



Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής Τ.Ε
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών
(έδρα: Σπάρτη)
Τ.Ε.Ι ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

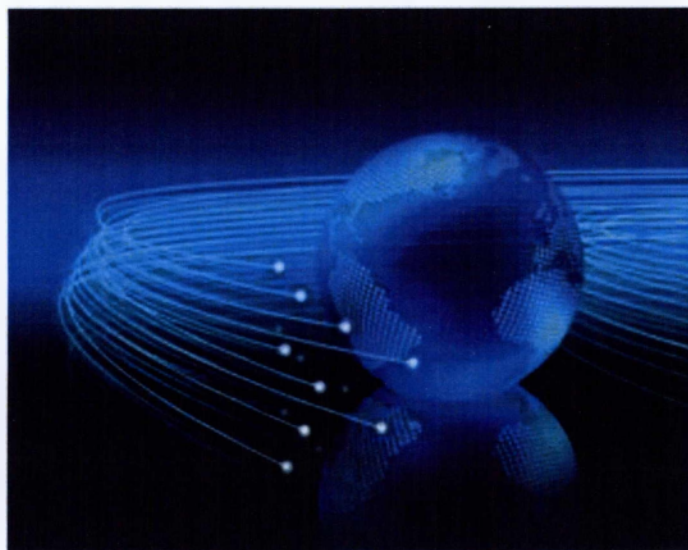
ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ: ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΟΠΤΙΚΩΝ
ΙΝΩΝ, ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥΣ ΣΤΙΣ ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΙΠΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥΣ**

ΜΑΡΙΝΑ - ΦΙΟΝΑ ΣΟΥΛΑ

A.M. 2006171

Επιβλέπων Καθηγητής: Ιωάννης Κ. Μπουλμέτης



Σπάρτη 2014

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΓΕΝΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ

- 1.1 Εισαγωγή 7
- 1.2 Η εξέλιξη των μέσων επικοινωνίας 8

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ

- 2.1 Εισαγωγή 11
- 2.2 Τι είναι οι οπτικές ίνες 11
- 2.3 Αρχές λειτουργίας οπτικών ινών 13
- 2.4 Πομπός /δέκτης 14
- 2.5 Ειδή οπτικών ινών..... 15
 - 2.5.1 Κατηγορίες οπτικών ινών..... 15
 - 2.5.2 Ανάλυση των ειδών των οπτικών ινών 16
- 2.6 Η δομή της οπτικής ίνας 19
- 2.7 Οι οπτικές ίνες ειδικού σχεδιασμού 20
 - 2.7.1 Συνήθης ίνα μετατοπισμένου σημείου διασποράς 20
 - 2.7.2 Ίνα μη μηδενικού μετατοπισμένου σημείου διασποράς 21
 - 2.7.3 Ίνες με συνεχές χρησιμοποιούμενο φάσμα 1280 - 1625 nm 22
 - 2.7.4 Ίνα αντιστάθμισης διασποράς 22

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΑΡΧΕΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΠΟΥ ΔΙΕΠΟΥΝ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

- 3.1 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα 23
- 3.2 Γεωμετρική οπτική 24
 - 3.2.1 Ανάκλαση 25
 - 3.2.2 Διάθλαση 25
 - 3.2.3 Διάθλαση μέσα σε φακό 27
- 3.3 Ολική ανάκλαση 28
- 3.4 Ολική ανάκλαση μέσα σε οπτική ίνα 28
- 3.5 Σκέδαση Rayleigh και φως Tyndall 29

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΤΡΟΠΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

- 4.1 Εισαγωγή..... 31
- 4.2 Τρόποι κατασκευής οπτικών ινών..... 32
 - 4.2.1 Η διεργασία ΟΥΡΟ- πλευρική εναπόθεση 33
 - 4.2.2 Η διεργασία ΟΥΡΟ-αξονική εναπόθεση 34
 - 4.2.3 Η διεργασία MCVD ή IVPO 35
 - 4.2.4 Η διεργασία PCVD 36
 - 4.2.5 Η διεργασία απευθείας τήξης 37
- 4.3 Η υποβάθμιση του οπτικού σήματος 38

4.3.1 Εξασθένηση	39
4.3.2 Διασπορά	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : ΚΟΛΛΗΣΗ ΚΑΙ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ	
5.1 Εισαγωγή	45
5.2 Κολλήσεις και Connectors	46
5.3 Απαιτήσεις	46
5.4 Fusion κόλληση οπτικών ινών	47
5.4.1 Διαδικασία Fusion κόλλησης για κορδέλα οπτικών ινών	48
5.5 Μηχανικές κολλήσεις	48
5.5.1 V-Block κόλληση	48
5.5.2 Σωλήνες ακριβείας	49
5.5.3 Κόλληση με τρεις ράβδους	50
5.5.4 Κολλήσεις κορδελών ινών	50
5.6 Ημι-μόνιμες κολλήσεις	51
5.7 Τύποι Connectors	52
5.7.1 Connectors με κυλινδρικό συνεκτικό δακτύλιο	52
5.7.2 Connectors με κωνικό συνεκτικό δακτύλιο.....	52
5.7.3 Connectors διαστελλόμενης δέσμης	52
5.7.4 Connectors κορδελών ινών	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο : ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥΣ	
6.1 Εισαγωγή	54
6.2 Πρώτη παράμετρος ,η οπτική ίνα	55
6.2.1 Πρωτεύον επίστρωμα	56
6.2.2 Το Acrylate ως πρωτεύον επίστρωμα	57
6.2.3 Χρωματική κωδικοποίηση οπτικών ινών	57
6.3 Δεύτερη παράμετρος ,οι απομονωτές	58
6.3.1 Loose tube buffer	58
6.3.2 Ίνες Tight buffer	59
6.3.3 Τεχνική Fibber Ribbon	60
6.4 Τρίτη παράμετρος ,παράγοντας αντοχής	61
6.4.1 Μεταλλικός παράγοντας αντοχής	61
6.4.2 Κεντρικός μη-μεταλλικός παράγοντας αντοχής	61
6.4.3 Νήμα Aramide	62
6.5 Τέταρτη παράμετρος ,ο πυρήνας του καλωδίου	63
6.5.1 Καλώδια με κυκλικό πυρήνα	63
6.5.2 Καλώδιο με πυρήνα αυλακώσεων	64
6.5.3 Οπτικό καλώδιο χωρίς πυρήνα	65
6.6 Πέμπτη παράμετρος ,προστασία από νερό και υγρασία	66
6.6.1 Υλικό γέμισης καλωδίου	67
6.6.2 Ταινία διόγκωσης ως μονωτής υγρασίας	67
6.6.3 Μεταλλικό κάλυμμα (φύλλο αλουμινίου)	67
6.6.4 Μεταλλικός σωλήνας χαλκού	68
6.7 Έκτη παράμετρος ,τελικό κάλυμμα	68

