theta_c \quad (4.4)$$

για την οριακή γωνία ισχύει :

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (4.5)$$

Υψώνοντας στο τετράγωνο και τα δυο μέρη έχουμε:

$$\frac{n_0^2}{n_1^2} \sin^2 a = \cos^2 \theta_c = 1 - \sin^2 \theta_c = 1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}$$



Εικόνα 4.13. Κατανομή της έντασης σε συνάρτηση με τη γωνία αποδοχής

Λύνοντας τη σχέση έχουμε::

$$n_0 \sin a = n_2 \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{(n_1 + n_2)(n_1 - n_2)} \cong \sqrt{2n_1(n_1 - n_2)} \quad (4.6)$$

Άρα:

$$n_0 \sin a = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (4.7)$$

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (4.8)$$

είναι η κανονικοποιημένη μεταβολή του δείκτη διάθλασης
Η ποσότητα

$$NA = n_0 \sin a = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (4.9)$$

ονομάζεται αριθμητικό άνοιγμα της οπτικής ίνας . Η παράμετρος NA είναι μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους της οπτικής ίνας και ορίζει το ποσοστό σύζευξης της φωτεινής πηγής με την οπτική ίνα . Όσο μεγαλύτερη η NA τόσο πιο εύκολη η εισαγωγή του φωτός στην ίνα άρα μεγαλύτερη και η ποσότητα φωτός που μεταφέρεται με αυτήν. Στην καλύτερη περίπτωση (εξωτερικός χώρος είναι ο αέρας) τότε $n_0=1$, άρα το άνοιγμα NA δεν μπορεί να υπερβεί την τιμή της μονάδας και λαμβάνει τυπικές τιμές, που κυμαίνονται μεταξύ 0.2–1.0. Η σχέση αυτή ισχύει για όλα τα οπτικά συστήματα.

Στις οπτικές ίνες συνήθως χρησιμοποιούμε τη σχέση:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (4.10)$$

Σε ορισμένες περιπτώσεις ο NA για μονότροπες ίνες βασίζεται στη σχέση αυτή αν και η γωνία αποδοχής για μονότροπες ίνες είναι αρκετά διαφορετική και δεν μπορεί να καθορισθεί μόνο από τους συντελεστές διάθλασης.

Ο δείκτης διάθλασης για ίνες διαβαθμισμένου δείκτη δίνεται από τη σχέση:

$$n(r) = \begin{cases} n_1 [1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha]^{1/2} & (0 \leq r \leq a) \\ n_1 (1 - 2\Delta)^{1/2} & (r > a) \end{cases} \quad (4.11)$$

$n(r)$: είναι ο δείκτης διάθλασης της οπτικής ίνας σε απόσταση "r" από το κέντρο του πυρήνα.

Η ακτίνα r παίρνει τιμές μεταξύ 0 και a.

n_1 : είναι ο δείκτης διάθλασης στο κέντρο του πυρήνα

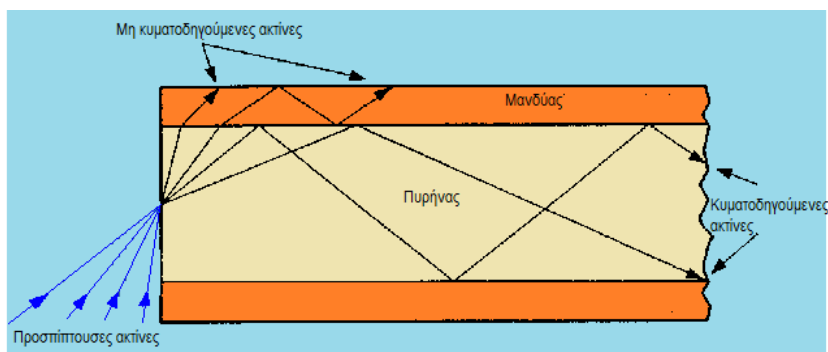
Δ : είναι η κανονικοποιημένη μεταβολή του δείκτη διάθλασης, του κέντρου του πυρήνα σε σχέση με τον δείκτη διάθλαση στο μανδύα

a: είναι η ακτίνα του πυρήνα.

Αν $\alpha = \infty$, ο τύπος ισχύει για οπτική ίνα βηματικού δείκτη [11,3,5,6,8].

4.5.1.2 Μη κυματοδηγούμενες ακτίνες

Η γωνία αποδοχής των μη κυματοδηγούμενων ακτίνων είναι μεγαλύτερη από την γωνία αποδοχής των κυματοδηγούμενων. Οι περισσότερες ακτίνες που εισέρχονται στον πυρήνα είναι μη κυματοδηγούμενες ακτίνες. Μια μεγάλη ποσότητα από αυτές τις ακτίνες διαφεύγουν (εικ.4.14). Διαρρέουσα ακτίνα είναι αυτή που διαφεύγει από τον κυματοδηγό ακόμα και αν η γεωμετρική οπτική προβλέπει ότι θα πρέπει να υποστεί ολική ανάκλαση, λόγω μικροκάμψεων και καμπυλότητας του κυματοδηγού. Όπως φαίνεται στο σχήμα, ορισμένες ακτίνες φωτός της προσπίπτουσας ακτινοβολίας διέρχονται μέσω της διεπαφής



Εικόνα 4.14: Μη κυματοδηγούμενες ακτίνες

πυρήνα μανδύα στην περιοχή του μανδύα και στη συνέχεια αντανακλώνται πίσω στο μανδύα, όπου μπορεί να παγιδευτούν και να διαδίδονται. Οι ακτίνες αυτές λέγονται διαρέουσες (leaky rays). Διαρέουσες ακτίνες προκύπτουν επίσης από τις εισερχόμενες ακτίνες που έχουν σημαντική ποσότητα στρεβλών ακτίνων.

Η διαρέουσα ακτίνα σε ακτινική απόσταση r από τον οπτικό άξονα ικανοποιεί τη σχέση

$$n_r^2 - n_o^2 \leq \sin^2 \theta_r \quad (4.12)$$

n_o είναι ο δείκτης διάθλασης του μανδύα, n_r ο δείκτης διάθλασης σε απόσταση r από τον άξονα.

Η ενέργεια των διαρρευουσών ακτίνων μειώνεται εκθετικά έτσι ώστε να είναι ασήμαντη σε απόσταση λίγων μηκών κύματος από την πηγή. [3,5,6].

4.6 Θεώρηση κυματικής οπτικής

4.6.1 Η θεωρία των τρόπων

Τρόπος είναι η πιθανή διαδρομή που μπορεί να ακολουθήσει μία ακτίνα κατά τη διάδοσή της μέσα σε μια οπτική ακτίνα. Η θεωρία των τρόπων θεωρεί ότι το φως είναι επίπεδα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και περιγράφει τη συμπεριφορά του φωτός στο εσωτερικό της οπτικής ίνας σύμφωνα με την θεωρία του Maxwell και τις κυματικές ιδιότητες του φωτός. ερμηνεύοντας μεταξύ των άλλων και τα φαινόμενα της εξασθένησης και διασποράς που η θεωρία των ακτίνων δεν είναι σε θέση να εξηγήσει.

Το φως που τροφοδοτεί μια οπτική ίνα μπορεί να αναλυθεί σε μία σειρά τρόπων που δεν περιορίζονται μόνο στον πυρήνα της ίνας. Οι τρόποι αυτοί είναι :

- κυματοδηγούμενοι τρόποι (δεσμευμένοι) στον πυρήνα, που αντιπροσωπεύουν την καθοδηγούμενη ενέργεια κατά μήκος του άξονα της ίνας,
- τρόποι μανδύα (μη δεσμευμένοι) που εκτείνονται μερικώς μέσα στο υλικό του μανδύα και αναπαριστούν την ακτινοβολούμενη ενέργεια. [3,5,6].

Το εύρος των τιμών της σταθεράς φάσης β σηματοδοτεί τους καθοδηγούμενους τρόπους της ίνας. Η σταθερά φάσης συνδέεται με την ταχύτητα φάσης v και τη γωνιακή συχνότητα ω με τη σχέση: $v = \frac{\omega}{\beta}$

Η μέγιστη τιμή της β είναι: $\beta_{max} = \frac{2\pi}{\lambda} n_1$ για τον πυρήνα και η ελάχιστη $\beta_{min} = \frac{2\pi}{\lambda} n_2$ για τον μανδύα.

Όταν ισχύει:
$$\frac{2\pi n_2}{\lambda} < \beta < \frac{2\pi n_1}{\lambda} \quad (4.13)$$

$$\text{ή} \quad kn_2 < \beta < kn_1 \quad (4.14)$$

έχουμε μερική διάδοση των τρόπων στον πυρήνα και στον μανδύα

- Όταν $\beta = kn_2$ το κύμα διαδίδεται στο μανδύα. Ο τρόπος λέγεται τρόπος αποκοπής
 - Αν $\beta = kn_1$ όλη η ενέργεια περιορίζεται στον πυρήνα της ίνας
- n_1 και n_2 είναι οι δείκτες διάθλασης του πυρήνα και του μανδύα, και k ο κυματάριθμος.

Ο κυματάριθμος του κενού είναι συνάρτηση του μήκους κύματος:

$$k_0 = \frac{w}{c} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4.15)$$

Ο κυματαριθμός συχνά συγχέεται με τη σταθερά φάσης β , αλλά η σταθερά φάσης αναφέρεται στους κυματαγωγούς ενώ ο κυματάριθμος αναφέρεται σε επίπεδο κύμα.

• **Η κανονικοποιημένη συχνότητα V** (ή παράγοντας V) συσχετίζει τα χαρακτηριστικά της οπτικής ίνας, με τον επιτρεπόμενο αριθμό τρόπων μετάδοσης, αλλά και με τα μήκη κύματος που μπορούν να διαδοθούν σε αυτή και δείχνει τον αριθμό των τρόπων που μπορεί να υποστηρίξει μια οπτική ίνα. Όσο μεγαλύτερη είναι η V , τόσοι περισσότεροι τρόποι μπορούν να υπάρξουν. Ο αριθμός V καθορίζει το κλάσμα της οπτικής ισχύος σε ένα τρόπο που περιορίζεται στον πυρήνα της ίνας.

Η κανονικοποιημένη συχνότητα (V) ορίζεται ως

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} aNA = \frac{2\pi}{\lambda} a\sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (4.16)$$

λ : το μήκος κύματος της οπτικής ακτίνας στο κενό

a : διάμετρος του πυρήνα

n_1 : ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα

n_2 : ο δείκτης διάθλασης του μανδύα

NA : το αριθμητικό άνοιγμα.

- Για τιμές του $0 < V < 2.405$, η οπτική ίνα υποστηρίζει μόνο ένα τρόπο ανά διεύθυνση πόλωσης. (μονότροπες ίνες). Στη συχνότητα αποκοπής στις μονότροπες ισχύει $V \approx 2.405$.
- Οπτικές ίνες με $V > 2.405$ μπορούν να υποστηρίξουν περισσότερους τρόπους (πολυτροπικές ίνες).
- Ο αριθμός των υποστηριζόμενων τρόπων ίνας βηματικού δείκτη διάθλασης μπορεί να υπολογισθεί κατά προσέγγιση από τη σχέση:

$$M \approx \frac{V^2}{2} \quad (4.17)$$

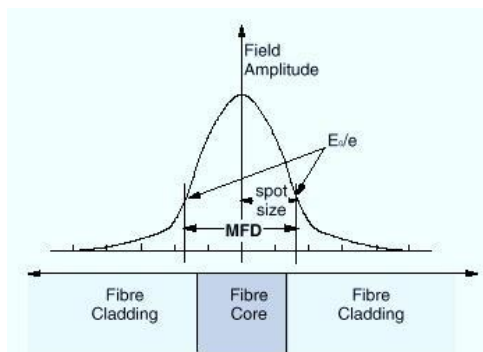
Στις ίνες με διαβαθμισμένο δείκτη διάθλασης ισχύει:

$$M \approx \frac{V^2}{4} \quad (4.18)$$

- Μικρός αριθμός V κάνει την ίνα ευαίσθητη σε απώλειες λόγω μικροκάμψεων και σε απώλειες λόγω απορρόφησης στο μανδύα.
- Μεγάλος αριθμός V μπορεί να αυξήσει τις απώλειες λόγω σκεδασμού στον πυρήνα.

4.6.1.1 Κυματοδηγούμενοι τρόποι.

Η ενέργεια που διαδίδεται σε μια ίνα μοιράζεται μεταξύ των διαφόρων τρόπων που οδεύουν με διαφορετικές ταχύτητες στην ίνα. Ένας στενός παλμός στην είσοδο μίας ίνας κάποιου μήκους διευρύνεται στην έξοδό της. Μέτρο της έκτασης της περιοχής που μεταφέρει ένα



Εικόνα 4.15. Αποσβένον πεδίο

σήμα αποτελεί το πεδίο τρόπου “mode field” που θεωρείται ο δραστικός πυρήνας της ίνας ενώ ο πραγματικός είναι λίγο μικρότερος. Η διάμετρος τρόπου πεδίου (MFD) περιγράφει την διάμετρο του φωτός στις μονότροπες ίνες (δραστικό πυρήνα). Στις μονότροπες ακτίνες περίπου 90% του φωτός διαδίδεται στον πυρήνα ενώ το 10% διαδίδεται στο μανδύα, ενώ στις πολύτροπες ίνες σχεδόν όλο το φως διαδίδεται στον πυρήνα.

Οι επιφάνειες κύματος που προσπίπτουν επί της ίνας σε γωνίες μικρότερες ή ίσες με την κρίσιμη γωνία μπορεί να διαδίδονται κατά μήκος του πυρήνα της ίνας (εικ.4.20) και απαιτείται να παραμείνουν σε φάση για να μεταδίδεται το φως κατά μήκος της ίνας. Το μέτωπο κύματος υφίσταται σταδιακή αλλαγή φάσης καθώς ταξιδεύει κατά μήκος της ίνας. Αλλαγές φάσης συμβαίνουν επίσης όταν το μέτωπο κύματος ανακλάται. Οι πολλαπλές ανακλάσεις πολλών διαφορετικών κυμάτων μέσα στην οπτική ίνα μπορούν να δημιουργήσουν συνθήκες συμβολής στο εσωτερικό της. Για να υπάρχει ενισχυτική συμβολή πρέπει η γωνία πρόσπτωσης, θ να ικανοποιεί μια σχέση της μορφής:

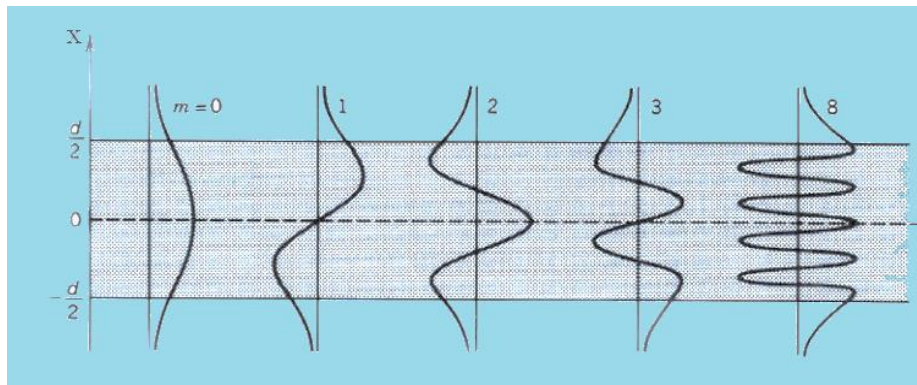
$$\sin\theta_r = \frac{ml}{4n_1a} \quad (4.19)$$

a : είναι η ακτίνα του πυρήνα της οπτικής ίνας

m : ακέραιος που αντιστοιχεί στην επανομαζόμενη τάξη του τρόπου διάδοσης,

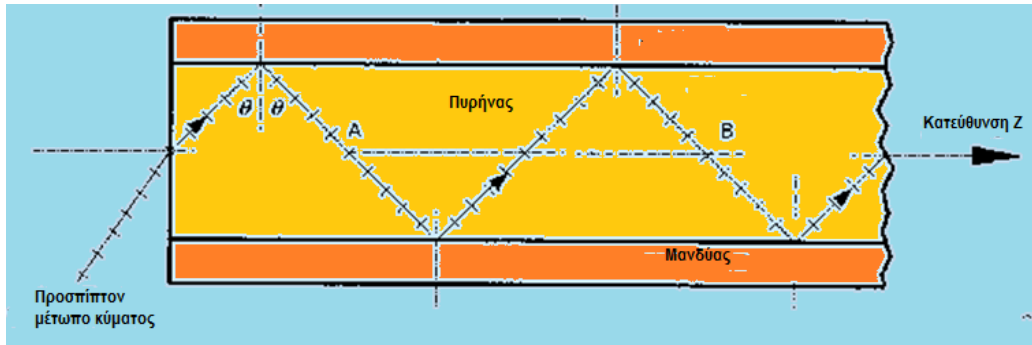
θ : είναι η γωνία εισόδου

Τότε όλες οι επιφάνειες κύματος μέσα στον πυρήνα έχουν φάση ίση ή ακέραιο πολλαπλάσιο του 2π . Διαφορετικά συμβαίνει απόσβεση. Η γωνία εισόδου για κάθε m αντιστοιχεί σε μια διαφορετική πορεία μέσα από την οπτική ίνα και καθορίζει έναν διαφορετικό οπτικό τρόπο ή ρυθμό, διάδοσης (εικ.4.16). Για $m=0$ έχουμε το τρόπο μηδενικής τάξης που αντιστοιχεί σε ευθεία διάδοση



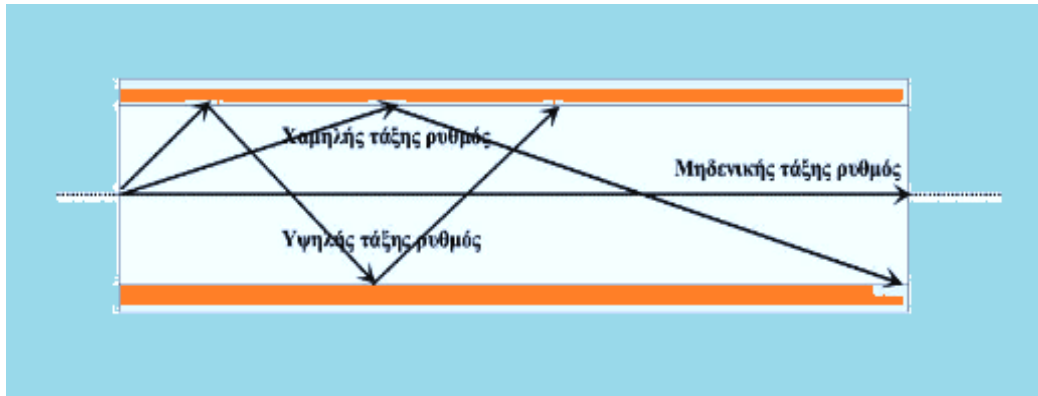
Εικόνα 4.16: Τάξεις τρόπου διάδοσης

Εξετάζουμε τον τρόπο που απεικονίζεται στην εικ. 4.17. Τα ανακλώμενα κύματα στο σημείο A και B βρίσκονται σε φάση, αν η ακτίνα μετά από δύο διαδοχικές ανακλάσεις έχει διανύσει οπτική διαδρομή πολλαπλάσια του 2π . Αν τα διαδιδόμενα μέτωπα κύματος δεν είναι σε φάση, τελικά εξαφανίζονται λόγω της απόσβεσης. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο μόνο ένας πεπερασμένος αριθμός των τρόπων μπορεί να διαδοθεί κατά μήκος της ίνας.



Εικόνα 4.17: Διαδιδόμενα μετωπα κύματος σε φάση

Για τους τρόπους χαμηλής τάξης, η γωνία εισόδου στην ίνα είναι μικρή και η γωνία ανάκλασης στη διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα-μανδύα είναι αρκετά μεγάλη. Αντίθετα όσο αυξάνει το m τόσο αυξάνει η γωνία εισόδου στην ίνα, η γωνία ανάκλασης προσεγγίζει την οριακή και αυξάνεται ο αριθμός των ανακλάσεων που απαιτούνται για τη διάδοση μέσα από την ίνα (εικ.4.18). Ο τρόπος διάδοσης μέγιστης τάξης που επιτρέπεται σε μια οπτική ίνα καθορίζεται από τη μέγιστη γωνία εισόδου άρα από το αριθμητικό άνοιγμα.



Εικόνα 4.18: Πορεία των διαφόρων τάξεων ρυθμών σε μια οπτική ίνα

Για ένα δεδομένο οπτικό τρόπο, μια μεταβολή στο μήκος κύματος μπορεί να αποτρέψει τη διάδοση του κατά μήκος της ίνας.

Το **μήκος κύματος αποκοπής** είναι το μήκος κύματος στο οποίο μία οπτική ίνα καθίσταται μονότροπη:

$$\lambda_c = \pi D \sqrt{\frac{n_{\text{πυρήνας}}^2 - n_{\text{μανδύα}}^2}{24}} \quad (4.20)$$

Σε μήκη κύματος μικρότερα από μήκος κύματος αποκοπής η ίνα είναι πολύτροπη. Καθώς το μήκος κύματος αποκοπής προσεγγίζεται, σταδιακά λιγότεροι τρόποι διαδίδονται μέχρι, το μήκος κύματος αποκοπής οπότε, μόνο ο θεμελιώδης τρόπος μπορεί να διαδοθεί, τότε η ίνα είναι τότε μονότροπη. Σε οπτική ίνα μπορεί να διαδίδεται τουλάχιστον ένας οπτικός τρόπος ο θεμελιώδης τρόπος της ίνας. Σε μήκη κύματος μεγαλύτερα η οπτική λειτουργία της ίνας γίνεται σταδιακά πιο αδύναμη, μέχρι τελικά (συνήθως σε ένα μήκος κύματος αρκετές εκατοντάδες νανόμετρα παραπάνω από το μήκος κύματος αποκοπής), η ίνα παύει να καθοδηγεί και χάνει όλη την οπτική της λειτουργία.

Το πεδίο των κυματοδηγούμενων τρόπων μπορεί να αναλυθεί σε μια οικογένεια ακτίνων που υφίστανται ολική ανάκλαση όπως περιγράφεται από τη μέθοδο των ακτίνων.

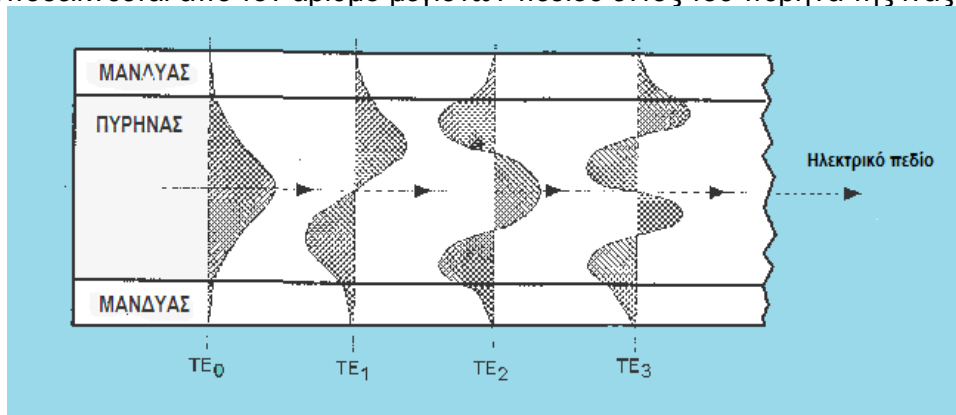
Έτσι ο κάθε τρόπος δίνει μια φυσική περιγραφή της δεσμευμένης ενέργειας μέσα στον κυματοδηγό. Οι συνιστώσες του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου του σήματος είναι διαφορετικές σε κάθε ένα από τους οπτικούς τρόπους διάδοσης, με τις συνιστώσες των πεδίων να αντιστοιχούν σε κάθε περίπτωση σε μια συγκεκριμένη λύση της εξίσωσης κύματος και να ικανοποιούν τις κατάλληλες οριακές συνθήκες. Το ηλεκτρικό πεδίο, E , και το μαγνητικό πεδίο, H , είναι κάθετα μεταξύ τους

Στον εγκάρσιο ηλεκτρικό τρόπο διάδοσης (εικ.4.19) κατά μήκος του άξονα της οπτικής ίνας (TE), το ηλεκτρικό πεδίο είναι κάθετο προς την κατεύθυνση της διάδοσης ($E_z=0$) ενώ το μαγνητικό πεδίο είναι στην κατεύθυνση της διάδοσης.

Στον εγκάρσιο μαγνητικό τρόπο διάδοσης (TM) κατά μήκος του άξονα της οπτικής ίνας το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο προς την κατεύθυνση της διάδοσης ($H_z=0$) ενώ το ηλεκτρικό πεδίο είναι στην κατεύθυνση της διάδοσης

Στον εγκάρσιο ηλεκτρομαγνητικό τρόπο TEM, το συνολικό πεδίο βρίσκεται στο εγκάρσιο επίπεδο ($E_z=0, H_z=0$)

Τα προφίλ των τρόπων TE δείχνουν τη τάξη του κάθε τρόπου. Η τάξη του κάθε τρόπου υποδεικνύεται από τον αριθμό μεγίστων πεδίου εντός του πυρήνα της ίνας. Για



Εικόνα 4.19: Εγκάρσιοι τρόποι διάδοσης

παραδειγμα, ο τρόπος TE0 έχει ένα μέγιστο πεδίου ο TE2 έχει 3 κλπ. Ο TE0 θεωρείται ο θεμελιώδης τρόπος ή η χαμηλότερη τάξη στάσιμου κύματος. Το ηλεκτρικό πεδίο είναι μέγιστο στο κέντρο του κυματοδηγού και μειώνεται προς το όριο πυρήνα-μανδύα.. Καθώς ο αριθμός μεγίστων αυξάνει η τάξη των τρόπων αυξάνεται. Σε γενικές γραμμές, οι τρόποι με περισσότερο από μερικά μέγιστα πεδίου αναφέρονται ως λειτουργίες υψηλής τάξης. Η τάξη του τρόπου καθορίζεται επίσης από τη γωνία που το μέτωπο κύματος σχηματίζει με τον άξονα της ίνας. [11,3,5,6].

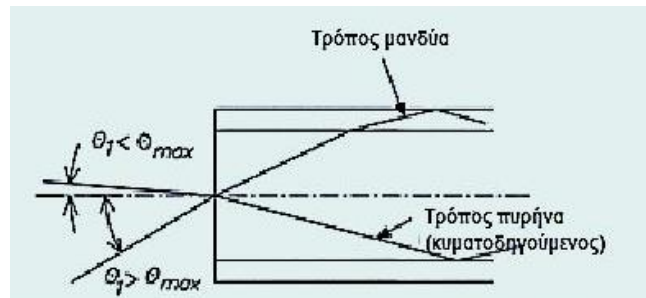
4.6.1.2 Τρόποι μανδύα.

Όταν τα διαδιδόμενα οπτικά κύματα υποστούν ολική ανάκλαση στη διεπιφάνεια πυρήνα- μανδύα ένα μέρος της ακτινοβολίας διέρχεται από τη διεπαφή στο μέσο με μικρότερο δείκτη διάθλασης (μανδύα). Αυτό το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου λέγεται αποσβένον πεδίο (Evanescent Field). Το πλάτος του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου μειώνονται εκθετικά καθώς απομακρυνόμαστε από τον άξονα της ίνας, παρ όλα αυτά όμως ένα σημαντικό τμήμα της οπτικής ενέργειας διαδίδεται στον μανδύα (εικ.4.19), με τρόπους μανδύα (εικ.4.15). Το αποσβένον πεδίο αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα του οδηγούμενου κύματος και τα χαρακτηριστικά του καθορίζονται από τις παραμέτρους οδήγησης του κύματος.

Οι τρόποι μανδύα αντιστοιχούν στις μη κυματοδηγούμενες ακτίνες της θεωρίας των ακτίνων και διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην οπτική ίνα. Οι τρόποι μανδύα περιορίζονται στον μανδύα μιας οπτικής ίνας λόγω του γεγονότος ότι ο μανδύας έχει ένα υψηλότερο δείκτη διάθλασης από το περιβάλλον μέσο, το οποίο είναι είτε αέρας ή το πρωτογενές πολυμερές. Οι σύγχρονες ίνες έχουν ένα πρωτεύον πολυμερές επικάλυμμα με

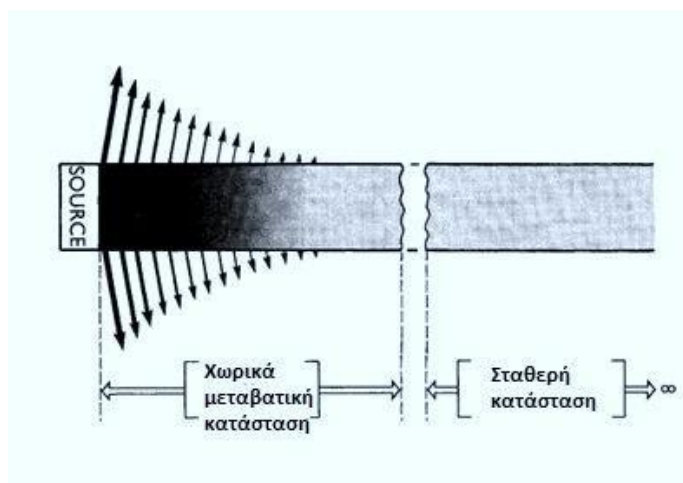
δείκτη διάθλασης που είναι ελαφρώς υψηλότερος από εκείνον του μανδύα, έτσι ώστε το φως που διαδίδεται στο μανδύα να εξασθενεί και εξαφανίζεται ύστερα από διάδοση λίγων εκατοστών

Η τελευταία κατάσταση είναι κοινή για μονότροπες ίνες.



Εικόνα 4.20: Μέγιστη γωνία αποδοχής για ίνα βηματικού δείκτη διάθλασης

Λόγω των διαφορετικών σταθερών διάδοσης τους, οι τρόποι πυρήνα και μανδύα συνήθως δεν εμφανίζουν καμία αξιοσημείωτη ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ (σύζευξη). Αυτό σημαίνει, ότι το φως που ξεκίνησε στον πυρήνα θα παραμείνει εκεί και δεν θα διαρρεύσει σε τρόπους μανδύα, και το αντίστροφο. Ωστόσο, μια τέτοια διαρροή μπορεί να προκύψει εάν υπάρχει απόκλιση από την κανονική δομή του πυρήνα και του μανδύα, ιδιαίτερα εάν υπάρχει μια περιοδική διαταραχή, η περίοδος της οποίας συνδυάζεται με τις διαφορές των σταθερών διάδοσης. Αυτό προκαλεί απώλειες από σύζευξη φωτός από τους τρόπους του πυρήνα στους τρόπους του μανδύα



Εικόνα 4.21: Ποιοτική περιγραφή απώλειας ακτινοβολίας κατά μήκος μιας ίνας. Οι σκοτεινές περιοχές αντιστοιχούν σε μεγαλύτερη ένταση φως και τα παχύτερα βέλη σε μεγαλύτερη απώλεια ακτινοβολίας.

Οι τρόποι χαμηλής τάξης διεισδύουν λίγο στο μανδύα επειδή, η ένταση των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων συγκεντρώνεται κοντά στο κέντρο της ίνας. Οι τρόποι υψηλής τάξης διεισδύουν περισσότερο μέσα στο μανδύα επειδή, τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία διανέμονται περισσότερο προς τα εξωτερικά άκρα της ίνας απ ότι στους τρόπους χαμηλής τάξης και μπορούν να παγιδευτούν στο μανδύα ίνας.(εικ.4.21). [3,5,6,8].

4.6.1.3 Διαρρέοντες τρόποι (Leaky Modes)

Όταν το φως εισέρχεται σε μια οπτική ίνα, υπάρχουν οπτικοί τρόποι οι οποίοι δεν ικανοποιούν τις συνθήκες για να οδηγηθούν στο εσωτερικό του πυρήνα της ίνας. Παρ' όλα αυτά όμως διαδίδονται σε σημαντική απόσταση. Αυτή είναι μια οριακή περίπτωση όπου ένας τρόπος αποτελεί διαχωριστική γραμμή μεταξύ κυματοδηγούμενου τρόπου και τρόπου μανδύα. Στις μονότροπες οπτικές ίνες αυτοί αντιστοιχούν σε κάποιο είδος στρεβλών ακτίνων. Τελικά αυτοί οι τρόποι εγκαταλείπουν τον πυρήνα και το μανδύα ύστερα από κάποια απόσταση. Η ταχύτητα ομάδας αυτών των τρόπων είναι μικρότερη από την ταχύτητα των καθοδηγούμενων τρόπων και συμβάλουν στην εξασθένηση του σήματος. Σε κάποιες περιπτώσεις οι κατασκευαστές δημιουργούν ορισμένες σταθερές καμπές στην ίνα έτσι ώστε να περνούν όλοι οι κυματοδηγούμενοι τρόποι και να αποκόπτονται οι διαρρέοντες (mode stripping).

4.7 Απόδοση των οπτικών ινών

Οι οπτικές ίνες μπορούν να μεταφέρουν σήματα με πολύ μεγάλο εύρος ζώνης σε μεγάλες αποστάσεις με πολύ μικρή εξασθένηση του σήματος. Η απόδοση των οπτικών ινών επηρεάζεται από : *Το εύρος ζώνης, τον τρόπο μετάδοσης του σήματος στην ίνα, με το αν, δηλαδή, η ίνα είναι πολύτροπη ή μονότροπη, την απώλεια σήματος και τα μη γραμμικά φαινόμενα* [3,5,6,8].

4.7.1. Το εύρος ζώνης

Εύρος ζώνης συχνοτήτων μίας ηλεκτρονικής διάταξης ονομάζεται η περιοχή συχνοτήτων μέσα στην οποία το σήμα της εισόδου περνάει αναλλοίωτο στην έξοδο. Η σημασία του εύρους ζώνης φαίνεται από το γεγονός ότι δύο διαδοχικοί παλμοί, για να ληφθούν χωρίς παραμόρφωση από την ίνα, χρειάζονται άπειρο εύρος ζώνης. Όσο μικρότερο είναι το εύρος ζώνης τόσο μεγαλύτερη είναι η παραμόρφωση. Το εύρος ζώνης είναι μέτρο της χωρητικότητας που έχει ένα δίκτυο ή μια σύνδεση για τη μεταφορά των δεδομένων. Για την ψηφιακή μετάδοση, το εύρος ζώνης μετριέται σε bits ανά δευτερόλεπτο (bps), και όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός εύρους ζώνης, τόσο γρηγορότερη είναι η ψηφιακή μετάδοση. Το εύρος ζώνης παίζει σημαντικό ρόλο στο ελάχιστο ανιχνεύσιμο σήμα. Το ελάχιστο ανιχνεύσιμο σήμα ορίζεται ως το σημείο στο οποίο η ισχύς του σήματος ισούται με το επίπεδο του θορύβου. Ο θερμικός θόρυβος, προκαλείται από την ακτινοβολία μέλανος σώματος. Με τον όρο μέλαν σώμα αναφερόμαστε σε οποιοδήποτε αντικείμενο ή σύστημα που απορροφά όλη την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που πέφτει πάνω του και την επανεκπέμπει με τον ίδιο ρυθμό που την απορροφά για να παραμείνει σε θερμική ισορροπία.

Ο θόρυβος εξαρτάται από το εύρος συχνοτήτων και τη θερμοκρασία:

$$P = k_B T \Delta f \quad (4.21)$$

k_B : σταθερά του Boltzmann = 1.38×10^{-23} Joules/K

Το Δf είναι το εύρος ζώνης. Περιορίζοντας το εύρος ζώνης, περιορίζεται το επίπεδο της ισχύος του θορύβου και απαιτείται σήμα εισόδου χαμηλότερου επιπέδου για να ανιχνευτεί και να αναπαραχθεί σωστά. Το μεγάλο εύρος σήματος ανεβάζει το επίπεδο θορύβου και αυξάνει την ισχύ που απαιτείται για να ανιχνευθεί το σήμα. Συνεπώς η εξασθένηση περιορίζει το εύρος ζώνης. Σε ψηφιακά συστήματα τηλεπικοινωνιών συνήθως δεν έχουμε έναν αποδεκτό bit-error-rate εκτός αν η ισχύς του σήματος είναι 4 φορές μεγαλύτερη από το επίπεδο του θορύβου.

Οι οπτικές ίνες παρέχουν μεγάλο εύρος ζώνης, το οποίο σήμερα φθάνει στις ευρέως χρησιμοποιούμενες υλοποιήσεις όπως το Gigabit Ethernet μέχρι και τα 10 Gbps. Η απόσταση μετάδοσης κυμαίνεται μεταξύ 70-100 Km ανάλογα με τον τύπο της οπτικής ίνας και το σήμα που μεταφέρεται. Συνεπώς, περιορίζουν τον αριθμό των ενδιάμεσων

ενισχύσεων που απαιτούνται για να διασχίσει το σήμα μια μεγάλη απόσταση, και έχει σημαντική ανοχή στον θόρυβο.

4.7.2 Τον τρόπο μετάδοσης του σήματος στην ίνα, με το αν, δηλαδή, η ίνα είναι πολύτροπη ή μονότροπη

Για δεδομένη εγκατάσταση, θα πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο ένας τρόπος μετάδοσης και μόνο ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος από τις πηγές σε όλη την έκταση της εγκατάστασης.

Στις μονότροπες οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται μήκη κύματος $1310 \text{ nm} < \lambda < 1550 \text{ nm}$. Στις πολύτροπες οπτικές ίνες έχουμε μήκη κύματος $850 \text{ nm} < \lambda < 1300 \text{ nm}$ και είναι πιο ανεκτό να χρησιμοποιήσουμε συνδετήρες και διακλαδωτές στην πορεία των οπτικών ινών απ' ό,τι στις μονότροπες.

Στις πολύτροπες οπτικές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν χαμηλού κόστους πηγές LED, ενώ οι μονότροπες οδηγούνται συνήθως από πηγή LASER.

4.7.3 Την απώλεια σήματος

Η απώλεια σήματος προκαλείται από

- Την εξασθένηση
- Τη διασπορά

4.7.3.1 Εξασθένηση

Η εξασθένηση συντελεί στην μείωση της ισχύος ενός οπτικού σήματος (εικ.4.22). Η εξασθένηση σήματος (ή απώλεια σήματος) σε μια οπτική ίνα ορίζεται από τη σχέση:

$$\text{Εξασθένηση} = \frac{10}{L} \log \left(\frac{P_i}{P_o} \right) \quad (4.22)$$

L: Το μήκος της οπτικής ίνας σε χιλιόμετρα.

P_i: Η ισχύς του σήματος στην έξοδο.

P_o: Η ισχύς του σήματος στην είσοδο.

Η εξασθένηση κατά μήκος της οπτικής ίνας δίνεται από τη σχέση:

$$P(z) = P(o) \cdot e^{-Az} \quad (4.23)$$

P(z): Η ισχύς σε απόσταση z από την αρχή της οπτικής ίνας

P(o): Η ισχύς στην είσοδο της ίνας

A: Συντελεστής συνολικής εξασθένησης

Ισχύει $A = A_a + A_s + A_b$

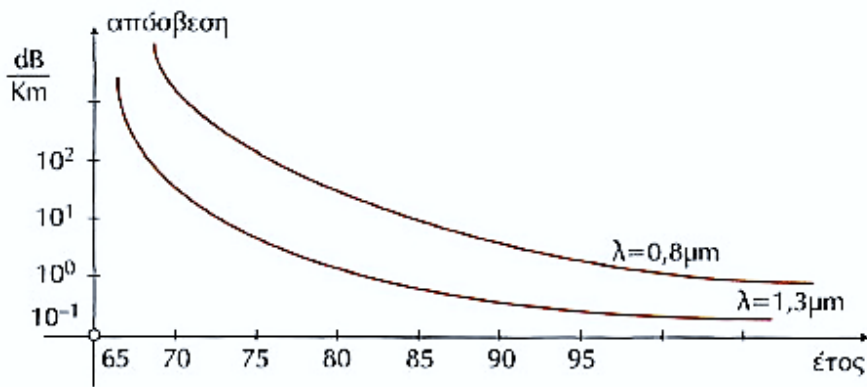
A_a: Συντελεστής απορρόφησης

A_s: Συντελεστής σκέδασης

A_b: Συντελεστής οπισθοσκέδασης

Η εξασθένηση καθορίζει, κατά μεγάλο μέρος, τη μέγιστη απόσταση στην οποία απαιτείται αναγέννηση και ενίσχυση του σήματος. Τυπική τιμή εξασθένησης σήματος για μια 62,5/125 πολύτροπη οπτική ίνα είναι 3,5 dB/Km για σήμα με μήκος κύματος $\lambda = 850 \text{ nm}$ και 1.0 dB/Km για μήκος κύματος $\lambda = 1300 \text{ nm}$.