6.7.1 Τοποθετώντας το τελικό κάλυμμα	68
6.7.2 Polyethylene (PE)	69
6.7.3 Halogen Free, flame retardant materials (HFFR)	70
6.7.4 Polyvinyl Chloride (PVC)	71
6.7.5 Polyamide (PA nylon)	72
6.7.6 Polybutylene terephthalate (PBT)	73
6.7.7 Fluoroplastics (PTFE, FEP, E-TFE, E-CTFE)	73
6.7.8 Thermoplastic polyurethane elastomer	73
6.8 Έβδομη παράμετρος, ενίσχυση	74
6.8.1 Μεταλλική ταινία με αυλακώσεις	74
6.8.2 Μεταλλικό νήμα ,μεταλλική ταινία	75
6.8.3 HET (θερμο-διαστελλόμενη ταινία)	76
6.8.4 Νήματα Aramide	77
6.8.5 Διαστελλόμενο εξωτερικό σκέλος	77
6.8.6 Οπτικό καλώδιο γείωσης	78
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο : ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΛΗΛΟΥ ΚΑΛΩΔΙΟΥ ΟΠΤΙΚΗΣ ΙΝΑΣ	
7.1 Εισαγωγή	79
7.2 Ρυθμοί διάδοσης (Modes)	81
7.3 Αριθμητικό άνοιγμα	82
7.4 Δείκτης διάθλασης ομάδας	83
7.5 Διάμετρος του πεδίου του ρυθμού διάδοσης	84
7.6 Αποτελεσματική περιοχή	84
7.7 Μη γραμμικά φαινόμενα	85
7.7.1 Διεγερόμενη σκέδαση Brillouin ,SBC	85
7.7.2 Διεγερόμενη σκέδαση Raman , SRS	86
7.7.3 Self phase modulation, SPM	86
7.7.4 Cross phase modulation, XPM	87
7.7.5 Μείξη τεσσάρων κυμάτων	87
7.8 Πολύτροπη ίνα με ορθογώνιο προφίλ δείκτη	88
7.9 Πολύτροπη ίνα με βαθμιαίο προφίλ δείκτη	88
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο : ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΠΗΓΕΣ ΦΩΤΟΣ	
8.1 Εισαγωγή στις πηγές φωτός	90
8.2 LED	91
8.2.1 Πλεονεκτήματα των LED	92
8.2.2 Μειονεκτήματα των LED	93
8.3 Laser	94
8.3.1 Τύποι Laser	95
8.3.2 Πλεονεκτήματα Laser	97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο : ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ	
9.1 Εισαγωγή	98
9.2 Τηλεπικοινωνίες	98
9.3 Ιατρική	99
9.4 Πλεονεκτήματα των οπτικών ινών	99

9.5 Μειονεκτήματα των οπτικών ινών	101
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	102

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία θα ήταν αδύνατον να πραγματοποιηθεί χωρίς την επίβλεψη, την οργάνωση και τη μεθοδικότητα του Καθηγητή μου κ. Μπουλμέτη Ιωάννη.

Τον ευχαριστώ θερμά όχι μόνο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου, αλλά και για την ευκαιρία που μου έδωσε ώστε να εμπλουτίσω τις γνώσεις μου.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου που με στήριξαν σε αυτή τη προσπάθεια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ

1.1 Εισαγωγή

Η λέξη τηλεπικοινωνία προέρχεται από το αρχαίο επίρρημα <τήλε> που σημαίνει μακριά/από απόσταση και το ρήμα <κοινωνώ> που σημαίνει μετέχω, έρχομαι σε επαφή. Με τον γενικό όρο τηλεπικοινωνίες, (telecommunications), χαρακτηρίζεται η κάθε μορφής ενσύρματη ή ασύρματη, ηλεκτρομαγνητική, ηλεκτρική, κ.λπ., ακουστική και οπτική επικοινωνία που πραγματοποιείται ανεξαρτήτως απόστασης.

Η έμφυτη ανάγκη του ανθρώπου για επικοινωνία τον οδήγησε στην αξιοποίηση της τεχνολογίας, με ιδιαίτερα ευρηματικό τρόπο, προκειμένου να εξαλείψει την απόσταση και να πετύχει τρόπους απομακρυσμένης επικοινωνίας. Μάλιστα σε κάθε ιστορική περίοδο το πολιτιστικό επίπεδο προσδιοριζόταν και από μια ανάλογης στάθμης ικανότητα για διεξαγωγή γρήγορης και αξιόπιστης επικοινωνίας. Δείκτης δηλαδή οικονομικής και κοινωνικής εξέλιξης κάθε χώρας, στο παρελθόν και στο σύγχρονο κόσμο, είναι τα επίπεδα της τηλεπικοινωνίας που αυτή διαθέτει.

Σε κάθε εποχή παρατηρήθηκε η τάση για βελτιστοποίηση των τηλεπικοινωνιακών μέσων. Σίγουρα, επανάσταση έφερε η γραφή, η τυπογραφία και η εκμετάλλευση του ηλεκτρισμού μιας και μας έδωσε τον τηλεγράφο και το τηλέφωνο αλλά και η βελτίωση των μέσων μεταφοράς. Ποτέ όμως στο παρελθόν, με την εξέλιξη της πληροφορικής και με της νέες τεχνολογίες, ο άνθρωπος δεν είχε την δυνατότητα να βρεθεί σε παγκόσμια κλίμακα τόσο κοντά και με τόσες πολλές επικοινωνιακές δυνατότητες. Πότε ξανά ο πολιτισμός δεν συνδεόταν σε τέτοιο καθοριστικό βαθμό με κάποια νέα τεχνική επικοινωνίας. Σήμερα κυριαρχεί η πληροφορία και η ελεύθερη διακίνηση της, με φορέα έναν τηλεπικοινωνιακό κορμό που απλώνεται με το διαδίκτυο, τις μεταφορές και τις δορυφορικές επικοινωνίες σε όλη τη γη.

Ο άνθρωπος στην προσπάθειά του να μεταδώσει όλο και μεγαλύτερο όγκο πληροφοριών, σε όλο και μεγαλύτερες αποστάσεις, χρησιμοποιεί εναέριες ή

υπόγειες γραμμές καλωδίων διαφόρων μορφών αλλά και την ατμόσφαιρα. Μέσα από αυτήν διαδίδονται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, που μεταφέρουν την πληροφορία σε μεγάλες αποστάσεις, ενώ η συχνά απαραίτητη οπτική επαφή πομπού-δέκτη οδηγεί στην κατασκευή τόσο υπέργειων σταθμών αναμετάδοσης, όσο και τηλεπικοινωνιακών δορυφόρων. Έτσι δημιουργείται σταδιακά ένα παγκόσμιο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Κυρίαρχες μορφές στα σήματα που διακινούνται από και προς αυτούς τους σταθμούς αναμετάδοσης σε τροχιά, παραμένουν τα σήματα ήχου και εικόνας.

Η εξέλιξη, κατά την περίοδο του Β' Παγκόσμιου πολέμου, μεθόδων ανίχνευσης σημάτων και υπολογισμού εμβέλειας, δηλαδή των ραντάρ, οδήγησε στη χρήση των μικροκυμάτων. Αυτά έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν πολύ περισσότερες πληροφορίες από τα ραδιοκύματα και σιγά-σιγά χρησιμοποιούνται τόσο σε υπεραστικές συνδιαλέξεις, όσο και σε τηλεοπτικές συνδέσεις. Η κατασκευή του πρώτου laser το 1960 και η κατασκευή των οπτικών ινών το 1980, έδωσαν νέα ώθηση στη μετάδοση πληροφοριών. Από τα μέσα της δεκαετίας του '80 οι ειδικοί των τηλεπικοινωνιών, οραματίζονται ένα ενιαίο δίκτυο πληροφοριών που θα συνέδεε τελικά όλες τις επιχειρήσεις, τους οργανισμούς και τα νοικοκυριά του σύγχρονου κόσμου. Ένα τέτοιο δίκτυο θα παρείχε ευρύ φάσμα υπηρεσιών, με κυριότερη την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ υπολογιστικών συστημάτων, ραδιοφωνικών σταθμών, τηλεοπτικών καναλιών και γενικά μεταξύ των χρηστών του δικτύου. Κάτι τέτοιο ήδη έχει αρχίσει και η γενίκευσή του θα αποτελέσει την ολοκλήρωση των επικοινωνιών.

1.2 Η εξέλιξη των μέσων επικοινωνίας

Αρχικά, η φωνή του ανθρώπου ήταν το μοναδικό μέσον επικοινωνίας, ενώ η μεταφορά των πληροφοριών σε απόσταση γινόταν με αγγελιοφόρους και στη συνέχεια με οπτικά ή με ακουστικά σήματα.

Η μεταβίβαση μηνυμάτων με φωτιές, οι λεγόμενες φρυκτωρίες, είχε συστηματοποιηθεί στην αρχαιότητα για στρατιωτικούς κυρίως σκοπούς. Πληροφορίες επίσης μεταδίδονταν με τη μεταβολή της ποσότητας καπνού που προέκυπτε από μια φωτιά. Έτσι εμφανίστηκε η ανάγκη ανάπτυξης ενός κώδικα, που πρέπει να γνωρίζει τόσο ο πομπός όσο και ο δέκτης. Τα σήματα καπνού θεωρούνται

ο πρόγονος των σημερινών ψηφιακών συστημάτων που χρησιμοποιούν κώδικες παλμών. Ο πανάρχαιος αυτός τρόπος μετάδοσης πληροφοριών καθώς και η μεταβίβαση πληροφοριών με τυμπανοκρουσίες (ταμ ταμ) εξακολουθούν και σήμερα ακόμη να χρησιμοποιούνται από ορισμένες φυλές.

Μεταγενέστερα έχουμε τη χρήση φάρων, ενώ με τη διάδοση της γραφής άρχισε η ανταλλαγή γραπτών μηνυμάτων και αναπτύχθηκε έτσι η ταχυδρομική επικοινωνία. Αποτέλεσε το μέσο επικοινωνίας για μεγάλες αποστάσεις μέχρι τα μέσα του 19ου αιώνα και εξακολουθεί να μας εξυπηρετεί ακόμη, παράλληλα με τα άλλα μέσα επικοινωνίας.

Η μελέτη των φαινομένων του ηλεκτρισμού οδήγησε στην έρευνα νέων τρόπων επικοινωνίας. Έτσι με την αξιοποίηση των νόμων της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής του Faraday, ο Samuel Morse επινοεί και εξελίσσει τον τηλεγράφο στο τέλος της δεκαετίας του 1830. Η πληροφορία μεταδίδεται κωδικοποιημένη με το συνδυασμό δύο στοιχείων, ενός παλμού ρεύματος μεγάλης διάρκειας -παύλα- και ενός άλλου μικρής διάρκειας -τελεία. Ο τηλεγράφος, λοιπόν, αποτελεί ουσιαστικά ένα «ψηφιακό μέσο». Η λήψη της πληροφορίας μπορεί να γίνει είτε με τη χρήση γραφικών σημάτων -τελείες και παύλες- είτε με ακουστικά σήματα -κτύπους.