Τυπική τιμή εξασθένησης σήματος για μονότροπη οπτική ίνα είναι 0,5 dB/Km για $\lambda = 1310 \text{ nm}$ και 0,4 dB/Km για $\lambda = 1550 \text{ nm}$.

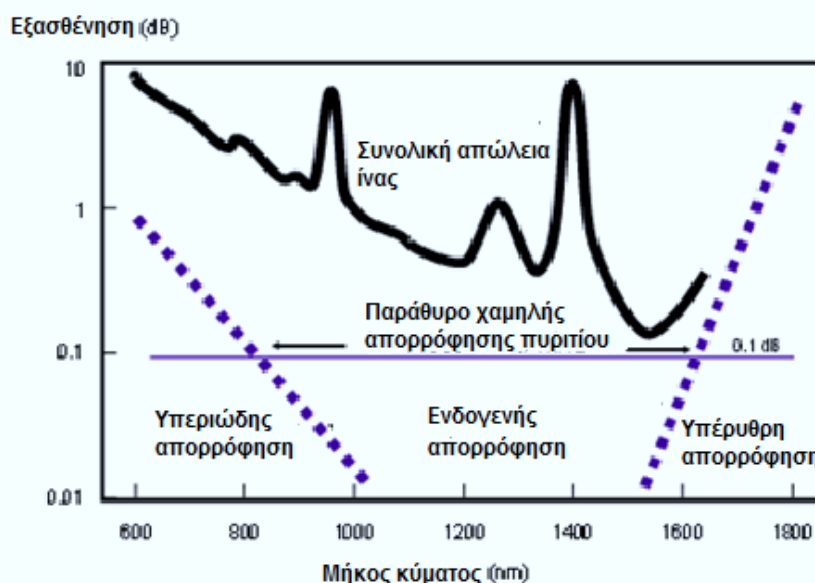


Εικόνα 4.22: Γραφική παράσταση της εξέλιξης της απόσβεσης με το χρόνο για μήκη κύματος $\lambda=0,8\mu\text{m}$ και $\lambda=1,3\mu\text{m}$

- **Μηχανισμοί εξασθένησης**

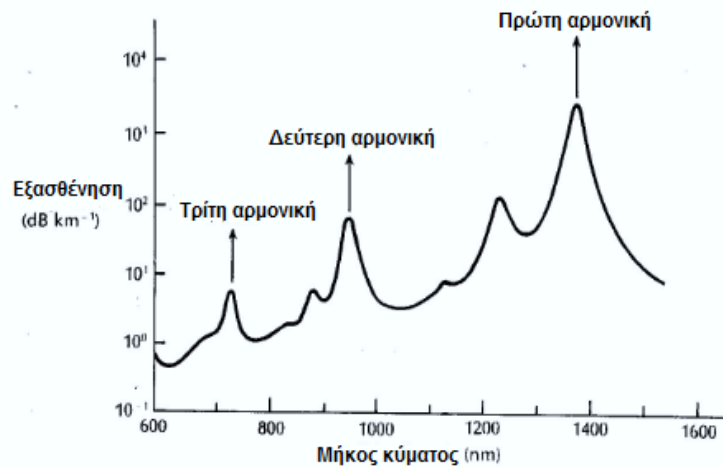
α. Απορρόφηση: είναι η μετατροπή της οπτικής ενέργειας σε ενέργεια άλλης μορφής όπως είναι η θερμότητα. Διακρίνεται σε ενδογενή απορρόφηση και εξωγενή απορρόφηση

α₁. Ενδογενής απορρόφηση Σε πυριτικό γυαλί, τα μήκη κύματος του φάσματος λειτουργίας είναι από 700 (nm) έως 1600 nm. Αυτή η περιοχή μηκών κύματος είναι μεταξύ δύο ενδογενών περιοχών απορρόφησης. Η πρώτη περιοχή είναι η υπεριώδης περιοχή (κάτω από 400 nm και η δεύτερη περιοχή είναι η περιοχή υπέρυθρου (πάνω από 2000-nm). Η ενδογενής απορρόφηση στην υπεριώδη περιοχή προκαλείται από τις ηλεκτρονικές ζώνες απορρόφησης. Η απορρόφηση συμβαίνει όταν ένα φωτόνιο αλληλεπιδρά με ένα ηλεκτρόνιο και το διεγείρει σε ένα υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο. Κύρια αιτία της ενδογενούς απορρόφησης στην υπέρυθη περιοχή είναι η χαρακτηριστική συχνότητα δόνησης της δεσμών των ατόμων. Φωτεινή ενέργεια μεταφέρεται από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στους δεσμούς πυριτίου-οξυγόνου (Si-O) του πυριτικού γυαλιού, όπου απορροφάται και προκαλεί τη δόνησή τους στη χαρακτηριστική τους συχνότητα. (Εικ.4.23)



Εικόνα 4.23: Μηχανισμοί εξασθένησης στις οπτικές ίνες

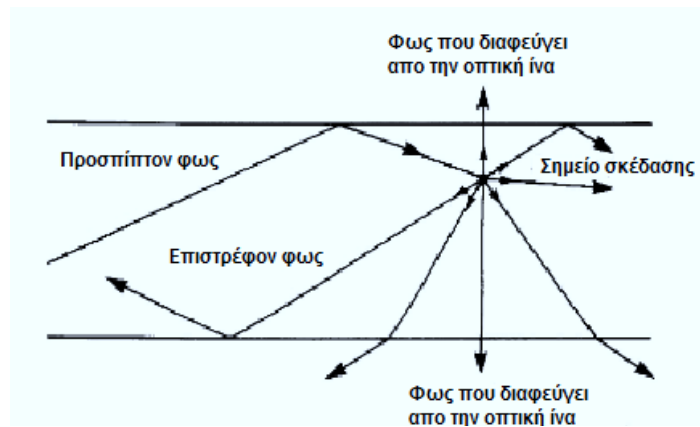
α₂. Εξωγενής απορρόφηση: προκαλείται από ίχνη μεταλλικών προσμίξεων σιδήρου, νικελίου, χρωμίου που εισάγονται στην ίνα κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Η εξωγενής απορρόφηση προκαλείται με τη μετάβαση αυτών των μεταλλικών ιόντων από το



Εικόνα 4.24. Εξωγενής απορρόφηση

ένα επίπεδο ενέργειας σε ένα άλλο. Εξωγενής απορρόφηση συμβαίνει επίσης όταν ιόντα υδροξυλίου (OH⁻) εισάγονται στην ίνα Σχηματίζεται δεσμός πυρίτιου-υδροξυλίου (Si-OH) που έχει μια θεμελιώδη απορρόφηση στα 2700 nm. Ωστόσο, οι αρμονικές της θεμελιώδους απορρόφησης συμβαίνουν στην περιοχή λειτουργίας. Αυτές οι αρμονικές αυξάνουν την εξωγενή απορρόφηση στα 1383 nm, 1250 nm και 950 nm. Το Σχήμα 4.24 δείχνει την παρουσία των τριών αρμονικών OH. Η ποσότητα προσμίξεων του νερού (OH⁻) που περιέχονται σε μια ίνα πρέπει να είναι μικρότερη από μερικά μέρη ανά δισεκατομμύριο.

β. Ελαστική σκέδαση: Με τον όρο σκέδαση περιγράφεται η αλλαγή της πορείας μιας ακτινοβολίας από την ευθύγραμμη τροχιά λόγω της αλληλεπίδρασής της με ανομοιογένειες στο μέσο που διαδίδονται, όπως μεταβολές πυκνότητας. Η σκέδαση γενικά συμβαίνει μέσω της συμβολής των κυμάτων που σκεδάζονται από ένα αντικείμενο.



Εικόνα 4.25 Διαδρομή προσπίπτουσών ακτίνων στην διεπαφή πυρήνα-μανδύα

Κατά τη διάρκεια της κατασκευής, στις οπτικές ίνες δημιουργούνται περιοχές χαμηλότερης και υψηλότερης μοριακής πυκνότητας, σε σχέση με τη μέση πυκνότητα. Το φως ταξιδεύει διαμέσου της ίνας και αλληλεπιδρά με τις περιοχές διαφορετικής πυκνότητας και στη συνέχεια σκεδάζεται μερικώς σε όλες τις κατευθύνσεις (εικ.4.25). Στις ίνες που λειτουργούν μεταξύ 700 nm και 1600 nm η πηγή της απώλειας ενέργειας είναι η ελαστική

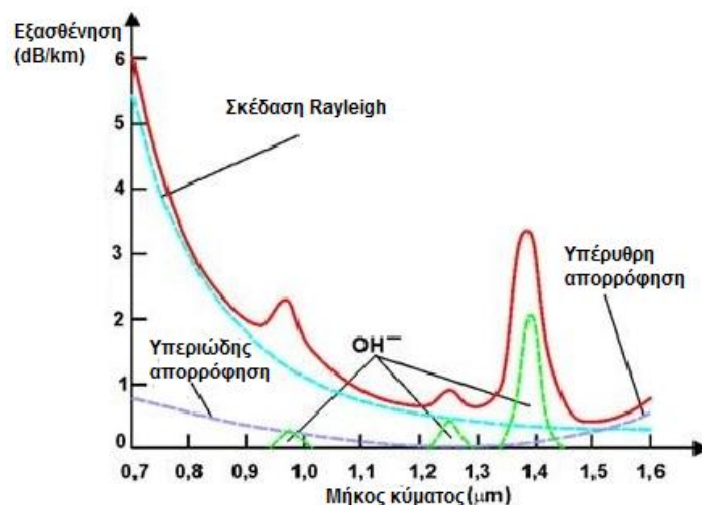
σκέδαση Rayleigh. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αλληλεπιδρά και διαγείρει όλο το άτομο. Η ενέργεια του ηλεκτρομαγνητικού κύματος προκαλεί συντονισμένη σε φάση, ταλάντωση όλων των ηλεκτρονίων του σκεδάζοντος ατόμου. Το νέφος των ηλεκτρονίων αυτού του ατόμου αμέσως επανεκπέμπει την ενέργεια που προσωρινά απορρόφησε, με τη μορφή φωτονίου ίδιας ενέργειας με του προσπίπτοντος, αλλά με λίγο διαφορετική κατεύθυνση (γωνία αντίστροφα ανάλογη της προσπίπτουσας ακτινοβολίας). Η σκέδαση Rayleigh συμβαίνει όταν το μέγεθος της διακύμανσης πυκνότητας είναι λιγότερο από το ένα δέκατο του μήκους κύματος του φωτός. Η σκέδαση Rayleigh είναι ελαστική, δηλαδή η ενέργεια και συχνότητα της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας είναι ίσες με τις αντίστοιχες της προσπίπτουσας. Επιπλέον, η σκέδαση είναι πολωμένη, ενώ είναι εντονότερη κατά τη διεύθυνση της πρόσπτωσης και προς τις δύο κατευθύνσεις. Οι απώλειες που προκαλούνται από την ελαστική σκέδαση είναι αντιστρόφως ανάλογες προς την τέταρτη δύναμη του μήκους κύματος ($\frac{1}{\lambda^4}$).

Όταν η σκέδαση προκαλείται από σωματίδια ίσα ή μεγαλύτερα από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ονομάζεται ελαστική σκέδαση Mie. Η κατεύθυνση των σκεδαζόμενων κυμάτων είναι κυρίως προς τα εμπρός φαινόμενο που γίνεται εντονότερο όσο μεγαλύτερα είναι τα σωματίδια.



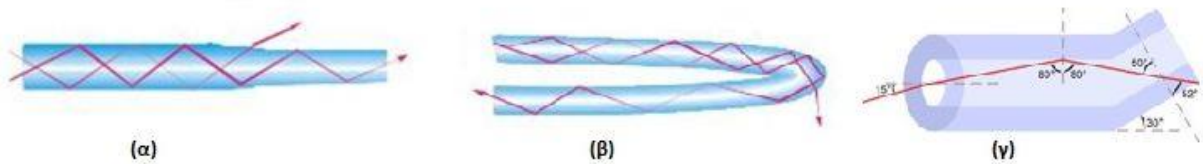
Εικόνα 4.26: Είδη σκέδασης

Η σκέδαση Mie διασκορπίζει το φως έξω από τον πυρήνα της ίνας. Ωστόσο, σε εμπορικές ίνες, τα αποτελέσματα της σκέδασης Mie είναι ασήμαντα.



Εικόνα 4.27: Μηχανισμοί εξασθένησης σε συνάρτηση με το μήκος κύματος

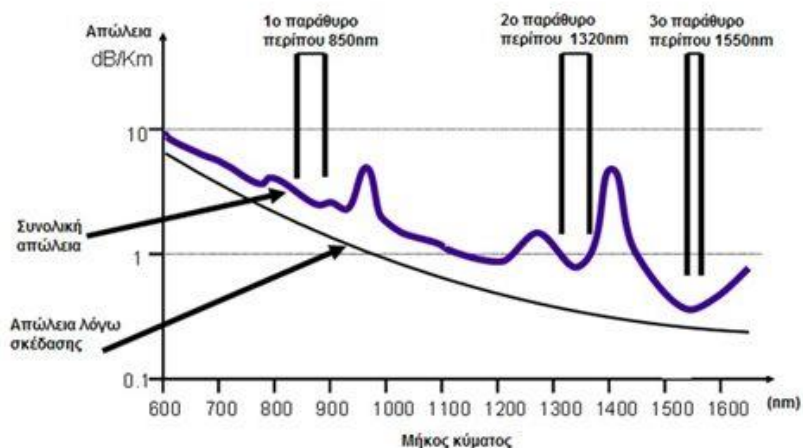
γ. Κακή κατασκευή – τοποθέτηση.



Εικόνα 4.28: Κακή κατασκευή - τοποθέτηση οπτικών ινών

Ατέλειες στη διεπαφή μεταξύ πυρήνα και μανδύα, όπως και τυχαίες διακυμάνσεις της ακτίνας του πυρήνα, μπορεί να οδηγήσουν σε απώλειες (εικ.4.28α). Λόγω μεγάλης καμπής της οπτικής ίνας ένα μέρος του τρόπου μετάδοσης μετατρέπεται σε τρόπο υψηλότερης τάξης και χάνεται στο μανδύα (εικ.4.28β). Ατέλειες της ίνας λόγω μικροκάμψεων, που προκαλούνται από μικρές αξονικές στροφές ή άσκηση εξωτερικής δύναμης, προκαλούν την μίξη ή την απώλεια της ενέργειας. Οι ακτίνες που διαφεύγουν αν και προβλέπεται να ανακλασθούν ολικά, είναι μερικώς διαθλώμενες λόγω του καμπύλου σχήματος του ορίου της ίνας. (εικ.4.28.γ)

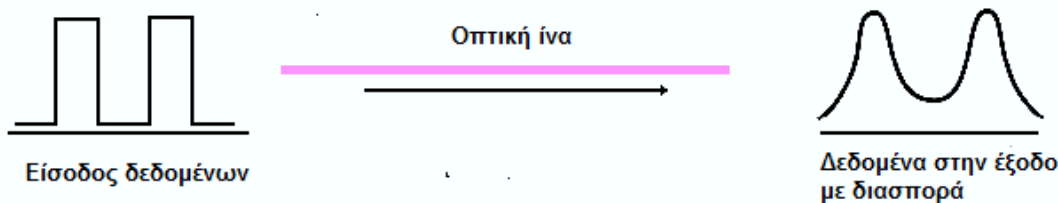
Η συνολική εξασθένηση είναι κυρίως αποτέλεσμα της εξωγενούς απορρόφησης και του σκεδασμού. Η εξασθένηση μειώνεται καθώς αυξάνει το μήκος κύματος, στα 1550nm είναι μόνο 0,25 dB/Km ενώ στα 850nm είναι 2,5dB/Km. Λόγω της μορφής που έχει η καμπύλη απορρόφησης στα συστήματα οπτικών ινών χρησιμοποιούνται τρία παράθυρα χαμηλής απώλειας ενέργειας στα 850 nm., στα 1320 nm. και στα 1550 nm (εικ.4.29) και λειτουργούν σε μήκη κύματος που ορίζονται σε ένα από αυτά τα παράθυρα. Η εξασθένηση της μονότροπης ίνας στο φως που έχει μήκος κύματος 1550nm είναι μόλις 0.19 db ανά χιλιόμετρο. Η περιοχή των 1550 nm χρησιμοποιείται σήμερα στις τηλεπικοινωνίες και στις ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων. Γίνονται έρευνες για μετακίνηση σε μεγαλύτερα μήκη κύματος όπου αναμένεται εξασθένηση 0,01dB/Km στα 2500nm. [3,5,6,8,11].



Εικόνα 4.29: Παράθυρα λειτουργίας οπτικών ινών

4.7.3.2 Διασπορά

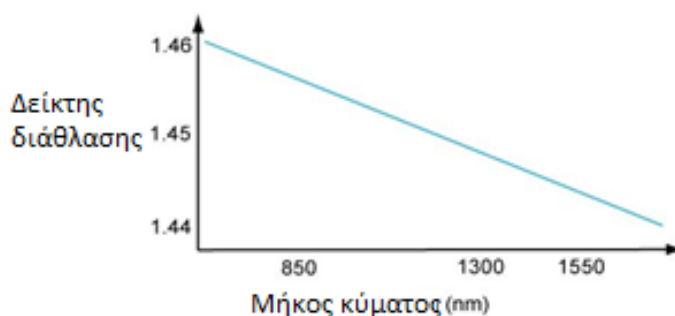
Διασπορά ονομάζεται το φαινόμενο της διεύρυνση του πλάτους των φωτεινών παλμών καθώς αυτοί ταξιδεύουν στην ίνα και οφείλεται στη μεταβολή της σταθεράς διάδοσης του επιπέδου κύματος. Ως αποτέλεσμα κάποια στιγμή υπάρχει αλληλοεπικάλυψη μεταξύ γειτονικών παλμών ώστε να γίνονται δυσδιάκριτοι στο δέκτη (εικ.4.30). Το αποτέλεσμα είναι η αύξηση του ρυθμού των λαθών. Έτσι η διασπορά των παλμών του σήματος περιορίζει το ρυθμό διακίνησης πληροφορίας (Bit Rate) στην οπτική ίνα, δηλαδή το εύρος ζώνης της ίνας που μπορεί να αξιοποιηθεί. Η διασπορά μετράται σε picoseconds της διεύρυνσης του παλμού εξάπλωσης ανά nanometer του φασματικού πλάτους ανά kilometer μήκους ίνας. Επειδή η επίδραση της διασποράς αυξάνει με το μήκος της ίνας, ένα σύστημα οπτικών ινών χαρακτηρίζεται από το γινόμενο του εύρους συχνοτήτων επί το μήκος της ίνας και μετράται σε MHz·km. Έτσι σε μια πολύτροπη οπτική ίνα το γινόμενο εύρους συχνοτήτων –μήκους έχει την τιμή 500 αυτό σημαίνει ότι μπορεί να μεταφέρει σήμα 500 MHz για 1 km ή σήμα 1000 MHz για 0.5 km.



Εικόνα 4.30: Διασπορά οπτικού παλμού

Οι μηχανισμοί που οδηγούν σε διασπορά των παλμών στις οπτικές ίνες είναι:

α. Χρωματική διασπορά: είναι η διεύρυνση του πλάτους των φωτεινών παλμών καθώς αυτοί ταξιδεύουν σε μια οπτική ίνα και προκαλείται από διαφορές στην ταχύτητα του κύματος στο μέσο. Η ταχύτητα μεταβάλλεται επειδή μεταβάλλεται ο δείκτης διάθλασης σε συνάρτηση με το μήκος κύματος. Ως αποτέλεσμα, από τον ορισμό του δείκτη διάθλασης, προκύπτει ότι το φως ταξιδεύει γρηγορότερα στα μεγάλα μήκη κύματος, δηλ. το μπλε φως ταξιδεύει πιο αργά στο υλικό από το κόκκινο φως

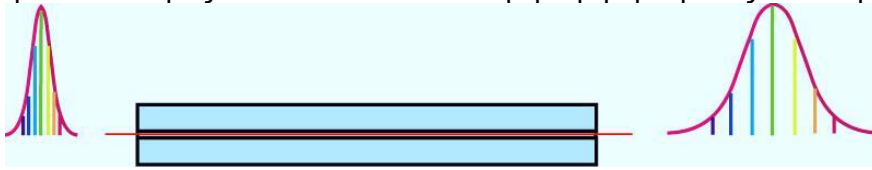


Εικόνα 4.31: Εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος

Η εικόνα 4.31 δείχνει δείκτη διάθλασης σε σχέση με το μήκος κύματος σε διοξειδίο του πυριτίου. Κάθε δεδομένη πηγή φωτός (ακόμη και ένα λέιζερ) εκπέμπει σε μία περιοχή μηκών κύματος. Η χρωματική διασπορά είναι το άθροισμα της διασποράς κυματοδηγού και της διασποράς υλικού.

- **Διασπορά υλικού (intramodal dispersion, spectral dispersion)** Προκαλείται από το γεγονός ότι η ταχύτητα του φωτός σε ένα μέσο εξαρτάται από το μήκος κύματος. Όταν το οπτικό σήμα του πομπού περιλαμβάνει περισσότερα από ένα μήκη κύματος τότε το κάθε ένα από αυτά βλέπει διαφορετικό συντελεστή διάθλασης του πυρήνα και το αντίστοιχο

μεταφερόμενο μέρος του σήματος κινείται με διαφορετική ταχύτητα. Το αποτέλεσμα του μηχανισμού διασποράς υλικού είναι ότι τα διάφορα μήκη κύματος που περιλαμβάνονται στον



Εικόνα 4.32: Διασπορά υλικού

παλμό που διαδίδεται, ταξιδεύουν με διαφορετικές ταχύτητες μέσω του μέσου. Έτσι, ο παλμός μπορεί να διαδοθεί σε μια απόσταση με ορισμένα τμήματα του να φθάσουν νωρίτερα από τα άλλα τμήματα (εικ.4.32). Καθώς αυξάνει το μήκος κύματος, η διασπορά υλικού μειώνεται. Έτσι, οπτικά σήματα στο παράθυρο 1550 nm υφίστανται μικρότερη διασπορά υλικού από μήκη κύματος στο παράθυρο 1310 nm. Η διασπορά υλικού παίζει σημαντικό ρόλο στη μετάδοση σημάτων σε μεγάλες αποστάσεις σε μονότροπες ίνες βηματικού δείκτη διάθλασης. Στις πολύτροπες ίνες βαθμιαίου δείκτη επικρατεί ο μηχανισμός τρόπων σε μικρές αποστάσεις ώστε η διασπορά υλικού να μην είναι υπολογίσιμη.

- **Διασπορά κυματοδηγού(DW).** Η διασπορά κυματοδηγού εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπτικής ίνας, και το μήκος κύματος. Το ποσοστό διεύρυνσης των οπτικών παλμών εξαρτάται από την αρχική τους χρονική διάρκεια (εικ.4.33).



Εικόνα 4.33: Διασπορά κυματοδηγού

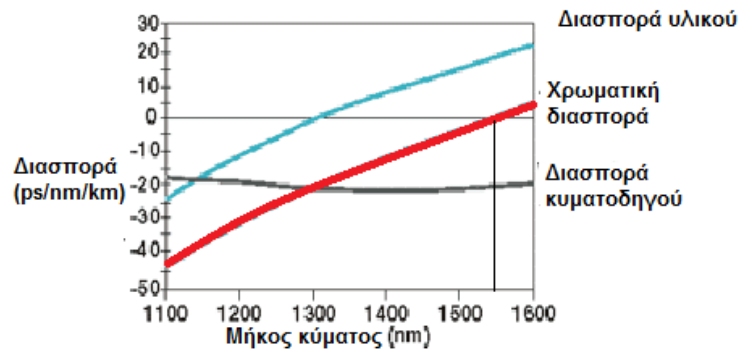
Παλμοί με μικρή διάρκεια, έχουν μεγάλο εύρος ζώνης και επομένως η διασπορά θα κάνει πιο έντονη την παρουσία της. Επομένως, η σημασία του φαινομένου γίνεται εντονότερη όσο αυξάνει ο ρυθμός του οπτικού σήματος.

Ο μηχανισμός διασποράς κυματοδηγού προκαλείται:

- i. από τους διαφορετικούς δείκτες διάθλασης του πυρήνα και του μανδύα μιας οπτικής ίνας. Ανεξάρτητα από τη φύση της πηγής φωτός και της οπτικής ίνας, το οπτικό σήμα διαδίδεται στον πυρήνα ενώ ένα μέρος του διαχέεται στο μανδύα. Στην περίπτωση μονότροπης ίνας στα μικρά μήκη κύματος το φως περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό μέσα στον πυρήνα, στα μεσαία μήκη κύματος διαχέεται ελαφρά μέσα στο μανδύα ενώ στα μεγάλα μήκη κύματος διαχέεται σε μεγάλο βαθμό στο μανδύα. Καθώς ο δείκτης διάθλασης του γυαλιού μεταβάλλεται με το μήκος κύματος, τα μεγαλύτερα μήκη κύματος διαδίδονται με υψηλότερες ταχύτητες. Έτσι τα διαφορετικά μήκη κύματος του φωτός από τα οποία αποτελείται το σήμα ταξιδεύουν με διαφορετικές ταχύτητες σε διαφορετικά στρώματα με αποτέλεσμα, ο οπτικός παλμός να διευρύνεται συναρτήσει της απόστασης πράγμα το οποίο μπορεί να μπερδεύει τον ανιχνευτή φωτός στο τέλος της ίνας. Η διασπορά κυματοδηγού παίζει σημαντικό ρόλο στις μονότροπες ίνες βηματικού δείκτη. Στις πολύτροπες ίνες διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης η συνεισφορά του στη χρωματική διασπορά δεν είναι σημαντική επειδή είναι σημαντική η διασπορά τρόπων σε μικρές αποστάσεις

- ii. από τη σχέση της διάμετρου της ίνας και του μήκους κύματος του σήματος.

Όσο πιο κοντά είναι η σχέση 1: 1, τόσο μικρότερη είναι η διασπορά κυματοδηγού. Καθώς η διάμετρος κυματοδηγού αυξάνει, η διασπορά κυματοδηγού αυξάνεται σε ένα δεδομένο μήκος κύματος. Η διάμετρος του κυματοδηγού καθορίζει τον αριθμό των τρόπων ή «δρόμων» που μπορούν να διαδοθούν τα σήματα. Καθώς το μήκος κύματος μειώνεται, η διασπορά κυματοδηγού αυξάνεται σε ένα δεδομένης διάμετρου πυρήνα. Αυτό οφείλεται στην αυξημένη συχνότητα του σήματος και, ως εκ τούτου, την αυξημένη δυνατότητα για το σήμα να αλληλεπιδρά με τον κυματοδηγό. Αυτή η διασπορά κυματοδηγού επηρεάζει μόνο τις πολύτροπες ίνες (MMF), καθώς οι μονότροπες ίνες (SMF) υποστηρίζουν μόνο ένα τρόπο διάδοσης.



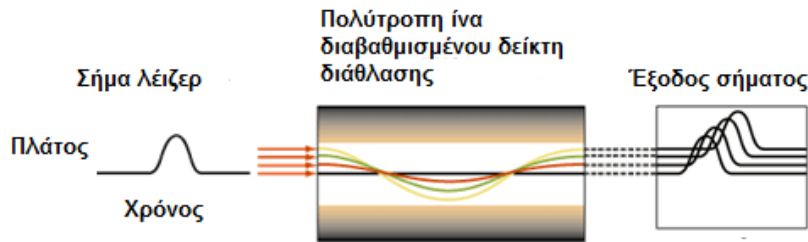
Εικόνα 4.34: Χρωματική διασπορά

Διασπορά υλικού και διασπορά κυματοδηγού τείνουν να έχουν αντίθετα αποτελέσματα. Οι κατασκευαστές ινών μπορούν να χειριστούν αυτά τα αποτελέσματα για να αλλάξουν τη θέση και την κλίση της καμπύλης της χρωματικής διασποράς. Όταν οι μονότροπες ίνες έγιναν για πρώτη φορά διαθέσιμες στο εμπόριο, χρησιμοποιήθηκε το σήμα στα 1310 nm, οπότε στα 1310 nm τέθηκε ο στόχος να είναι το μήκος κύματος μηδενικής διασποράς. Σε αυτές τις ίνες, η διασπορά αυξάνεται σταδιακά πάνω από 1.310 έως ότου φθάσει περίπου 17 (ps/nm/km) στα 1550 nm. Μια πρακτική χρήση της διασποράς υλικού και κυματοδηγού είναι να συνδυασθούν με έναν τρόπο που να παράγει μηδενική χρωματική διασπορά σε ένα επιθυμητό μήκος κύματος λειτουργίας στο παράθυρο χαμηλής εξασθένησης στα 1550 nm για τη μετάδοση υψηλής ταχύτητας σε μεγάλες αποστάσεις. Αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας προσμίξεις ή τροποποιώντας τη γεωμετρία ίνας. Η εικόνα 4.35 δείχνει πώς η διασπορά υλικού, διασπορά κυματοδηγού και χρωματική διασπορά ποικίλουν ανάλογα με το μήκος κύματος και δείχνει μηδενική χρωματική διασπορά σε μήκος κύματος 1550nm.

Το πρόβλημα της χρωματικής διασποράς εξαλείφεται πλήρως αν χρησιμοποιηθεί οπτική πηγή που να εκπέμπει σε ένα μόνο μήκος κύματος. Αυστηρά μονοχρωματικές πηγές βέβαια δεν υπάρχουν. Οι ευρέως χρησιμοποιούμενες φωτεινές πηγές Laser εκπέμπουν σε ένα φασματικό εύρος Δλ από 1 έως 10 nm ενώ οι πηγές LED έχουν μεγαλύτερο φασματικό εύρος 50 – 100nm. Σήμερα κατασκευάζονται πηγές με ακόμη μικρότερο εύρος και με αμελητέα χρωματική διασπορά, ωστόσο είναι πολύ ακριβές και χρησιμοποιούνται μόνο σε ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων. Επιπλέον, ακόμη και μονοχρωματική πηγή να υπήρχε, μία διεύρυνση του φασματικού εύρους της είναι αναπόφευκτη λόγω της διαμόρφωσης που πρέπει να εφαρμοστεί για την μεταφορά του σήματος πληροφορίας.

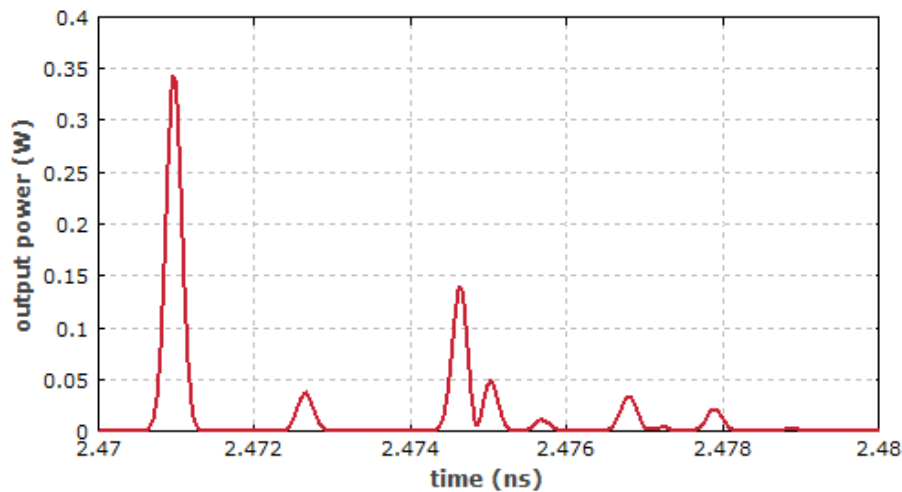
β. Διασπορά τρόπων μετάδοσης: Εμφανίζεται μόνο σε πολύτροπες ίνες και το σήμα διευρύνεται χρονικά επειδή ο χρόνος διάδοσης του οπτικού σήματος δεν είναι ίδιος για όλους τους τρόπους. Οφείλεται στη μεταβολή της σταθεράς διάδοσης για τους διαφορετικούς τρόπους. Το σήμα διασπάζεται σε ακτίνες φωτός οι οποίες έχουν διαφορετικό μήκος οπτικής διαδρομής κατά μήκος της ίνας, ως εκ τούτου, οι ακτίνες που εισέρχονται ταυτόχρονα δεν θα φτάσουν στο άλλο άκρο της ίνας την ίδια στιγμή (εικ.4.35). Το φως ταξιδεύει ταχύτερα στα περιοχές κοντά στο μανδύα που έχουν χαμηλότερο δείκτη διάθλασης και πιο αργά στις περιοχές κοντά στο κέντρο του πυρήνα που έχουν υψηλότερο δείκτη διάθλασης. Η τιμή της διασποράς των τρόπων μετάδοσης αυξάνει ανάλογα με το πλήθος των

τρόπων μετάδοσης που υποστηρίζει ο κυματοδηγός Εξαρτάται δηλ. από το μέγεθος του



Εικόνα 4.35: Διασπορά τρόπων μετάδοσης

πυρήνα και την ταχύτητα ομάδας σε κάθε τρόπο διάδοσης. Και οι δύο παράγοντες συμβάλλουν στην διασπορά τρόπων. Στη μονότροπη ίνα δεν υπάρχει η διασπορά τρόπων, δεδομένου ότι υπάρχει μόνο ένας τρόπος διάδοσης. Σε πολύτροπες ίνες βηματικού δείκτη μια τυπική τιμή διασποράς είναι τα 30 ms /km ενώ σε ίνες βαθμιαίου δείκτη η διασπορά του τρόπου μετάδοσης είναι μικρότερη του 1ms/km.



Εικόνα 4.36: Διέγερση πολλαπλών τρόπων

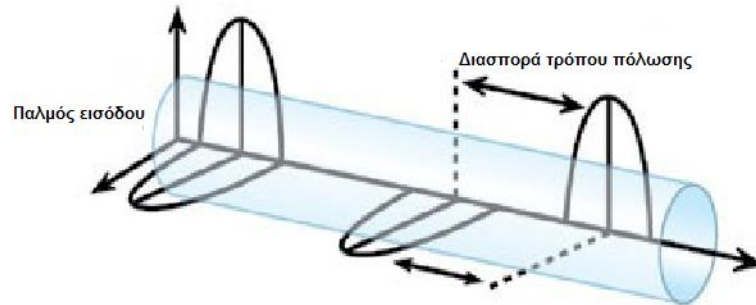
Ένας παλμός υπερβραχείας 200 fs (εικ.4.24) έχει ξεκινήσει σε 50 cm μήκος πολύτροπη ίνα έτσι ώστε να διεγερθούν πολλαπλές λειτουργίες. Μετά την ίνα, οι αντίστοιχες συνεισφορές εμφανίζονται σε διαφορετικούς χρόνους εξαιτίας διαφορετικών ταχυτήτων ομάδων των τρόπων. Η βασικός τρόπος έρχεται πρώτος, δεδομένου ότι είναι ο γρηγορότερος.

γ. Διασπορά τρόπων πόλωσης (PMD): Στις μονότροπες οπτικές ίνες υπάρχει ένας τρόπος διάδοσης που αποτελείται από δυο τρόπους ορθογώνιας πόλωσης αξόνων. Τα ηλεκτρικά πεδία στους δυο τρόπους είναι κάθετα μεταξύ τους. Όποια και αν είναι η πολωτική κατάσταση του σήματος μπορεί πάντα να αναλυθεί σε δυο κάθετους άξονες Στην ιδανική περίπτωση, ο πυρήνας μιας οπτικής ίνας είναι τελείως κυκλικός, και ως εκ τούτου έχει τον ίδιο δείκτη διάθλασης και για τους δυο τρόπους πόλωσης. Ασύμμετρες διαφορές στην ίνα όπως τάσεις μέσα στην ίνα, και δυνάμεις που εφαρμόζονται σε αυτή από το εξωτερικό περιβάλλον προκαλούν μικρές μεταβολές στους δείκτες διάθλασης των δυο κάθετων διευθύνσεων και οι πολωτικές συνιστώσες ταξιδεύουν με διαφορετικές ταχύτητες ομάδας. Έτσι, αυτοί οι δύο τρόποι πόλωσης φθάσουν σε ελαφρώς διαφορετικό χρόνο στο τέλος της ίνας (εικ.4.37). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διπλοθλαστικότητα. Ως συνέπεια έχουμε χρονική διαπλάτυνση και παραμόρφωση των παλμών. Η διασπορά τρόπων πόλωσης είναι σημαντική μόνο σε μονότροπες οπτικές ίνες όταν ο ρυθμός δεδομένων υπερβαίνει τα 2.5 Gb/sA.

Η χρονική διαφορά μεταξύ των δυο καταστάσεων δίνεται από τη σχέση:

$$\langle \Delta T \rangle \approx 0.1ps/\sqrt{km} \quad (4.25)$$

[3,5,6].



Εικόνα 4.37: Διασπορά τρόπων πόλωσης

Η συνολική διεύρυνση του παλμού δίνεται από τη σχέση

$$\Delta t_{total} = \sqrt{(\Delta t_{\text{τρόπων μετάδοσης}})^2 + (\Delta t_{\text{χρωματική}})^2 + (\Delta t_{\text{τρόπων πόλωσης}})^2} \quad (4.26)$$

Στις πολύτροπες ίνες η διασπορά τρόπων πόλωσης είναι ασήμαντη οπότε η σχέση γίνεται:

$$\Delta t_{total} = \sqrt{(\Delta t_{\text{τρόπων μετάδοσης}})^2 + (\Delta t_{\text{χρωματική}})^2} \quad (4.27)$$

Στις μονότροπες ίνες δεν υπάρχει διασπορά τρόπων οπότε η διεύρυνση του παλμού δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta t_{total} = \sqrt{(\Delta t_{\text{τρόπων μετάδοσης}})^2 + (\Delta t_{\text{χρωματική}})^2} \quad (4.28)$$

$$\Delta t_{total} = \sqrt{(\Delta t_{\text{χρωματική}})^2 + (\Delta t_{\text{τρόπων πόλωσης}})^2} \quad (4.29)$$

4.7.4 Μη γραμμικά φαινόμενα

Οφείλονται στο γεγονός ότι η απόκριση κάθε διηλεκτρικού στο φως γίνεται μη γραμμική στα έντονα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Τα σημαντικότερα από τα φαινόμενα αυτά είναι:

4.7.4.1. Διεγερόμενη σκέδαση φωτός:

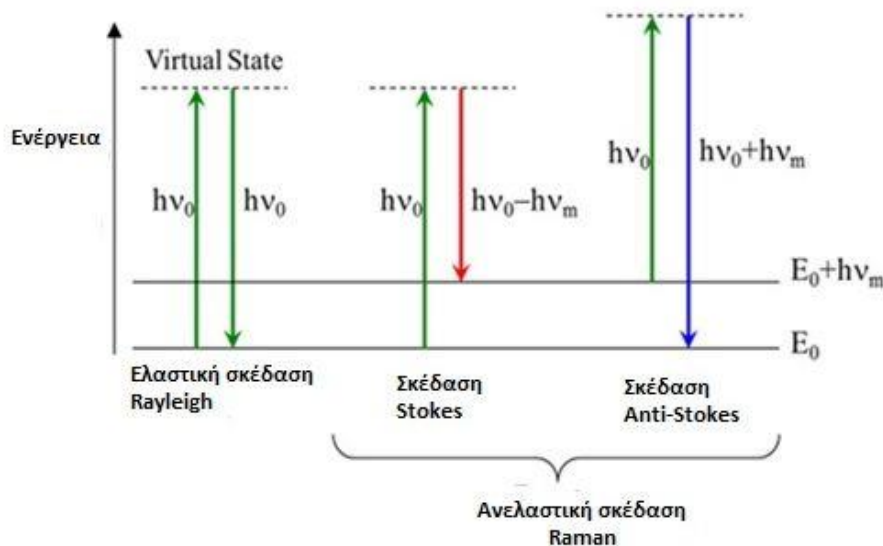
Η συχνότητα του σκεδαζόμενου φωτός μεταβάλλεται κατά την ανελαστική σκέδαση. Δυο περιπτώσεις ανελαστικής σκέδασης είναι: [3,5,6,11].

α. Ανελαστική σκέδαση. Το Φαινόμενο Raman. (SRS)

Όταν τα φωτόνια σκεδάζονται από ένα άτομο ή μόριο) τα περισσότερα φωτόνια σκεδάζονται ελαστικά (Rayleigh scattering). Ένα μικρό ποσοστό φωτονίων (περίπου 1 στα 10 εκατομμύρια) σκεδάζονται ανελαστικά με διέγερση, με τα σκεδαζόμενα φωτόνια να έχουν διαφορετική συχνότητα από τη συχνότητα του προσπίπτοντος φωτονίου (φαινόμενο Raman). Το φάσμα του σκεδαζόμενου φωτός περιέχει εκτός από τις γραμμές Rayleigh και

άλλες γραμμές μετατοπισμένες ως προς την αρχική συχνότητα (φάσμα Raman). (εικ.4.38). Το φαινόμενο Raman οδηγεί σε δυο πιθανά αποτελέσματα

- Το μόριο απορροφά ενέργεια υφίσταται μετάβαση σε κάποιο υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο, το σκεδαζόμενο φωτόνιο χάνει ενέργεια και σκεδάζεται με χαμηλότερη συχνότητα (Δf αρνητικό) από το απορροφούμενο φωτόνιο (σκέδαση Stokes Raman).
- Αν το μόριο βρίσκεται ήδη σε κάποια ενεργειακή κατάσταση υψηλότερη της θεμελιώδους, η συνάντηση με ένα φωτόνιο μπορεί να προκαλέσει την αποδιέγερσή και το σκεδαζόμενο φωτόνιο έχει μεγαλύτερη ενέργεια και συχνότητα (Δf θετικό). από το απορροφούμενο (σκέδαση anti-Stokes Raman).



Εικόνα 4.38: Σκέδαση φωτονίων

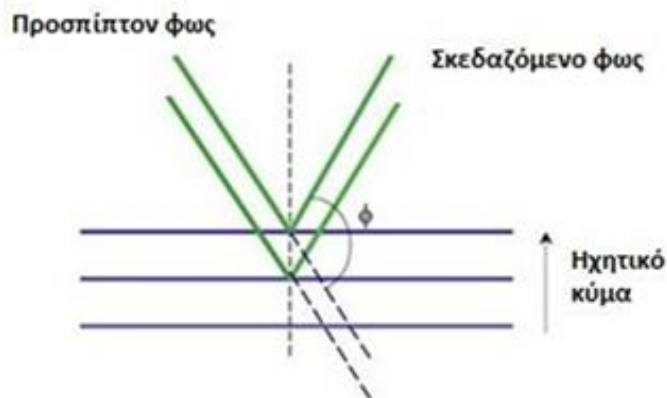
Η μορφή του φάσματος στην πλευρά όπου η συχνότητα είναι χαμηλότερη από αυτή του διεγείροντος φωτός (Δf αρνητικό - γραμμές Stokes) αποτελεί το αντικατοπτρικό είδωλο της μορφής του φάσματος που κείται στην άλλη πλευρά της γραμμής Rayleigh (Δf θετικό - γραμμές anti-Stokes), με τη διαφορά ότι οι εντάσεις των λαμβανομένων κορυφών για αρνητικό Δf είναι μεγαλύτερες από ότι για θετικό. Οι εντάσεις των γραμμών εξαρτώνται από τους πληθυσμούς των αρχικών καταστάσεων του υλικού, που με τη σειρά τους εξαρτώνται από τη θερμοκρασία. Σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας η ανώτερη κατάσταση θα έχει λιγότερο πληθυσμό από την κατώτερη, άρα και ο ρυθμός των μεταπτώσεων από την κατώτερη στην ανώτερη κατάσταση (μεταπτώσεις Stokes) θα είναι μεγαλύτερος από το ρυθμό στην αντίθετη κατεύθυνση (μεταπτώσεις anti-Stokes). Αντίστοιχα οι κορυφές σκέδασης Stokes είναι ισχυρότερες από τις κορυφές σκέδασης anti-Stokes. Ο λόγος τους εξαρτάται από τη θερμοκρασία

β. Σκέδαση Brillouin

Ένα στερεό που διεγείρεται ώστε στιγμιαία να παραμορφωθεί ελαστικά, ταλαντώνεται δημιουργώντας στάσιμα κύματα (τρόπους ταλάντωσης). Το φωνόνιο είναι το ελάχιστο διακριτό ποσό ενέργειας που μπορεί να μεταφερθεί σε ένα στερεό κρύσταλλο, με μηχανικές ταλαντώσεις των ατόμων του, και αντιστοιχεί στη μηχανική ταλάντωση με το μικρότερο μήκος κύματος που μπορεί να αναπτυχθεί και να διαδοθεί μέσα στον κρύσταλλο. Κάθε κανονικός τρόπος ταλάντωσης, αναλύεται και περιγράφεται ως επαλληλία φωνονίων. Τα φωνόνια μεταφέρουν θερμική ενέργεια στο υλικό με αποτέλεσμα να αλλάζουν τη θερμοκρασία των αγωγών. Με την αύξηση της θερμοκρασίας αλλάζουν οι ενδοατομικές αποστάσεις και

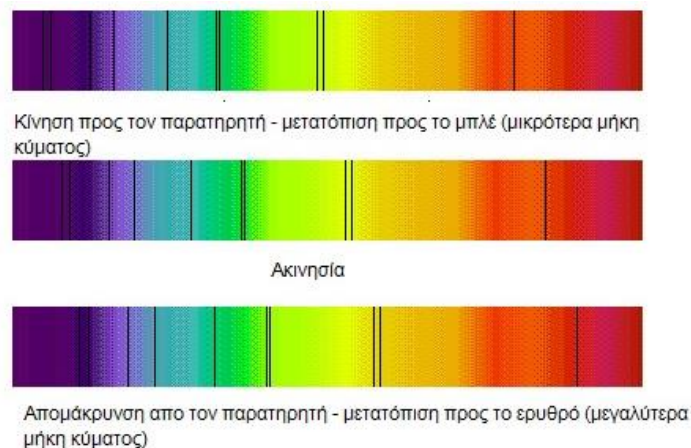
αλλάζει και ο δείκτης διάθλασης κατά περιοχές του υλικού. Αυτό μακροσκοπικά φαίνεται σαν κινούμενο φράγμα περίθλασης. Η διεγερόμενη σκέδαση Brillouin, (SBS) είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος μεγάλης έντασης με το κύμα του κρυσταλλικού πλέγματος του υλικού της οπτικής ίνας. Η σκέδαση Brillouin μπορεί να ερμηνευθεί από δυο έννοιες:

- **την ανάκλαση Bragg** . Ανάκλαση της ακτινοβολίας στα διαδοχικά επίπεδα του κρυστάλλου και παρατηρούνται μέγιστα της έντασης, σε ορισμένες γωνίες τις λεγόμενες γωνίες Bragg (εικ.4.39).



Εικόνα 4.39: Σκέδαση Bragg

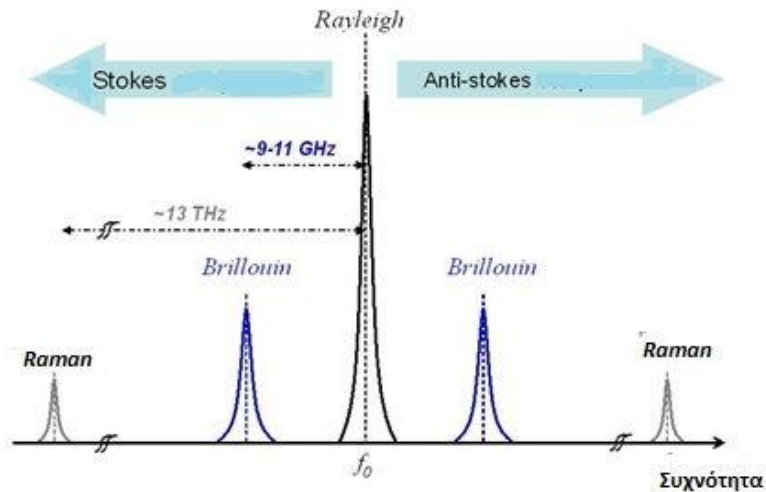
- **τη μετατόπιση Doppler** : Πρόκειται για την αλλαγή στη συχνότητα και το μήκος κύματος ενός κύματος που προέρχεται από ένα κινητό αντικείμενο, όπως το αντιλαμβάνεται ένας παρατηρητής. Έτσι για το λευκό φως έχουμε (εικ.4.40)



Εικόνα 4.40: Μετατόπιση Doppler

Η σκέδαση είναι ανελαστική. ένα μέρος του διαδιδόμενου κύματος αλλάζει τη συχνότητα και την ενέργειά του σε ορισμένες κατευθύνσεις, όπως στην περίπτωση περίθλασης από ταλαντούμενο φράγμα περίθλασης. Η σκέδαση γίνεται προς την αντίθετη κατεύθυνση από την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Το φωτόνιο μπορεί να χάσει ενέργεια (φαινόμενο Stokes) και να δημιουργήσει ένα φωνόνιο ενέργειας που μπορεί να μεταφερθεί στο στερεό κρύσταλλο, με μηχανικές ταλαντώσεις των ατόμων του ή να κερδίσει ενέργεια

απορροφώντας ένα φωνόνιο (φαινόμενο anti-Stokes). Αυτή η μετατόπιση ενέργειας που ισούται με την ενέργεια του εκπεμπόμενου ή απορροφούμενου φωνονίου αντιστοιχεί σε μια μετατόπιση συχνότητας Brillouin. Στις οπτικές ίνες πυριτίου τα κύματα Stokes διαδίδονται προς τα πίσω και πολύ λίγο τμήμα εμπρός. Η συχνότητα του φωτονίου Stokes σε μήκος κύματος περίπου 1550-nm είναι περίπου τρεις φορές μικρότερη από τη συχνότητα της σκέδασης Raman (εικ.4.41)



Εικόνα 4.41: Συνιστώσες σκέδασης σε οπτική ίνα

4.7.4.2 Μη γραμμική διάθλαση

Η μη γραμμική εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από την ισχύ αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για τα οπτικά συστήματα τηλεπικοινωνιών και μπορεί να οδηγήσει:

α. Σε αυτοδιαμόρφωση φάσης (SPM) Σε ένα υπερβραχύ παλμός φωτός διάρκειας picosecond ή femtosecond με υψηλή ισχύ αιχμής, η στιγμιαία συχνότητα του μπορεί να κυμαίνεται σε ένα φάσμα πολλών terahertz. Όταν ο παλμός διαδίδεται σε ένα μέσον προκαλεί μια χρονικά εξαρτώμενη μεταβολή φάσης σύμφωνα με τη χρονικά εξαρτώμενη ένταση του παλμού, την αυτοδιαμόρφωση φάσης (SPM) που μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική φασματική διεύρυνση, δηλαδή αύξηση της φασματικής ζώνης ενώ το χρονικό περιεχόμενο του παλμού δε μεταβάλλεται (εικ.4.42) Με τον τρόπο αυτό ένας αρχικά unchirped παλμός (με σταθερή συχνότητα), αποκτά ένα chirp, δηλ. μια προσωρινά μεταβαλλόμενη στιγμιαία συχνότητα.

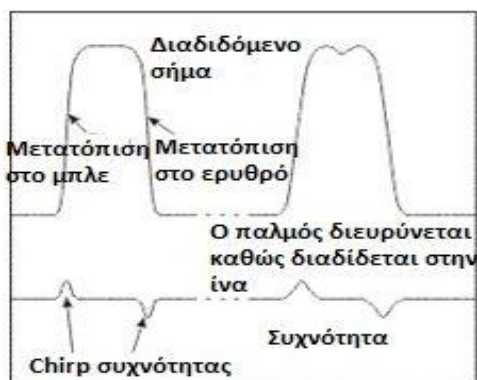
Αυτό μπορεί να περιγραφεί ως μη γραμμική μεταβολή του δείκτη διάθλασης:

$$\Delta n = n_2 \cdot I \quad (4.30)$$

n_2 : είναι ο μη γραμμικός δείκτης διάθλασης

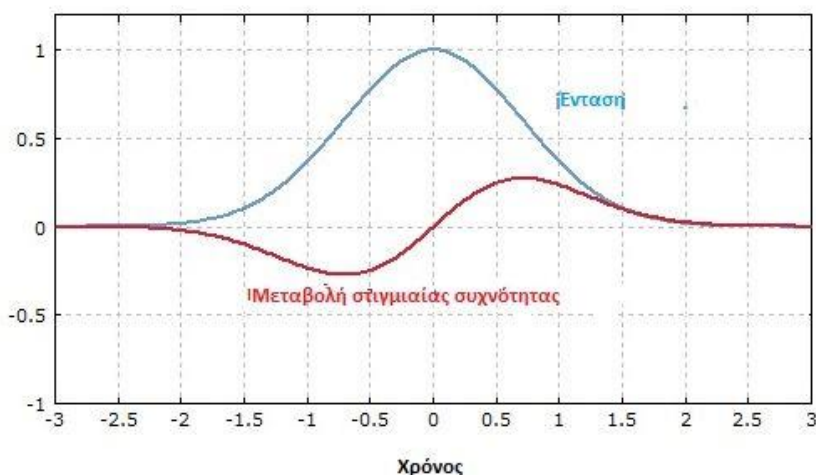
I : η οπτική ένταση

δηλ. οι μεταβολές αυτές του δείκτη διάθλασης είναι υπεύθυνες για την τη διεύρυνση του παλμού στην ίνα



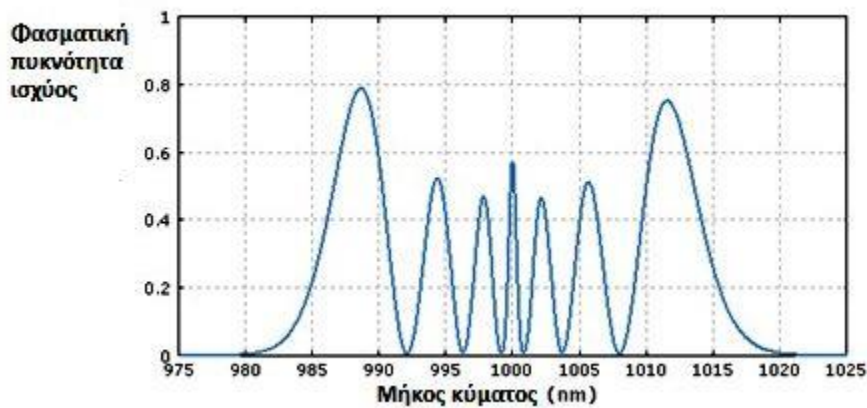
Εικόνα 4.42: Αυτοδιαμόρφωση φάσης

Το μπροστινό μέρος του παλμού μετατοπίζεται σε χαμηλότερες συχνότητες και έχουμε μετατόπιση προς το ερυθρό, ενώ το πίσω μέρος μετατοπίζεται σε υψηλότερες συχνότητες προς το μπλέ. Στο κέντρο του παλμού η μετατόπιση συχνότητας είναι περίπου γραμμική. Στην εικόνα 4.43 φαίνεται η στιγμιαία συχνότητα ενός αρχικά unchirped παλμού που έχει υποστεί αυτοδιαμόρφωση φάσης. (με μια π μετατόπιση φάσης 20 rad), που οδηγεί σε χαρακτηριστικές ταλαντώσεις της οπτικής ισχύος ανά οπτική συχνότητα. Στην αρχή του παλμού η συχνότητα είναι μικρότερη και στο τέλος μεγαλύτερη. Ύστερα από διάδοση σε ιδεώδες μέσο παίρνουμε έναν chirped παλμό χωρίς διεύρυνση. Αν ο παλμός αρχικά είναι unchirped η αυτοδιαμόρφωση φάσης (SPM) οδηγεί σε διεύρυνση του φάσματος (αύξηση της οπτικής περιοχής συχνοτήτων, ενώ μπορεί να προκύψει συμπίεση φάσματος συχνοτήτων αν ο αρχικός παλμός είναι downchirped. Για ισχυρό SPM, το οπτικό φάσμα παρουσιάζει ισχυρές ταλαντώσεις



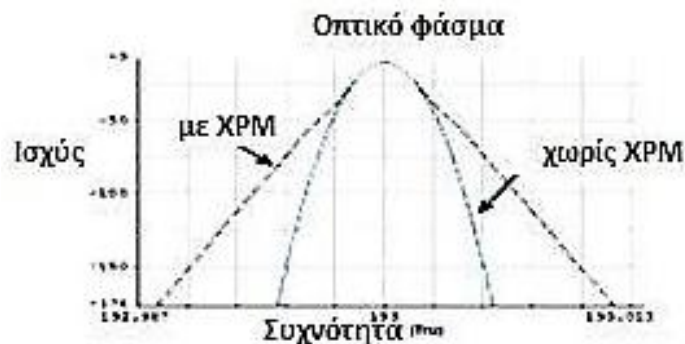
Εικόνα 4.43: Στιγμιαία συχνότητα παλμού με αυτοδιαμόρφωση

(εικόνα 4.44) επειδή η στιγμιαία συχνότητα υφίσταται ισχυρές παρεκτροπές, έτσι ώστε να υπάρχουν συνεισφορές από δυο διαφορετικούς χρόνους στο ολοκλήρωμα Fourier για δεδομένη συχνότητα. Ανάλογα με τη συχνότητα, οι συνεισφορές αυτές προστίθενται ή αναιρούνται.



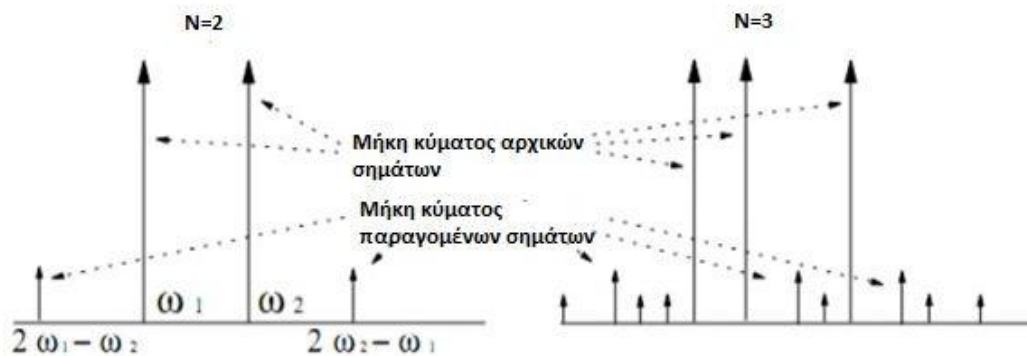
Εικόνα 4.44: Αποτελέσματα ισχυρής αυτοδιαμόρφωσης φάσης

β. Την **ετεροδιαμόρφωση (XPM)** που εμφανίζεται όταν δυο ή περισσότερα κανάλια εκπέμπουν ταυτόχρονα στο εσωτερικό μιας οπτικής ίνας με χρήση διαφορετικών φερουσών συχνοτήτων και προκαλεί ολίσθηση φάσης των σημάτων (εικ.4.45).



Εικόνα 4.45: Αποτελέσματα ετεροδιαμόρφωσης

γ. **Μίξη τεσσάρων κυμάτων (FWM)**. Η μίξη τεσσάρων σημάτων αποτελεί το μεγαλύτερο πρόβλημα των πολυκαναλων οπτικών συστημάτων. Η διάδοση πολλαπλών σημάτων συνεισφέρει στην δημιουργία καινούργιων που αντλούν ισχύ από τα κύρια. Ο αριθμός των παραγόμενων σημάτων-προϊόντων δίνεται από τη σχέση $\frac{1}{2} \cdot (N^3 - N^2)$, όπου N είναι ο αρχικός αριθμός των σημάτων (εικόνα 4.46). Η FWM προκαλεί διακαναλικές παρεμβολές και υποβάθμιση του SNR και αποτελεί περιοριστικό παράγοντα στα πολυκαναλικά συστήματα που χρησιμοποιούν πολυπλεξία διαίρεσης μήκος κύματος. [3,5,6].

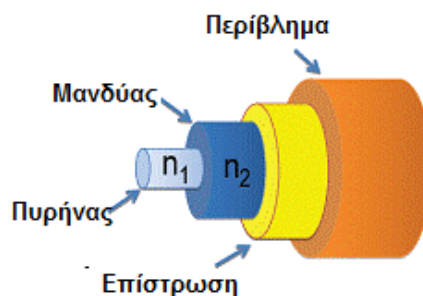


Εικόνα 4.46 FWM με αρχικό αριθμό σημάτων N=2 και N=3 αντίστοιχα

4.8 Καλώδια οπτικών ινών

Η δομή ενός καλωδίου οπτικών ινών είναι τέτοια, ώστε να αποτρέπει τις εξωτερικές φθορές, αλλά και την απώλεια σήματος, που θα προέκυπτε από τη διαρροή της φωτεινής ακτινοβολίας στο εξωτερικό του. Τα τμήματα ενός καλωδίου οπτικών ινών από το κέντρο προς το εξωτερικό του, είναι τα εξής (εικ.4.47): [3,5,6].

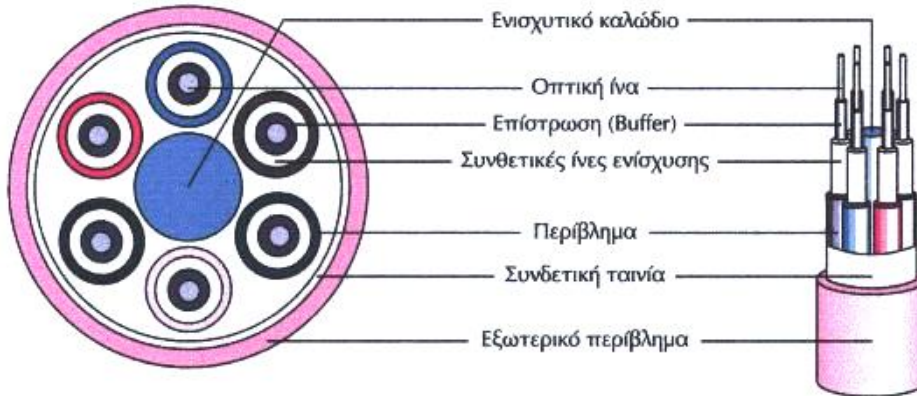
- **Ο πυρήνας** (core): Βρίσκεται στο κέντρο του καλωδίου. Αποτελείται από μία ή περισσότερες οπτικές ίνες, που αναλαμβάνουν τη μετάδοση των φωτεινών σημάτων.



Εικόνα 4.47: Δομή καλωδίου οπτικών ινών

- **Ο μανδύας** (Εσωτερική επένδυση, cladding) : Είναι το υλικό που αντανακλά εσωτερικά το φως, εκμηδενίζοντας παράλληλα το ποσοστό διαφυγής του στο εξωτερικό του καλωδίου.
- **Η επίστρωση** (Buffer coating) Είναι από ακρυλικό πολυμερές και παρέχει μηχανική μόνωση, προστασία από φυσική καταστροφή και αναγνώριση της ίνας. Όλα τα καλώδια περιέχουν επίστρωση 250 microns.
- **Το περίβλημα** (Εξωτερική επένδυση, εξωτερικός μανδύας, Jacket). Το εξωτερικό στρώμα προστασίας που επιλέγεται ώστε να προστατεύει την ίνα από τις συνθήκες περιβάλλοντος στο οποίο εγκαθίσταται. Ως περίβλημα χρησιμοποιείται μαύρο πολυαιθυλένιο (PE) που είναι ανθεκτικό στην υγρασία και στην έκθεση στο ηλιακό φως. Στα καλώδια εσωτερικής χρήσης χρησιμοποιούνται υλικά που επιβραδύνουν την καύση και έχουν κωδικοποίηση χρώματος για να αναγνωρίζονται οι ίνες στο καλώδιο. Τα καλώδια εσωτερικής-εξωτερικής χρήσης έχουν εξωτερικό περίβλημα από PE που μπορεί να απομακρυνθεί ώστε να εμφανισθεί το εσωτερικό περίβλημα από υλικό βραδυφλεγές για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέσα σε κτίρια.
- Κάποια καλώδια περιλαμβάνουν μια **κεντρική ράβδο** fibreglass που παρέχει επιπλέον αντοχή στο καλώδιο για να αποφεύγεται η συστολή και η καταστροφή των ινών.

- Τα καλώδια εξωτερικής χρήσης (εικ.4.48) προστατεύονται από νερό και υγρασία. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι θυροτροφικό ζελέ ή απορροφητική ταινία ή σκόνη.
- **Ενισχυτικά αντοχής.** (Strength members and stiffeners): Συνήθως νήματα αραμιδίου Kevlar, που απορροφούν την τάση που απαιτείται για την έλξη του καλωδίου και παρέχει απορρόφηση κραδασμών για την ίνα. Οι ίνες αραμιδίου έχουν την ιδιότητα να μην τεντώνουν και όταν ασκείται μεγάλη δύναμη που υπερβαίνει την αντοχή τους σπάζουν. Μερικά καλώδια εξωτερικής χρήσης έχουν διπλή επένδυση με ένα μεταλλικό φύλλο ανάμεσά τους για να προστατεύει το καλώδιο από τα δόντια των τρωκτικών.

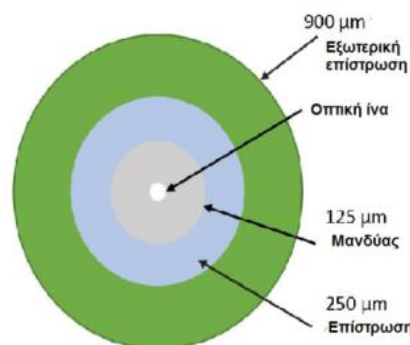


Εικόνα 4.48: Δομή καλωδίου οπτικών ινών εξωτερικής χρήσης

Διακρίνουμε δυο τύπους καλωδίων οπτικών ινών ως προς την κατασκευή τους, τα καλώδια Tight buffer και τα καλώδια Loose tube.

4.8.1 Tight buffer

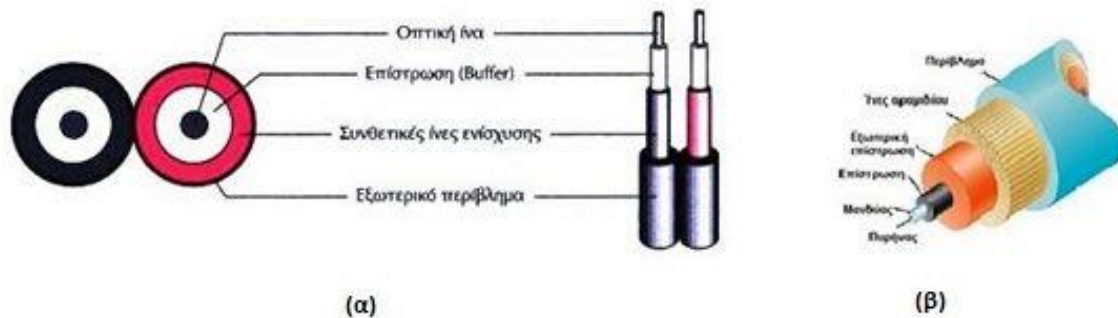
Στα καλώδια tight buffer (εικ.4.49), έχουμε σε κάθε οπτική ίνα μανδύα, και εξωτερικό μονωτικό περίβλημα μανδύα. Τα καλώδια αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται όπου η ευελιξία και η ευκολία τερματισμού παίζει σημαντικό ρόλο, γενικά χρησιμοποιούνται σε εσωτερικούς χώρους. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι τύποι καλωδίων simplex, zipcord, distribution και breakout.



Εικόνα 4.49: Τομή καλωδίου τύπου "tight buffer"

4.8.1.1 Simplex

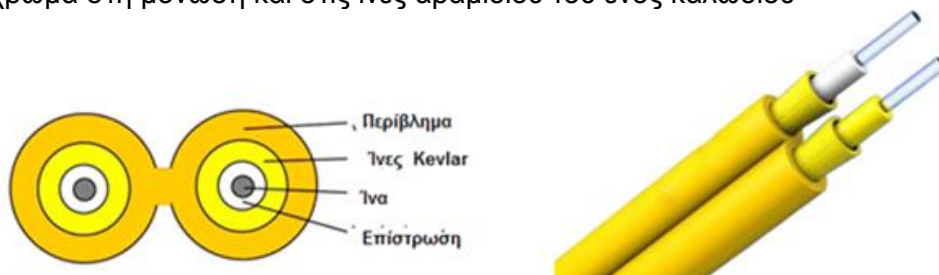
Τα καλώδια Simplex είναι καλώδια μιας ίνας, με επίστρωση 900 micron πάνω από την κύρια επίστρωση, ίνες αραμιδίου Kevlar και περίβλημα και χρησιμοποιούνται σε καλώδια patch για την σύνδεση δικτυακών συσκευών (εικόνα 4,50). Τα εύκαμπτα καλώδια διασύνδεσης αποτελούνται από δυο καλώδια ενωμένα στο εξωτερικό τους, το κάθε ένα από τα οποία περιέχει οπτική ίνα από πλαστικό.



Εικόνα 4.50: Καλώδια Simplex (α) διασύνδεσης, (β) καλώδια patch cord

4.8.1.2 Ο τύπος Zip-cord

Είναι καλώδιο με δυο ή περισσότερους πυρήνες που συγκρατούνται από ένα μονωτικό περίβλημα και μπορούν εύκολα να διαχωρισθούν. Ο τύπος αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά οπτικών και ηλεκτρικών σημάτων μαζί. Χρησιμοποιούνται ως καλώδια σε λάμπες ή σε ηχεία. Οι αγωγοί μπορούν να ξεχωρίσουν από το διαφορετικό χρώμα στη μόνωση και στις ίνες αραμιδίου του ενός καλωδίου



Εικόνα 4.51: Καλώδιο τύπου Zip cord

4.8.1.3 Το καλώδιο τύπου Distribution

Είναι το περισσότερο χρησιμοποιούμενο καλώδιο εσωτερικής χρήσης, καθώς είναι μικρού μεγέθους και ελαφρύ. Περιέχει αρκετές ίνες τύπου tight-buffered που έχουν κοινή

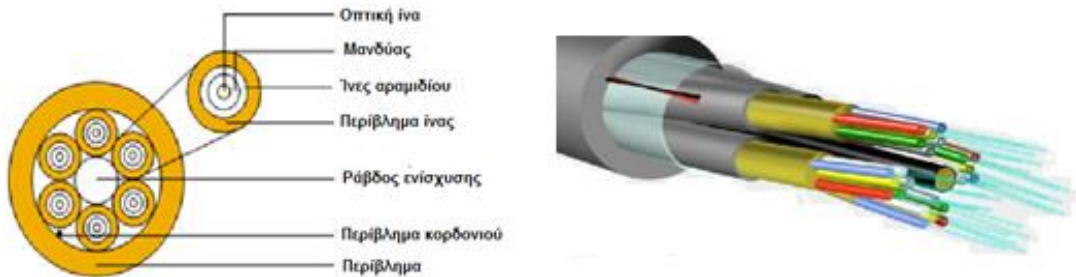


Εικόνα 4.52: Καλώδιο τύπου Distribution

επένδυση και ίνες Kevlar και σε ορισμένες περιπτώσεις και ράβδο fiberglass για ενίσχυση και για αποτροπή στρέβλωσης. Τα καλώδια αυτά έχουν μικρό μέγεθος. Έχουν διπλή επίστρωση αλλά επειδή οι ίνες τους δεν είναι ενισχυμένες ξεχωριστά πρέπει να τερματισθούν σε panel ή junction box για να προστατευθούν οι ίνες.

4.8.1.4 Τα καλώδια τύπου Breakout:

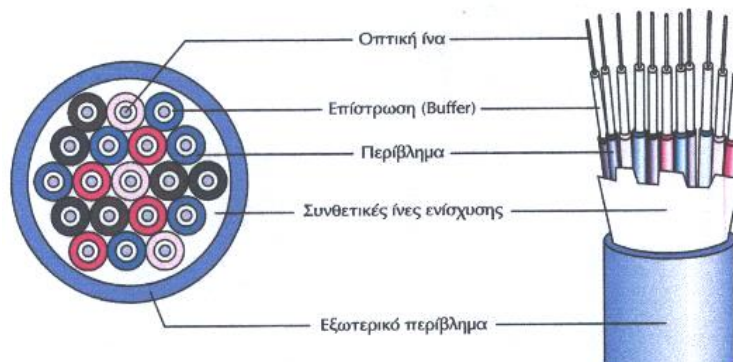
Προτιμώνται εκεί όπου πρέπει να χρησιμοποιηθούν τραχιά καλώδια ή άμεσος τερματισμός χωρίς κουτιά διακλάδωσης, patch πάνελ ή άλλο υλικό. Αποτελούνται από αρκετά καλώδια simplex που περιβάλλονται από κοινή επένδυση. Είναι μεγαλύτερα και ακριβότερα από τα καλώδια τύπου distribution. Είναι ιδανικό για βιομηχανικές εφαρμογές επειδή κάθε ίνα είναι ατομικά ενισχυμένη και η κατασκευή αυτή επιτρέπει γρήγορη τερματισμό στους συνδέσμους και δεν απαιτεί πάνελ διανομής ή κουτιά.



Εικόνα 4.53: Καλώδιο τύπου Breakout

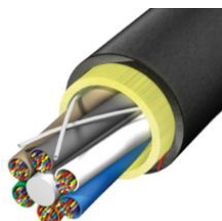
4.8.2. Καλώδια τύπου loose tube

Είναι μικροί πλαστικοί σωλήνες που περιέχουν 12 ίνες. Τοποθετούνται κυκλικά



Εικόνα 4.54: Καλώδιο τύπου Loose tube

γύρω από μια ανθεκτική ράβδο που περιβάλλεται από ίνες αραμιδίου και εξωτερικό μανδύα. Τα καλώδια αυτού του τύπου μπορούν να γεμίσουν με θυροτροφικό ζελε ή απορροφητική σκόνη ώστε να προφυλαχθούν οι οπτικές ίνες (εικ.4.54). Κάποια καλώδια εξωτερικής χρήσης έχουν διπλό εξωτερικό περίβλημα με μεταλλική ταινία ανάμεσά τους για προστασία από τρωκτικά ή πολυεστερική ταινία κενlar για περισσότερη αντοχή από μεγάλη τάση αφέλκυσης. Το καλώδιο loose-tube με ζελέ στο εσωτερικό του μπορεί να τοποθετηθεί μέσα στο έδαφος. Το καλώδιο **Dry loose-tube** έχει μεγάλη αντοχή, χρησιμοποιείται σε εξωτερικούς χώρους και εγκαθίσταται ευκολότερα από το καλώδιο με ζελέ.



Εικόνα 4.55. Καλώδιο Dry loose tube

4.8.2.1 Καλώδια τύπου Ribbon

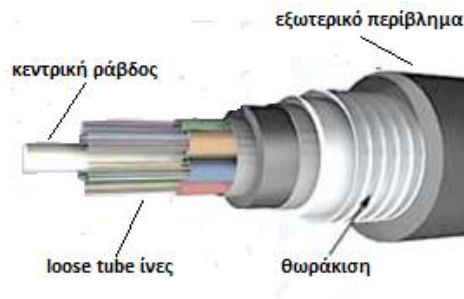
Χρησιμοποιούνται όπου απαιτούνται μεγάλος αριθμός ινών και καλώδια μικρής διαμέτρου. Το καλώδιο αυτό έχει τις περισσότερες ίνες στο πιο μικρό καλώδιο, τοποθετημένες σε σειρά σε ταινίες, συνήθως 12 ινών, και οι ταινίες τοποθετούνται η μία πάνω στην άλλη. Συνήθως σε μια τομή του καλωδίου υπάρχουν 144 ίνες 6 mm και το περίβλημα έχει διάμετρο 13 mm. Είναι καλώδιο εξωτερικής χρήσης και περιέχει gel για παρεμπόδιση της υγρασίας.



Εικόνα 4.56: Καλώδιο τύπου Ribbon

4.8.2.2 Θωρακισμένα καλώδια (Armored Cable)

Τα θωρακισμένα καλώδια οπτικών ινών έχουν ένα πρόσθετο εξωτερικό στρώμα θωράκισης συνήθως μεταλλική ταινία μεταξύ των δυο περιβλημάτων για περαιτέρω ενίσχυση της προστασίας. Είναι κατάλληλα για να τοποθετηθούν απευθείας στο έδαφος, ή σε κανάλια σε εξωτερικούς χώρους, σε περιοχές που υπάρχουν τρωκτικά. Χρησιμοποιούνται επίσης σε data centers, όπου τα καλώδια τοποθετούνται κάτω από το πάτωμα και υπάρχει πρόβλημα σύνθλιψης. Τα καλώδια αυτού του τύπου είναι αγωγίμα και πρέπει να γειωθούν κατάλληλα. Έχουν πολύ μεγάλη διάρκεια και ανθεκτικότητα.



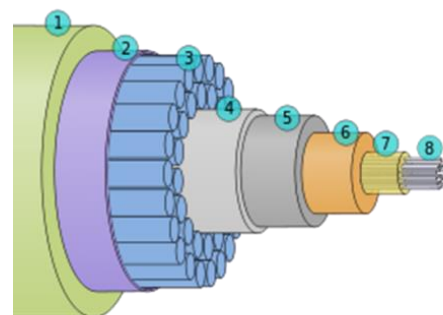
Εικόνα 4.57: Θωρακισμένο καλώδιο

4.8.2.3 Υποβρύχια καλώδια τηλεπικοινωνιών.

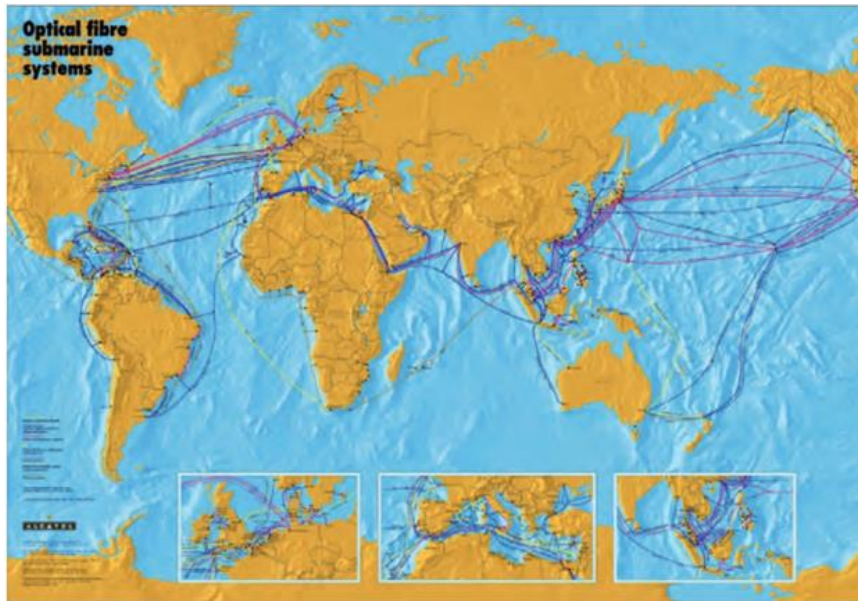
Ένα σύγχρονο υποβρύχιο καλώδιο περιέχει:

- 1 – Πολυαιθυλένιο
- 2 – Ταινία Mylar
- 3 – Ατσάλινα σύρματα
- 4 – Στρώμα αλουμινίου
- 5 – Πολυκαρβονικές ίνες
- 6 – Σωλήνας χαλκού ή αλουμινίου
- 7 – Ζελέ πετρελαίου
- 8 – Οπτικές ίνες

Καλώδια διαμέτρου 69mm και βάρους 10Kg/m χρησιμοποιήθηκαν το 2010 για να συνδεθούν όλοι οι ήπειροι (εικ.4.58).



Εικόνα 4.58: Υποβρύχιο καλώδιο τηλεπικοινωνιών



Εικόνα 4.59: Χάρτης διηπειρωτικών υποβρυχίων καλωδίων

4.8.2.4 Εναέρια καλώδια

Χρησιμοποιούνται για εξωτερικές εγκαταστάσεις σε στύλους. Μπορούν να είναι προσδεμένα σε ένα αγγελιοφόρο καλώδιο ή άλλο καλώδιο (συνήθως CATV) ή να έχουν μεταλλικό περίβλημα ή ίνες αραμιδίου για να είναι ανεξάρτητα. Τα καλώδια αυτά πρέπει να είναι γειωμένα.



Εικόνα 4.60: Εναέριο καλώδιο

4.8.2.5 Καλώδια εμφύσησης

Στην πραγματικότητα δεν είναι καλώδια; Αλλά άδειοι σωλήνες. Όταν εγκαταστήσουμε ένα τέτοιου τύπου καλώδιο που αποτελείται από μια σειρά άδειων σωλήνων μπορούμε να φυσήξουμε οπτικές ίνες μέσα σε αυτούς χρησιμοποιώντας πετρευσμένο αέριο. Αν χρειάζονται αντικατάσταση μπορούν με τη βοήθεια συμπιεσμένου αερίου να βγουν από τους σωλήνες. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές εσωτερικού και εξωτερικού χώρου ακόμη και σε δίκτυα FTTH. Χρησιμοποιούνται ειδικές ίνες που έχουν επένδυση για ευκολότερο φύσημα (μονότροπες ή πολύτροπες) Έχουν μεγαλύτερο κόστος εγκατάστασης.