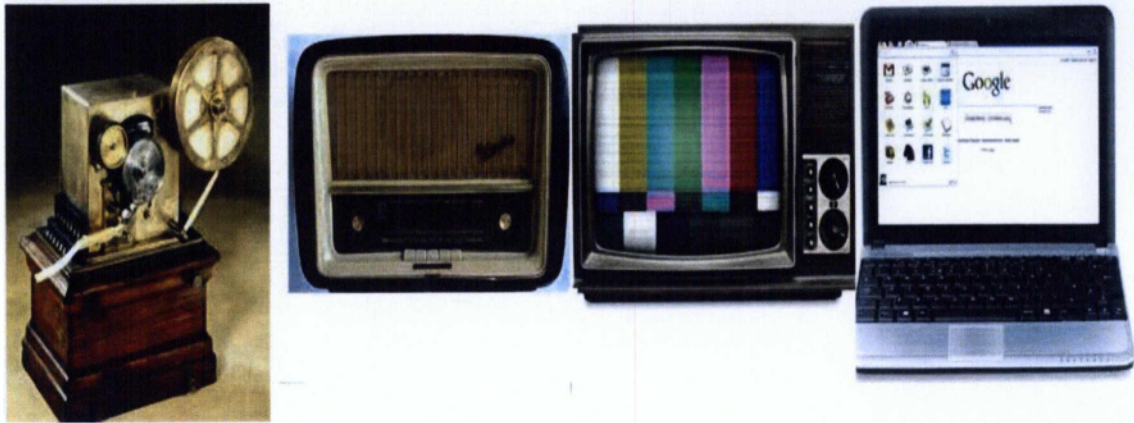
Στις αρχές του 20ού αιώνα τελειοποιείται η ασύρματη τηλεγραφία που άρχισε να επεκτείνεται όλο και περισσότερο σε οργανωμένα δίκτυα και μπορεί να θεωρηθεί πρόδρομος των δικτύων υπολογιστών. Τα τηλεγραφικά όμως μηνύματα είναι ανυπόγραφα. Πρακτικά είναι αδύνατη η ανταλλαγή απόψεων. Από τα πρώτα βήματα της τηλεγραφίας εντείνεται η έρευνα για κάποιο τρόπο συνομιλίας δυο προσώπων, που βρίσκονται σε απόσταση.

Η ιστορία της τηλεφωνίας μπορεί να θεωρηθεί ότι αρχίζει κατά την δεκαετία του 1870 ενώ από τότε βρίσκεται σε συνεχή εξέλιξη.

Στο κατώφλι του 21ου αιώνα, ο άνθρωπος διεκπεραιώνει ένα μεγάλο μέρος από τις ανάγκες της καθημερινής του ζωής μέσω της ηλεκτρονικής επικοινωνίας. Με αυτόν τον τρόπο ενημερώνεται από το ραδιόφωνο την τηλεόραση, συναλλάσσεται στην τράπεζα, αποστέλλει και λαμβάνει φαξ, επικοινωνεί με άλλους ανθρώπους μέσω της τηλεφωνίας και απολαμβάνει ποικίλες υπηρεσίες, μέσα από την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ υπολογιστικών συστημάτων.

Η ηλεκτρονική επικοινωνία επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ειδικών συσκευών (όπως το τηλέφωνο, η συσκευή φαξ, ο υπολογιστής, κ.ά.) μέσω των οποίων γίνεται

ανταλλαγή σημάτων. Για τη μετάδοση αυτών των σημάτων χρησιμοποιείται κάποιο μέσο μετάδοσης.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ

2.1 Εισαγωγή

Όπως είναι γνωστό, τα καλώδια κατασκευάζονται από χαλκό ή κράματά του. Όμως, ο χαλκός παράγεται σε λίγες μόνο χώρες του κόσμου. Έτσι οι υπόλοιπες χώρες είναι εξαρτημένες από αυτές που τον παράγουν. Οι ερευνητές ωθήθηκαν στο να προτείνουν πιο συμφέρουσες εναλλακτικές λύσεις παρακινούμενοι και από την προσπάθεια απεξάρτησης από τις χώρες παραγωγής χαλκού και από την προσπάθεια αποτροπής υποκλοπών στις τηλεπικοινωνίες καθώς και μεταφοράς μεγαλύτερου "όγκου" πληροφοριών. Έτσι οδηγηθήκαμε στην κατασκευή των οπτικών ινών.

Η ιδέα της επικοινωνίας χρησιμοποιώντας το φως, υπήρχε πολύ πριν από την εφεύρεση των οπτικών ινών. Ωστόσο χρειάστηκαν αρκετά χρόνια έτσι ώστε να ωριμάσουν οι ιδέες που αφορούσαν τα απλά οπτικά μέσα σε οπτικές ίνες. Είναι κοινή γνώση ότι το φως ταξιδεύει ευθύγραμμα. Έστω κι αν οι φακοί αποκλίνουν το φως και οι καθρέπτες το αντανακλούν, το φως ταξιδεύει σε ευθείες γραμμές μεταξύ των οπτικών συσκευών. Αρκετές εφευρέσεις δημιουργήθηκαν σαν αποτέλεσμα αυτής της αρχής, όπως είναι το τηλεσκόπιο, το μικροσκόπιο και οι φωτογραφικές μηχανές. Εν τούτοις, αρκετές φορές το φως χρειάζεται να ταξιδέψει περνώντας μέσα από γωνίες.

Το πρόβλημα αυτό εμφανίστηκε πολύ πριν βρεθεί η λύση. Η ανάγκη για τη μεταφορά φωτός χρησιμοποιώντας καλώδια για επικοινωνία οδήγησε στην εφεύρεση των οπτικών ινών (optical fiber).

2.2 Τι είναι οι οπτικές ίνες

Ένας καθαρά επιστημονικός ορισμός της οπτικής ίνας θα έλεγε ότι μία οπτική ίνα είναι ένας κυλινδρικός διηλεκτρικός κυματοδηγός αποτελούμενος από υλικό (γυαλί ή πολυμερές) που παρουσιάζει μικρές απώλειες στην ορατή και κοντινή