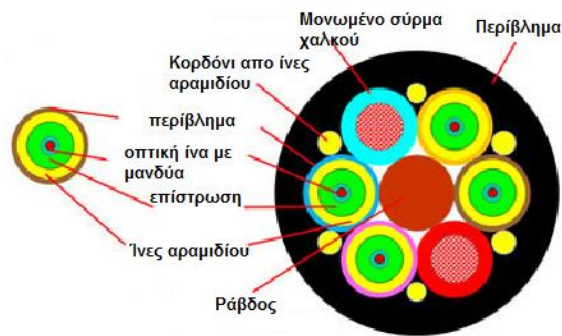


Εικόνα 4.61: Καλώδιο εμφύσησης

4.8.2.6 Υβριδικά καλώδια

Καλώδια τα οποία περιέχουν δυο τύπους οπτικών ινών, συνήθως μονότροπες και πολύτροπες. Συνήθως χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις μεταξύ γειτονικών κτιρίων.

4.8.2.7 Μικτά καλώδια



Εικόνα 4.62: Μικτό καλώδιο

Τα καλώδια που περιέχουν ίνες και ηλεκτρικού αγωγούς. Υποβρύχια συνδεδεμένα οχήματα χρησιμοποιούν τέτοια καλώδια, χρησιμοποιούνται επίσης σε απομακρυσμένες ασύρματες κεραιές ή CCTV cameras. Τα καλώδια αυτά πρέπει να γειωθούν κατάλληλα. Υπάρχουν επίσης πολλές **μαύρες ίνες** μέσα σε καλώδια, που δεν χρησιμοποιούνται ακόμα αλλά ενδέχεται να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον.

Πίνακας 4.2 Χρωματικός κώδικας καλωδίων.

Τύπος ίνας	Διάμετρος (μm)	Χρώμα επίστρωσης
Multimode	50/125	Orange
Multimode	62.5/125	Slate
Multimode	85/125	Blue
Multimode	100/140	Green
Singlemode	-	Yellow

4.8.3 Δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων

Το Σεπτέμβριο 2012, η Ιαπωνική εταιρία NTT παρουσίασε καλώδιο μονής ίνας που μπορεί να μεταδώσει 1 petabit ανά δευτερόλεπτο (10^{15} bits/s) σε απόσταση 50 χιλιομέτρων. Τα σύγχρονα καλώδια οπτικών ινών περιέχουν μέχρι 1000 ίνες σε ένα καλώδιο με εύρος ζώνης συχνοτήτων της τάξης terabytes ανά δευτερόλεπτο.

4.9 Πλεονεκτήματα οπτικών ινών

Σήμερα, οι οπτικές ίνες φαίνεται να είναι η καλύτερη λύση στα μέσα μετάδοσης και αυτό γιατί τα πλεονεκτήματα, που παρουσιάζουν, σε σχέση με τα άλλα μέσα είναι ιδιαίτερα σημαντικά. Στα βασικά πλεονεκτήματα της οπτικής ίνας έναντι των άλλων ενσύρματων μέσων διάδοσης περιλαμβάνονται τα ακόλουθα:

- Οι οπτικές ίνες διαθέτουν πολύ μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται υψηλές ταχύτητες μετάδοσης (της τάξης των Gbps). Συνήθεις ταχύτητες μετάδοσης είναι αυτές των 2 Gbps, και 10 Gbps, ενώ έχουν επίσης αναπτυχθεί συστήματα των 20,40 και 50 Gbps. Σε περίπτωση πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος (WDM), οι ταχύτητες φθάνουν σε μερικά Tbps.

- Τα δεδομένα μεταδίδονται ψηφιακά άρα έχουμε γρηγορότερη κωδικοποίηση-αποκωδικοποίηση των δεδομένων. Το αμιγώς ψηφιακό σήμα, εξασφαλίζει υψηλότερη ποιότητα επικοινωνίας και αποφυγή προβλημάτων που θα προέκυπταν σε μια αναλογική μετάδοση. Επίσης, δεν επηρεάζονται από ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, με αποτέλεσμα να συνιστάται η χρήση τους σε βιομηχανικό περιβάλλον και σε χώρους με υψηλό θόρυβο.
- Η εξασθένηση των σημάτων είναι μικρότερη από ό,τι στα χάλκινα και ομοαξονικά καλώδια, με αποτέλεσμα οι αποστάσεις μεταξύ ενισχυτών ή άλλων ενεργών στοιχείων να φθάνουν μέχρι και μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα, ανάλογα με τη τεχνική και το ρυθμό μετάδοσης.
- Η υποκλοπή ή η παρεμβολή πληροφορίας είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθούν, με αποτέλεσμα οι οπτικές ίνες να συνιστούν πολύ ασφαλές μέσο μετάδοσης.
- Τόσο ο όγκος, όσο και το βάρος, των οπτικών ινών είναι σημαντικά μικρότερος από άλλα καλώδια. Για παράδειγμα, χάλκινο καλώδιο με εύρος ζώνης 50 MHz και μήκους 500 μέτρων ζυγίζει περίπου 4000 κιλά, ενώ το αντίστοιχο οπτικό καλώδιο ζυγίζει λιγότερο από 45 κιλά. προσφέροντας παράλληλα μεγαλύτερο εύρος ζώνης.
- Δεδομένου ότι τα οπτικά καλώδια μεταφέρουν οπτικά σήματα και όχι ηλεκτρικά, δεν παρουσιάζουν κίνδυνο σπινθήρων γι αυτό και προτιμώνται σε περιοχές υψηλού κινδύνου από σπινθήρες. Ταυτόχρονα δεν επηρεάζονται από την υγρασία, σε αντίθεση με τα χάλκινα καλώδια που η έκθεση τους σε υγρασία μπορεί να προκαλέσει βραχυκυκλώματα ή το φαινόμενο της διαφωνίας καθώς και σε υψηλές θερμοκρασίες
- Μικρές απαιτήσεις σε ενέργεια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν παρατηρούνται σημαντικές απώλειες σήματος, καθώς και στον τρόπο μετάδοση δεδομένων, δηλαδή με τη χρήση φωτεινής δέσμης, που απαιτεί πολύ μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, σε σχέση με το ηλεκτρικό σήμα.
- Μπορούν να μεταφέρουν παράλληλα τεράστιο όγκο δεδομένων σε σύγκριση με τα χάλκινα καλώδια.
- Μπορούν να παραχθούν από κάθε χώρα με συνέπεια την απεξάρτηση της από χώρες που παράγουν χαλκό. Έτσι επιτυγχάνεται και τεχνολογική διάχυση. Στην Ελλάδα υπάρχουν εργοστάσια παραγωγής οπτικών ινών, δηλαδή επεξεργασίας του διοξειδίου του πυριτίου, με πρώτη ύλη την άμμο. [3,5,6,8].

4.10 Μειονεκτήματα οπτικών ινών

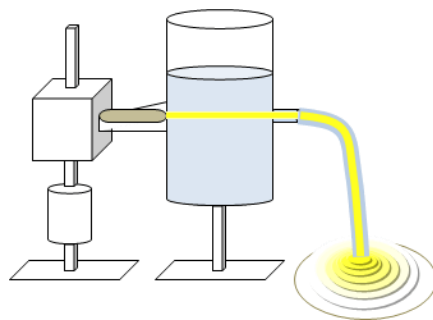
Παρά τα πολλά πλεονεκτήματα που έχουν οι οπτικές ίνες παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα:

- Ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα, που παρουσιάζουν οι οπτικές ίνες, είναι η δυσκολία υλοποίησης συνδέσεων, επειδή απαιτείται υψηλή προσαρμογή και ευθυγράμμιση της φωτεινής πηγής, για να μην υπάρχει διασπορά και να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες. Η πρόοδος όμως της τεχνολογίας, που έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια στην περιοχή των οπτικών ινών, αντιμετώπισε με επιτυχία την παραπάνω δυσκολία, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η χρήση τους και για συνδέσεις σημείου προς πολλά σημεία. Παρόλα αυτά, η χρήση τους σε τέτοιες συνδέσεις δεν έχει ακόμη ευρέως εξαπλωθεί, ιδιαίτερα λόγω του αυξημένου κόστους, που παρουσιάζουν τέτοια συστήματα.

- Είναι πιο ακριβές από τα χάλκινα καλώδια. Επίσης το κόστος των ηλεκτρονικών και οπτικοηλεκτρονικών διατάξεων μπορεί να είναι μεγάλο.
- Είναι πιο δύσκολη η εγκατάστασή τους. επειδή είναι πολύ εύθραυστες και δεν είναι αρκετά ευλύγιστες.
- Θα πρέπει η εγκατάσταση τους να γίνεται με ελαφριά κλίση γιατί διαφορετικά θα υπάρχει απώλεια δεδομένων. [3,5,6,8].

4.11 Ιστορία των οπτικών ινών

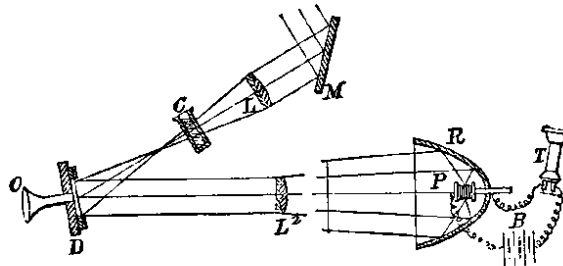
- Από τη Ρωμαϊκή εποχή ήταν δυνατή η δημιουργία ινών από γυαλί.
- Τη δεκαετία 1840, ο Daniel Collodon και ο Jacques Babinet έδειξαν στο Παρίσι ότι το φως μπορεί να οδηγηθεί κατά μήκος πιδάκων νερού. λόγω της ανάκλασης που υφίσταται.



Εικόνα 4.63 Πείραμα του Tyndall

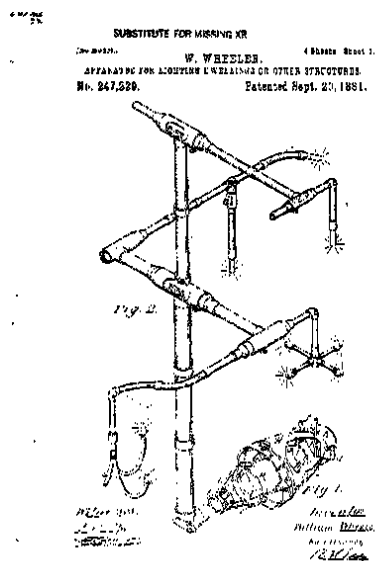
Μάλιστα ο Daniel Colladon δημοσίευσε το 1842 ένα άρθρο με τίτλο: "On the reflections of a ray of light inside a parabolic liquid stream" όπου περιέγραψε πως το φως μπορεί να περιορισθεί ώστε να ακολουθεί το σχήμα του μέσου διάδοσής του. Το 1852, ο John Tyndall στο Λονδίνο με ανάλογο πείραμα έδειξε ότι το φως θα μπορούσε να διαδοθεί μέσα από καμπύλη ροή νερού και στο βιβλίου για τη φύση του φωτός έγραψε για την ολική εσωτερική ανάκλαση τη βασική αρχή της επικοινωνίας με οπτικές ίνες.

- Ο Alexander Graham Bell δημιούργησε το οπτικό τηλέφωνο το 1880, που μπορούσε να μεταδώσει φωνητικό σήμα με μια δέσμη φωτός. Ο Bell εστίασε το φως του ήλιου με έναν καθρέπτη και μετά μιλούσε σε ένα μηχανισμό που δονούσε τον καθρέπτη. Ο αποδέκτης ήταν ένας ανιχνευτής που ελάμβανε την δονούμενη δέσμη και την αποκωδικοποιούσε σε φωνή,



Εικόνα 4.64 Συσκευή του Bell

με τον ίδιο τρόπο που έκανε το τηλέφωνο με τα ηλεκτρικά σήματα. Πολλοί παράγοντες όπως τα νέφη έδρασαν ανασταλτικά στην εξέλιξη του συστήματος.



Εικόνα 4.65 Σύστημα του Wheeler

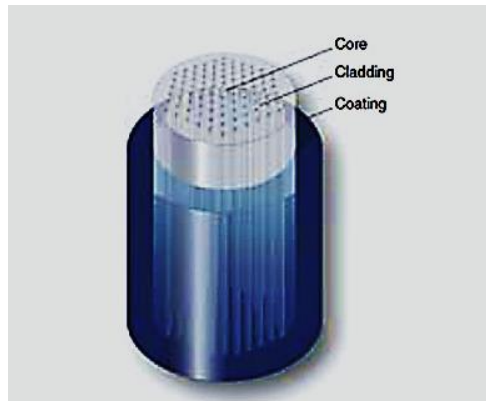
- Τον ίδιο χρόνο ο William Wheeler εφηύρε ένα σύστημα σωλήνων φωτός επενδεδυμένων με ένα στρώμα ανακλαστικού υλικού που μπορούσε να φωτίσει σπίτια. Χρησιμοποιούσε το φως από λαμπα ηλεκτρικού τόξου που ήταν τοποθετημένη ισόγειο και μοιράζε το φως με τους σωλήνες στο σπίτι.[43].
- Οι γιατροί Roth και Reuss, στη Βιέννη, χρησιμοποίησαν λυγισμένες γυάλινες ράβδους για να φωτίσουν κοιλότητες του σώματος το 1888.
- το 1895. ο Γάλλος μηχανικός Henry Saint-Rene σχεδίασε ένα σύστημα από λυγισμένες γυάλινες ράβδους για να οδηγήσει φωτεινά είδωλα σε μια πρώτη απόπειρα για τηλεόραση
- Το 1898, Αμερικανός David Smith εφηύρε μια συσκευή φωτισμού για οδοντιατρική χρήση χρησιμοποιώντας λυγισμένες ράβδους γυαλιού.
- Η πρώτη ερευνητική εργασία για τη διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε διηλεκτρική ράβδο, έγινε το 1910 από τους Δ. Χόνδρο και P. Debye
- Στη δεκαετία του 1920 ο John Logie Baird κατοχύρωσε την ιδέα χρησιμοποίησης συστοιχίας των διαφανών ράβδων για τη μετάδοση εικόνων στην τηλεόραση
- Ο Heinrich Lamm, ήταν ο πρώτος που μετέδωσε εικόνα μέσα από μέσω μιας δέσμης οπτικών ινών το 1930 επιδιώκοντας την έρευνα στο εσωτερικό του σώματος.
- Το 1951, ο Δανός Holger Moeller εφάρμοσε μια μέθοδο απεικόνισης με καλυμμένες ίνες γυαλιού ή πλαστικού με υλικό χαμηλού δείκτη διάθλασης.
- Το 1954 ο Abraham Van Heel δημιούργησε ένα σύστημα καλυμμένων ινών που μείωσε σε μεγάλο βαθμό την παρεμβολή και την ανεπιθύμητη μεταφορά σημάτων μεταξύ των ινών.
- Το 1954, αναπτύχθηκε η ενίσχυση μικροκυμάτων με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας το "maser" από τον Charles Townes και την ομάδα του στο Columbia University.
- Το 1954, ο Ολλανδός Abraham Van Heel και ο Βρετανός Harold. H. Hopkins ανεξάρτητα, δημοσίευσαν εργασίες στην δέσμες απεικόνισης. Ο Harold Hopkins και ο Narinder Singh Karany στο Imperial College στο Λονδίνο πέτυχαν τη μετάδοση φωτός με δέσμη μήκους 75cm που περιείχε αρκετές χιλιάδες γυμνές ίνες σκοπεύοντας να τις χρησιμοποιήσουν στις κατασκευές ενδοσκοπίων .Ο Karany χρησιμοποίησε για πρώτη φορά τον όρο fibre optics το 1955.[12]. Ο Van Heel χρησιμοποίησε δέσμες καλυμμένων ινών, με ένα διαφανές υλικό χαμηλότερου δείκτη διάθλασης, που προστάτευσε την ανακλαστική επιφάνεια της ίνας από εξωτερικές παραμορφώσεις και μείωσε σε μεγάλο βαθμό την παρεμβολή μεταξύ των ινών κάνοντας δυνατό το συνεχή φωτισμό. Οι έρευνες αυτές έπαιξαν

βασικό ρόλο στην κατασκευή του πρώτου γαστροσκοπίου το 1957 και του ουρητηροσκόπιου το 1960.

- Η πρώτη ημιεύκαμπτη οπτική ίνα για την κατασκευή γαστροσκοπίου δημιουργήθηκε από τους Basil Hirschowitz, C. Wilbur Peters, and Lawrence E. Curtiss, ερευνητές στο πανεπιστήμιο του Michigan, in 1956. Ο Curtiss παρήγαγε τις πρώτες επιστρωμένες με γυαλί οπτικές ίνες.
- Το 1958 ανακαλύφθηκε το laser, ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας, (σύμφωνες πηγές ακτινοβολίας στην οπτική περιοχή) ως αποδοτική πηγή φωτός .απο τον Charles Townes και τον Arthur Schawlow.
- Το 1960, δημιουργήθηκε η πρώτη πηγή laser αερίου ηλίου-νέον συνεχούς λειτουργίας. Την ίδια χρονιά χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά στις οπτικές ίνες laser που χρησιμοποιούσαν συνθετικό ροζ κρύσταλλο ρουμπινίου ως πηγή και παρήγαγε παλμό φωτός..
- Το 1961, ο Elias Snitzer της American Optical δημοσίευσε μια θεωρητική περιγραφή μονότροπης οπτικής ίνας. Ο Snitzer επέδειξε ένα laser που κατευθυνόταν μέσα σε μία λεπτή γυάλινη ίνα που μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε ιατρικές εφαρμογές. Όμως υπήρχε μεγάλη απώλεια φωτός ώστε να χρησιμοποιηθεί στις επικοινωνίες.
- Ο Jun-ichi Nishizawa, στο πανεπιστήμιο του Tohoku, πρότεινε τη χρήση οπτικών ινών στις τηλεπικοινωνίες το 1963. Ο Nishizawa συμμετείχε στη δημιουργία οπτικών ινών με δείκτη διάθλασης βαθμιαίας κατανομής ως κανάλι για τη διάδοση φωτός από lasers ημιαγωγών.
- Ο Charles Kao και ο George Hockham, των Standard Communications Laboratories στην Αγγλία, δημοσίευσαν το 1964 μια εργασία που αποδείκνυαν θεωρητικά ότι η απώλεια φωτός σε οπτικές ίνες θα μπορούσε να μειωθεί δραματικά απομακρύνοντας τις προσμίξεις, και πρότειναν το κατάλληλο υλικό για τη δημιουργία των οπτικών ινών: γυαλί πυριτίου υψηλής καθαρότητας. Με την ανακάλυψή του αυτή ο Kao κέρδισε το Νόμπελ Φυσικής το 2009.[34].
- Το πρώτο λειτουργικό σύστημα οπτικών ινών για τη μετάδοση δεδομένων κατασκευάστηκε από το Γερμανό φυσικό Manfred Börner στο Telefunken Research Labs στην Ulm το 1965.
- Το 1966 κατασκευάστηκε η πρώτη οπτική ίνα, με πολύ μεγάλη απόσβεση (1000dB/km). Την ίδια εποχή οι Kao και Hockman προβλέπουν τη δυνατότητα κατασκευής οπτικών ινών με απόσβεση 20dB/km και προτείνουν τη χρήση της για τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις.
- Το 1969 κατασκευάζονται ίνες με απόσβεση 100dB/km
- Το 1970 κατασκευάστηκε μονότροπη οπτική ίνα με απόσβεση μικρότερη από το κρίσιμο όριο εξασθένησης των 20dB/km από τους Robert D. Maurer, Donald Keck, Peter C. Schultz, και Frank Zimar για την Corning Glass Works. Η ομάδα έλυσε τα προβλήματα που εντόπισε ο Dr. Kao. Παρουσίασαν μια ίνα με εξασθένηση 17 dB/km χρησιμοποιώντας γυαλί πυριτίου με πιτάσιο. Οι ερευνητές ανακάλυψαν “καλώδιο οπτικών ινών” ικανό να μεταφέρει 65,000 φορές περισσότερες πληροφορίες από το καλώδιο χαλκού, μέσα από το οποίο μπορούσαν να μεταφέρονται πληροφορίες με κύματα φωτός και θα μπορούσαν να αποκωδικοποιηθούν μετά από περισσότερο από 1000 χιλιόμετρα. .Αργότερα δημιούργησαν οπτικές ίνες με απόσβεση 4dB/km χρησιμοποιώντας διοξείδιο του γερμανίου
- Επίσης το 1970, ο Morton Panish και ο Izuo Hayashi of Bell Laboratories, με ένα γκρουπ από το Ioffe Physical Institute του Leningrad, παρουσίασαν ένα λέιζερ διόδου ημιαγωγού ικανού να εκπέμπει συνεχή κύματα σε θερμοκρασία δωματίου.
- Η NASA χρησιμοποίησε οπτικές ίνες στις κάμερες τηλεόρασης που στάλθηκαν στη Σελήνη από το 1969-1972.
- Μεταξύ των ετών 1973 - 1975 παρουσιάζονται συστήματα που λειτουργούν με ταχύτητες μετάδοσης 1,5 έως 140Mbps σε πολυρυθμικές ίνες και στο παράθυρο 850nm.
- Το 1973, τα Bell Laboratories ανέπτυξαν μια μέθοδο παραγωγής γυαλιού με τη θέρμανση χημικών ατμών και οξυγόνου για να δημιουργηθεί υπέρ-διαφανές γυαλί που

μπορεί να κατασκευασθεί μαζικά σε χαμηλό κόστος .Η διαδικασία αυτή παραμένει και σήμερα η στανταρ διαδικασία παραγωγής οπτικών ινών.

- Το 1973 παρουσιάσθηκαν από τον Gerhard Bernsee οπτικές ίνες στις οποίες ο πυρήνας και το περίβλημα αποτελούνται βασικά από γυαλί χαλαζία ενισχύοντας ένα σχετικά ένα άνυδρο πυρήνα από γυαλί χαλαζία με ένα περίβλημα γυαλιού χαλαζία με υψηλότερο περιεχόμενο νερού για να μειωθεί ο δείκτης διάθλασης. Οι οπτικές αυτές ίνες είναι κατάλληλες για την διάδοση υπεριώδους φωτός με μεγάλη απόδοση. [35].
- Η πρώτη μη πειραματική σύνδεση οπτικών ινών τοποθετήθηκε στην αστυνομία Dorset (UK) το 1975. Το 1975, η κυβέρνηση των Η.Π.Α, σύνδεσε του Η/Υ στα γραφεία διοίκησης της NORAD στο όρος Cheyenne χρησιμοποιώντας οπτικές ίνες για να μειώσει τις παρεμβολές.
- Το 1977, τοποθετήθηκε το πρώτο οπτικο τηλεφωνικό σύστημα εγκαταστάθηκε στο Σικάγο και η κάθε οπτική ίνα μετέφερε το ισοδύναμο 672 voice channels.
- Μεταξύ των ετών 1977 - 1978 εγκαθίστανται τοπικές και μεγάλης απόστασης ζεύξεις με ρυθμούς 140Mbps.
- Το 1978 στη Βρετανία: εγκαταστάθηκε το πρώτο οπτικό σύστημα καλωδίων στην Ευρώπη, για να αποτελέσει μέρος του δημόσιου τηλεφωνικού δικτύου μεταξύ του Κέντρου Ερευνών του Ταχυδρομείου στο Martlesham και του τηλεφωνικού κέντρου του Ίπσουιτς, και τοποθετήθηκε το πρώτο υποβρύχιο καλώδιο οπτικών ινών στον κόσμο, μήκους πέντε ναυτικών μιλίων
- Το 1980 έγινε ζεύξη 140Mbps με μονότροπη ίνα μήκους 37km.
- In 1981, General Electric δημιούργησε συγχωνευμένα πλινθώματα χαλαζία που θα μπορούσαν να μετατραπούν σε ίνες μήκους 40 χιλιομέτρων
- Το 1982 τέθηκε σε λειτουργία το μεγαλύτερο τηλεφωνικό καλώδιο οπτικής ίνας μεταξύ Λονδίνου και Μπίρμιγχαμ
- Η Sprint στα μέσα της δεκαετίας του 80 δημιούργησε στην Αμερική το πρώτο εθνικό δίκτυο εκατό τοις εκατο ψηφιακό με οπτικές ίνες.
- Το 1984 λειτούργησε το πρώτο σύστημα μονότροπης ίνας 140 Mbit/s μεταξύ Milton Keynes και Luton.
- Το 1986 έγινε η πρώτη διεθνής υποθαλάσσια σύνδεση με οπτικές ίνες μεταξύ Αγγλίας και Βελγίου.
- Ο οπτικός Ενισχυτής EDFA,(Erbium-Doped Fiber Amplifier) που μειώνει το κόστος συστημάτων οπτικών ινών μεγάλης απόστασης χωρίς να υπάρχει η ανάγκη για οπτικούς-ηλεκτρικούς -οπτικούς repeaters, εφευρέθηκε το 1986 από τον David Payne στο πανεπιστήμιο του Southampton και τον Emmanuel Desurvire στα Bell Laboratories
- Η πρώτη υπερατλαντική γραμμή τηλεφώνου με καλώδιο οπτικών ινών βασισμένη στην τεχνολογία της βελτιστοποιημένης ενίσχυσης λέιζερ. του Desurvire άρχισε να λειτουργεί το 1988. Το ισοδύναμο των 25.000 ταυτόχρονων τηλεφωνικών συνομιλιών μεταφέρθηκαν από μια μονότροπη οπτική ίνα TAT 8 μεταξύ Tuckerton, New Jersey, Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και Widemouth Bay, Βρετανία μέσω Penmarch, Γαλλία. και με χωρητικότητα 280 Mbits / s και μπορούσε να μεταφέρει 40.000 τηλεφωνικών κανάλια ταυτόχρονα
- Το 1991, ο Desurvire και ο Payne παρουσίασαν οπτικούς ενισχυτές που ήταν ενσωματωμένοι μέσα στο καλώδιο οπτικής ίνας, δίνοντας τη δυνατότητα στο οπτικό σύστημα να μεταφέρει 100 φορές περισσότερες πληροφορίες από τα καλώδια με ηλεκτρονικούς ενισχυτές.



Εικόνα 4.66 Μοντέλο ίνας φωτονικών κρυστάλλων

- Το 1991, δημιουργήθηκε η ίνα φωτονικών κρυστάλλων. Η ιδέα ήταν πως το φως θα μπορούσε να εγκλωβιστεί μέσα στον πυρήνα μιας οπτικής ίνας με τη δημιουργία ενός περιοδικού πλέγματος μικροσκοπικών τρυπών (της τάξης του μήκους κύματος), δηλαδή ενός «φωτονικού» κρυστάλλου και θα επέτρεπε την ισχύ να μεταφέρεται περισσότερο αποδοτικά από τις συνηθισμένες ίνες βελτιώνοντας έτσι την απόδοση. Οι πρώτες ίνες φωτονικών κρυστάλλων έγιναν διαθέσιμες εμπορικά το 2000.
- Το 1992 ένα νέο υπερατλαντικό καλώδιο οπτικών ινών (TAT 9) τέθηκε σε λειτουργία συνδέοντας το Ηνωμένες Πολιτείες, τον Καναδά, το Ηνωμένο Βασίλειο, τη Γαλλία και την Ισπανία. Το καλώδιο μήκους 9.000 χιλιομέτρων και με χωρητικότητα 560 Mbit / s, μπορούσε να μεταφέρει 80.000 τηλεφωνικά κανάλια. Το υπερατλαντικό καλώδιο TAT 10 συνέδεσε τις ΗΠΑ, τη Γερμανία και την Ολλανδία, με χωρητικότητα 560 Mbit / s.
- Το πρώτο all-optic fiber cable, TPC-5, που χρησιμοποιεί οπτικούς ενισχυτές τοποθετήθηκε στον Ειρηνικό ωκεανό το 1996. Το 1997 η Fiber Optic Link Around the Globe (FLAG) έγινε το μακρύτερο δίκτυο ενός καλωδίου στον κόσμο και παρείχε την υποδομή για τις εφαρμογές Internet της επόμενης γενιάς.
- Το 1999 η BT ανακοίνωσε ότι ανακάλυψε ότι είχε πετύχει την εμπορική μετάδοση οπτικών ινών σε 80Gbit / s.
- Το 2012 κατασκευάστηκε το σύστημα Emerald Express - ένα νέο υπερατλαντικό σύστημα υποθαλάσσιου καλωδίου κατά μήκος του «Μεγάλου Κύκλου», διαδρομή που συνδέει τη Βόρεια Αμερική με την Ευρώπη μέσω της Ισλανδίας, με έξι ζεύγη οπτικών ινών και ένα καλώδιο μήκους 5.200 χιλιομέτρων. Το Emerald Express έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει 100 x 100 Gbps για κάθε μια από έξι ζεύγη ινών της και έχει ως στόχο να είναι ο πρώτος 100 Gbps, καλώδιο οπτικών ινών υποθαλάσσια μεγάλων αποστάσεων. Τον ίδιο χρόνο πραγματοποιήθηκε το Project Express ένα καλωδιακό σύστημα το οποίο παρέχει συνδεσιμότητα μεταξύ Νέας Υόρκης και του Λονδίνου, αρχικά με τη χρήση της τεχνολογίας 40G με μελλοντικές αναβαθμίσεις 100G. προσφέρει τη χαμηλότερη λανθάνουσα διαδρομή από τη Νέα Υόρκη στο Λονδίνο με λιγότερο από 60 milliseconds με επιστροφή, καθιστώντας ταχύτερη τη διαδρομή που συνδέει τις δύο μεγάλες ηπείρους.
- Το μήκος των οπτικών ινών που χρησιμοποιούνται σήμερα υπολογίζεται σε μήκος περισσότερο από 1 δισεκατομμύριο χιλιόμετρα και αυξάνεται με ρυθμό χιλιάδων χιλιομέτρων ανα ώρα.
- Ο Steve Alexander παρουσίασε το πρώτο DWDM σύστημα το MultiWave 1600. Η τεχνολογία DWDM κάνει εφικτή τη συνύπαρξη πολλών φωτεινών σημάτων στην ίδια οπτική ίνα ταυτόχρονα μεταφέροντας πολλά διακριτικά σήματα ή κανάλια δεδομένων/ήχου. Η τεχνολογία αυτή τοποθετεί δεδομένα από διαφορετικές πηγές σε μια οπτική ίνα με κάθε σήμα να μεταφέρεται ταυτόχρονα στο δικό του μήκος κύματος. Χρησιμοποιώντας την DWDM, περισσότερα από 80 ξεχωριστά μήκη κύματος ή κανάλια δεδομένων μπορούν να πολυπλέκονται σε ένα φωτεινό ρεύμα που διαδίδεται σε μια οπτική ίνα. Το κάθε κανάλι

μπορεί να μεταφέρει ένα σήμα με πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDM) μεταφέροντας 2.5 Gbps (billion bits per second), μέχρι 200 Gbps μπορούν να μεταφερθούν από την οπτική ίνα.

- Η μεγάλη ζήτηση για ευρυζωνικές επικοινωνίες είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία υπηρεσιών Fiber-to-the-Cabinet (FTTC Fiber-to-the-home (FTTH) για πρώτη φορά το 2001. [2,3,5,6,27].

4.12 Εφαρμογές των οπτικών ινών

Οι κατηγορίες χρηστών της τεχνολογίας οπτικών ινών περιλαμβάνουν:

- Οικιακούς χρήστες
- Επιχειρήσεις μεσαίου ή μεγάλου μεγέθους
- Δημόσιους φορείς με μικρές απαιτήσεις όπως Α' βαθμια εκπαίδευση, Κέντρα Υγείας και πολιτιστικούς φορείς
- Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται ευρέως σε δίκτυα επικοινωνιών και επιτρέπουν τη μετάδοση φωτεινών σημάτων σε μεγαλύτερες αποστάσεις και σε υψηλότερο εύρος ζώνης (ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων) σε σχέση με άλλες μορφές μετάδοσης σημάτων, όπως ο χαλκός, ενώ η ταχύτητα μετάδοσης πλησιάζει αυτή με την οποία διαδίδεται το φως. Τα καλώδια οπτικών ινών, που συνήθως περιέχουν δεσμίδες οπτικών ινών, χρησιμοποιούνται κυρίως, από τους τηλεπικοινωνιακούς οργανισμούς για επίγειες και υποθαλάσσιες συνδέσεις μεγάλων αποστάσεων, αντικαθιστώντας τόσο τις γραμμές ομοαξονικών καλωδίων, όσο και τις επίγειες και δορυφορικές μικροκυματικές ζεύξεις. Τα τελευταία χρόνια έχουν ποντισθεί πολλά καλώδια οπτικών ινών, με χωρητικότητα, που ξεπερνά τα 30.000 κυκλώματα φωνής, για τη διασύνδεση ηπείρων. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν :

- το καλώδιο BSFOCS, που εκτείνεται στην περιοχή της Μαύρης θάλασσας και συνδέει τη Βουλγαρία, Ουκρανία και Ρωσία
- το καλωδιακό σύστημα SEA - ME - WE 3 (South East Asia - Middle East - West Europe), που ξεκινά από τη Δυτική Ευρώπη (Γερμανία, Μεγ. Βρετανία), περνά από τα στενά του Γιβραλτάρ στη Μεσόγειο (Ιταλία, Ελλάδα, Κύπρος) συνεχίζει από τα στενά του Σουέζ προς την Ασία (Ινδία, Σιγκαπούρη) και χωρίζεται σε δύο μέρη, με το ένα άκρο να καταλήγει στην Ιαπωνία και το άλλο στην Αυστραλία και
- το καλώδιο ADRIA-1, που συνδέει την Ελλάδα (Κέρκυρα), την Αλβανία (Durres) και την Κροατία (Dubrovnik).

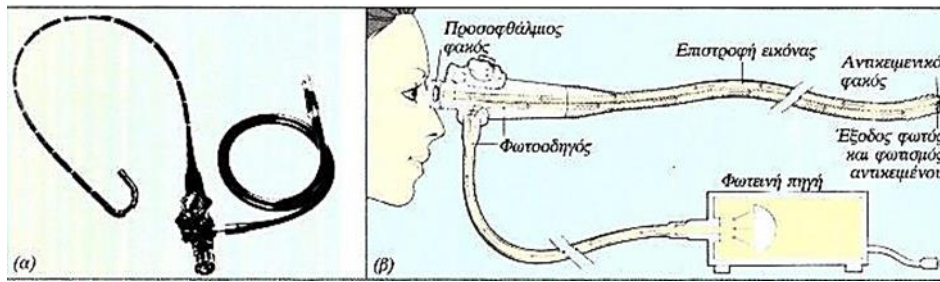
Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται, επίσης :

- από ιδιωτικές εταιρίες σε τοπικά δίκτυα (LAN)
- σε πανεπιστημιακά δίκτυα κορμού
- σε δίκτυα ευρείας περιοχής (WAN)
- σε δίκτυα καλωδιακής τηλεόρασης
- σε εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις σε ασφάλεια μετάδοσης, όπως οι στρατιωτικές και σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπου υπάρχει υψηλός βιομηχανικός θόρυβος, στον οποίο οι οπτικές ίνες παρουσιάζουν ανοσία.

Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται για φωτισμό, όπως για την φωταγωγήση καταστημάτων αλλά και έργων τέχνης, για τον φωτισμό πισινών, σε συστήματα αρχιτεκτονικού φωτισμού. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά εικόνων, επιτρέποντας έτσι την προβολή σε στενούς χώρους

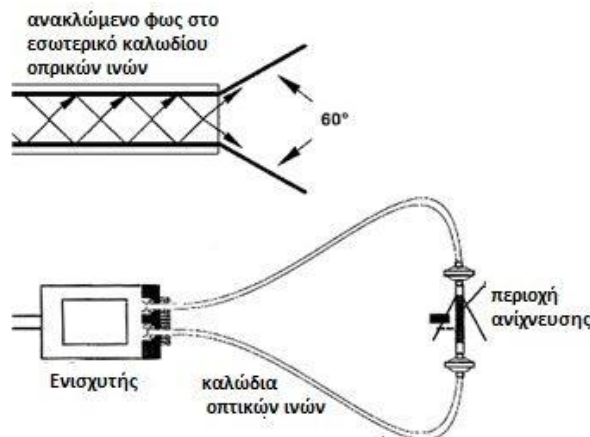
Σημαντική είναι η χρήση των οπτικών ινών στην Ιατρική. Αποτελούν τη ραχοκοκαλιά των προηγμένων τεχνικών απεικόνισης που χρησιμοποιούνται στην ψηφιακή διαγνωστική, δεδομένου ότι μπορούν να μεταφέρουν αποτελεσματικά μεγάλες ποσότητες ευαίσθητων δεδομένων. Δεδομένου ότι τα καλώδια οπτικών ινών είναι αδρανή, δεν εισάγουν κανένα κίνδυνο μόλυνσης και χρησιμοποιούνται στα ενδοσκόπια λόγω της ευελιξίας τους. Με την ενδοσκόπηση (εικ.4.68) δίνουν οπτική εικόνα από τον περιορισμένο χώρο των εσωτερικών οργάνων του ανθρώπινου σώματος. Τα περισσότερα ενδοσκόπια έχουν δύο σειρές ινών: ένα εξωτερικό δακτύλιο που τροφοδοτεί με φως, και μια εσωτερική δέσμη που μεταδίδει την εικόνα. Ενδοσκόπια έχουν σχεδιαστεί για συγκεκριμένες περιοχές, όπως το αρθροσκόπιο για την εξέταση των γονάτων, των ώμων, και άλλων αρθρώσεων. Με τα ενδοσκόπια

πραγματοποιούνται ελάχιστα επεμβατικές χειρουργικές επεμβάσεις. Σε αυτά, ένα τρίτο σετ ινών εκπέμπει μια ακτίνα λέιζερ που χρησιμοποιείται για να σταματήσει η αιμορραγία ή για να κάψει παθολογικό ιστό.



Εικόνα 4.67: (α) Ενδοσκόπιο, (β) Τρόπος λειτουργίας του ενδοσκοπίου.

- Αισθητήρες με οπτικές ίνες** Οι αισθητήρες με οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση μιας ποικιλίας φυσικών ιδιοτήτων όπως μηχανική καταπόνηση, πίεση, θερμοκρασία (ηφαιστίων και πυρηνικών αντιδραστήρων), καθώς και άλλων μεγεθών (εικ.4.69). Το μικρό τους μέγεθος επιτρέπει να χρησιμοποιούνται σε χώρους που είναι δύσκολο να επιτευχθεί διαφορετικά η μέτρηση. Ένα σύστημα αισθητήρων οπτικών ινών αποτελείται από ένα καλώδιο οπτικών ινών που συνδέεται σε έναν απομακρυσμένο αισθητήρα, ή ενισχυτή. Ο αισθητήρας εκπέμπει, παραλαμβάνει και μετατρέπει την ενέργεια του φωτός σε ένα ηλεκτρικό σήμα. Το καλώδιο είναι η μηχανική συνιστώσα που μεταφέρει το φως μέσα και έξω από τις περιοχές που είναι είτε σε πολύ περιορισμένο χώρο ή πολύ εχθρικό πίσω στον αισθητήρα. Μερικοί αισθητήρες οπτικών ινών μετρούν τις φυσικές ιδιότητες άμεσα με τη χρήση διαμορφωμένου φωτός. Άλλοι αισθητήρες χρησιμοποιούν οπτικές ίνες συνήθως πολύτροπες ίνες, ως φορείς για να μεταφέρουν το φως από εχθρικά περιβάλλοντα σε ευαίσθητους αισθητήρες που βρίσκονται σε πιο ασφαλείς θέσεις. Ένα παράδειγμα είναι η μέτρηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό κινητήρα αεριωθούμενων αεροσκαφών με τη χρήση μιας ίνας για τη μετάδοση ακτινοβολίας σε ένα πυρόμετρο ακτινοβολίας που βρίσκεται έξω από το κινητήρα. Εξωγενείς αισθητήρες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν με τον ίδιο τρόπο για τη μέτρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας σε ηλεκτρικούς μετασχηματιστές, όπου τα παρόντα ακραία ηλεκτρομαγνητικά πεδία κάνουν άλλες τεχνικές μέτρησης αδύνατες.