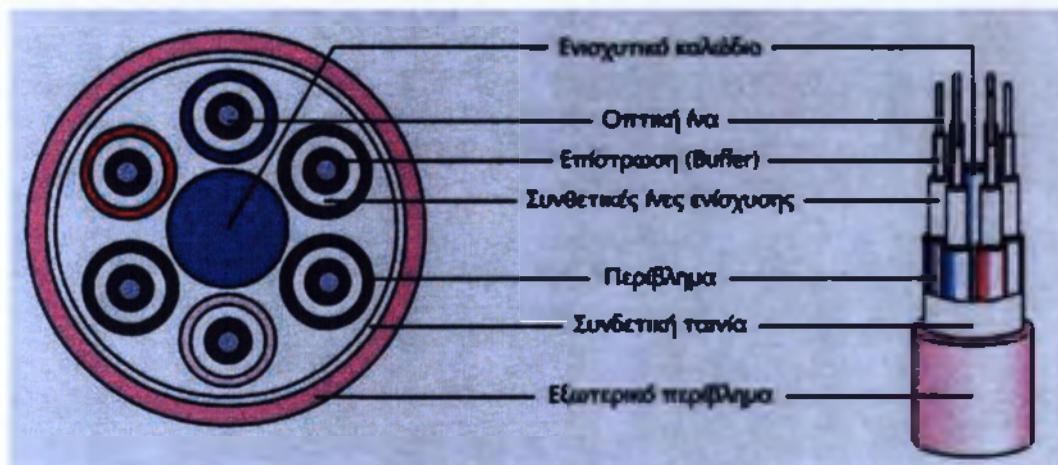
υπέρυθρη ακτινοβολία. Η οπτική ίνα αποτελείται από τρεις βασικές περιοχές. Στο κέντρο της ίνας βρίσκεται ο πυρήνας που είναι γυαλί υψηλού δείκτη διάθλασης. Ο πυρήνας περιβάλλεται από υλικό χαμηλότερου δείκτη διάθλασης. Το φως εγκλωβίζεται στον πυρήνα και διαδίδεται κατά μήκος της ίνας.

Ο πυρήνας στην πραγματικότητα μεταφέρει το φως, ενώ το περίβλημα της ίνας ανακλά το φως πίσω στον πυρήνα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο πυρήνας και το περίβλημα της οπτικής ίνας είναι κατασκευασμένα από γυαλί (οξειδίο του πυριτίου SiO_2) μεγάλης καθαρότητας με μικρές προσθήκες άλλων οξειδίων όπως GeO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 κλπ. Ο ρόλος των οποίων είναι ο ακριβής καθορισμός του δείκτη διάθλασης. Εκτός από το γυαλί μπορεί να χρησιμοποιηθεί και πολυμερές. Οι πολυμερικές οπτικές ίνες όμως παρουσιάζουν μεγαλύτερες απώλειες και χρησιμοποιούνται μόνο για εφαρμογές μικρών αποστάσεων. Άλλα είδη οπτικών ινών ενσωματώνουν χαλαζία ή καθαρή τιγμένη σιλικόνη και πλαστικό, όμως αυτές δεν χρησιμοποιούνται στις κοινά αποδεκτές, υψηλής ποιότητας, εφαρμογές.

Ένα σχεδιαστικό βασικό χαρακτηριστικό όλων των οπτικών ινών είναι ότι ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα είναι υψηλότερος από τον δείκτη διάθλασης του περιβλήματος. Η εξωτερική περιοχή της ίνας καλείται μανδύας ή απομονωτής. Ο απομονωτής, τυπικά ένα πλαστικό υλικό, παρέχει προστασία και διατηρεί την αντοχή του γυαλιού της ίνας. Στο κέντρο του καλωδίου υπάρχει η οπτική ίνα η οποία κατασκευάζεται από γυαλί ικανό να μεταφέρει φωτεινή δέσμη συγκεκριμένου μήκους κύματος με πολύ λίγες απώλειες. Την οπτική ίνα περιβάλλει ειδική επίστρωση υλικού με μικρότερο δείκτη διάθλασης από το υλικό της ίνας, το οποίο ονομάζεται *cladding* ή *buffer*. Το υλικό αυτό βοηθά στη συνεχή ανάκλαση της φωτεινής δέσμης. Όταν μια φωτεινή δέσμη εισχωρήσει στην οπτική ίνα, εφόσον η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη της οριακής (ή κρίσιμης) γωνίας, θα υποστεί ολική ανάκλαση στη διαχωριστική επιφάνεια της οπτικής ίνας με το περίβλημα. Αυτό σημαίνει ότι δεν θα έχουμε διάθλαση στην εξωτερική επίστρωση (*cladding*). Με αυτό τον τρόπο η δέσμη του φωτός εγκλωβίζεται μέσα στην οπτική ίνα και ύστερα από διαδοχικές ολικές ανακλάσεις, οδηγείται στην έξοδό της από την ίνα. Την επίστρωση περιβάλλει δέσμη συνθετικών ινών, οι οποίες έχουν στόχο την προστασία της ίνας από πιθανά "τραβήγματα" που θα μπορούσαν να προκαλέσουν σπάσιμο του γυαλιού, το οποίο αποτελεί και τον πυρήνα της ίνας. Όλα τα παραπάνω περικλείονται σε εξωτερικό πλαστικό περίβλημα όμοιο με αυτό των καλωδίων. Οι περισσότερες από τις οπτικές

ίνες που χρησιμοποιούνται σήμερα λειτουργούν στα πλαίσια του υπέρυθρου φωτός με μήκη κύματος που κυμαίνονται από 800 έως 1600nm.

- Η βασική χημική αντίδραση από την οποία παράγεται το οπτικό γυαλί είναι:



2.3 Αρχές λειτουργίας οπτικών ινών

Κατά την επινόηση των καλωδίων οπτικών ινών, οι κατασκευαστές τους είχαν έναν σημαντικό στόχο: να μην υπάρχει διαρροή φωτός στο εξωτερικό ενός καλωδίου, κάτι που θα είχε ως αποτέλεσμα την απώλεια δεδομένων και πολλά ακόμη προβλήματα. Για το λόγο αυτό έπρεπε να βρεθεί ένας τρόπος ώστε όλη η φωτεινή ενέργεια να παραμένει στο εσωτερικό του καλωδίου και να φτάνει δίχως εξασθένηση στον προορισμό της. Η αρχή λειτουργίας ενός οπτικού καλωδίου είναι η ολική εσωτερική αντανάκλαση (TIR – Total Internal Reflection) και βασίζεται στο γεγονός ότι όταν το φως αντανακλάται εξολοκλήρου σε έναν κλειστό εσωτερικό χώρο, μπορεί να ταξιδεύσει σε μεγάλες αποστάσεις, χωρίς να μειωθεί η έντασή του. Ως εκ τούτου, σε ένα οπτικό καλώδιο, η δεσμίδα των οπτικών ινών περικλείεται σε ειδικό υλικό που αντανακλά εσωτερικά όλο το φως, εξασφαλίζοντας έτσι δύο πράγματα:

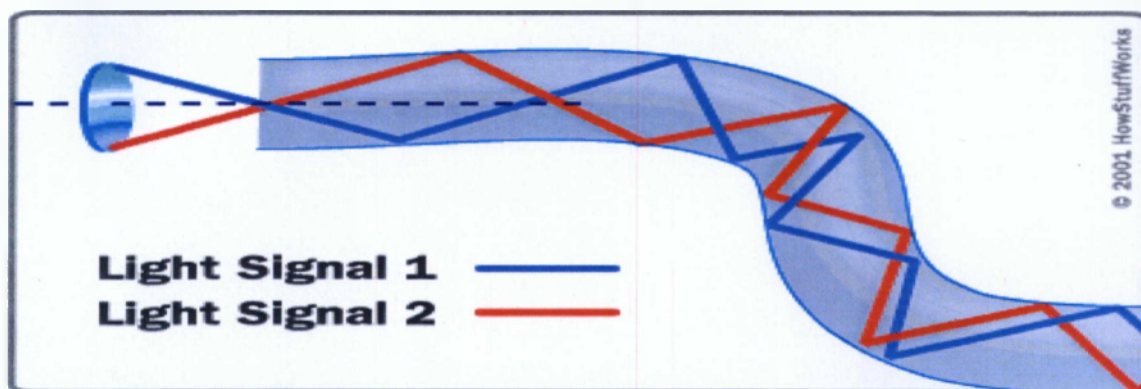
1) Την ολική εσωτερική αντανάκλαση, που θα επιτρέψει στην πληροφορία να φθάσει αναλλοίωτη σε μεγάλες αποστάσεις

2) Την αποφυγή διαρροής φωτός στο εξωτερικό του καλωδίου.

Για τον λόγο αυτό, το φως διοχετεύεται στο εσωτερικό της οπτικής ίνας υπό συγκεκριμένη γωνία, ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη ανάκλαση που θα αποτρέψει την διαρροή φωτεινής ενέργειας. Μέχρι να φθάσει στον προορισμό της, η φωτεινή δέσμη συνήθως πραγματοποιεί χιλιάδες ή και εκατομμύρια ανακλάσεις στο εσωτερικό της οπτικής ίνας.

Πάντως οι απώλειες ισχύος της φωτεινής ενέργειας είναι σε κάθε περίπτωση αναπόφευκτες, ακόμη και κατά την ολική εσωτερική αντανάκλαση του φωτός και παρατηρούνται κυρίως κατά τη μετάδοση των δεδομένων σε αποστάσεις πολλών χιλιομέτρων. Αυτό οφείλεται σε μικρές ατέλειες του μέσου μεταφοράς, που δεν είναι άλλο από το γυαλί. Η καθαρότητα του τελευταίου δεν φθάνει ποτέ το 100%, με αποτέλεσμα η ισχύς του φωτός να εξασθενεί.

Ανάλογα με το πάχος του καλωδίου, οι απώλειες μπορούν να φθάσουν ακόμη και το 20% ανά χιλιόμετρο, ωστόσο με κάποια σύγχρονα καλώδια, έχουν μειωθεί στο 5-10%.



2.4 Πομπός / Δέκτης

Ο πομπός πραγματοποιεί την μετατροπή από ηλεκτρικό σε οπτικό σήμα αποτυπώνοντας τα δεδομένα του ηλεκτρικού σήματος πάνω στον φορέα του φωτός. Αυτή η διεργασία λέγεται διαμόρφωση. Η διαμόρφωση μπορεί να πραγματοποιηθεί

είτε άμεσα, χρησιμοποιώντας μόνο ένα laser και τότε ονομάζεται άμεση διαμόρφωση (αυτή είναι και που μας απασχολεί περισσότερο), είτε χρησιμοποιώντας ένα εξωτερικό διαμορφωτή. Μετά τη διαμόρφωση, το οπτικό σήμα μεταδίδεται κατά μήκος της οπτικής ίνας.

Κατά σύμβαση, ο παλμός φωτός παριστάνει το bit 1 και η απουσία φωτός παριστάνει το bit 0. Στην έξοδο της ίνας, το οπτικό σήμα ανιχνεύεται και επεξεργάζεται από το δέκτη. Ο δέκτης αποτελείται κυρίως από μία φωτοδίοδο που ανιχνεύει το οπτικό σήμα και το μετατρέπει σε ηλεκτρικό. Το ηλεκτρικό σήμα μπορεί να το επεξεργαστεί περαιτέρω αν είναι αναγκαίο. Τέλος, μετά από τη δειγματοληψία που βασίζεται στην ανάκτηση του ρολογιού (clock recovery) και στην απόφαση του στοιχείου αποφάσεως (slicer), ανακτάται το μεταδιδόμενο σήμα. Στα οπτικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα υπάρχουν διάφορα στοιχεία. Για παράδειγμα, το οπτικό σήμα εξασθενεί κατά μήκος της μετάδοσης και για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται οπτικοί ενισχυτές για την κάλυψη των οπτικών απωλειών πριν την ανίχνευση του σήματος στο δέκτη. Επιπρόσθετα, οπτικά ζωνοπερατά (bandpass) φίλτρα και ηλεκτρικά χαμηλοπερατά (lowpass) φίλτρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εξαλείψουν κατά ένα μεγάλο μέρος τον θόρυβο τόσο στο οπτικό, όσο και στο ηλεκτρικό επίπεδο αντίστοιχα

2.5 Είδη οπτικών ινών

2.5.1 Κατηγορίες οπτικών ινών

Οι οπτικές ίνες κατηγοριοποιούνται ως προς:

1. Το υλικό κατασκευής πυρήνα και μανδύα:

- ✓ Εξ' ολοκλήρου γυάλινες οπτικές ίνες: Τόσο ο πυρήνας όσο και ο μανδύας είναι κατασκευασμένα από συνθετικό γυαλί υψηλής καθαρότητας σε διοξείδιο του πυριτίου SiO_2 στο οποίο έχουν προστεθεί κατάλληλες προσμίξεις προκειμένου να επιτευχθεί η επιδιωκόμενη διαφορά στο συντελεστή διάθλασης πυρήνα-μανδύα. Στον πυρήνα χρησιμοποιούνται το γερμάνιο (Ge) και ο φώσφορος (P) που έχουν την ιδιότητα να αυξάνουν το δείκτη διάθλασης. Στον μανδύα χρησιμοποιούνται το βόριο (B) και το φθόριο (F) που έχουν την ιδιότητα να μειώνουν τον συντελεστή διάθλασης του γυαλιού.