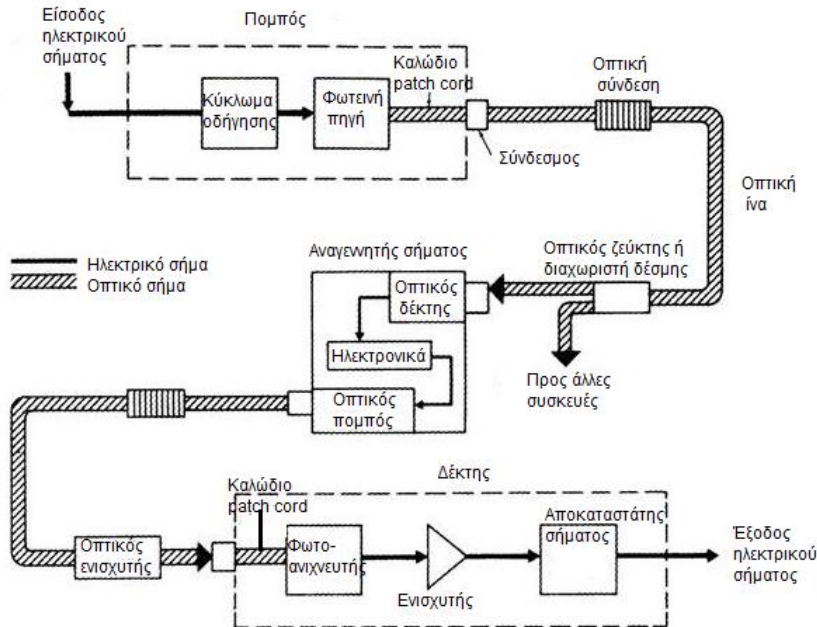
Εικόνα 4.68: Αισθητήρας οπτικών ινών

Μελλοντικά οι αεροναυπηγοί προσανατολίζονται στην κατασκευή αεροσκαφών τα οποία, αντί για μεταλλικό περίβλημα, θα έχουν περίβλημα από οπτικές ίνες και πολυμερή. Έτσι μέσω των οπτικών ινών ο πιλότος θα ενημερώνεται συνεχώς για την κατάσταση του αεροσκάφους του, για την πίεση που δέχεται, τη θερμοκρασία σε κάθε σημείο του, για

κάποια πιθανή παραμόρφωση κτλ. Θα κατασκευαστούν δηλαδή αεροσκάφη με “δέρμα” που αισθάνεται. [27]

4.12.1 Το οπτικό σύστημα επικοινωνίας

Οι βασικές μονάδες ενός οπτικού τηλεπικοινωνιακού συστήματος είναι: (εικ.4.70).



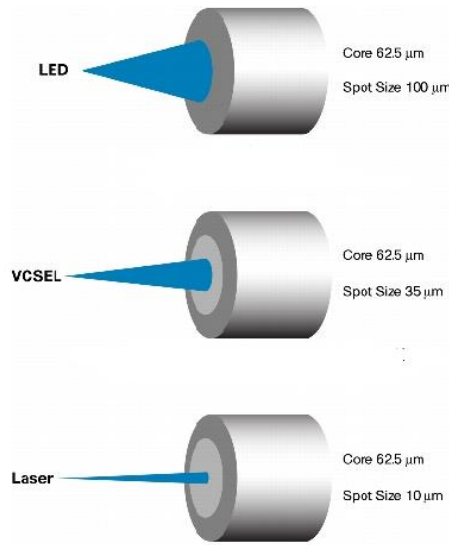
Εικόνα 4.69: Βασικές μονάδες τηλεπικοινωνιακού συστήματος

- Οπτικοί πομποί: Μετατρέπουν το ηλεκτρικό σήμα σε φως
- Δέκτες: Μετατρέπουν το φως σε ηλεκτρικό σήμα
- Ενισχυτές σήματος
- Διαμορφωτές: Φορτώνουν την πληροφορία στην ακτινοβολία
- Αναγεννητές σήματος
- Φωρατές: Διαχωρίζουν την πληροφορία από την ακτινοβολία
- Συνδετήρες: Συνδέουν προσωρινά τμήματα οπτικής ίνας
- Πηγές φωτός
- Ο μετατροπέας μετατρέπει ένα μη ηλεκτρικό μήνυμα σε ηλεκτρικό, όπως τα μικρόφωνα που μετατρέπουν τα ηχητικά κύματα σε ρεύμα και οι βιντεοκάμερες που μετατρέπουν τα είδωλα σε ρεύμα. Η μεταφορά μηνυμάτων μεταξύ Η/Υ γίνεται σε ηλεκτρική μορφή.
- Ο διαμορφωτής μετατρέπει το ηλεκτρικό ρεύμα σε ψηφιακή μορφή και το “φορτώνει” στο φέρων κύμα. Η διαμόρφωση γίνεται αναβοσβήνοντας τη πηγή του φωτός με το ρυθμό της πληροφορίας δηλαδή το ένα (1) να αντιστοιχεί σε φως και το μηδέν (0) σε σκότος. Το φως που παράγουν οι φωτεινές πηγές βρίσκεται στην περιοχή του υπέρυθρου και δεν είναι ορατό από το ανθρώπινο μάτι. Αν κατά την εκπομπή αυξομειώνουμε την ένταση του φωτός, τότε έχουμε αναλογική διαμόρφωση, ενώ, αν αναβοσβήνουμε την πηγή, έχουμε ψηφιακή διαμόρφωση
- Η εκπομπή του οπτικού σήματος μέσα σε οπτική ίνα γίνεται από πηγή :

α) LED (Light Emitting Diode) ή

β) LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

Οι πηγές LED παράγουν μη γραμμικό ασύμφωνο φως και χρησιμοποιούνται σε συστήματα πολυτρόπων ινών. Οι φωτοδιόδοι (LED), λόγω των φτωχών αποτελεσμάτων της λειτουργίας τους (ευρύ φάσμα εκπομπής ασύμφωνου φωτός, χαμηλή οπτική ισχύς εξόδου),



Εικόνα 4.70: Πηγές οπτικού σήματος

χρησιμοποιούνται κυρίως σε τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις μικρών σχετικά αποστάσεων όπως τα τοπικά δίκτυα LAN

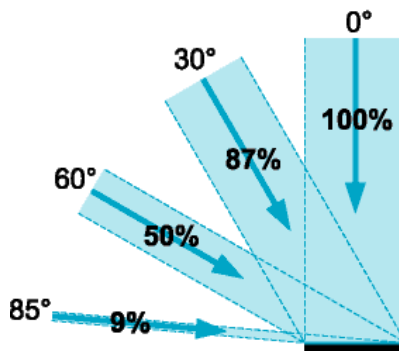
Οι δίοδοι Laser παράγουν γραμμικό σύμφωνο φως και χρησιμοποιούνται στα δίκτυα μονότροπων ινών και είναι πολύ γρηγορότερες στην απόκριση μεταγωγής. Οι δίοδοι Laser πρέπει να λειτουργούν πάνω από την περιοχή κατωφλίου για να παράγουν σύμφωνο φως.

Σήμερα οι κοινές LED έχουν αντικατασταθεί από τις vertical-cavity surface-emitting laser ή VCSEL. Οι δίοδοι αυτοί εκπέμπουν μια πολύ αποτελεσματική, στενή, σχεδόν κυκλική οπτική δέσμη κάθετα από την πάνω επιφάνεια του ημιαγωγού. Οι κοινές οπτικές πηγές ημιαγωγών που περιλαμβάνουν Edge laser (EEL) εκπέμπουν φως από την πλευρά του και οι δίοδοι εκπομπής φωτός (LED) εκπέμπουν φως από την κορυφή και τις πλευρές. Τα χαρακτηριστικά της VCSEL είναι η υψηλή ταχύτητα, η χαμηλή κατανάλωση ισχύος, και η μεγαλύτερη οπτική ισχύς. Επιπλέον, οι VCSELs μπορούν να υλοποιηθούν σε δισδιάστατη διάταξη, επιτρέποντας σε μία μόνο μήτρα να περιέχει εκατοντάδες πηγές φωτός για να αυξηθεί μέγιστη ισχύς εξόδου και η μακροπρόθεσμη αξιοπιστία

Τα μήκη κύματος που εκπέμπουν οι πηγές είναι 850 nm, 1300 nm ή 1550nm.

Οι συντονίσιμες πηγές (Tunable laser) μπορούν να παράγουν σύμφωνο φως με ελεγχόμενο μεταβαλλόμενο μήκος κύματος και χρησιμοποιούνται στα πολύτροπα δίκτυα σε ένα σύστημα όπου πολλές πηγές είναι συζευγμένες σε ένα σύστημα οργάνων πολυπλεξίας.

Μοντέλα Πηγής Φωτός. Η φωτεινή πηγή που βρίσκεται σε επαφή με το οπτικό καλώδιο



Εικόνα 4.71: Προφίλ εκπεμπόμενης ακτινοβολίας πηγής φωτός

διαθέτει κατάλληλο φακό (συνδετήρας) για την ευθυγράμμιση του εκπεμπόμενου από την φωτεινή πηγή φωτός. Οι οπτικές πηγές έχουν ένα προφίλ ακτινοβολίας το οποίο απέχει πολύ από την πανκατευθυντική δομή. Συνήθως εκπέμπουν την ακτινοβολία με μέγιστη ισχύ (λαμπρότητα) στο οριζόντιο επίπεδο και καθώς απομακρυνόμαστε από το επίπεδο αυτό ($\varphi = 0^\circ$ προς $\varphi = 90^\circ$) η ισχύς της ακτινοβολίας φθίνει οπότε μιλάμε για έναν κατευθυντικό λοβό ακτινοβολίας. Αυτό το μοντέλο ονομάζεται πηγή Lambertian επειδή ακολουθεί το νόμο του Lambert σύμφωνα με τον οποίο : *Η φωτεινή ένταση που προσπίπτει σε οποιαδήποτε επιφάνεια μεταβάλλεται ως το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης, θ .*

$$E(\theta) = E \cos\theta \quad (4.31)$$

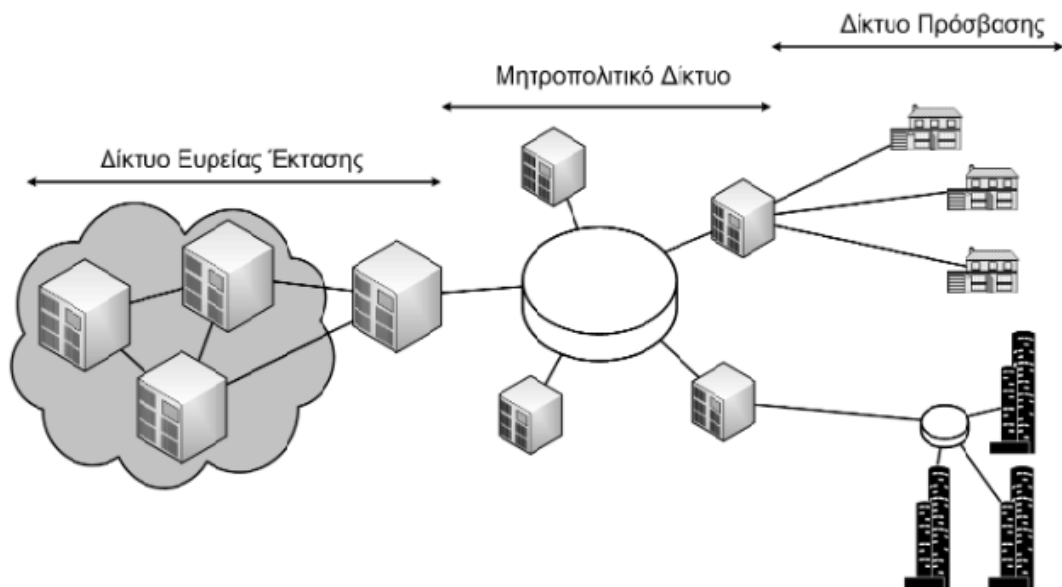
Προκειμένου να κατευθύνεται το φως σε ένα στόχο, είναι απαραίτητη η χρήση κατευθυντήρα, για να εστιάζει το φως σε μια ελεγχόμενη δέσμη που φωτίζει την περιοχή στόχευσης. Οι ακτίνες που εξέρχονται από τον κατευθυντήρα διαδίδονται παράλληλα, αν και τέλεια ευθυγράμμιση δεν είναι δυνατή λόγω της περίθλασης και του πεπερασμένου μέγεθους του εκπομπού. Ωστόσο, όσο μικρότερη είναι η πηγή φωτός, τόσο παίρνουμε καλύτερα αποτελέσματα. [33].

- **Ο ενισχυτής σήματος**, είναι απαραίτητος μόνο σε συνδέσεις μεγάλων αποστάσεων, επειδή παρατηρείται συχνά εξασθένηση του σήματος και αναλαμβάνει την ενίσχυση του σήματος σε τακτικά διαστήματα. Διαθέτει ειδικά κυκλώματα, τα οποία όταν λάβουν την εξασθενημένη φωτεινή πληροφορία, εκπέμπουν το σήμα εκ νέου, με πλήρη ισχύ.
- **Αναγέννηση.** Όταν ένας τηλεπικοινωνιακός σύνδεσμος πρέπει να καλύψει μεγαλύτερες αποστάσεις από όσο μπορεί η τεχνολογία των οπτικών ινών, το σήμα πρέπει να αναγεννηθεί σε ενδιάμεσα σημεία με επαναλήπτες, που μετατρέπουν το ψηφιακό σήμα σε ηλεκτρική μορφή και χρησιμοποιούν πομπό για να ξαναστείλουν το σήμα σε μεγαλύτερη ένταση. Το κόστος αυτών είναι μεγάλο γιατί πρέπει να τοποθετούνται κάθε είκοσι χιλιόμετρα. Η σημερινή τεχνολογία επιτρέπει την αναγέννηση του οπτικού σήματος μετά από αποστάσεις εκατοντάδων χιλιομέτρων μειώνοντας το κόστος των οπτικών δικτύων. Αυτό οφείλεται στη χρήση σολιτονίων που χρησιμοποιούν μη γραμμικά αποτελέσματα στην ίνα και μπορούν να διαδοθούν χωρίς διασπορά σε μεγάλες αποστάσεις
- **Ο αποκωδικοποιητής** είναι συνήθως μία φωτοδίοδος που μετατρέπει το φως σε ηλεκτρικό ρεύμα. Τα ηλεκτρικά σήματα που περιέχουν την ωφέλιμη πληροφορία περνούν στις επόμενες βαθμίδες ηλεκτρονικής επεξεργασίας
- **Τέλος ο δέκτης** λαμβάνει το φωτεινό σήμα και το μετατρέπει ξανά στην αρχική του μορφή, δηλαδή σε ψηφιακά δεδομένα. Αυτό επιτυγχάνεται πρώτα με φιλτράρισμα για να μεγιστοποιηθεί ο λόγος του σήματος προς την ανεπιθύμητη ισχύ και στη συνέχεια με ενίσχυση. Η ηλεκτρική μορφή που εξέρχεται από τον επεξεργαστή σήματος μεταμορφώνεται σε ηχητικό κύμα ή οπτικό είδωλο. Αν Η/Υ ή άλλου είδους συσκευές είναι συνδεδεμένες στο κύκλωμα οπτικών ινών αυτά τα σήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατευθείαν χωρίς επεξεργασία.
- Οι απώλειες ισχύος στις διάφορες συνιστώσες του συστήματος είναι: στους οπτικούς συνδετήρες μέση απώλεια σύνδεσης 0,1dB, στις συγκολλήσεις < 0,5dB, στο καλώδιο patchcord <0,3dB
- Ως μέσο μεταφοράς χρησιμοποιούνται τα καλώδια οπτικών ινών. [60,11,3,5,6,7]

4.12.2 Δομή των τηλεπικοινωνιακών δικτύων

Η αρχιτεκτονική ενός δικτύου οπτικών ινών (εικ.4.72.), αποτελείται από τρεις βασικές συνιστώσες:

- i. Τα δίκτυα κορμού, δίκτυα ευρείας έκτασης, (backbone networks)
 - ii. Τα μητροπολιτικά δίκτυα (metropolitan area networks)
 - iii. Τα δίκτυα πρόσβασης (access networks)
- Τα δίκτυα κορμού πραγματοποιούν διεθνή και εθνική κάλυψη και είναι δυνατόν να καλύπτουν μέχρι και υπερωκεάνιες αποστάσεις (χιλιάδες χιλιόμετρα). Αποτελούνται από έναν αριθμό κόμβων οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους.



Εικόνα 4.72: Αρχιτεκτονική δικτύου οπτικών ινών

- Τα *μητροπολιτικά δίκτυα* (δίκτυα διανομής) είναι υπεύθυνα για την κάλυψη μερικών δεκάδων χιλιομέτρων και για τη διασύνδεση των δικτύων κορμού με τα δίκτυα πρόσβασης. Τα δίκτυα διανομής παρέχουν συνδέσεις σημείου-πολλαπλών σημείων μεταξύ των κυρίων κόμβων και των κόμβων πρόσβασης. Στους κόμβους διανομής μπορεί να τοποθετηθεί ενεργός ή παθητικός εξοπλισμός για το διαχωρισμό του σήματος, οπότε λέμε ότι χρησιμοποιούμε Ενεργό Οπτικό Δίκτυο (AON, Active Optical Network) ή Παθητικό Οπτικό Δίκτυο (PON, Passive Optical Network) αντίστοιχα.
- Τα *δίκτυα πρόσβασης* παρέχουν πρόσβαση σε τελικούς χρήστες, όπως επιχειρήσεις και οικιακοί πελάτες. Καταλήγουν στις Οπτικές Μονάδες Δικτύου, που αποτελούν τον οπτικό τερματισμό του σήματος.

Η οπτική τεχνολογία καθιστά δυνατή τη διασύνδεση σε όλα τα επίπεδα της τηλεπικοινωνιακής υποδομής (δίκτυα ευρείας έκτασης, μητροπολιτικά δίκτυα, δίκτυα πρόσβασης), παρέχοντας τεράστιους ρυθμούς μετάδοσης και κοινή υποδομή για μεγάλη γκάμα υπηρεσιών. Η ευρυζωνικότητα που παρέχεται από την οπτική τεχνολογία οφείλεται κυρίως στις οπτικές ίνες. Οι οπτικές ίνες παρέχουν μεγάλο εύρος ζώνης, το οποίο σήμερα φθάνει στις ευρέως χρησιμοποιούμενες υλοποιήσεις όπως το Gigabit Ethernet μέχρι και τα 10 Gbps. Η απόσταση κυμαίνεται μεταξύ 70-100 Km ανάλογα με τον τύπο της οπτικής ίνας και το σήμα που μεταφέρεται. Συνεπώς, περιορίζουν τον αριθμό των ενδιάμεσων ενισχύσεων που απαιτούνται για να διασχίσει το σήμα μια μεγάλη απόσταση, και έχει σημαντική ανοχή στον θόρυβο. [3,5,6,7,60].

4.12.2.1 Τεχνολογία FTTx.

Η αρχιτεκτονική της τεχνολογίας οπτικών ινών που αφορά στην παροχή ευρυζωνικής πρόσβασης, αναφέρεται ως τεχνολογία FTTx (Fiber To The x), (εικ.4.73). Η τεχνολογία αυτή κάνει χρήση της οπτικής ίνας μέχρι ένα ορισμένο σημείο x του δικτύου πρόσβασης [49,50]. Το σημείο "x" μπορεί να είναι

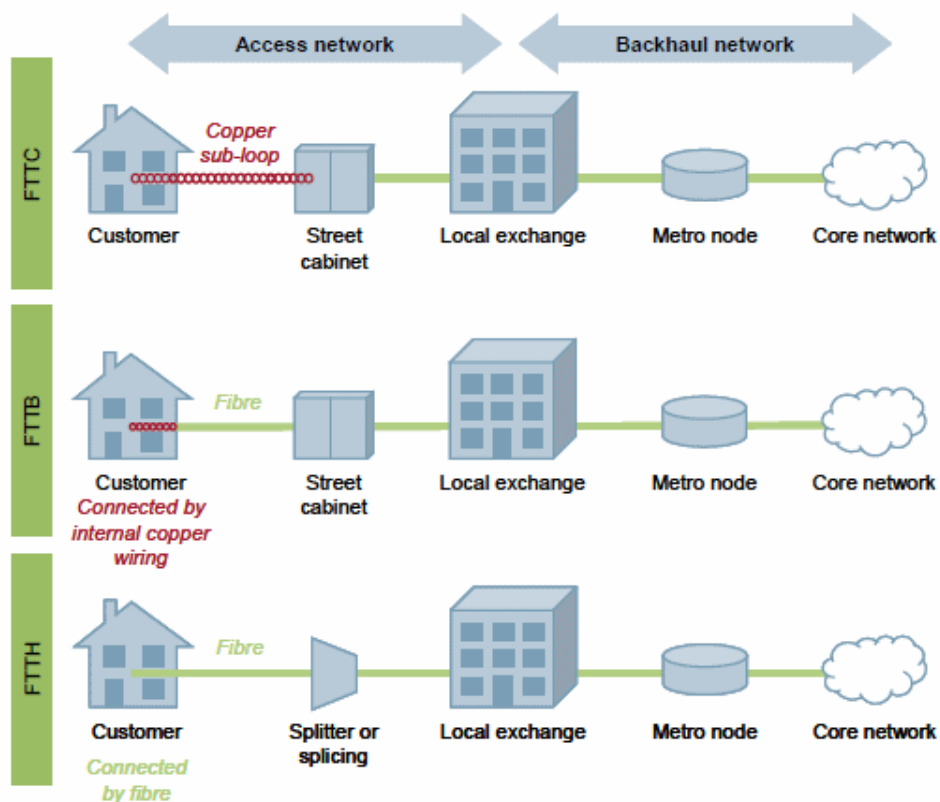
- η γειτονιά οπότε έχουμε αντίστοιχα FTTN (Fiber To The Neighborhood)

- το κράσπεδο του πεζοδρομίου, αρχιτεκτονική FTTC (Fiber To The Curb) όπου η μονάδα τερματισμού της οπτικής ίνας βρίσκεται στο κράσπεδο του πεζοδρομίου
- το κτίριο οπότε έχουμε την περίπτωση FTTB (Fiber To The Building) εξυπηρετώντας μερικές δεκάδες συνδρομητές.
- το σπίτι με το FTTH (Fiber To The Home). Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί την οπτική ίνα μέχρι το σπίτι.

Όλα τα FTTx δίκτυα βασίζονται στις τεχνολογίες Active Optical Network (AON) και Passive Optical Network (PON) ανάλογα με το αν στα σημεία διακλάδωσης χρησιμοποιείται παθητικός ή ενεργός εξοπλισμός.

Οι συνδέσεις / υπηρεσίες που μπορούν να προσφέρουν τα δίκτυα FTTx μπορούν γενικά να περιλαμβάνουν:

- Τηλεφωνία, ISDN
- Ψηφιακές μισθωμένες γραμμές $n \times 64$ kb/s, 2Mb/s ή και περισσότερο, ανάλογα με την ταχύτητα μετάδοσης που χρησιμοποιείται (π.χ. 155 ή 622 Mb/s στην περίπτωση δακτυλίων SDH)
- Συνδέσεις IP & ATM και υπηρεσίες που βασίζονται σ' αυτές
- Συνδέσεις VDSL και υπηρεσίες που βασίζονται σ' αυτές
- Υπηρεσίες Video Broadcast
- Υπηρεσίες Video on Demand

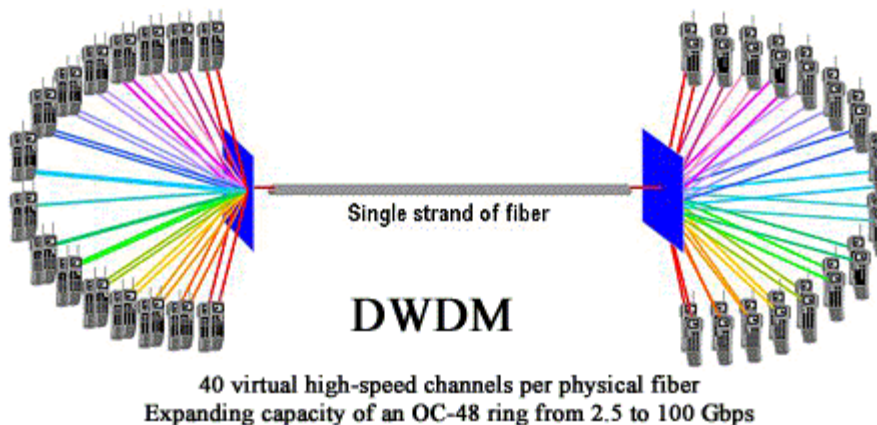


Εικόνα 4.73: Τεχνολογία FTTx

4.12.2.2 Χωρητικότητα οπτικών δικτύων – Τεχνικές πολυπλεξίας.

Η ανάγκη για πολυπλεξία προκύπτει από το γεγονός ότι η μετάδοση μέσω μίας ίνας σε υψηλούς ρυθμούς είναι πολύ πιο οικονομική από τη μετάδοση με περισσότερες ίνες και σε χαμηλότερους ρυθμούς. Υπάρχουν δύο βασικές τεχνικές πολυπλεξίας στα οπτικά δίκτυα, ανάλογες με αυτές που χρησιμοποιούνται στα αντίστοιχα ηλεκτρονικά: Η πολυπλεξία στο μήκος κύματος (WDM – Wavelength Division Multiplexing) και η πολυπλεξία στο χρόνο (OTDM – Optical Time Division Multiplexing).[1]

Η βασική ιδέα πάνω στην οποία στηρίχτηκε η **τεχνολογία πολυπλεξίας μήκους κύματος WDM** ήταν η εξής: σε κάθε οπτική ίνα το οπτικό σήμα που διαδίδεται έχει μια συγκεκριμένη συχνότητα και είναι δυνατόν από την ίδια ίνα να περάσουν περισσότερα του ενός διαφορετικά σήματα διαφορετικής συχνότητας. Με βάση αυτό το χαρακτηριστικό έγινε δυνατή η παράλληλη μετάδοση σήματος και στις οπτικές ίνες. Η πολυπλεξία μήκους κύματος είναι η τεχνική μετάδοσης πληροφορίας μέσα από οπτική ίνα η οποία επιτρέπει την παράλληλη μετάδοση bits ή αλλιώς τη σειριακή μετάδοση χαρακτήρων. Τα συστήματα WDM μπορούν να μεταδώσουν μέχρι 24 κανάλια αλλά στο μέλλον η χωρητικότητα θα αυξηθεί στα 128 και παραπάνω μέσα από μια ίνα. Σήμερα η τεχνική DWDM (Dense Wave Division Multiplexing, Πυκνή Πολυπλεξία στο πεδίο του Μήκους Κύματος) έχει ενταχθεί στην τεχνική WDM. Τεχνικά είναι η ίδια μεθοδολογία αλλά όπως φαίνεται και από το όνομα η DWDM εμπεριέχει περισσότερα κανάλια και μεγαλύτερη χωρητικότητα σε εύρος ζώνης. Συχνά οι δύο αυτές τεχνικές αναφέρονται σαν μια, WDM, χωρίς να διακρίνεται η ειδοποιός διαφορά.

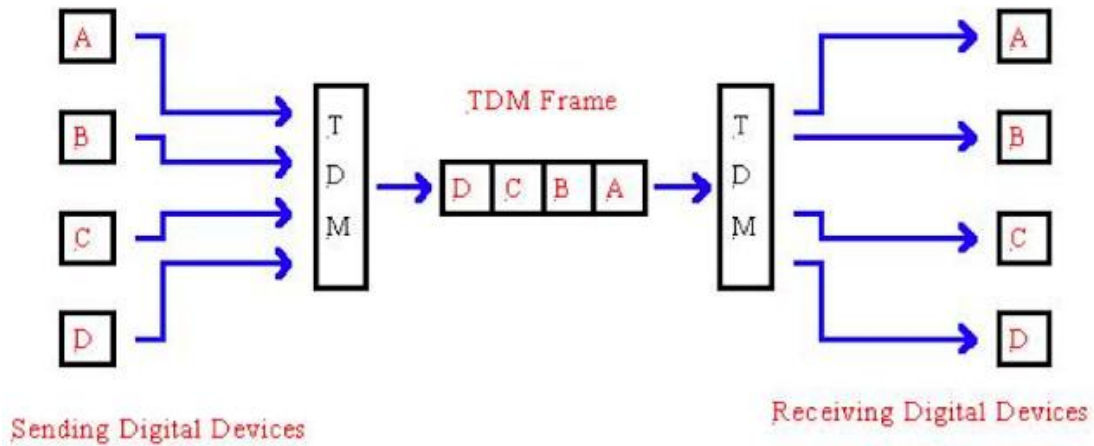


Εικόνα 4.74: Τεχνολογία WDM

Η τεχνολογία DWDM είναι η περισσότερα υποσχόμενη τεχνολογία για μεταφορά δεδομένων μέσα από οπτικές ίνες και αποτελεί σίγουρα μονόδρομο για την υλοποίηση σχεδίων όπως το Gigabit Internet.

Επιπλέον, η (CWDM - Coarse Wavelength Division Multiplexing) είναι μια τεχνολογία μεταφοράς πολυπρωτοκόλλων, που παρουσιάζει σημαντική ανάπτυξη στην αγορά λόγω των ιδιοτήτων χαμηλότερου κόστους και της απλότητας στον σχεδιασμό της. Η CWDM τεχνολογία αντιπροσωπεύει μια τέλεια οικονομική τεχνολογία τόσο σε πρόσβαση όσο και στην αγορά δικτύων κορμού και ειδικά σε σχετικά μικρές αποστάσεις (έως 31 μίλια). Παραδίδει τα πολλαπλάσια μήκη κύματος μέσω μιας οπτικής ίνας σε ένα μέρος του κόστους και πολυπλοκότητας των συστημάτων DWDM. Ένας ακριβέστερος ορισμός του CWDM είναι "μια μορφή διαίρεσης και πολυπλεξίας μήκους κύματος που έχει ευρύτερα διαστήματα μεταξύ των μηκών κύματος από αυτά που χρησιμοποιούνται στο DWDM. Επίσης, αντίθετα από άλλες μορφές WDM, χρησιμοποιεί ένα πολύ ευρύτερο φωτονιακό φάσμα ζωνών από άλλα τέτοια συστήματα, τα οποία συχνά είναι περιορισμένα σε μια ή δύο ζώνες" (Μέχρι 18 μήκη κύματος μπορούν να σταλούν χρησιμοποιώντας μερικά σχέδια CWDM), χρήσιμα στην ηλεκτρονική επικοινωνία.

Αντίθετα, στην περίπτωση της τεχνικής **OTDM πολυπλεξία στο χρόνο**, πολλές ροές πληροφορίας (data streams) χαμηλής ταχύτητας πολυπλέκονται σε μία ροή υψηλού ρυθμού μετάδοσης. Ο χρόνος διαιρείται σε σταθερά υποδιαστήματα 'χρονοθυρίδες'. Κάθε ροή πληροφορίας χρησιμοποιεί διαφορετική χρονοθυρίδα. Η αρχή της πολυπλεξίας στο πεδίο του χρόνου φαίνεται στην εικόνα 4.75.



Εικόνα 4.75 Τεχνολογία OTDM

Ο βασικότερος παράγοντας για την επίδοση των OTDM συστημάτων είναι ο ακριβής χρονισμός των οπτικών σημάτων και το χρονικό εύρος των οπτικών παλμών για τη αποφυγή φαινομένων διασυμβολικής παρεμβολής. Τα σημαντικότερα φαινόμενα που επηρεάζουν την μετάδοση στα OTDM συστήματα είναι η χρωματική διασπορά και η διασπορά τρόπων πόλωσης της ίνας.

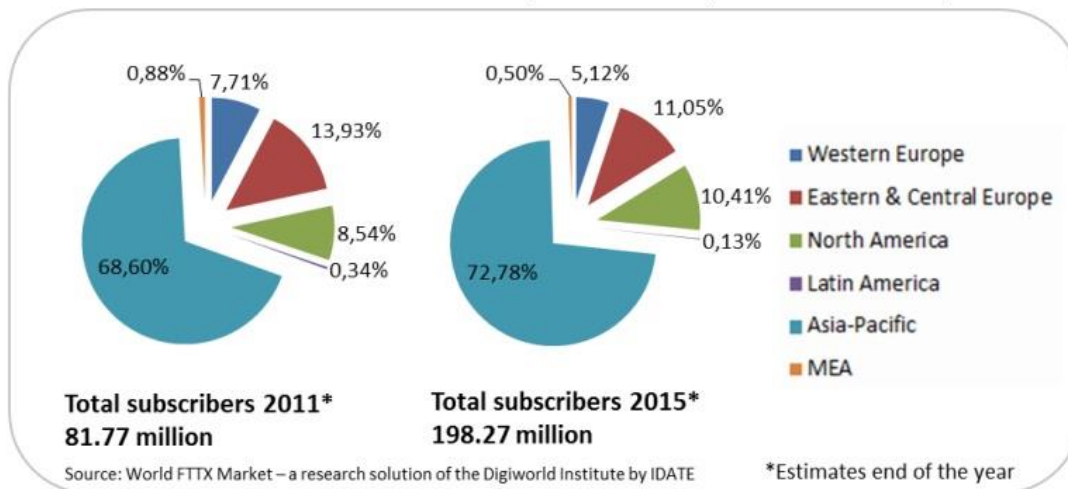
Οι δύο τεχνικές WDM και OTDM δεν είναι ανταγωνιστικές, αλλά μπορούν να συνδυαστούν για την περαιτέρω αύξηση της χωρητικότητας στα οπτικά δίκτυα. Για αυτό το λόγο τα σημερινά δίκτυα χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό των δύο, όπου τα σήματα πολυπλέκονται στο μήκος κύματος και επιπλέον το κάθε μήκος κύματος πολυπλέκεται στο χρόνο .

4.13 Ευρυζωνική ανάπτυξη και τεχνολογίες στην Ευρώπη

Το σχέδιο δράσης eEurope 2005, που εγκρίθηκε από τους αρχηγούς κρατών και κυβερνήσεων στο Ευρωπαϊκό Συμβούλιο της Σεβίλλης τον Ιούνιο του 2002 και που στη συνέχεια αντικαταστήθηκε από τη δράση i2010, έθεσε την ευρυζωνική πρόσβαση ως σημαντική προτεραιότητα της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Στο σχέδιο αυτό αναφέρεται για πρώτη φορά η έννοια της ευρυζωνικής πρόσβασης, ενώ έχει σαν στόχους την τόνωση της ανάπτυξης υπηρεσιών εφαρμογών και περιεχομένου με παράλληλη επιτάχυνση της παροχής ασφαλούς ευρυζωνικής πρόσβασης στο Internet, σύγχρονες δικτυακές δημόσιες υπηρεσίες, ηλεκτρονική διακυβέρνηση (e-government), ηλεκτρονικές υπηρεσίες μάθησης (e-learning), ηλεκτρονικές υπηρεσίες υγείας (e-health), δυναμικό περιβάλλον για το ηλεκτρονικό Επιχειρείν (e-business), ασφαλή υποδομή πληροφοριών, μαζική διάθεση ευρυζωνικής πρόσβασης σε ανταγωνιστικές τιμές και συγκριτική αξιολόγηση της Προόδου και Διάδοση ορθών πρακτικών. Η Ελλάδα έχει μεγάλο ποσοστό χρηστών οι οποίοι έχουν πρόσβαση σε 10 Mbps και ένα καλό ποσοστό χρηστών που έχουν πρόσβαση σε 24 Mbps συνδεσιμότητας, επομένως ο στόχος της Ψηφιακής Ατζέντας στην Ευρώπη κάλυψης 100% πάνω από 30 Mbps μέχρι το 2020 φαίνεται εφικτός. Οι ανταγωνιστικές δυνάμεις είναι ο βασικός παράγοντας για να επιτευχθούν οι στόχοι κάλυψης. [50,51].

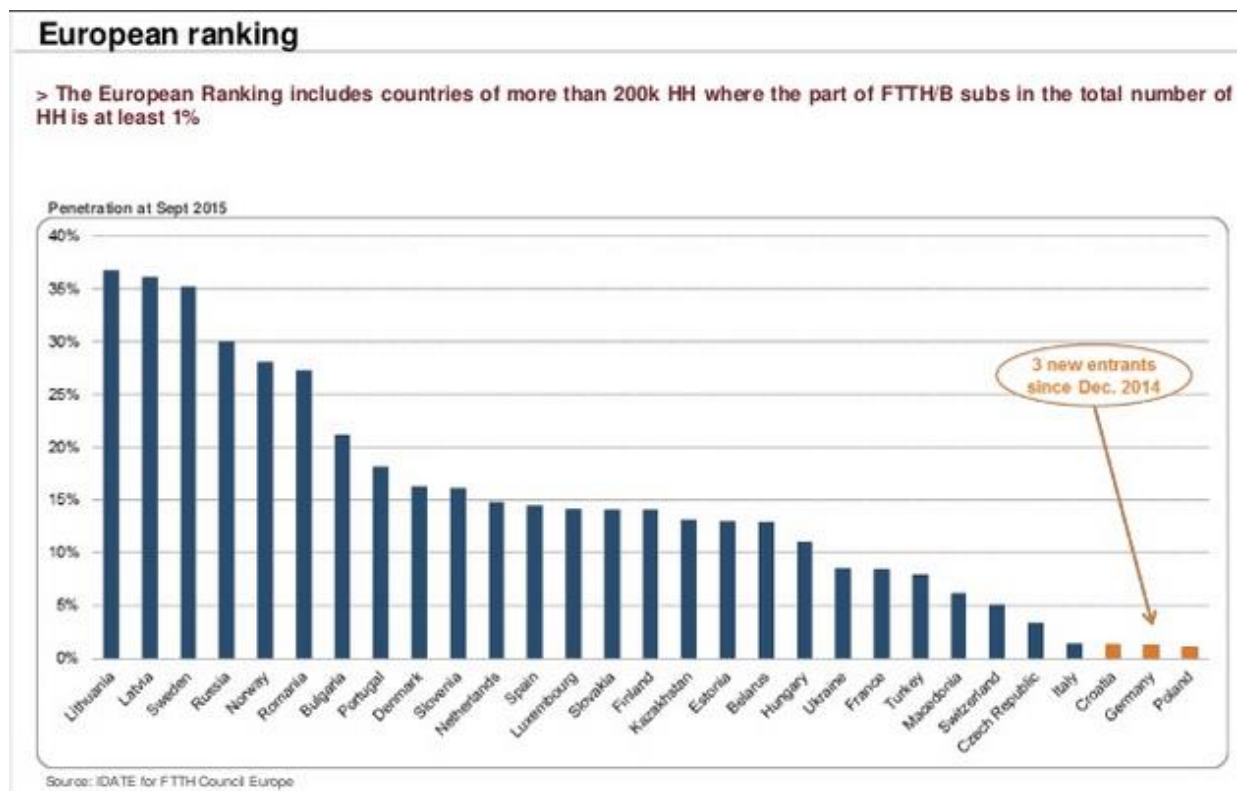
Στο συνέδριο FTTH Conference 2015 στη Βαρσοβία στις 11 Φεβρουαρίου [13] ανακοινώθηκε ότι οι συνδρομητές FTTH στην Ευρώπη είναι περίπου 14,8 εκατομμύρια στην Κίνα 100 εκατομμύρια στη Ρωσία 13,4 εκατομμύρια, στη Βόρεια Αμερική 12,4 και στη Νότιο 1,5 ενώ στις Αραβικές χώρες 1,7 εκατομμύρια σπίτια.(εικ.4.76)

Distribution of FTTH/B subscribers around the world, end 2011 & 2015 (Estimates & Forecasts)



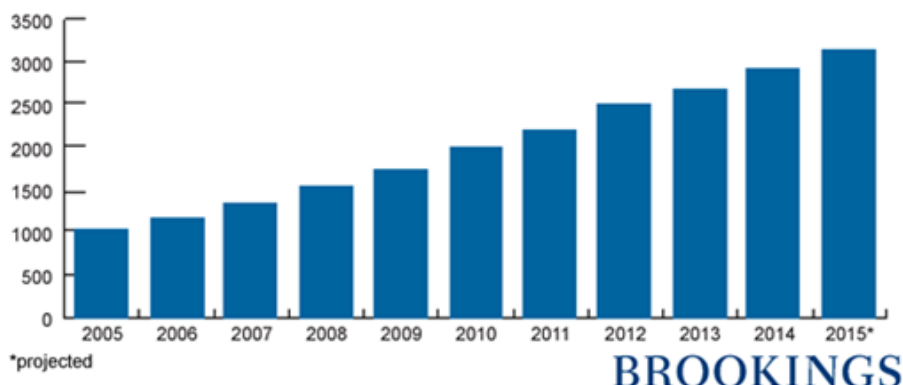
Εικόνα 4.76: Συνδρομητές FTTH/B παγκοσμίως Φεβρουάριος 2015

Οι κορυφαίες στην Ευρώπη χώρες στη χρήση της τεχνολογίας FTTH το Σεπτέμβριο 2015 όπως παρουσιάστηκε στο συνέδριο FTTH που έγινε στο Λουξεμβούργο στις 18-2-2016 φαίνεται στην εικόνα 4.77 [50]. Η εξέλιξη του αριθμού χρηστών Παγκοσμίως σύμφωνα με την International Telecommunication Union το 2015 είναι [49]: (εικ.4.78)



Εικόνα 4.77 Οι κορυφαίες στην Ευρώπη χώρες στη χρήση της τεχνολογίας FTTH

Global number of Internet users (2005-2015, in millions)



Εικόνα 4.78: Εξέλιξη του αριθμού χρηστών Ίντερνετ παγκοσμίως τα τελευταία 10 χρόνια [48]

4.14 Ευρυζωνική ανάπτυξη και τεχνολογίες στην Ελλάδα

Για την Ελλάδα η ανάπτυξη του κλάδου των Τεχνολογιών Πληροφορικής και Επικοινωνιών (ΤΠΕ), όπως και η αξιοποίησή τους ως εργαλείο οικονομικής ανάπτυξης, αναμόρφωσης της δημόσιας διοίκησης και προαγωγής της διαφάνειας, αποτελεί στρατηγική επιλογή πολιτικής για την οριστική έξοδο από την κρίση και τη βιώσιμη ανάπτυξη, στο ανώτατο δυνατό επίπεδο. Αυτό ήδη είναι πραγματικότητα και αποφέρει τα πρώτα αποτελέσματα, με την ενίσχυση της επιχειρηματικότητας και την προσέλκυση επενδύσεων στον τομέα των ΤΠΕ. Η ψηφιακή οικονομία συνιστά για τη χώρα τομέα με σημαντικές αναπτυξιακές προοπτικές για την επόμενη περίοδο, αντίστοιχα όπως η ενέργεια και ο τουρισμός.[51]

Πίνακας 4.3 Ποσοστό διαφόρων τεχνολογιών στην Ελλάδα το 2014.

Τεχνολογίες	Κάλυψη σπιτιών
DSL	99%
VDSL	34%
FTTP	0%
WiMAX	0%
Καλωδιακό internet	0%
Docsis 3 καλωδιακό internet	0%
HSPA	99%
LTE	70%
Δορυφορικό internet	100%

Πίνακας 4.4 Ποσοστά Διείσδυσης Ευρυζωνικότητας, από τον Ιανουάριο 2004 και μετά, για την Ελλάδα και απόκλιση από το ΜΟ της ΕΕ.

Εξάμηνο	Ποσοστό Διείσδυσης Ευρυζωνικότητας	Μ.Ο. Ευρώπης	Απόκλιση Ελλάδα από Μ.Ο. Ευρώπης
Ιανουάριος 2004	0.10%	5.10%	5.00%
Ιούλιος 2004	0.23%	6.53%	6.30%
Ιανουάριος 2005	0.46%	8.50%	8.04%
Ιούλιος 2005	0.84%	10.50%	9.66%
Ιανουάριος 2006	1.40%	12.80%	11.40%
Ιούλιος 2006	2.68%	14.04%	11.36%
Ιανουάριος 2007	4.40%	16.20%	11.80%
Ιούλιος 2007	6.90%	18.20%	11.30%
Ιανουάριος 2008	9.10%	20.00%	10.90%
Ιούλιος 2008	11.20%	21.70%	10.50%
Ιανουάριος 2009	13.40%	22.90%	9.50%
Ιούλιος 2009	15.60%	23.90%	8.30%
Ιανουάριος 2010	17.00%	24.80%	7.80%
Ιούλιος 2010	18.60%	25.60%	7.00%
Ιανουάριος 2011	19.90%	26.60%	6.70%
Ιούλιος 2011	20.80%	27.20%	6.40%
Ιανουάριος 2012	21.80%	27.70%	5.90%
Ιούλιος 2012	22.70%	28.20%	5.50%
Ιανουάριος 2013	23.80%	28.80%	5.00%
Ιούλιος 2013	25.30%	29.40%	4.10%
Ιανουάριος 2014	26.30%	29.20%	2.90%
Ιούλιος 2014	27.50%	30.90%	3.40%
Ιανουάριος 2015	28.70%	31.10%	2.40%

Ο ρυθμός αύξησης από το 2010 και μετά είναι μειωμένος με αποτέλεσμα η σύγκλιση με το μέσο όρο της ΕΕ να γίνεται πιο αργά.

5. ΟΙ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ MAXWELL ΣΤΙΣ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ

5.1 Εισαγωγή

Οι εξισώσεις Maxwell στο κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων λαμβάνοντας υπόψη την αξονική συμμετρία έχουν τη μορφή:

$$e_r \left(\frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial E_\varphi}{\partial z} \right) + e_z \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r E_\varphi) - \frac{1}{r} \frac{\partial E_r}{\partial \varphi} \right] + e_\varphi \left(\frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} \right) = - \frac{\partial B}{\partial t}$$

$$e_r \left(\frac{1}{r} \frac{\partial B_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial B_\varphi}{\partial z} \right) + e_z \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r B_\varphi) - \frac{1}{r} \frac{\partial B_r}{\partial \varphi} \right] + e_\varphi \left(\frac{\partial B_r}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial r} \right) = - \frac{1}{c^2} \frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r E_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial E_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 0$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r B_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial B_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0$$

Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο είναι διανυσματικές ποσότητες με τρεις συντεταγμένες η κάθε μία. Συνολικά πρέπει να καθορίσουμε έξι συνιστώσες για τα πεδία ώστε να έχουμε μια λεπτομερή συμπεριφορά τους στο εσωτερικό του πυρήνα της οπτικής ίνας. Εφόσον υπάρχουν τέσσερις εξισώσεις Maxwell που ικανοποιούνται ταυτόχρονα από τις έξι συνιστώσες των δυο πεδίων, δεν είναι τελείως ανεξάρτητες, αλλά υπάρχει αλληλεξάρτηση μεταξύ τους. Επιλύοντας δυο από τις εξισώσεις Maxwell για οποιαδήποτε δυο συνιστώσες των πεδίων που υποθέτουμε ότι είναι ανεξάρτητες θα εκφράσουμε τις άλλες συνιστώσες σε σχέση με αυτές. Αν επιλέξουμε δυο συνιστώσες εγκάρσιου πεδίου υπάρχει σε κάθε σημείο άπειρος αριθμός πιθανών συνιστωσών και άπειρος αριθμός πιθανών λύσεων. Η καλύτερη επιλογή είναι να επιλέξουμε συνιστώσες στην κατεύθυνση διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Αν θεωρήσουμε ότι το κύμα διαδίδεται στη διεύθυνση +z θα υπολογίσουμε την συνιστώσα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου E_z και τη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου H_z και θα προσπαθήσουμε να εκφράσουμε τις άλλες συνιστώσες με όρους E_z και H_z . Μόλις βρούμε τις εκφράσεις για τις δυο διαμήκεις συνιστώσες, μπορούμε να βρούμε τις υπόλοιπες τέσσερις συνιστώσες ως συνάρτηση αυτών των δυο αντικαθιστώντας στις παρακάτω εξισώσεις που προκύπτουν από τις εξισώσεις Maxwell στο κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων:

$$E_r = - \frac{j}{q^2} \left\{ \beta \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{\mu \omega}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} \right\} \quad (5.1)$$

$$E_\varphi = - \frac{j}{q^2} \left\{ \beta \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} - \mu \omega \frac{\partial H_z}{\partial r} \right\} \quad (5.2)$$

$$H_r = - \frac{j}{q^2} \left\{ \beta \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{\varepsilon \omega}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} \right\} \quad (5.3)$$

$$H_\varphi = - \frac{j}{q^2} \left\{ \beta \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} - \varepsilon \omega \frac{\partial E_z}{\partial r} \right\} \quad (5.4)$$

ω = γωνιακή συχνότητα του φωτός,

β = Σταθερά φάσης του υλικού του πυρήνα.

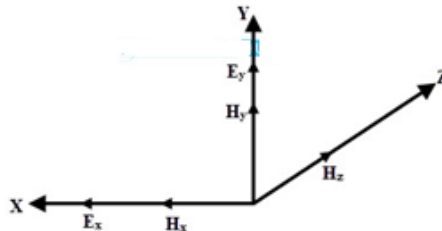
$q^2 = \omega^2 \mu \epsilon - \beta^2$ όπου μ : μαγνητική διαπερατότητα και ϵ : διηλεκτρική σταθερά.

Στις παραπάνω εκφράσεις::

- i. Κάθε μια από τις εγκάρσιες συντεταγμένες εκφράζεται με όρους παραγώγων των διαμήκων συνιστωσών E_z και H_z .
- ii. Οι εγκάρσιες συντεταγμένες του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου υπάρχουν ακόμα και αν εξαφανισθεί μια από τις διαμήκεις συνιστώσες.
- iii. Αν και οι δυο διαμήκεις συνιστώσες εξαφανιστούν μαζί, όλες οι συνιστώσες του πεδίου εξαφανίζονται δείχνοντας την απουσία πεδίου στον πυρήνα. Για να διαδοθεί λοιπόν η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια κατά μήκος της οπτικής ίνας, τα πεδία θα πρέπει να έχουν τουλάχιστον μια διαμήκη συνιστώσα
- iv. Η παρατήρηση (ii) μας δίνει τρεις διακριτούς τύπους κατανομής πεδίου που μας οδηγεί σε τρεις διαφορετικούς τρόπους με τους οποίους τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μπορούν να ταξιδεύουν στο εσωτερικό του πυρήνα της οπτικής ίνας. Τρόπος είναι η λύση της κυματικής εξίσωσης η οποία είναι αρμονική συνάρτηση ως προς το χρόνο και ικανοποιεί τις οριακές συνθήκες στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ πυρήνα και μανδύα.

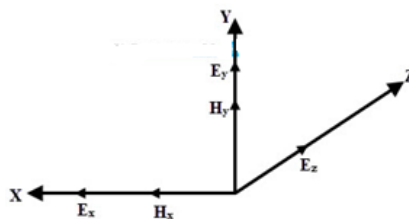
Δηλαδή

- Αν $E_z=0$, δεν υπάρχει διαμήκης συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου στη διεύθυνση της διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Το ηλεκτρικό πεδίο σε αυτή την περίπτωση είναι εγκάρσιο προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος σε κάθε σημείο. Αυτοί οι τύποι των κυμάτων καλούνται Εγκάρσια Ηλεκτρικά Κύματα. Τα Εγκάρσια Ηλεκτρικά Κύματα και ο τρόπος διάδοσης αυτών λέγεται Εγκάρσιος Ηλεκτρικός Τρόπος (TE).



Εικόνα 5.1: Πεδία στον Εγκάρσιο Ηλεκτρικό Τρόπο (TE).

- Αν $H_z=0$, δεν υπάρχει διαμήκης συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου στη διεύθυνση της διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Το μαγνητικό πεδίο σε αυτή την περίπτωση είναι εγκάρσιο προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος σε κάθε σημείο. Αυτοί οι τύποι των κυμάτων καλούνται Εγκάρσια Μαγνητικά Κύματα. Τα Εγκάρσια μαγνητικά Κύματα και ο τρόπος διάδοσης των κυμάτων αυτών λέγεται Εγκάρσιος Μαγνητικός (TM).



Εικόνα 5.2: Πεδία στον Εγκάρσιο Μαγνητικό (TM) τρόπο.

- Αν $E_z \neq 0$ και $H_z \neq 0$, οι τρόποι που προκύπτουν περιέχουν και τις έξι συνιστώσες των πεδίων και λέγονται Υβριδικοί Τρόποι διάδοσης του κύματος

Οι Εγκάρσιοι Ηλεκτρικοί και οι Εγκάρσιοι Μαγνητικοί τρόποι σχετίζονται με τη διάδοση των διαμεσημβρινων ακτίνων ενώ οι Υβριδικοί Τρόποι έχουν σχέση με τη διάδοση των στρεβλών ακτίνων. Το φαινόμενο της ύπαρξης τριών διαφορετικών τρόπων διάδοσης μπορεί να ερμηνευτεί με το θεώρημα των ακτινών.

5.2 Επίλυση των εξισώσεων Maxwell στις οπτικές ίνες

Οι εξισώσεις

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (5.5)$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} \quad (5.6)$$

που προκύπτουν από το νόμο του Faraday και το νόμο του Ampere, όπως είδαμε στο 3^ο κεφάλαιο είναι οι βασικές κυματικές εξισώσεις στο κενό, που συμφωνούν με την εξίσωση του κύματος σε τρεις διαστάσεις

$$\nabla^2 V = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \quad (5.7)$$

Και δείχνουν ότι ένα χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό και ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, συνιστούν ένα κυματικό φαινόμενο στο μέσο που διαδίδονται. Για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου στον πυρήνα μιας οπτικής ίνας πρέπει να επιλύσουμε τις παραπάνω κυματικές εξισώσεις για να πάρουμε εκφράσεις για τα δυο πεδία εφαρμόζοντας τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες.

Για να λύσουμε την κυματική εξίσωση για E_z και H_z ας θεωρήσουμε το βαθμωτό μέγεθος 'V' που μπορεί να αναπαριστά οποιαδήποτε από τις δυο συνιστώσες σε σύστημα κυλινδρικών συντεταγμένων. Η εισαγωγή βαθμωτού μεγέθους γίνεται για να απλοποιηθεί η ανάλυση επειδή οι κυματικές εξισώσεις για τις συνιστώσες των δυο πεδίων είναι παρόμοιες και η λύση για τη μια είναι ίδια με τη λύση για την άλλη. Στη συνέχεια θα αντικαταστήσουμε το βαθμωτό μέγεθος με το κατάλληλο πεδίο στην τελική λύση.

Η εξίσωση του κύματος στις κυλινδρικές συντεταγμένες γίνεται (κεφάλαιο 1):

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}$$

$$\text{ή} \quad \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = \mu \epsilon \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \quad (5.8)$$

Αν θεωρήσουμε ότι όλες οι συνιστώσες του πεδίου είναι αρμονικές συναρτήσεις του χρόνου με γωνιακή συχνότητα 'ω' τότε:

$$V \sim e^{j\omega t} \quad (5.9)$$

Επειδή η V είναι αρμονική συνάρτηση του χρόνου, παραγωγίζοντας την ποσότητα «V» ως προς το χρόνο έχουμε:

$$\frac{\partial V}{\partial t} \equiv j\omega V \quad (5.10)$$

και

$$(\partial^2 V)/\partial t^2 \equiv -\omega^2 V \quad (5.11)$$

Η δεύτερη παράγωγος μιας ποσότητας αρμονικής με το χρόνο με γωνιακή συχνότητα 'ω' είναι ισοδύναμη με το να πολλαπλασιάσουμε αυτή την ποσότητα επι '-ω²'. Αντικαθιστώντας την παραπάνω παράγωγο στην εξίσωση (8) έχουμε:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -\omega^2 \mu \epsilon V \quad (5.12)$$

Η εξίσωση (12) είναι μερική διαφορική εξίσωση που μπορεί να επιλυθεί με τη μέθοδο χωρισμού μεταβλητών.

Εφόσον η διαφορική εξίσωση αποτελείται από τρεις ανεξάρτητες μεταβλητές 'r', 'φ' and 'z', η 'V' πρέπει να είναι συνάρτηση των τριών ανεξάρτητων μεταβλητών. Υποθέτουμε ότι η λύση της παραπάνω εξίσωσης έχει τη μορφή:

$$V = R(r)\Phi(\varphi)Z(z) \quad (5.13)$$

Επειδή μας ενδιαφέρει να ερευνήσουμε τρόπο που διαδίδεται κατά μήκος της διεύθυνσης +z (κατά μήκος του άξονα της ίνας) το πεδίο θα πρέπει να μεταβάλλεται κατά τη διεύθυνση z σύμφωνα με τη σχέση $e^{-j\beta z}$, όπου β είναι η σταθερά διάδοσης του τρόπου. Έχουμε λοιπόν:

$$Z(z) = e^{-j\beta z} \quad (5.14)$$

Αν παραγωγίσουμε την (5.14) ως προς 'z' έχουμε:

$$\frac{\partial V}{\partial z} \equiv -j\beta V \quad (5.15)$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \equiv -\beta^2 V \quad (5.16)$$

Θεωρούμε ένα σημείο (r, φ, z) στον πυρήνα της οπτικής ίνας. Κρατώντας σταθερά τα r και z αν μεταβάλουμε τη φ, το σημείο κινείται σε περιφέρεια κύκλου σε επίπεδο εγκάρσιο ως προς τον άξονα του πυρήνα της οπτικής ίνας (κατεύθυνση-z). Για μεταβολές της φ που είναι ακέραια πολλαπλάσια του 2π φθάνουμε στο ίδιο σημείο (r, φ, z), δηλ. (r, φ, z) ≡ (r, φ+2mπ, z): m είναι ακέραιος. Επειδή δηλ. δεν υπάρχουν ασυνέχειες στον κυματοδηγό το πεδίο μέσα στον κυκλικό κυματοδηγό πρέπει να επαναλαμβάνεται κάθε φ =2π. Συνεπώς θα πρέπει να έχουμε :

$$V(r, \varphi, z) \equiv V(r, \varphi + 2\pi m, z) \quad (5.17)$$

Αυτό μπορούμε να το επιτύχουμε αν διαλέξουμε:

$$\Phi(\varphi) = e^{jn\varphi} \quad (n \text{ είναι ακέραιος}) \quad (5.18)$$

Ισχύει :

$$\Phi(\varphi + 2\pi) = e^{jn(\varphi+2\pi)} = e^{jn\varphi} = \Phi(\varphi) \quad (5.19)$$

Συνεπώς,

$$\frac{\partial V}{\partial \varphi} \equiv jnV \quad (5.20)$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} \equiv -n^2 V \quad (5.21)$$

Αντικαθιστώντας αυτές τις παραγώγους στην εξίσωση (12) παίρνουμε την παραπάνω έκφραση:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{1}{r^2} (-n^2 V) + (-\beta^2 V) = -\omega^2 \mu \varepsilon V \quad (5.22)$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{1}{r^2} (-n^2 V) + (-\beta^2 V) + \omega^2 \mu \varepsilon V = 0 \quad (5.23)$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \left\{ (\omega^2 \mu \varepsilon - \beta^2) - \frac{n^2}{r^2} \right\} V = 0 \quad (5.24)$$

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \left\{ (\omega^2 \mu \varepsilon - \beta^2) - \frac{n^2}{r^2} \right\} \right] V = 0 \quad (5.25)$$

$$\left[\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \left\{ (\omega^2 \mu \varepsilon - \beta^2) - \frac{n^2}{r^2} \right\} \right] V = 0 \quad (5.26)$$

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \left\{ (\omega^2 \mu \varepsilon - \beta^2) - \frac{n^2}{r^2} \right\} \right] R(r) = 0 \quad (5.27)$$

$$\left[\frac{\partial^2 R(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R(r)}{\partial r} + \left\{ (\omega^2 \mu \varepsilon - \beta^2) - \frac{n^2}{r^2} \right\} \right] R(r) = 0 \quad (5.28)$$

Η εξίσωση (28) είναι η εξίσωση Bessel. Η σειρά των λύσεων της εξίσωσης καλούνται συναρτήσεις του Bessel.

$$\text{Αν ορίσουμε } q^2 = \omega^2 \mu \varepsilon - \beta^2 \quad (5.29)$$

έχουμε ποικιλία λύσεων της εξίσωσης Bessel ανάλογα με τις παραμέτρους 'n' και 'q'. Ανάλογα με την επιλογή του q δηλ. πραγματικός, φανταστικός, μιγαδικός, παίρνουμε διαφορετικές λύσεις της εξίσωσης Bessel. Για να διαλέξουμε την κατάλληλη λύση πρέπει να κατανοήσουμε την κατανομή του πεδίου. Για πεδίο που διαδίδεται, το β είναι πραγματικός, και για μέσο χωρίς απώλειες το μ και το ε είναι πραγματικοί. Συνεπώς το q² είναι πραγματικός, θετικός ή αρνητικός. Η ποσότητα q μπορεί να είναι

- πραγματική (αν q² είναι θετικός) ή
- φανταστική (αν q² είναι αρνητικός).

Ανάλογα με το πρόσημο του q², η εξίσωση Bessel έχει διαφορετικές λύσεις. Η εξίσωση (5.24) είναι διαφορική δεύτερης τάξης και έχει δυο αυθαίρετες σταθερές.

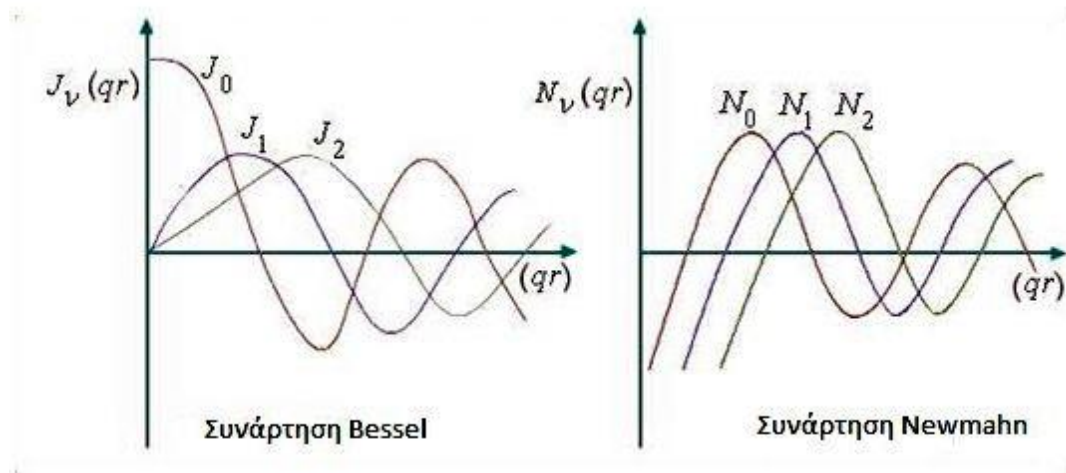
5.2.1 q²>0:

Οι λύσεις είναι οι συναρτήσεις Bessel και Neumann ή συνάρτηση Bessel δεύτερου είδους και συμβολίζονται J_v(qr) και N_v(qr) αντίστοιχα. 'v' είναι η τάξη της συνάρτησης και η ποσότητα στις παραθέσεις είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές.

Η γενική λύση της εξίσωσης (28) μπορεί να γραφεί ως γραμμικός συνδυασμός των δυο συναρτήσεων:

$$R(r) = \alpha_1 J_v(qr) + \alpha_2 N_v(qr) \quad (5.30)$$

Οι α_1 και α_2 είναι οι αυθαίρετες σταθερές. Η εικόνα (5.3) δείχνει την αναπαράσταση των συναρτήσεων Bessel και Neumann :



Εικόνα 5.3: Λύσεις της εξίσωσης Bessel

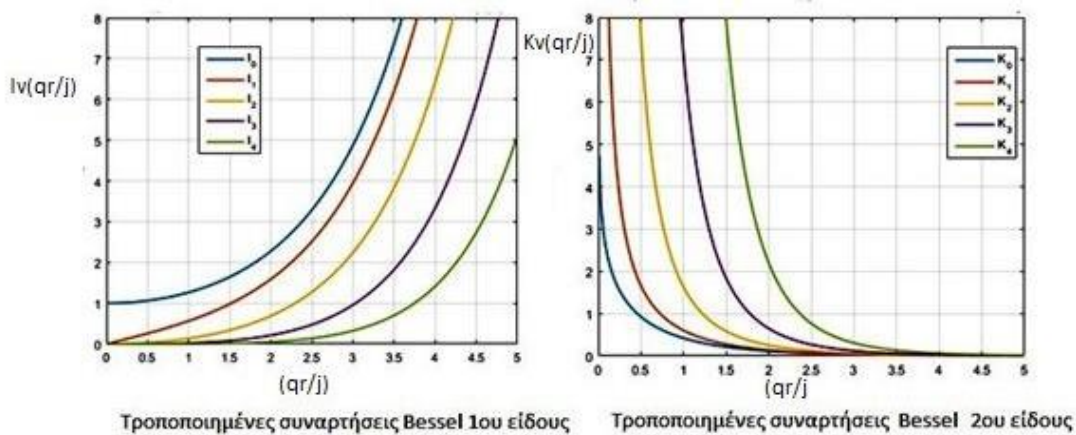
5.2.2 $q_2 < 0$:

Οι λύσεις λέγονται τροποποιημένες συναρτήσεις Bessel και συμβολίζονται με $K_n(qr/j)$ και $I_n(qr/j)$ αντίστοιχα. Στην περίπτωση αυτή το q είναι φανταστικό, και το (qr/j) είναι πραγματικός αριθμός. Η λύση της εξίσωσης (28) στην περίπτωση αυτή μπορεί να γραφεί:

$$R(r) = n_1 K_n\left(\frac{qr}{j}\right) + n_2 I_n\left(\frac{qr}{j}\right) \quad (5.31)$$

Οι n_1 and n_2 είναι αυθαίρετες σταθερές.

Η εικόνα (5.4) δείχνει τις τροποποιημένες συναρτήσεις Bessel. Εφόσον η σταθερή διάδοσης β δεν έχει ακόμη καθορισθεί δεν είναι ξεκάθαρο αν σ αυτή την περίπτωση το q είναι πραγματικό ή φανταστικό και ποια λύση θα πρέπει να επιλεγεί για την κυματική εξίσωση (28). Στη περίπτωση αυτή θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τη γνώση που έχουμε για τα πεδία από το μοντέλο των ακτινών του φωτός.



Εικόνα 5.4: Τροποποιημένη συνάρτηση Bessel 1^{ου} είδους, (β) τροποποιημένη συνάρτηση Bessel 2ου είδους

- Από τις εικόνες 5.3 and 5.4 είναι καθαρό ότι η συνάρτηση $J_n(x)$ είναι πάντα πεπερασμένη για όλες τις τιμές του 'x' όπου $x=qr$. Εκτός από το $J_0(x)$, όλα τα υπόλοιπα $J_n(x)$ είναι μηδέν στο $x=0$.
- Οι συναρτήσεις $N_n(x)$ ασυμπτωτικά αποκλίνουν στο $-\infty$ καθώς $x \rightarrow 0$, αν και είναι πεπερασμένη για όλες τις τιμές του $x \neq 0$.
- Και οι δυο συναρτήσεις $J_n(x)$ και $N_n(x)$ έχουν ταλαντωτική συμπεριφορά σαν συναρτηση του 'x'.
- Οι συναρτήσεις $K_n(x)$ είναι μονότονα φθίνουσες συναρτήσεις του 'x' όπου $x = \frac{qr}{j}$, και τείνουν στο μηδέν καθώς $x \rightarrow \infty$.
- Οι συναρτήσεις $I_n(x)$ είναι μονότονα αύξουσες συναρτήσεις του 'x', και τείνουν στο ∞ όταν $x \rightarrow \infty$.

Ένας τρόπος είναι καθοδηγούμενος όταν τα πεδία του περιορίζονται στον οδηγό και έξω από τον οδηγό φθίνουν μονότονα. Η μορφή του πεδίου που δημιουργείται κάθετα στην διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα -μανδύα οφείλεται στην επαλληλία των μετώπων κύματος των προσπιπτόντων και των ανακλωμένων ακτίνων και συνεπώς παρουσιάζει μια μεταβολή του πλάτους από μια μέγιστη σε μια ελάχιστη τιμή στο χώρο που αντιστοιχεί στην ενισχυτική και καταστροφική συμβολή. Για καθοδηγούμενο τρόπο αναμένουμε ένα χωρικά ταλαντωτικό πεδίο στο εσωτερικό της διηλεκτρικής ράβδου και ένα φθίνον πεδίο στο εξωτερικό της.

Από τα παραπάνω για την επιλογή της λύσης στο εσωτερικό και εξωτερικό της ράβδου έχουμε: Στο εσωτερικό πρέπει να έχουμε μια λύση που δίνεται από την εξίσωση (5.30), και στο εξωτερικό η λύση πρέπει να δίνεται από την εξίσωση (5.31). Με τον τρόπο αυτό θέτουμε όρια στην τιμή της σταθερής διάδοσης β , στο εσωτερικό και το εξωτερικό του πυρήνα της οπτικής ίνας.

- Στο εσωτερικό $r < a$ και $q^2 > 0$ συνεπώς $\beta^2 < \omega^2 \mu \epsilon_1$
- Στο μανδύα της οπτικής ίνας, $r > a$ και $q^2 < 0$ συνεπώς $\beta^2 > \omega^2 \mu \epsilon_2$

Έτσι η σταθερή διάδοσης β μπορεί να πάρει τιμές

$$\omega \sqrt{\mu \epsilon_2} < \beta < \omega \sqrt{\mu \epsilon_1} \quad (5.32)$$

Οι δυο όροι στις εξισώσεις (5.30) και (5.31) δεν αναπαριστούν σωστά την συμπεριφορά του πεδίου στην οπτική ίνα. Οι συναρτήσεις $N_n(x)$ ασυμπτωτικά αποκλίνουν στο $-\infty$ καθώς $x \rightarrow 0$, ο όρος αυτός είναι απαράδεκτος, γιατί δεν έχει φυσική σημασία στον κυκλικό κυματοδηγό, επομένως $a_2 = 0$. Εφ' όσον τα πεδία είναι πάντα πεπερασμένα σε κάθε σημείο, πρέπει η h_2 να είναι μηδέν, επειδή η $I_n(x)$ δεν είναι πεπερασμένη σε κάθε σημείο στο χώρο. Η λύση της κυματικής εξίσωσης στον πυρήνα και στην περιοχή του μανδύα της οπτικής ίνας μπορεί να γραφεί:

$$V_1(r, \varphi, z, t) = a_1 J_n(ur) e^{jn\varphi - j\beta z + j\omega t} \quad \text{για } r < a \quad (5.33)$$

$$V_2(r, \varphi, z, t) = n_1 K_n(wr) e^{jn\varphi - j\beta z + j\omega t} \quad \text{για } r > a \quad (5.34)$$

Όπου:

$$u = \sqrt{\omega^2 \mu \epsilon_1 - \beta^2} \quad \text{Εγκάρσια σταθερά διάδοσης} \quad (5.35)$$

$$w = \sqrt{\beta^2 - \omega \mu \epsilon_2} \quad \text{Εγκάρσιος συντελεστής εξασθένησης} \quad (5.36)$$

Οι εξισώσεις (33) και (34) δίνουν τη λύση της κυματικής εξίσωσης σε μια οπτική ίνα και δείχνουν τη συμπεριφορά του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στην περιοχή του πυρήνα και του μανδύα της οπτικής ίνας. Οι εκφράσεις για το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο στον πυρήνα και τον μανδύα μπορούν να γραφούν::

- Στο εσωτερικό του πυρήνα ($r < a$):

$$E_{z1} = AJ_v(ur)e^{jv\varphi - j\beta z + j\omega t} \quad (5.37)$$

$$H_{z1} = BJ_v(ur)e^{jv\varphi - j\beta z + j\omega t} \quad (5.38)$$

- Στο εσωτερικό του μανδύα ($r > a$):

$$E_{z2} = CK_v(wr)e^{jv\varphi - j\beta z + j\omega t} \quad (5.39)$$

$$H_{z2} = DK_v(wr)e^{jv\varphi - j\beta z + j\omega t} \quad (5.40)$$

Οι A, B, C και D είναι αυθαίρετες σταθερές και οι τιμές τους καθορίζονται αντικαθιστώντας τις κατάλληλες οριακές συνθήκες.

5.2.3 Οι συνιστώσες του πεδίου

Εφαρμόζοντας τις εξισώσεις Maxwell σε κυλινδρικές συντεταγμένες έχουμε:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial H_\varphi}{\partial z} = j\omega \epsilon E_r \quad (5.41)$$

$$\frac{\partial H_r}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial r} = j\omega \epsilon E_\theta \quad (5.42)$$

$$\frac{1}{r} H_\varphi + \frac{\partial H_\varphi}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} = j\omega \epsilon E_z \quad (5.43)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial E_\varphi}{\partial z} = j\omega \mu H_r \quad (5.44)$$

$$\frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} = j\omega \mu H_\varphi \quad (5.45)$$

$$\frac{1}{r} E_\varphi + \frac{\partial E_\varphi}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} = j\omega \mu H_z \quad (5.46)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις βρίσκουμε εκφράσεις για τις εγκάρσιες συνιστώσες συναρτήσει E_z και H_z

$$E_r = -\frac{j}{q^2} \left\{ \beta \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{\mu\omega}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} \right\} \quad (5.1)$$

$$E_\varphi = -\frac{j}{q^2} \left\{ \frac{\beta}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} - \mu\omega \frac{\partial H_z}{\partial r} \right\} \quad (5.2)$$

$$H_r = -\frac{j}{q^2} \left\{ \beta \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{\epsilon\omega}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} \right\} \quad (5.3)$$

$$H_\varphi = -\frac{j}{q^2} \left\{ \frac{\beta}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} - \epsilon\omega \frac{\partial E_z}{\partial r} \right\} \quad (5.4)$$

Αντικαθιστώντας στις σχέσεις αυτές τις 5.3, 5.38, 5.39, 5.40 βρίσκουμε τις εκφράσεις των μεγεθών E_r , E_φ , H_r , και H_φ για τον πυρήνα και το μανδύα.

- **Ρυθμοί TE ($E_z=0, H_z \neq 0$)**

Αντικαθιστώντας στις σχέσεις 1-4 $E_z=0$ και την H_z από την 38 έχουμε:

$$E_r = \frac{-j\omega\mu\eta}{k_c^2 r} (A\cos n\theta - B\sin n\theta) J_n(k_c r) e^{-j\beta z} e^{j\omega t} \quad (5.47)$$

$$E_\theta = \frac{j\omega\mu}{k_c} (A\sin n\theta \cos n\theta + B\cos n\theta) J_n'(k_c r) e^{-j\beta z} e^{j\omega t} \quad (5.48)$$

$$E_z = 0 \quad (5.49)$$

$$H_r = \frac{-j\beta}{k_c} (A\sin n\theta \cos n\theta + B\cos n\theta) J_n'(k_c r) e^{-j\beta z} e^{j\omega t} \quad (5.50)$$

$$H_\theta = \frac{-j\beta\eta}{k_c^2 r} (A\cos n\theta - B\sin n\theta) J_n(k_c r) e^{-j\beta z} e^{j\omega t} \quad (5.51)$$

$$H_z = (A\sin n\theta \cos n\theta + B\cos n\theta) J_n(k_c r) e^{-j\beta z} e^{j\omega t} \quad (5.52)$$

- **Ρυθμοί TM ($E_z \neq 0, H_z = 0$)**

Αντικαθιστώντας στις σχέσεις 1-4 $H_z=0$ και την E_z από την (37) έχουμε:

$$E_r = \frac{-j\beta}{k_c} (A\sin n\theta \cos n\theta + B\cos n\theta) J_n'(k_c r) e^{-j\beta z} e^{j\omega t} \quad (5.53)$$

$$E_\theta = \frac{-j\beta\eta}{k_c^2 r} (A\cos n\theta - B\sin n\theta) J_n(k_c r) e^{-j\beta z} e^{j\omega t} \quad (5.54)$$

$$E_z = (A\sin n\theta \cos n\theta + B\cos n\theta) J_n(k_c r) e^{-j\beta z} e^{j\omega t} \quad (5.55)$$

$$H_r = \frac{j\omega\varepsilon\eta}{k_c^2 r} (A\cos n\theta - B\sin n\theta) J_n(k_c r) e^{-j\beta z} e^{j\omega t} \quad (5.56)$$

$$H_\theta = \frac{-j\omega\varepsilon}{k_c} (A\sin n\theta \cos n\theta + B\cos n\theta) J_n'(k_c r) e^{-j\beta z} e^{j\omega t} \quad (5.57)$$

$$H_z = 0 \quad (5.58)$$

[11,37,38,52]

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εργασία είναι μια επισκόπηση των οπτικών ινών τόσο στο θεωρητικό μέρος με τη βοήθεια των Μαθηματικών και της Φυσικής όσο και στον τομέα των εφαρμογών. Οι εξισώσεις Maxwell προέβλεψαν την ύπαρξη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και την ταύτιση του φωτός με αυτό πράγμα που επιβεβαιώθηκε αργότερα πειραματικά. Η διάδοση του φωτός στην ύλη και ειδικότερα στις οπτικές ίνες περιγράφεται από τις εξισώσεις Maxwell. Η λύση των εξισώσεων με τη χρήση κατάλληλου συστήματος συντεταγμένων παρουσιάζει ιδιαίτερη δυσκολία και ερμηνεύει τη διάδοση του φωτός τόσο στον πυρήνα όσο και στο μανδύα λαμβάνοντας υπόψη τις κατάλληλες οριακές συνθήκες. Σημαντικό ρόλο παίζει η ταύτιση των μαθηματικών λύσεων με την ύπαρξη φυσικής ερμηνείας για κάθε επιμέρους περίπτωση. Οι νέες δυνατότητες των οπτικών στη μεταφορά δεδομένων με τη χρήση συνεστραμμένου φωτός μπορεί να ερμηνευθεί με τις εξισώσεις Maxwell σε συνδυασμό με το μέγεθος στροφορμή του φωτός.

Η έκρηξη στη μεταφορά και πρόσβαση στις πληροφορίες που παρατηρείται τις τελευταίες δεκαετίες οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη χρήση των οπτικών ινών. Η χρήση τους ως αισθητήρων προκάλεσε μεγάλες αλλαγές τόσο στην ιατρική όσο και στη Γεωλογία όπως αναφέρθηκε. Παρά τη διαθεσιμότητα ασυρμάτων υπηρεσιών οι οπτικές ίνες αποτελούν το μέλλον στις τηλεπικοινωνίες σήμερα. Ο λόγος είναι ότι στην ασύρματη επικοινωνία υπάρχει συμβολή των δεσμών ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, συνεπώς ο κάθε πάροχος δικτύου μπορεί να χρησιμοποιεί μικρά μόνο τμήματα του φάσματος μετάδοσης. Στις οπτικές ίνες μπορεί να χρησιμοποιηθεί ολόκληρο το διαθέσιμο φάσμα λόγω του περιορισμού του φωτός μέσα στο καλώδιο.[54,55].

Οι μελλοντικοί στόχοι οπτικών επικοινωνιών αφορούν στην υπερνίκηση των περιορισμών που επιβάλλει η χρήση των συγχρόνων δικτύων και αφορούν:[56,57,58]

Το πρόβλημα εύρους ζώνης -Οπτικά Δίκτυα Multi – Terabit. Η διαθεσιμότητα μεγαλύτερου εύρους ζώνης στα δίκτυα οπτικών ινών οδήγησε στο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη οπτικών δικτύων με δυνατότητα μεταφοράς Tb/s. Τα δίκτυα αυτά παρέχουν τη χωρητικότητα και το εύρος ζώνης που απαιτείται για την ικανοποίηση των αυξανόμενων απαιτήσεων για επικοινωνίες data and voice για την μελλοντική ανάπτυξη του Internet για βίντεο υψηλής ποιότητας και εφαρμογές ηλεκτρονικού εμπορίου]. Η τεχνολογία Dense Wave Division Multiplexing (DWDM) έδωσε το έρισμα πετυχαίνοντας δίκτυο 1 Terabit με τη χρήση ρυθμού μεταφοράς 10Gb/s συνδυαζόμενο με 100 κανάλια DWDM(2014) [56]. Δίκτυο 4 terabit μπορεί να επιτευχθεί συνδυάζοντας ρυθμό μεταφοράς 40Gb/s με 100 κανάλια 100 DWDM. Ο στόχος των ερευνητών έχει τεθεί σε μεγαλύτερο εύρος ζώνης με συστήματα 100Gb/s [55]. Με τη συνεχή μείωση του κόστους των συστατικών οπτικών ινών, θα είναι δυνατή η διαθεσιμότητα πολύ μεγαλύτερου εύρους ζώνης και η χρησιμοποίησή σε επικοινωνίες :Μεγάλης απόστασης (WAN), Μητροπολιτικών δικτύων (MAN), Δικτύων πρόσβασης (Access networks), Τοπικών δικτύων (LAN) αλλά και μέσα στους υπολογιστές (interconnections) [1]. Η τεχνολογία που βασίζεται στο συνεστραμμένο φως, αφορά δέσμες laser σχήματος donut που αποκαλούνται οπτικές δίνες (optical vortices), στις οποίες το φως περιστρέφεται καθώς διαδίδεται και υπόσχεται τεράστια αύξηση στο εύρος ζώνης. [4,30,46]

Μετατροπή οπτικών σημάτων σε ηλεκτρικά και το αντίστροφο- . All Optical Δίκτυα Τηλεπικοινωνιών. Στα προσεχή σχέδια βρίσκεται η οπτική επικοινωνία (all fiber optic communication) που θα στηρίζεται πλήρως στον οπτικό τομέα. Στα δίκτυα αυτά όλα τα σήματα θα επεξεργάζονται στον οπτικό τομέα χωρίς καμμία μορφή ηλεκτρικής επεξεργασίας. Τώρα η επεξεργασία και μεταγωγή των σημάτων γίνονται στο ηλεκτρικό πεδίο, όπου τα οπτικά σήματα πρέπει πρώτα να μετατρέπονται σε ηλεκτρικά πριν να μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία, και κατευθύνονται προς τον προορισμό τους. Μετά την επεξεργασία και δρομολόγηση, τα σήματα επαναμετατρέπονται σε οπτικά σήματα, τα οποία μεταδίδονται σε μεγάλες αποστάσεις στον προορισμό τους. Αυτή η μετατροπή από ηλεκτρική

μορφή σε οπτική και αντίστροφα, έχει ως αποτέλεσμα να προστίθεται χρόνος απόκρισης στο δίκτυο και ως εκ τούτου είναι ένας περιορισμός για την επίτευξη πολύ υψηλών ταχυτήτων δεδομένων. Ένα άλλο όφελος των οπτικών δικτύων είναι ότι δεν θα υπάρξει καμία ανάγκη να αντικατασταθούν τα ηλεκτρονικά, όταν αυξάνεται ο ρυθμός δεδομένων, δεδομένου ότι όλη η επεξεργασία σήματος και τη δρομολόγηση συμβαίνει στο οπτικό πεδίο [55]. Ωστόσο, πριν αυτό να μπορεί να γίνει πραγματικότητα, πρέπει να επιλυθούν δυσκολίες στην οπτική δρομολόγηση και στη μεταγωγή μήκους κύματος (LHN). [56,57].