- ✓ Για γυάλινου πυρήνα και πλαστικού μανδύα: Στη χρήση τους τείνουν να αντικατασταθούν από εξ' ολοκλήρου πλαστικές ίνες.
- ✓ Εξ' ολοκλήρου πλαστικές ίνες: Συγκρινόμενες με τα άλλα είδη ινών παρουσιάζουν εμφανώς κατώτερες επιδόσεις ως προς την ελάχιστη εξασθένιση (0,15dbm στα 650nm) και το διαθέσιμο εύρος ζώνης, καθώς και μεγάλη ευαισθησία σε θερμοκρασιακές μεταβολές

2. Την μεταβολή του δείκτη διάθλασης από τον πυρήνα στο μανδύα.

3. Το πλήθος των τρόπων μετάδοσης που υποστηρίζουν:

- Μονότροπες – βηματικού δείκτη (step index)
- Πολύτροπες - βηματικού δείκτη (step index)
- Πολύτροπες - βαθμιαίου δείκτη (graded index)

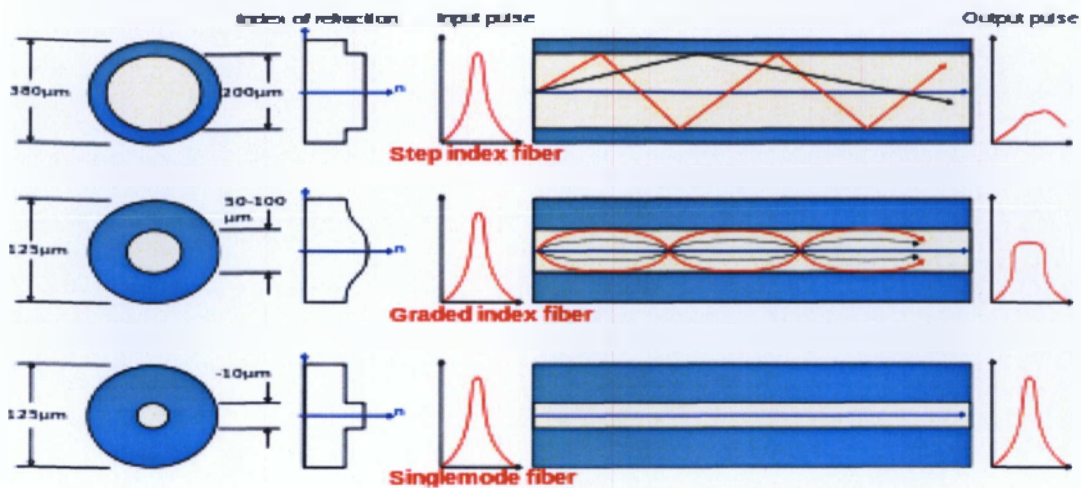
2.5.2 Ανάλυση των ειδών των οπτικών ινών

Ανάλογα με τη κατανομή του δείκτη διάθλασης του υλικού σε κάθετη τομή στη διεύθυνση διάδοσης των ΗΜ κυμάτων, οι οπτικές ίνες διακρίνονται σε (α) **ίνες με βηματικό δείκτη διάθλασης (step index fiber)** και σε (β) **ίνες με διαβαθμισμένο δείκτη διάθλασης (graded index fiber)**.

Στην πρώτη περίπτωση ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα είναι σταθερός και ίδιος σε όλη την διατομή του, δημιουργώντας ένα σκαλοπάτι δείκτη διάθλασης στην διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα-περιβλήματος.

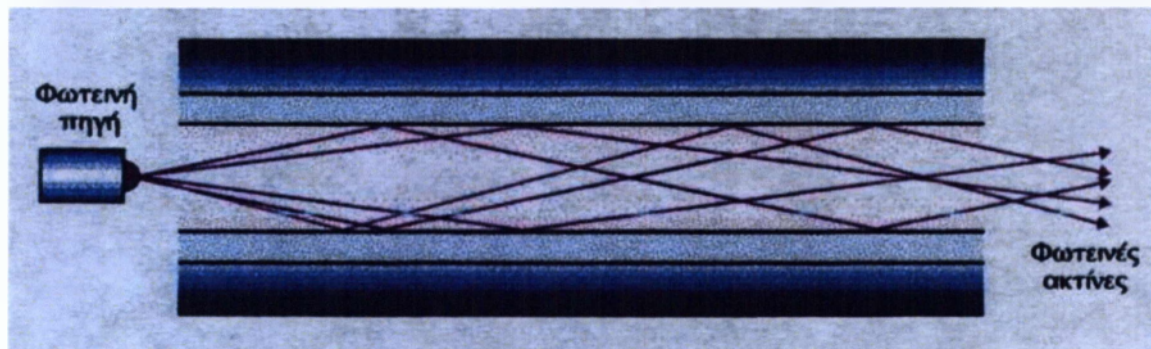
Αντίθετα, στην διαβαθμισμένη περίπτωση, ο δείκτης διάθλασης μεταβάλλεται κατά συνεχή τρόπο από το κέντρο της ίνας προς την περιφέρεια της, με την μέγιστη τιμή να παρουσιάζεται στο κέντρο της ίνας.

Σαν αποτέλεσμα, στην πρώτη περίπτωση η ανάκλαση όλων των διαδιδόμενων κυμάτων γίνεται στην διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα-περιβλήματος, ενώ στην δεύτερη η πορεία της ακτίνας είναι «κυρτωμένη» και το σημείο «ανάκλασης» εξαρτάται από την γωνία εισόδου στην ίνα.