Έξυπνα Οπτικά δίκτυα μεταφοράς. Επί του παρόντος, τα παραδοσιακά οπτικά δίκτυα δεν είναι σε θέση να προσαρμοστούν στη γρήγορη ανάπτυξη των online υπηρεσιών δεδομένων λόγω της απροβλεπτότητας της δυναμικής κατανομής του εύρους ζώνης. Τα Ευφυή δίκτυα οπτικών ινών είναι μια μελλοντική τάση στην ανάπτυξη των οπτικών δικτύων και θα έχουν τις ακόλουθες εφαρμογές: Μηχανική κίνησης (κυκλοφορίας), δυναμική πόρων, κατανομή διαδρομών, ειδικά πρωτόκολλα ελέγχου για τη διαχείριση του δικτύου, εύρος ζώνης on demand, ενοικίαση μήκους κύματος, μήκος κύματος wholesale, διαφοροποιημένες υπηρεσίες για ποικιλία ποιότητας επιπέδων παρεχόμενων υπηρεσιών. [62].

Ατέλειες του μέσου μετάδοσης -Οπτική Μετάδοση Ultra - Long Haul. Στον τομέα των υπερ-μεγάλων αποστάσεων οπτικής μετάδοσης, οι περιορισμοί που επιβάλλονται λόγω ατελειών του μέσου μετάδοσης είναι αντικείμενο έρευνας. Για την εξάλειψη του φαινομένου της διασποράς οι ερευνητές μελέτησαν τα πιθανά οφέλη της διάδοσης σολιτονίων. (Ο όρος σολιτόνια στην Οπτική αναφέρεται σε οποιοδήποτε οπτικό πεδίο που δεν αλλάζει καθώς διαδίδεται, εξαιτίας μιας ευαίσθητης ισορροπίας μεταξύ γραμμικών και μη γραμμικών φαινομένων στο μέσο διάδοσης). Μεγαλύτερη κατανόηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ ηλεκτρομαγνητικού κύματος φωτός και του μέσου διαβίβασης είναι απαραίτητη για να προχωρήσουμε προς μια υποδομή με τις πιο ευνοϊκές συνθήκες για τη διάδοση ενός παλμού φωτός. [62,57].

Βελτιώσεις στην τεχνολογία Laser. Μια άλλη μελλοντική εξέλιξη θα είναι η επέκταση των ημιαγωγών λέιζερ σε μια ευρύτερη ποικιλία μηκών κύματος. Λέιζερ με μικρότερο μήκος κύματος, με πολύ υψηλή ισχύ εξόδου έχουν ενδιαφέρον σε ορισμένες οπτικές εφαρμογές υψηλής πυκνότητας, όπως επίσης και μονότροπα λέιζερ με δυνατότητα εκπομπής φωτός σε διαφορετικές επιλεγόμενες συχνότητες. [57].

Νευρωνικά Κόμβοι δικτύου Laser. Το νευρωνικό δίκτυο είναι ένα δίκτυο από απλούς υπολογιστικούς κόμβους (νευρώνες, νευρώνια), διασυνδεδεμένους μεταξύ τους. Είναι εμπνευσμένο από το Κεντρικό Νευρικό Σύστημα (ΚΝΣ), το οποίο προσπαθεί να προσομοιώσει. Οι *νευρώνες* είναι τα δομικά στοιχεία του δικτύου. Κάθε τέτοιος κόμβος δέχεται ένα σύνολο αριθμητικών εισόδων από διαφορετικές πηγές (είτε από άλλους νευρώνες, είτε από το περιβάλλον), επιτελεί έναν υπολογισμό με βάση αυτές τις εισόδους και παράγει μία έξοδο. Η εν λόγω έξοδος είτε κατευθύνεται στο περιβάλλον, είτε τροφοδοτείται ως είσοδος σε άλλους νευρώνες του δικτύου [58]. Η χρήση λέιζερ νευρωνικού δικτύου που θα λειτουργεί στον οπτικό τομέα και η χρήση υπερ-ταχέων φωτονικών τμημάτων θα βελτιώσει τη χωρητικότητα και ταχύτητα τηλεπικοινωνιακών δικτύων και θα αποτελέσει λύση στην αυξανόμενη περιπλοκότητα των δικτύων. [57].

Δομικοί περιορισμοί οπτικών ινών. Τα συστήματα ινών φωτονικών κρυστάλλων (PCFs) αποτελούν μια λύση στο πρόβλημα των περιορισμών στην απόδοση που έχει να κάνει με δομή (γεωμετρία) της ίνας. Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από εγκάρσια περιοδικές σειρές από οπές που περιβάλλονται από γυαλί και διατρέχουν όλο το μήκος της οπτικής ίνας. Ωστόσο, ενώ οι PCF μπορούν να αναγκάσουν το φως να χρησιμοποιηθεί σε μια μεγάλη ποικιλία από τρόπους, πολλά φαινόμενα, όπως η μειωμένη μη γραμμικότητα, μπορεί να επιτευχθεί με βελτίωση των υλικών. [58].

Βελτίωση του υλικού - Πολυμερείς Οπτικές ίνες. Οι πολυμερές οπτικές ίνες προσφέρουν πολλά οφέλη σε σχέση με τα καλώδια χαλκού, τις ίνες υάλου. Σε σύγκριση με τις γυάλινες οπτικές ίνες, οι οπτικές ίνες πολυμερούς παρέχουν εύκολη και λιγότερο δαπανηρή επεξεργασία των οπτικών σημάτων, και είναι πιο ευέλικτες για διασυνδέσεις βύσματος. Το Γερμανικό Κέντρο Αεροδιαστημικής έχει καταλήξει στο συμπέρασμα ότι η χρήση των Πολυμερών Οπτικών ινών πολυμέσων φαίνεται να είναι δυνατή για μελλοντικές εφαρμογές σε αεροσκάφη. Επίσης, στο μέλλον, πολυμερείς οπτικές ίνες πιθανότατα θα εκτοπίσουν καλώδια χαλκού για τη σύνδεση του τελευταίου μίλιου (last mile) από το τελευταίο κουτί διανομής της εταιρείας τηλεπικοινωνιών, και τον τελικό καταναλωτή.[57,58].

Βελτιώσεις στην τεχνολογία πομπού - δέκτη.

Για την επίτευξη διάδοσης υψηλής ποιότητας γίνονται έρευνες για την δημιουργία οπτικών πομποδέκτων που υιοθετούν νέα και προηγμένη τεχνολογία διαμόρφωσης, με άριστη χρωματική διασπορά και ανοχή οπτικού σήματος προς το θόρυβο λόγο (OSNR), το οποίο θα είναι κατάλληλο για εξαιρετικά μεγάλου μήκους συστήματα επικοινωνίας. Επίσης, καλύτεροι κώδικες διόρθωσης σφαλμάτων, που είναι είναι πιο αποτελεσματικοί από ότι οι παρόντες κώδικες BCH φαίνεται ότι θα είναι διαθέσιμοι στο εγγύς μέλλον.[57].

Πρόοδος στη σχεδίαση Δικτύου Υποβρυχίων Οπτικών Συστημάτων.

Για να βελτιωθεί η ευελιξία της διαμόρφωσης του δικτύου σε υποβρυχία οπτικά συστήματα επικοινωνίας, αναμένεται ότι η ανάπτυξη τεχνολογίας mesh δικτύων θα είναι ένα βήμα προς τη σωστή κατεύθυνση. Ένα δίκτυο δακτυλίου που χρησιμοποιούν τα μεγάλης κλίμακας υποβρυχία συστήματα οπτικών ινών ενώνει τους σταθμούς κατά μήκος ενός δακτυλίου, ενώ ένα δίκτυο mesh συνδέει τους σταθμούς άμεσα.[57].

Βελτίωση στην τεχνολογία Οπτικής Ενίσχυσης όπου χρησιμοποιούνται οι ενισχυτές (EDFA) Οπτικοί Ενισχυτές προσμίξεως Ερβίου.[57].

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

1. Προσομοιώσεις τρόπων διάδοσης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κυκλικού κυματοδηγού

Οι προσομοιώσεις έγιναν με το λογισμικό **The Wolfram Demonstrations Project** και συγκεκριμένα με το **Electromagnetic Waves in a Cylindrical Waveguide.[18]** Είναι λογισμικό ανοικτού κώδικα που χρησιμοποιεί δυναμικούς υπολογισμούς για να αναπαραστήσει επιστημονικές έννοιες. Καθώς μεταβάλλονται τα κουμπιά ελέγχου βλέπουμε να μεταβάλλονται οι απεικονίσεις και αυτό μας βοηθάει να κατανοούμε το μέγεθος που δείχνουν. Υπάρχει η δυνατότητα επίσης της επιλογής *step backward and forward, enter specific values, play*, καθώς και έλεγχος της ταχύτητας στην εξέλιξη ενός φαινομένου, ή στη συμπεριφορά ενός κουμπιού ελέγχου.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μπορούν να διαδοθούν σε κυλινδρικούς κυματοδηγούς. Ο κάθε τρόπος μετάδοσης αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη κατανομή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και συνεπώς και στην ένταση του φωτεινού σήματος στην εγκάρσια διατομή της ίνας. Οι κατανομές αυτές προκύπτουν από την επίλυση των εξισώσεων Maxwell με τις οριακές συνθήκες που επιβάλλει η δομή και η συμμετρία της ίνας. Στις μονότροπες ίνες που έχουν σχετικά μικρό πυρήνα και μπορούν να καθοδηγούν μόνο ένα χωρικό τρόπο, αν και υπάρχουν δυο διαφορετικές κατευθύνσεις πόλωσης, του οποίου το προφίλ στις περισσότερες περιπτώσεις έχει περίπου Gaussian μορφή. Αν αλλάξουμε τις αρχικές συνθήκες αυτό επηρεάζει μόνο την ισχύ που ακτινοβολείται στον καθοδηγούμενο τρόπο, ενώ η χωρική κατανομή του φωτός είναι σταθερή. Η ακτίνα του τρόπου μονότροπης ίνας είναι της τάξης 5 μm . Οι πολυτροπικές ίνες που έχουν μεγαλύτερο πυρήνα και/ή μεγαλύτερη διαφορά του δείκτη διάθλασης μεταξύ του πυρήνα και του μανδύα, υποστηρίζουν, πολλαπλούς τρόπους με διαφορετικές τιμές κατανομής έντασης. Στην περίπτωση αυτή η χωρική κατανομή του φωτός που διαδίδεται στην ίνα εξαρτάται από τις αρχικές συνθήκες που καθορίζουν την κατανομή της ισχύος μεταξύ των χωρικών τρόπων.

Οι κυλινδρικοί κυματοδηγοί υποστηρίζουν εγκάρσια μαγνητικούς (TM) και εγκάρσιους ηλεκτρικούς τρόπους. Η προσομείωση δείχνει τα αντίστοιχα πεδία, την κατανομή της ενέργειας και τη μεταφορά της ενέργειας. Μπορούμε να επιλέξουμε τους αριθμούς τρόπων n, p τη συχνότητα f , την ακτίνα a , και επιδεικνύονται τα αντίστοιχα πεδία και η κατανομή της ενεργειακής πυκνότητας, για τον καθορισμένο χρόνο ωt στο επίπεδο με γωνία θ μέσω του άξονα του κυλίνδρου. Η μέγιστη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι καθορισμένη στα 1000 V/m σε όλες τις περιπτώσεις. Η συχνότητα είναι μεγαλύτερη από τη συχνότητα αποκοπής f_c , που καθορίζεται από το b και από τους αριθμούς των τρόπων.

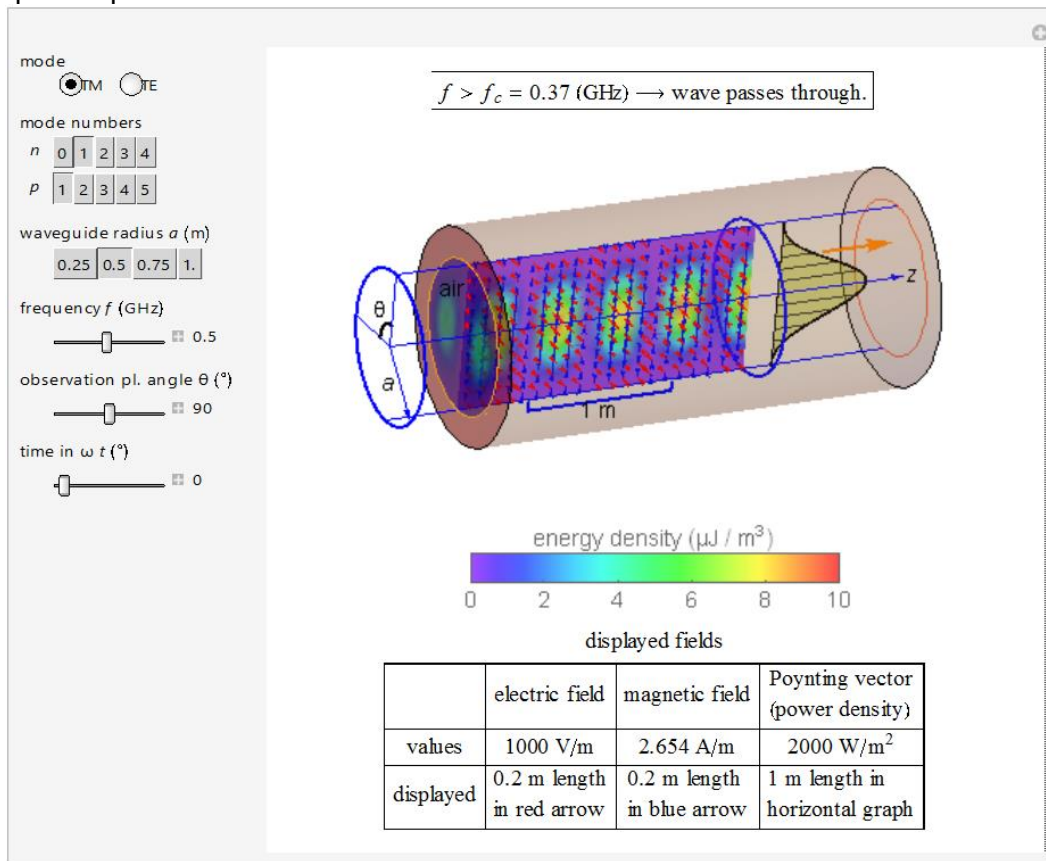
Χρησιμοποιώντας κυλινδρικές συντεταγμένες και θεωρώντας ως διεύθυνση διάδοσης τη διεύθυνση $+z$, τα πεδία είναι συνάρτηση των r, ϕ, z , and t . Η ενέργεια ρέει κατά μήκος του κυματοαγωγού στη θετική διεύθυνση z . Τα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά πεδία παριστάνονται με κόκκινα και μπλε βέλη αντίστοιχα. Η ενεργειακή πυκνότητα παριστάνεται με διαφορετικά χρώματα σύμφωνα με το υπόμνημα. Η μεταφορά ενέργειας ή πυκνότητα ισχύος ισούται με τη μέση τιμή του διανύσματος Poynting η τιμή του οποίου εξαρτάται από τα r, ϕ . Το διάνυσμα Poynting αναπαριστά την πυκνότητα ενεργειακής ροής σε ορισμένη διεύθυνση (ρυθμό μεταφοράς ενέργειας ανα μονάδα επιφάνειας) και ορίζεται από τη σχέση: $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$
Τα πεδία περιγράφονται στον υπάρχοντα πίνακα.

Η ενεργειακή πυκνότητα μπορεί να υπολογισθεί από $W = \frac{\epsilon_0}{2} E^2 + \frac{\mu_0}{2} H^2$, E και H οι στιγμιαίες τιμές των πεδίων. Το μέτρο του μέσου διανύσματος Poynting δίνεται από τη σχέση $S_{ave} = \frac{E \times H}{2}$, και βρίσκεται πάντα στη κατεύθυνση z .

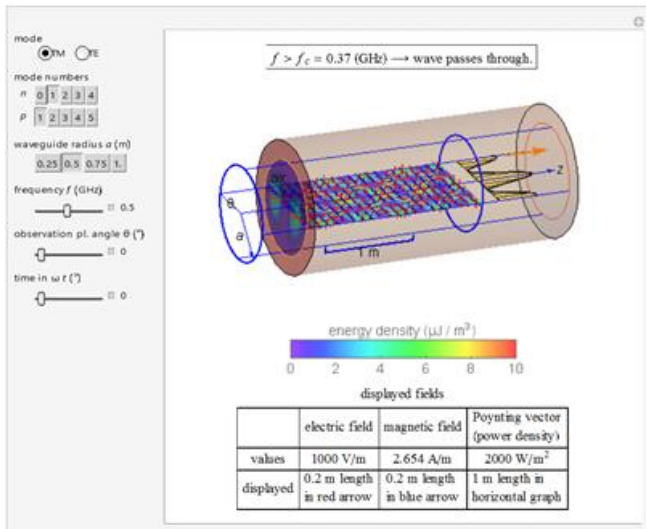
Αν επιλέξουμε συχνότητα κάτω από τη συχνότητα αποκοπής η ενεργειακή πυκνότητα δεν είναι περιοδική κατά μήκος του άξονα z , και το διάνυσμα Poynting είναι μηδέν.

Η οθόνη εργασίας με τα κουμπιά επιλογής και τα κουμπιά ελέγχου φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, όπου έχει επιλεγεί τρόπος TM₁₁, ακτίνα κυματοδηγού 0,5m, συχνότητα 0,5 GHz, γωνία επιπέδου παρατήρησης 90° και χρόνος 0.

Υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μεταξύ των τρόπων TM,TE για τους αριθμούς τρόπων n:0-4 P: 1-5, για οποιοδήποτε συνδυασμό αυτών. Μπορούμε να αλλάξουμε τη συχνότητα, γωνία και χρόνο. Σε κάθε περίπτωση γίνεται υπολογισμός της συχνότητας αποκοπής που αναγράφεται στο πάνω μέρος της προσομοίωσης και αν μπορεί να διαδοθεί η ακτινοβολία.

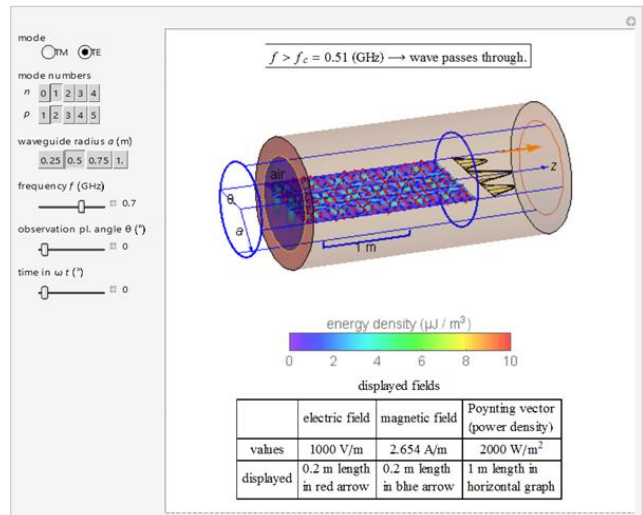


Διατηρώντας σταθερές τις τιμές για το χρόνο και αλλάζοντας ακτίνα, συχνότητα, γωνία παρατηρούμε τους εξής τρόπους διάδοσης:



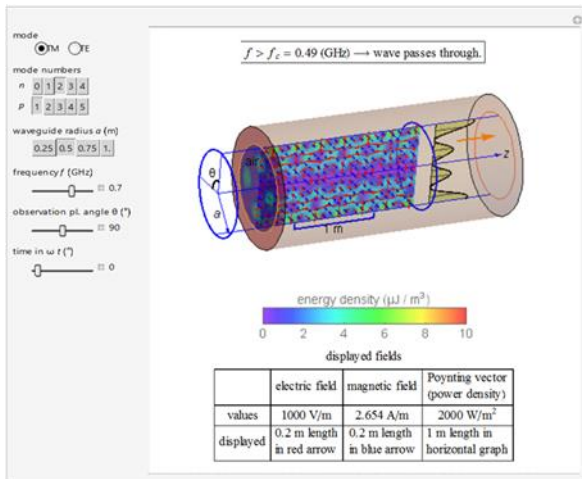
TM11
r=0,5m

f=0,5GHz $\theta=0^\circ$



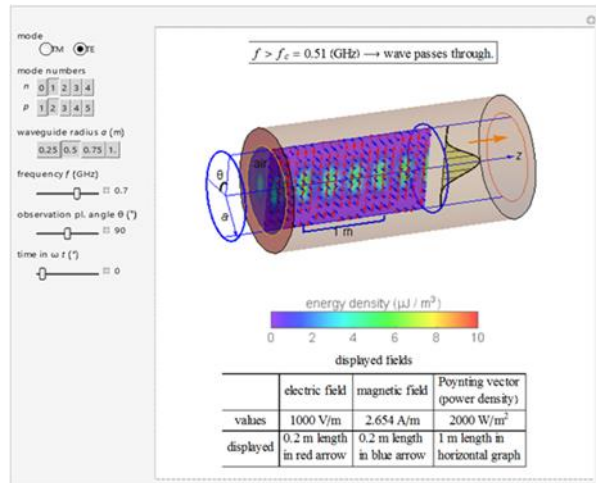
TE12
r=0,5m

f=0,7 GHz $\theta=0^\circ$



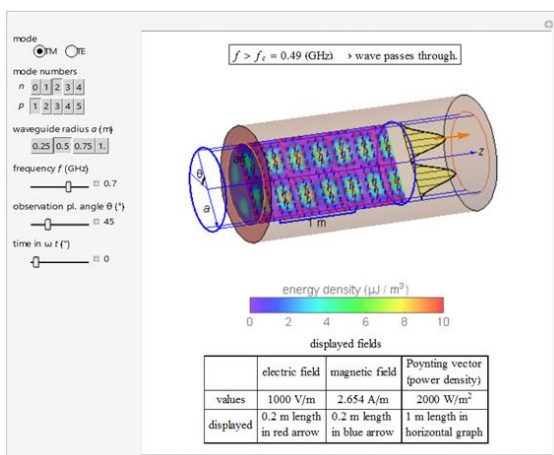
TM21
r=0,5m

f=0,7GHz $\theta=90^\circ$



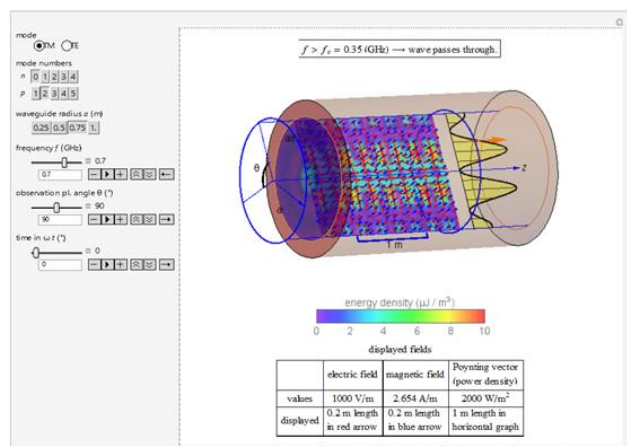
TE12
r=0,5m

f=0,7 GHz $\theta=90^\circ$



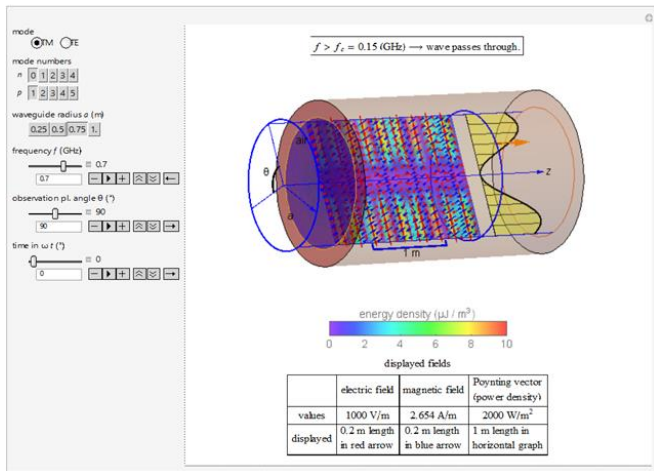
TM21 r=0,5m

f=0,7, $\theta=45^\circ$



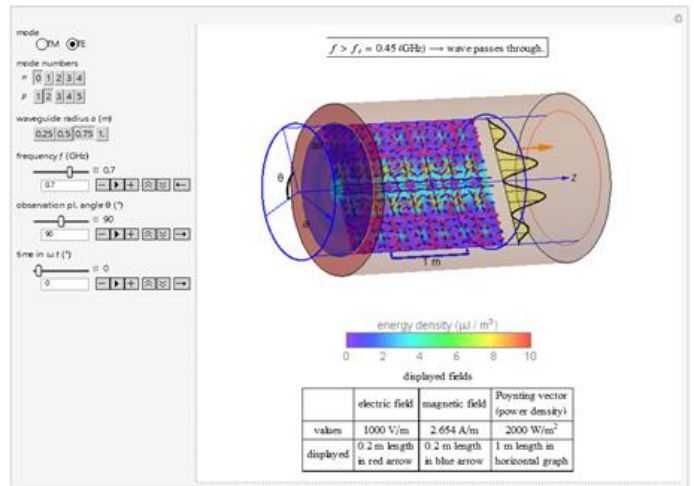
TM02

f=0,7 $\theta=90^\circ$ r=0,75m



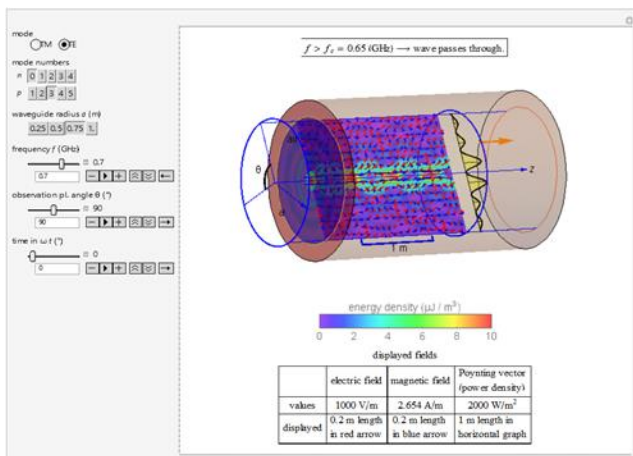
TM01
 $\theta=90^\circ$

$f=0,7$ GHz $r=0,75\text{m}$

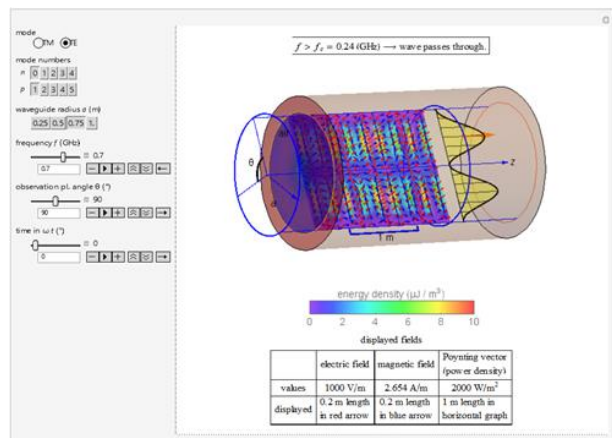


TE02
 $r=0,75\text{m}$

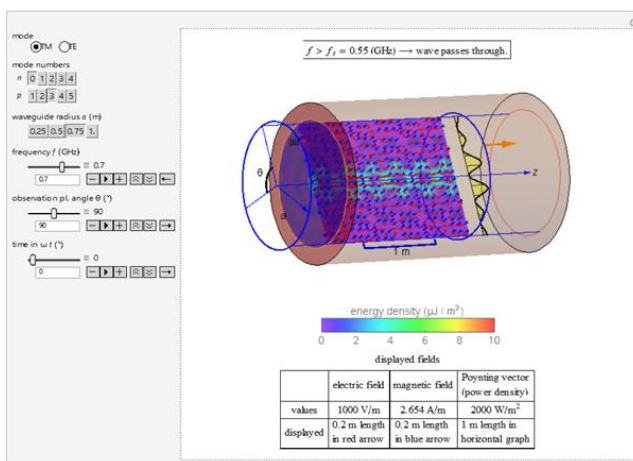
$f=0,7$ GHz $\theta=90^\circ$



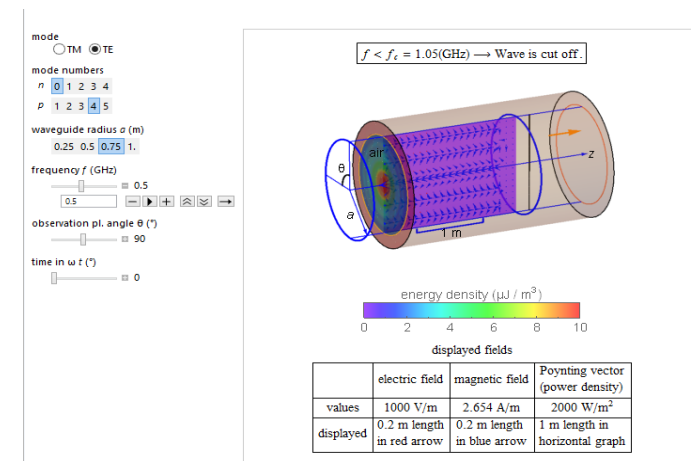
TE03 $f=0,7$ $\theta=90^\circ$ $r=0,75\text{m}$



TE01 $f=0,7$ $\theta=90^\circ$ $r=0,75\text{m}$

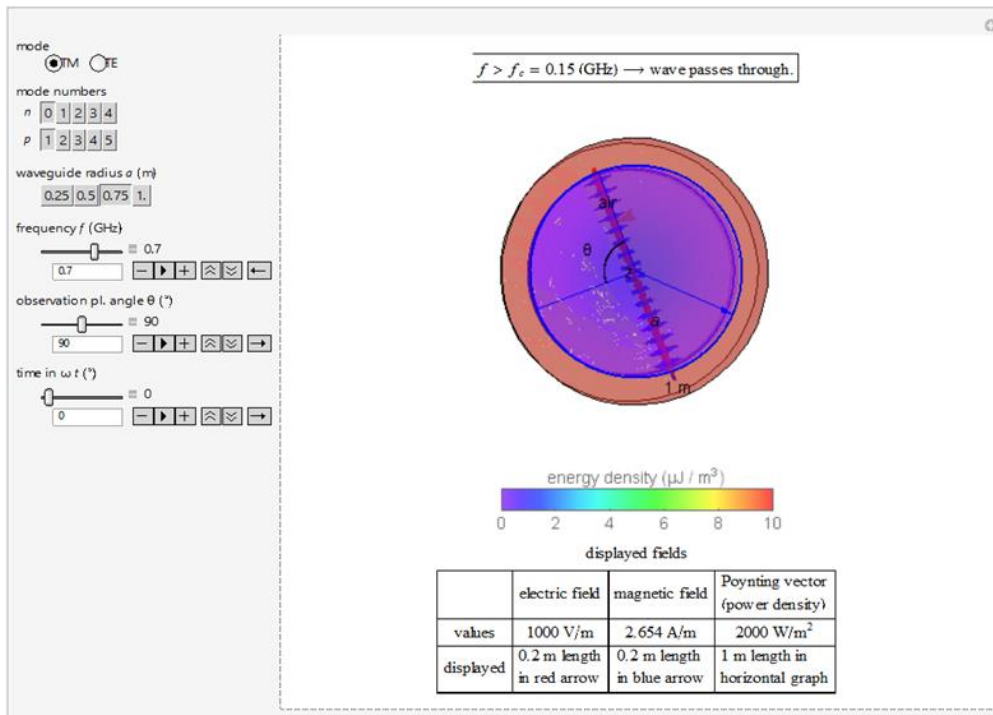


TM04 $f=0,7$ $\theta=90^\circ$ $r=0,75\text{m}$

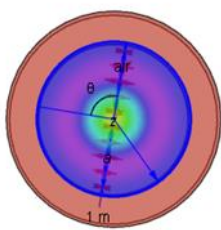


TE04 $f=0,7$ $\theta=90^\circ$ $r=0,75\text{m}$ $\Delta\epsilon$ διαδίδεται το κύμα επειδή $f < f_c$

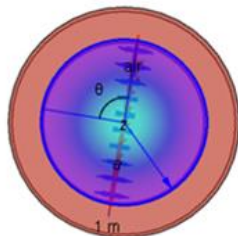
Υπάρχει η δυνατότητα περιστροφής του κυματαγωγού ώστε να παρατηρούμε σε επίπεδο κάθετο προς τη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας. Η εικόνα που παίρνουμε με τις ρυθμίσεις TM11, ακτίνα κυματοδηγού 0,5m, συχνότητα 0,5 GHz, γωνία επιπέδου παρατήρησης 90° και χρόνος 0 είναι:



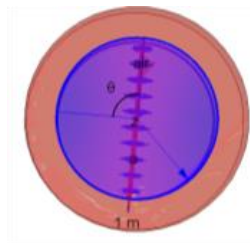
Κρατώντας σταθερές τις αρχικές ρυθμίσεις παρατηρούμε τους 16 πρώτους τρόπους:



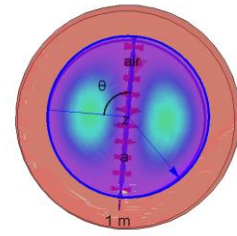
TE01



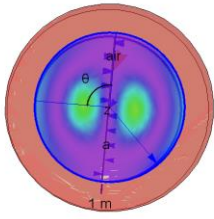
TM01



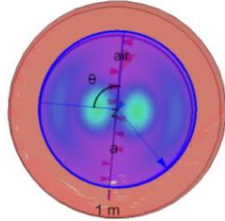
TE11



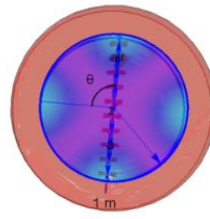
TM11



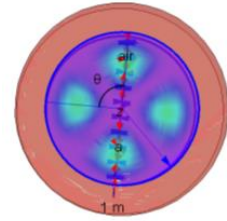
TE12



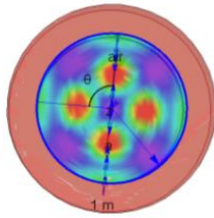
TM12



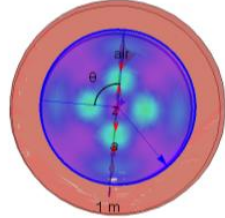
TE21



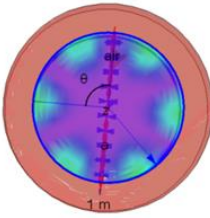
TM21



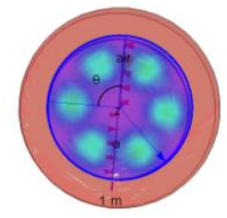
TE22



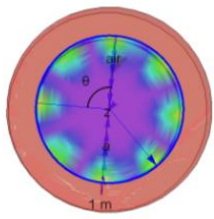
TE22



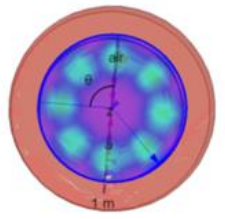
TE31



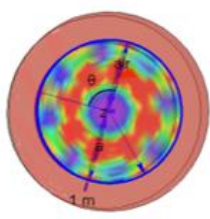
TM31



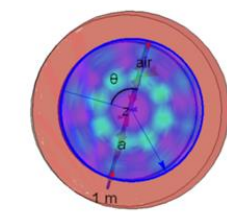
TE 41



TM41



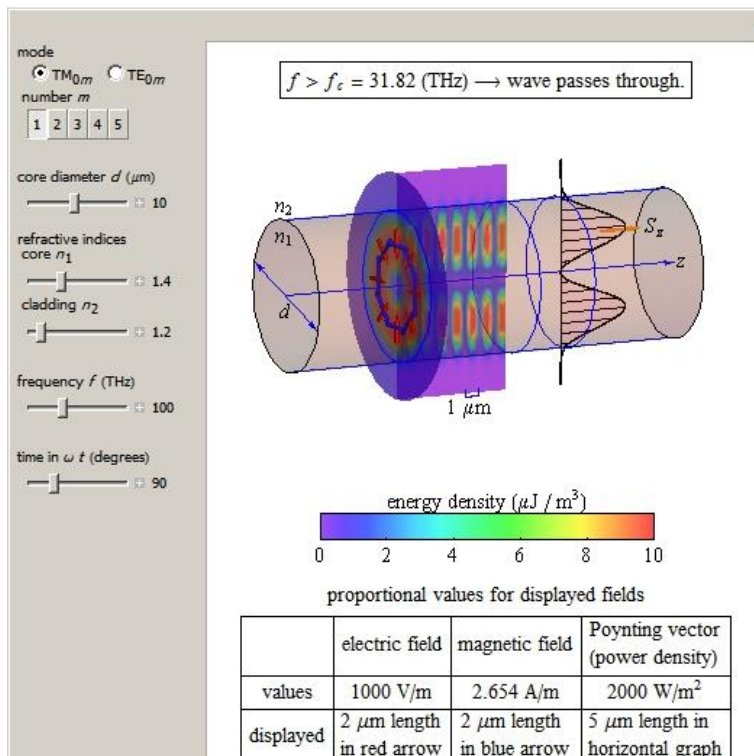
TE 42



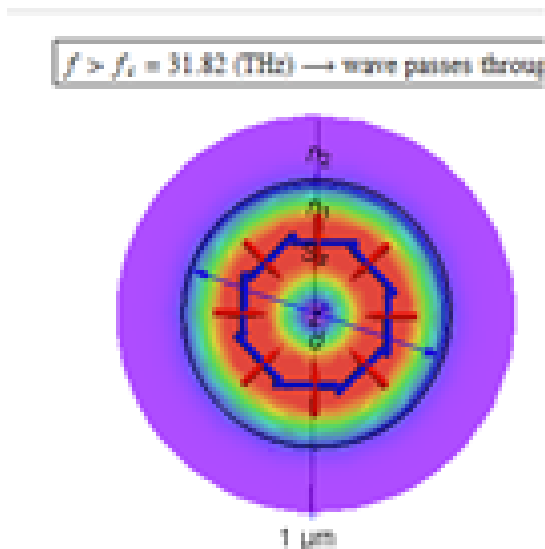
TM 42

2. Προσομοιώσεις τρόπων διάδοσης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε οπτική ίνα

Οι προσομοιώσεις έγιναν με το λογισμικό -The Wolfram Demonstrations Project και συγκεκριμένα με το **ElectromagneticWavesInOpticalFibers.[20]**. Οι προσομοιώσεις αφορούν στη διάδοση φωτός σε οπτικές ίνες βηματικού δείκτη διάθλασης με τρόπους TE_{0m} , TE_{0m} , μηδενικής τάξης για τους πέντε πρώτους τρόπους από $m=1$ έως $m=5$ και παρουσιάζουν τα στιγμιαία πεδία, την πυκνότητα ενέργειας, την πυκνότητα ισχύος σε συνάρτηση με το χρόνο ωt , τον αριθμό τρόπου m , τη διάμετρο του πυρήνα d και τη συχνότητα f που μπορούν να μεταβληθούν με τα αντίστοιχα κουμπιά ελέγχου. Η μέγιστη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι σταθερή στα 1000 V/m σε όλες τις περιπτώσεις. Η συχνότητα αποκοπής f_c καθορίζεται από τα d και m . Η προσομοίωση χρησιμοποιεί κυλινδρικές συντεταγμένες και η διεύθυνση διάδοσης είναι η $+z$ και τα a πεδία είναι συνάρτηση των r, z, t . Τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία παρουσιάζονται σε κάθετο επίπεδο ως προς τη διεύθυνση διάδοσης και παριστάνονται με κόκκινα και μπλε βέλη αντίστοιχα. Η πυκνότητα ενέργειας παρουσιάζεται σε δυο επίπεδα έγχρωμη σύμφωνα με την κλίμακα. Η μεταφορά ενέργειας ή πυκνότητα ισχύος S_z (συνιστώσα z) φαίνεται επίσης. Τα πεδία είναι ανάλογα με τα μεγέθη που παρουσιάζονται με τις σχέσεις τους να αποτυπώνονται στον πίνακα. Ο μανδύας στην περιοχή κοντά στον πυρήνα παίρνει ένα μέρος της ενέργειας. Η προσομοίωση δίνει τη δυνατότητα μεταβολής της διαμέτρου της ίνας μέχρι 20 μm , δυνατότητα επιλογής του δείκτη διάθλασης του πυρήνα και του μανδύα, της συχνότητας και του χρόνου. Ο υπολογισμός της συχνότητας αποκοπής, του υπομνήματος πυκνότητας ενέργειας καθώς και ο πίνακας με τα στοιχεία των πεδίων είναι όπως στην προηγούμενη προσομοίωση. Έτσι για οπτική ίνα διαμέτρου 10 μm , δείκτη διάθλασης 1,4 με δείκτη διάθλασης μανδύα 1,2 και συχνότητα ακτινοβολίας 100 THz για χρόνο ωt 90°, για τον τρόπο TM01 παίρνουμε την εικόνα:

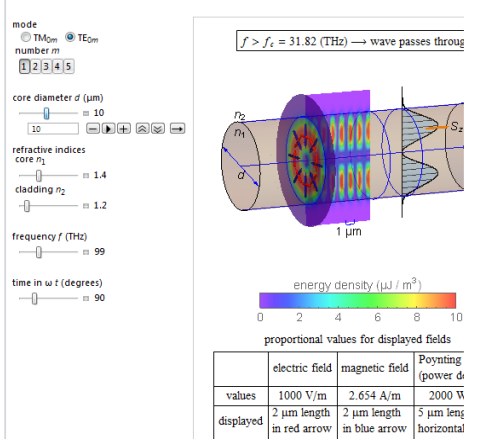


Η εικόνα σε επίπεδο κάθετο ως προς τη διεύθυνση διάδοσης είναι:

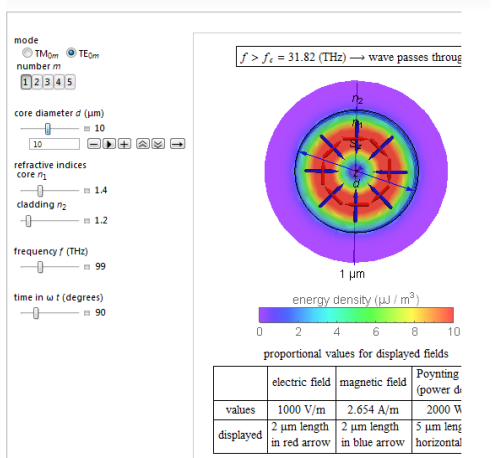


2.1 Προσομοιώσεις τρόπου 0 ηλεκτρικού TE_{0n} και μαγνητικού TM_{0n} πεδίου σε οπτική ίνα διαμέτρου 10nm. Δείκτης διάθλασης πυρήνα 1,4 και μανδύα 1,2. Συχνότητα φωτός 99THz. Χρόνος σε ωt (μοίρες) 90^0

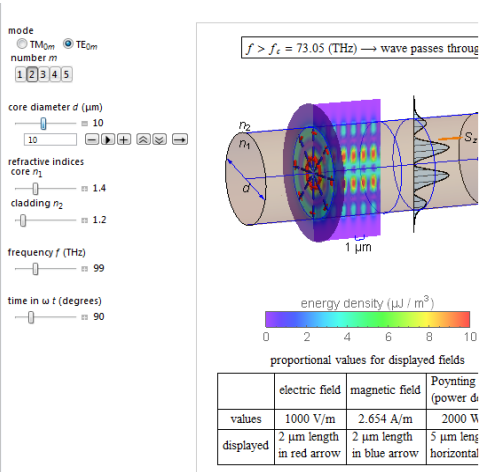
ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ



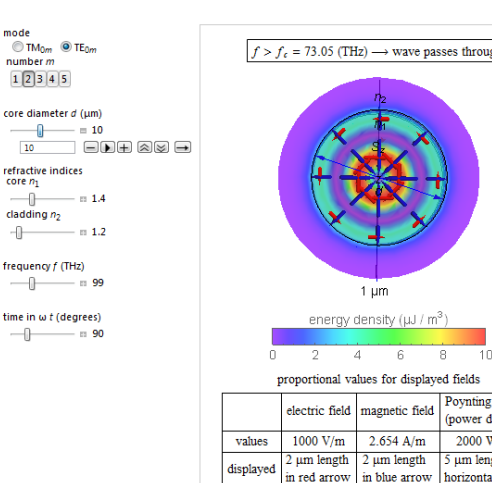
TE01



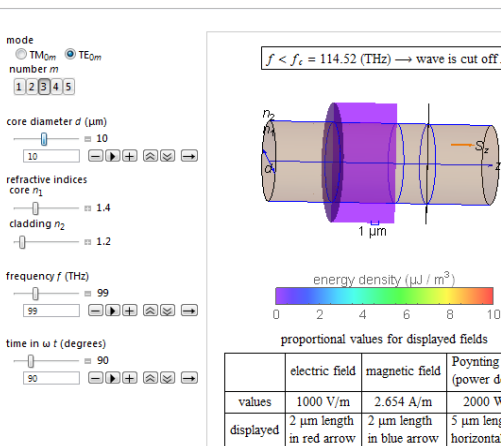
TE01



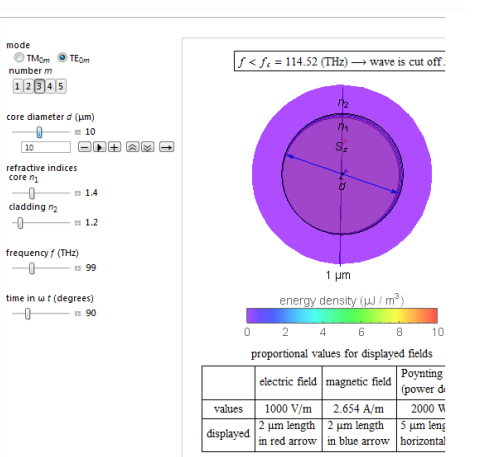
TE02



TE02



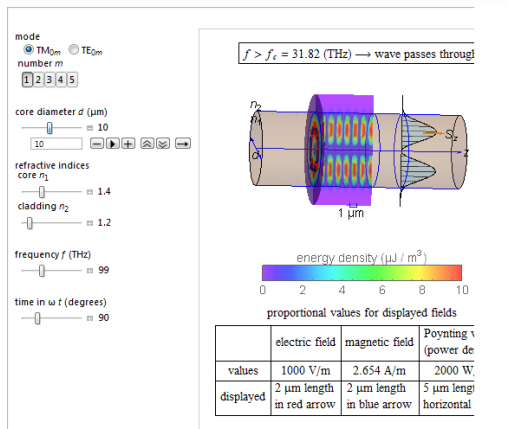
TE03



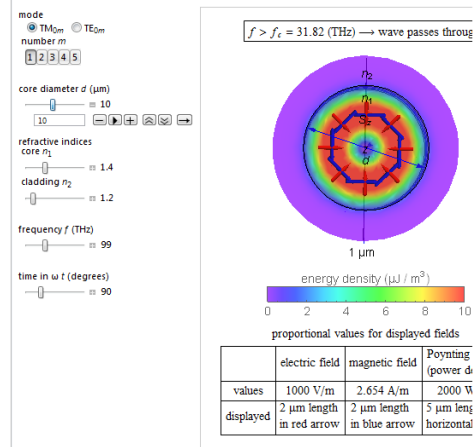
TE03

Παρατηρούμε ότι για $m \geq 3$ η συχνότητα αποκοπής γίνεται μεγαλύτερη από τη συχνότητα του φωτός και δεν υπάρχει διάδοση της ηλεκτρικής συνιστώσας του ηλεκτρομαγνητικού κύματος

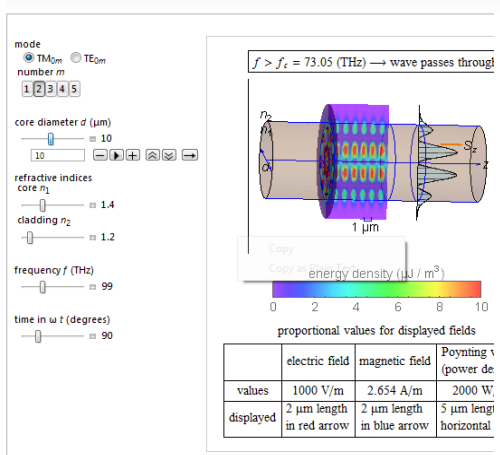
ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ



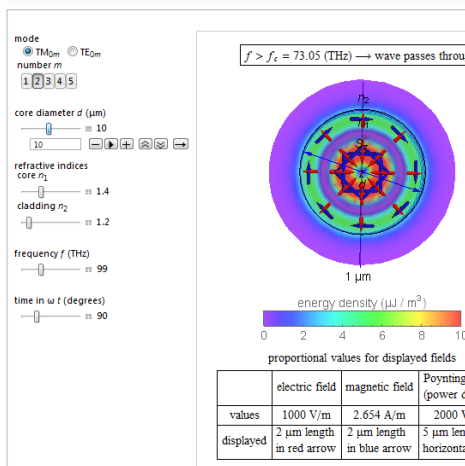
TM01



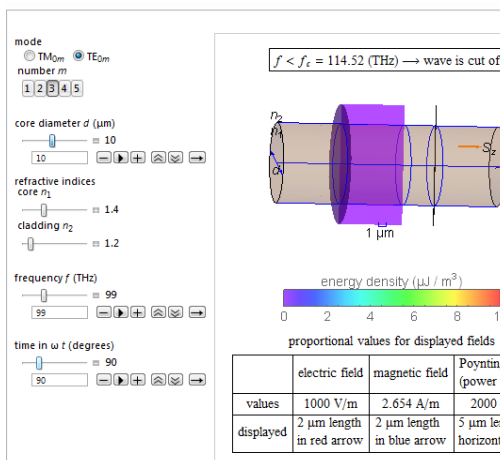
TM01



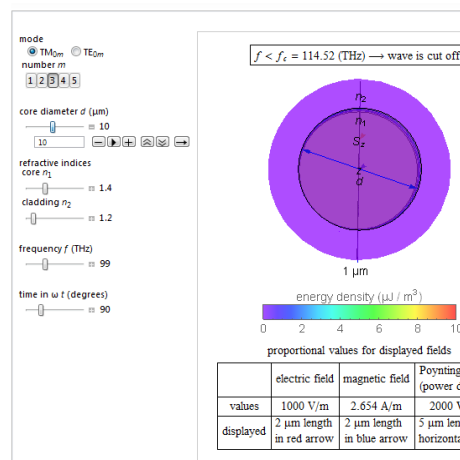
TM02



TM02



TM03

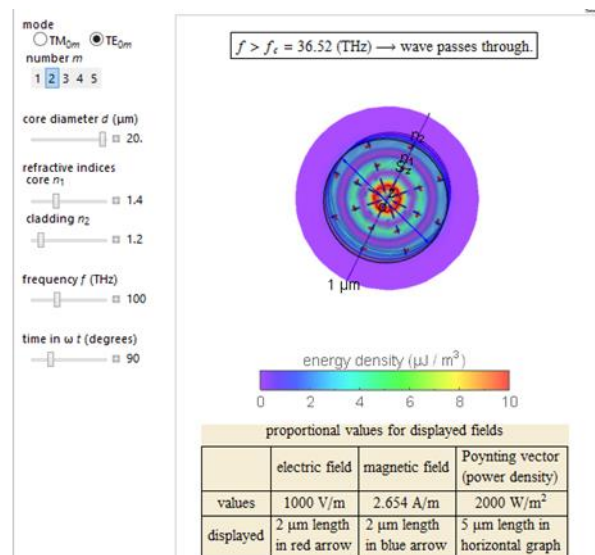
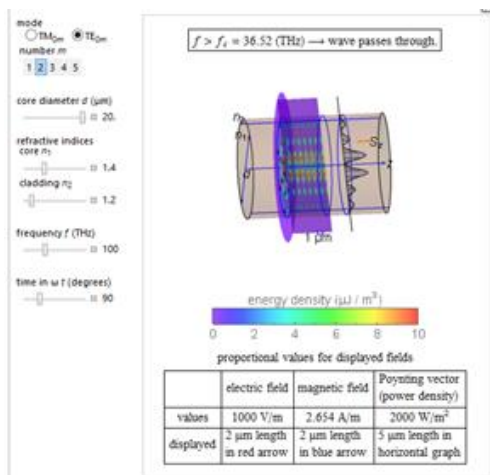
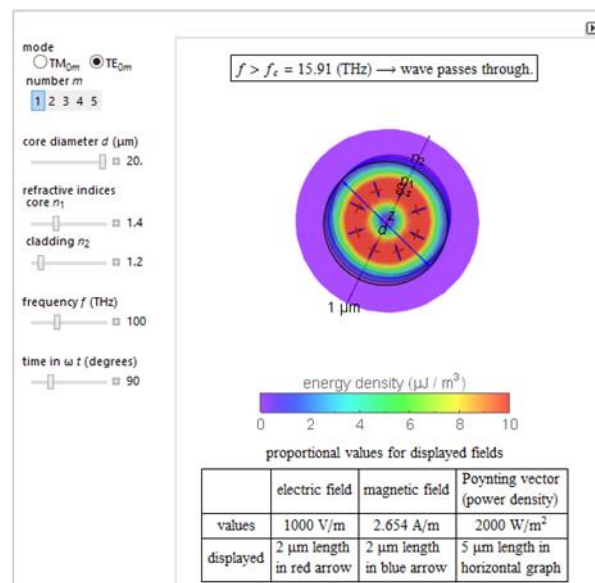
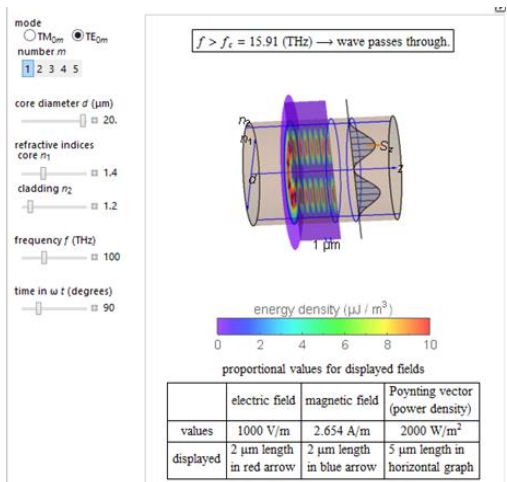


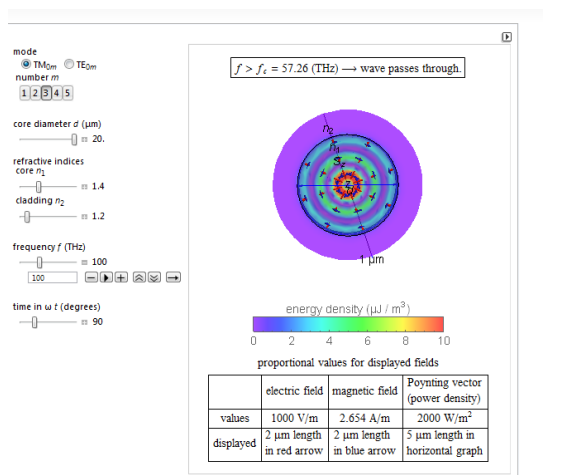
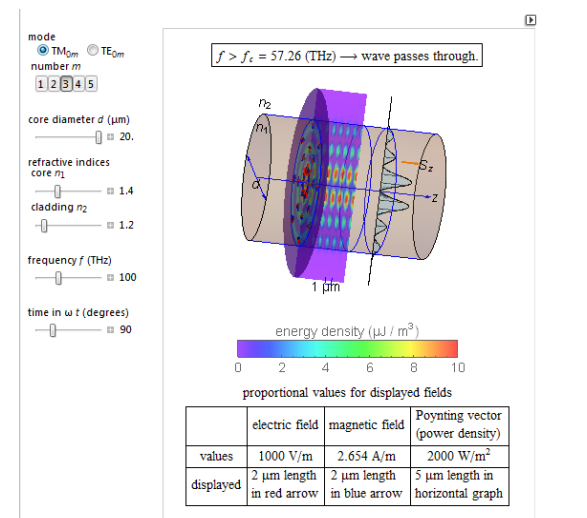
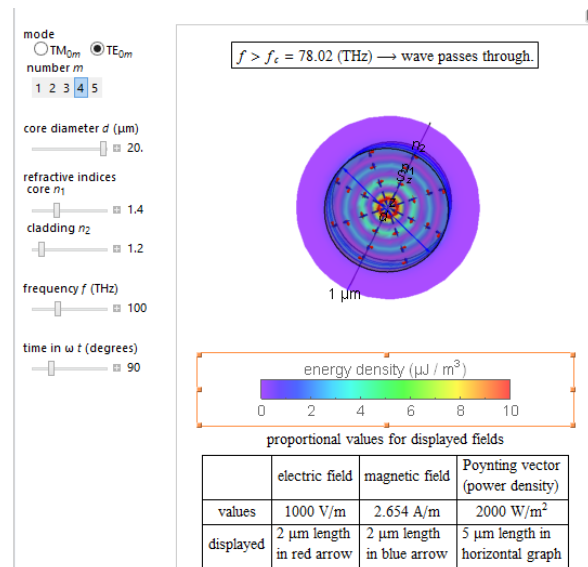
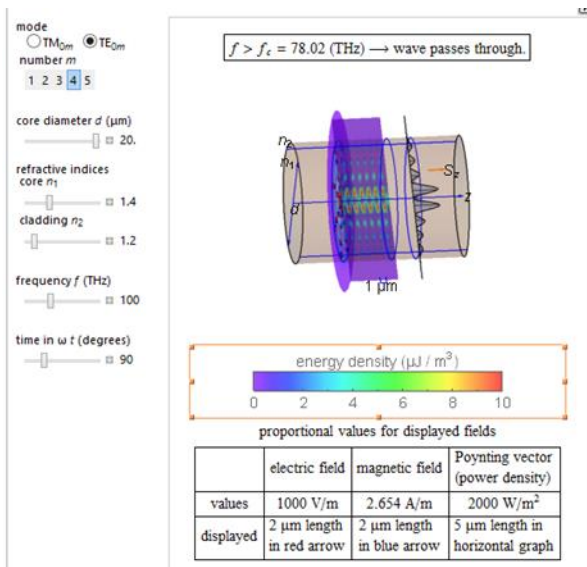
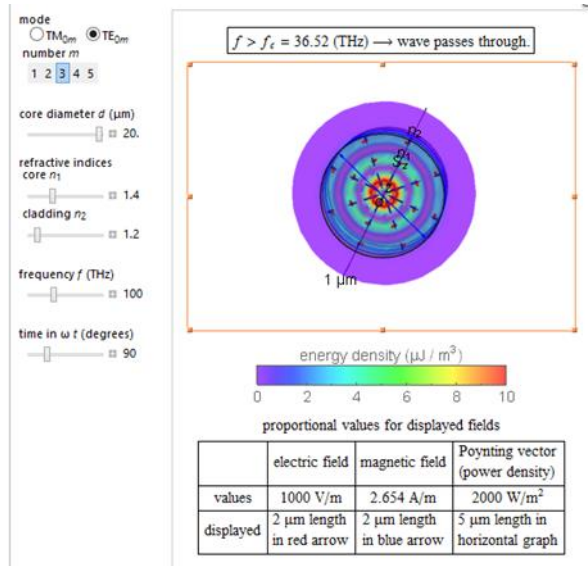
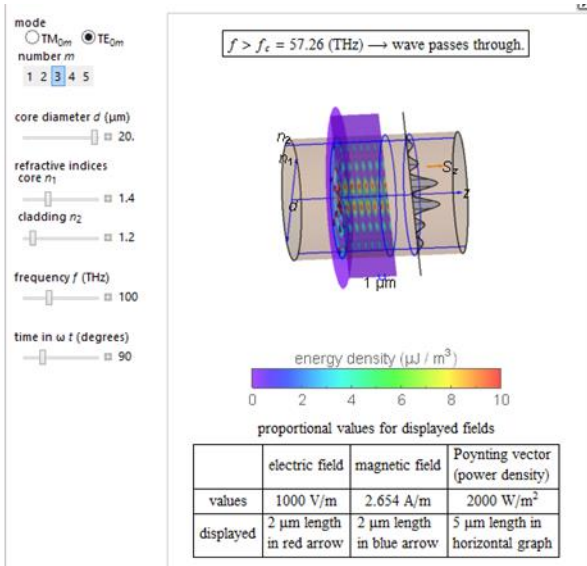
TM03

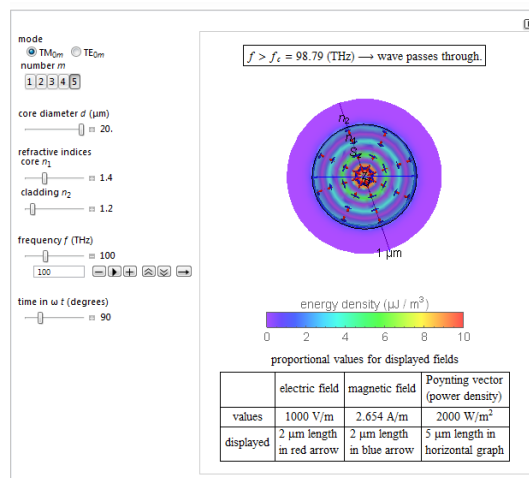
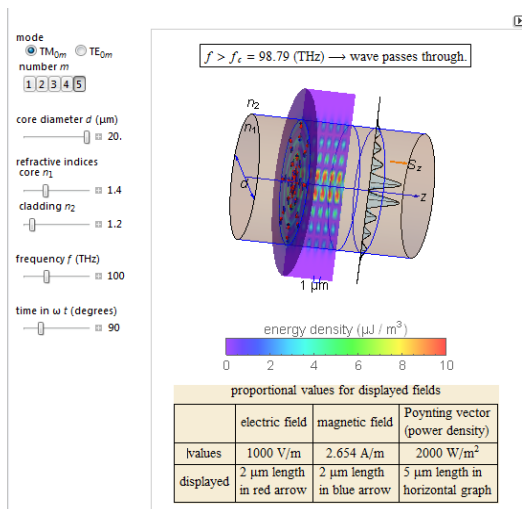
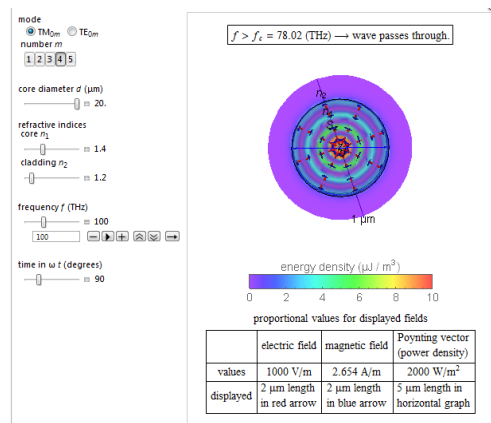
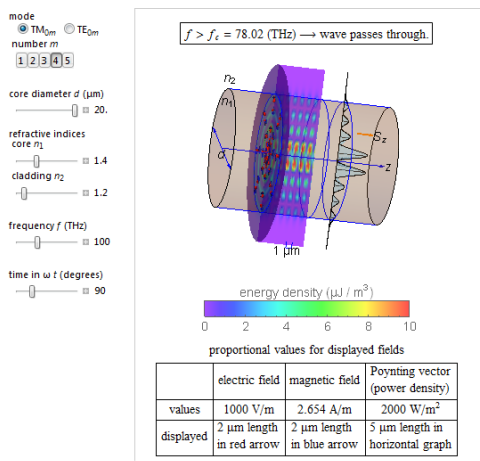
Παρατηρούμε ότι για $m \geq 3$ η συχνότητα αποκοπής γίνεται μεγαλύτερη από τη συχνότητα του φωτός και δεν υπάρχει διάδοση της μαγνητικής συνιστώσας του ηλεκτρομαγνητικού κύματος

2.2 Επίδραση της διαμέτρου στους τρόπους της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

I. Διάμετρος: 20 nm, δείκτης διάθλασης πυρήνα 1,4 και μανδύα 1,2. Συχνότητα φωτός 100 THz. Χρόνος σε ωt (μοίρες) 90°



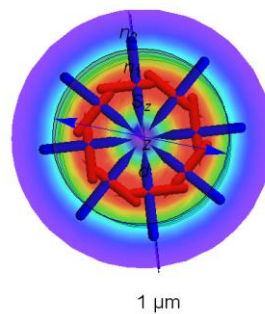
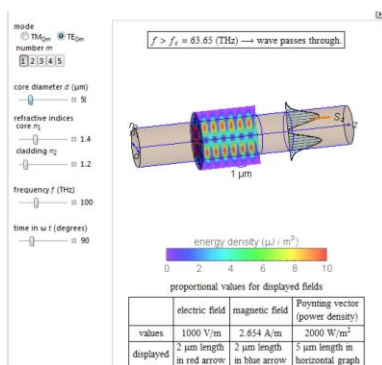


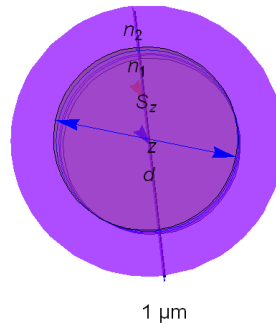
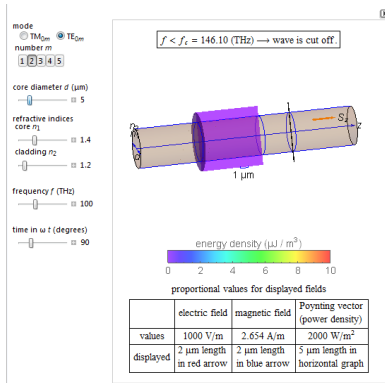


Παρατηρούμε όταν αυξάνουμε τη διάμετρο μειώνεται η συχνότητα αποκοπής και έτσι υπάρχει διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος για $m \geq 3$

II. Διάμετρος: 5 nm, δείκτης διάθλασης πυρήνα 1,4 και μανδύα 1,2. Συχνότητα φως 100THz. Χρόνος σε ωt (μοίρες) 90°

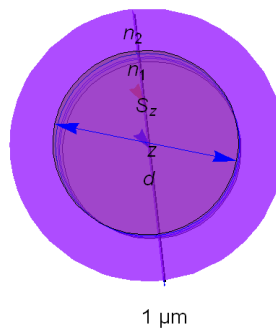
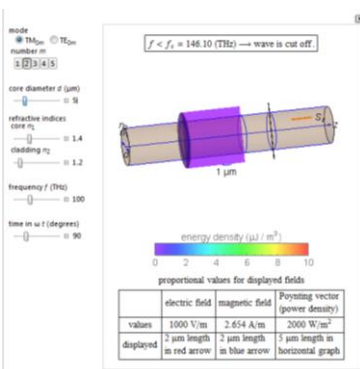
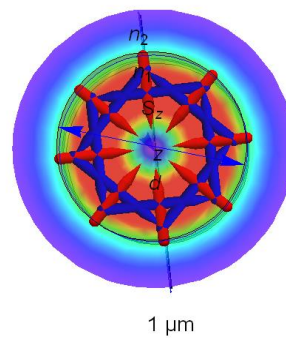
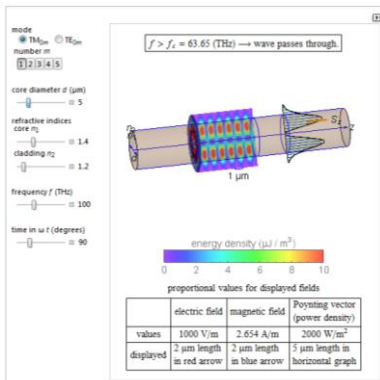
ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ





Η συχνότητα αποκοπής αυξάνεται καθώς μειώνεται η διάμετρος. Έτσι για $m=2$ και για διάμετρο 20nm είναι 36,52THz, για διάμετρο 10nm είναι 73,05THz ενώ για διάμετρο 5nm είναι 146,10. Η οπτική ίνα επιτρέπει μόνο ένα τρόπο να διαδοθεί.

ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αβραμόπουλος, Η. (n.d.) Συστήματα Μετάδοσης & Δίκτυα Οπτικών Ινών Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο http://www.photonics.ntua.gr/Diafaneies_Susthmata_metadoshs/Enotita_1a_OptikaSustimataMetadosis.pdf.
2. Αβραμόπουλος, Η. (2009) Φωτονική Τεχνολογία για Τηλεπικοινωνίες Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο http://www.photonics.ntua.gr/photoniki_diafaneies_2009_2010/mathima01-eisagwghv3.pdf
3. Ασαρίδης, Η. (2013). Οπτικά Δίκτυα Επικοινωνιών Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο <https://openeclass.teimes.gr/modules/document/?course=CIED111>
4. Διαμαντοπούλου, Ι. (2014) Η τροχιακή στροφορμή του φωτός και οι εφαρμογές της Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο http://dspace.lib.ntua.gr/dspace2/bitstream/handle/123456789/39523/damatopoulou_orbital.pdf?sequence=1
5. Ευθυμίου, Χ. (2011) Εισαγωγή Στις Οπτικές Επικοινωνίες, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο teiserron.gr/index.php?action=dlattach;topic=8699.0;attach=5380. Ε.Ι. ΣΕΡΡΩΝ Τμήμα Πληροφορικής & Επικοινωνιών.
6. Λούβρος, Σ. Δίκτυα Οπτικών Επικοινωνιών, Διάλεξη ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδος, Αντίρριο: 2013.
7. Μπούρας, Χ (2008) Δίκτυα Δημόσιας Χρήσης και Διασύνδεσης Δίκτυων, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις. Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο http://ru6.cti.gr/ru6/system/files/bouras_site/notes/ddxdd.pdf?language=el
8. Οπτικές Ίνες (n.d.). Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο http://www.hep.upatras.gr/class/download/met_pli/optikes_ines.pdf (Τελευταία πρόσβαση 11-3-2016)
9. Σούρλας, Δ. Συνήθειες διαφορικές εξισώσεις. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία, 2010.
10. Σούρλας, Δ. Μιγαδική Ανάλυση, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Φυσικής. Πάτρα: 2012.
11. Agrawal, Govind P. Συστήματα επικοινωνιών με οπτικές ίνες. Αθήνα: Εκδόσεις Τζιόλα, 2012
12. Choudhury G (2004) Father of fibre optics may manufacture in India US-based Narinder Singh Kapany focusses on next-generation στην The Tribune on line edition Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο <http://news.rediff.com/report/2009/oct/08/how-india-missed-another-nobel-prize.htm>
13. Creating a Connected Continent (2015) FTTH Conference Warsaw Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο <http://www.ftthcouncil.eu/documents/Presentations/20150211PressConfWarsaw.pdf>
14. ECE303 Electromagnetic Fields and Waves (n.d.). Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο <https://courses.cit.cornell.edu/ece303/Lectures/Lectures.htm>
15. Electrodynamics (n.d.). Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο <http://www.uio.no/studier/emner/matnat/fys/FYS3120/v08/undervisningsmateriale/Electrodynamics.pdf>
16. Electromagnetic propagation (2008) Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο http://www.ie.itcr.ac.cr/acotoc/Maestria_en_Computacion/Sistemas_de_Comunicacion_II/Material/Biblio1/chapter%2010.pdf
17. Electromagnetic Wave Equation (n.d.). Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/waves/emwv.html>

18. *Electromagnetic Waves in a Cylindrical Waveguide* (2016) Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο <http://demonstrations.wolfram.com/ElectromagneticWavesInACylindricalWaveguide/>
19. *Electromagnetic Waves in Dielectric Media* (n.d.) Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο <http://pcwww.liv.ac.uk/~awolski/Teaching/Liverpool/PHYS370/AdvancedElectromagnetism-Part2.pdf>.
20. *Electromagnetic Waves in Optical Fibers*(2016) Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο <http://demonstrations.wolfram.com/ElectromagneticWavesInOpticalFibers>
21. Elert, G. ed.(1997) *Diameter of an Optical Fiber* Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο <http://hypertextbook.com/facts/1997/LaurenBoyd.shtml>
22. Ghosh, S.N. *Electromagnetic theory and wave propagation* (1998) Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο <https://books.google.gr/books?id=6Mvf4-gsVycC&pg=PA16&pg=PA16&dq=Ghosh,+S.N.+Electromagnetic+theory+and+wave+propagation+London&source=bl&ots=h8cTTCrrP-&sig=zL2V3Ndv1jC4t7J9VBYrUFC-5o&hl=el&sa=X&ved=0ahUKEWj2gYiDir7LAhXljCwKHTYICiwQ6AEIHTAA#v=onepage&q=Ghosh%2C%20S.N.%20Electromagnetic%20theory%20and%20wave%20propagation%20London&f=false>
23. Gottlieb, M. and Pfeiffer, P. (2006) *Solutions of Maxwell's Equations in Free Space* Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο http://feynmanlectures.caltech.edu/II_20.html
24. Green, Paul. *Μεταφρ Καρούμπαλου, Δίκτυα Οπτικών Ινών*. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 1994
25. Hecht, J.(2015) *Understanding fiber optics* (5th ed.) Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=PlglCQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT13&dq=Hecht,+J.+Understanding+fiber+optics+&ots=YPL7p-wX2Z&sig=Hbltrgwpd0Bmi_fjhbJDMofYk0c&redir_esc=y#v=onepage&q=Hecht%2C%20J.%20Understanding%20fiber%20optics&f=false .
26. Laurel M. Sheppard (n.d.) *Fiberglass* Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο <http://www.madehow.com/Volume-2/Fiberglass.html>
27. Mahato, R (mod. Adhikari, A. 2012) *History and Application Of Fiber Optics*. Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο <https://wiki.metropolia.fi/display/Physics/History+and+Application+Of+Fiber+Optics>
28. *Maxwell's Equations and Electromagnetic Waves* (n.d.). Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο <http://web.mit.edu/8.02t/www/materials/StudyGuide/guide13.pdf>
29. *Maxwell's Equations* (n.d.) Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο <http://www.maxwells-equations.com/index.php#maxwells>
30. *New Fiber Optic Technology Could Boost Internet Bandwidth* (2013) *SciTech Daily* Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο <http://scitechdaily.com/new-fiber-optic-technology-could-boost-internet-bandwidth/>
31. Oral-History: George E. Smith (2015) Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο www.ieeeahn.org/wiki/index.php/Oral-History:George_E_Smith
32. *Reminders on waves Maxwell equations in vacuum* (n.d.) Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο <https://www.physics.wisc.edu/undergrads/courses/spring08/208/Lectures/lect20.pdf>
33. Ryer, A. (2000) *Light Measurement Handbook: Basic Principles* Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο <http://www.dfisica.ubi.pt/~hgil/fotometria/HandBook/ch06.html1>
34. Saul, M (2009) *Charles Kao* Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο <https://prezi.com/zlkeilyyqdt3/charles-kao/>
35. Schnabel, R. Holzel, A. Gotter, K.(1973) *Light conducting fibers of quartz glass* Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο <http://patents.justia.com/patent/3966300>

36. Serway,R.A. *Physics for Scientists and Engineers Τόμος III,μετ* Λ.Κ.Ρεσβάνη.Αθήνα: Κορφιάτης, 1991.
37. Shevgaonkar, R.K. (2007) *Fiber Optics, lecture 4 Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο* <http://nptel.ac.in/courses/117101002/downloads/Lec04.pdf>
38. Shevgaonkar, R.K. (2007) *Fiber Optics, lecture 5 Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο* <http://nptel.ac.in/courses/117101002/downloads/Lec05.pdf>
39. Stark,G. στην *Encyclopædia Britannica (2016) Light as electromagnetic radiation Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο* <http://www.britannica.com/science/light/Light-as-electromagnetic-radiation>
40. Tanenbaum , Andrew S. *Βασίλης Στυλιανάκης μετ. Δίκτυα Υπολογιστών.Αθήνα: Παπασωτηρίου,2000*
41. *The Nobel Prize in Physics 2009 Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο* http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2009/press.html
42. Toge,K.και Itoh, F.(2013) *Recent research and development of optical fiber monitoring in communication systems Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο*<http://paperity.org/p/35085640/recent-research-and-development-of-optical-fiber-monitoring-in-communication-systems>
43. Wheeler,W.(1881). *Apparatus for for lighting dwellings or other structures. Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο* <http://www.google.com/patents/US247229>
44. Willard S. Boyle *Condensed Matter Physics, crystals, magnets, superconductors, semiconductors Co-Inventor of the Charge Coupled Device for which he won the 2009 Nobel Prize in Physics (2015) Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο* www.science.ca/scientists/scientistprofile.php?plD=129
45. Williams,L. (n.d.) *Simple Derivation of Electromagnetic Waves from Maxwell's Equations Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο* <http://www.santarosa.edu/~lwillia2/42/WaveEquationDerivation.pdf>
46. Yan Yan et al (2014) *High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing στο Nature Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο*<http://www.nature.com/ncomms/2014/140916/ncomms5876/full/ncomms5876.html>
47. Young, H.D. και Freedman , R.A. *Πανεπιστημιακή Φυσική με σύγχρονη Φυσική. Αθήνα; Εκδόσεις Παπαζήση, 2010*
48. Karsten,J. and West D. Brookings (2015) *Some progress, some distance to go on multistakeholder Internet governance Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο* <http://www.brookings.edu/blogs/techtank/posts/2015/07/29-brotman-internet-governance>
49. Chaillou,V. και Montagne,R .(2016) *FTTH/B Panorama Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο* <http://www.slideshare.net/DigiWorldIDATE/idade-digiworld-european-ftthb-panorama-at-sept-2015-public-version-58424348>
50. *Η σημασία της Ευρυζωνικότητας διεθνώς (2016.) από την Ευρυζωνικότητα διαθέσιμο στο δικτυακό τόπο* <http://broadband.cti.gr/el/evrizonikotita/broadworld.php>
51. *Πληροφορίες χώρας- Ελλάδα (2016) από Digital Single Market διαθέσιμο στο δικτυακό τόπο* <https://ec.europa.eu/digital-single-market/plirofories-horas-ellada>
52. Χριστοδουλίδης, Κ. (n.d.) *Μαθηματικό συμπλήρωμα για τα Εισαγωγικά Μαθήματα Φυσικής διαθέσιμο στο δικτυακό τόπο* <http://www.physics.ntua.gr/~cchrist/SIMEIOSEIS/MATH.SYMPPL.2003.PDF>
53. Μαξιμίδης,Ρ (n.d.) *Λύσεις εξίσωσης κύματος στους κυματοδηγούς διαφόρων διατομών διαθέσιμο στο δικτυακό τόπο* http://utopia.duth.gr/cschinas/index.files/upload/Metaptuxiaka%20Mathimata/Efarmosmena%20Mathimatika/Epiprostheto%20Yliko/Ergasia_MaximidisRonis.pdf

54. Hoang,B. Perez,O. (n.d) Terabit networks Διαθέσιμο στο https://www.ieee.org/about/technologies/emerging/emerging_tech_terabit.pdf
55. Clark,N. (2009) *Is fibre optics the technology of the future?* Διαθέσιμο στο <http://www.abc.net.au/science/articles/2009/04/23/2551066.htm>
56. Colin Yao, (2013) “The Future of Fiber Optic Communication”, Διαθέσιμο στο: http://www.streetdirectory.com/travel_guide/126621/computers/the_future_of_fiber_optic_communication.html
57. Idachaba,F.(2014) Future Trends in Fiber Optics Communication Διαθέσιμο στο: http://www.iaeng.org/publication/WCE2014/WCE2014_pp438-442.pdf
58. Ballato,J. Dragic,P. (2014) Materials Development for Next Generation Optical Fiber Διαθέσιμο στο www.mdpi.com/1996-1944/7/6/4411/pdf
59. *Νευρωνικά δίκτυα* (n.d.) Διαθέσιμο στο https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9D%CE%B5%CF%85%CF%81%CF%89%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CF%8C_%CE%B4%CE%AF%CE%BA%CF%84%CF%85%CE%BF
60. Αρσένης,Σ.Δ. *Σχεδιασμός και υλοποίηση δικτύων*, Αθήνα, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2008
61. Riffe, D. M. *The Wave Equation in Cylindrical Coordinates* (n.d.) Διαθέσιμο στο <https://www.google.gr/#q=D+M+RiffeThe+Wave+Equation+in+Cylindrical+Coordinates>
62. *Status of optical communication technology and future trends* (2012) Διαθέσιμο στο <http://www.qqread.net/network/knowledge/d268859.html>