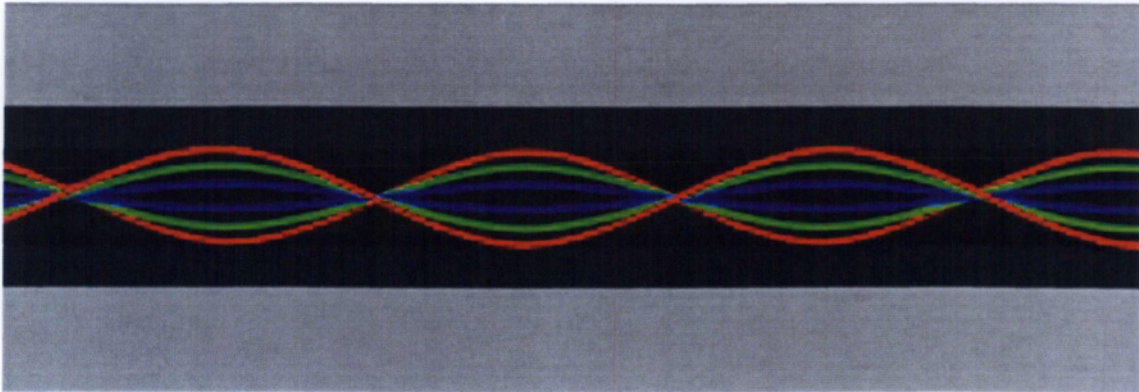
- **Βηματικού δείκτη (step index)**

Στις ίνες βηματικού δείκτη (step index) συμβαίνει απότομη μεταβολή του δείκτη διάθλασης μεταξύ της κεντρικής ίνας και του υλικού επίστρωσης. Στην περίπτωση αυτή, η πορεία των ακτίνων εμφανίζεται στο παρακάτω σχήμα.



- **Βαθμιαίου δείκτη (graded index)**

Στις ίνες βαθμιαίου δείκτη (graded index) έχουμε βαθμιαία μεταβολή του δείκτη διάθλασης του υλικού της κεντρικής ίνας. Συμβαίνει βαθμιαία μείωση όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο προς την εξωτερική επιφάνεια του γυαλιού. Η πορεία των ακτίνων σε μια τέτοια ίνα είναι αυτή, που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Οι οπτικές ίνες βηματικού δείκτη διάθλασης ανάλογα με την διάμετρο του πυρήνα διακρίνονται σε μονότροπες (Single-mode) ή πολύτροπες (Multi-mode).

- **Απλού τύπου** (Single mode)

Οι οπτικές ίνες απλού τύπου ή μονοτροπικές ίνες έχουν διαστάσεις (διάμετρο) μέχρι 10μm. Τα κύματα φωτός ταξιδεύουν σε ευθεία γραμμή και μπορούμε να στείλουμε δεδομένα σε μεγάλες αποστάσεις. Η μικρή αυτή διάμετρος του πυρήνα επιτρέπει τη διέλευση σε ένα περιορισμένο πλήθος ακτίνων, ουσιαστικά μόνο σε ακτίνες που προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνεια της διατομής.

- **Πολλαπλού τύπου** (Multi mode)

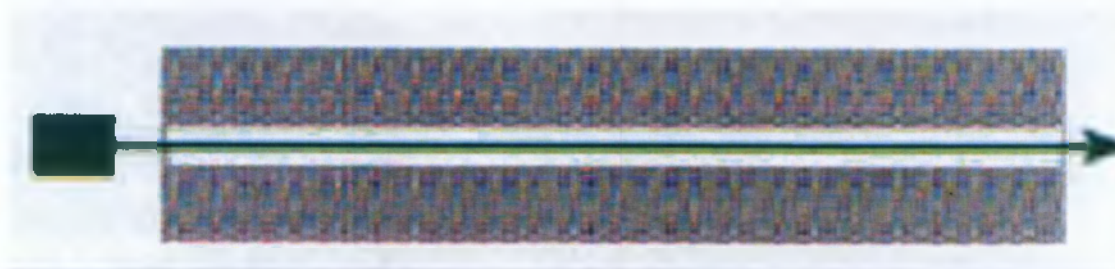
Οι οπτικές ίνες πολλαπλού τύπου ή πολυτροπικές ίνες έχουν διαστάσεις διαμέτρου από 50 - 100 μm, είναι πιο "χοντρές" από τις απλού τύπου, αλλά μπορούν να στείλουν παράλληλα, σε ξεχωριστό μονοπάτι, πολλά κύματα φωτός. Το κάθε κύμα φωτός, εισέρχεται στην οπτική ίνα υπό ελαφρώς διαφορετική γωνία σε σχέση με τα άλλα, και ακολουθεί το δικό του μονοπάτι, μέσω των διαδοχικών ανακλάσεων στο περιβάλλον. Αυτό συμβαίνει παράλληλα με πολλά κύματα φωτός (όλα σε διαφορετική γωνία σε σχέση με τα άλλα) κι έτσι μπορούμε να στείλουμε παράλληλα, τεράστιο όγκο δεδομένων.

📌 Πίνακας χαρακτηριστικών

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

- **Μονότροπη οπτική ίνα (single mode)**

Στις μονότροπες οπτικές ίνες (single mode) η διάμετρος της κεντρικής ίνας είναι πολύ μικρή και πλησιάζει περίπου το επίπεδο του μήκους κύματος του εκπεμπόμενου σήματος. Στην περίπτωση αυτή, έχουμε έναν μόνο δυνατό τρόπο μετάδοσης του οπτικού σήματος, τον αξονικό. Η πορεία των ακτινών σε μια τέτοια οπτική ίνα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Singlemode - Step Index

2.6 Η δομή της οπτικής ίνας

Οι οπτικές ίνες φτιάχνονται από γυαλί το οποίο, με τη σειρά του, φτιάχνεται από άμμο, μια φτηνή πρώτη ύλη που είναι διαθέσιμη σε απεριόριστες ποσότητες. Μια οπτική ίνα είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να καθοδηγεί το φως κατά μήκος της, εγκλωβίζοντάς το όσο το δυνατόν περισσότερο σε μια συγκεκριμένη μορφή

διάδοσης. Η βασική της δομή περιλαμβάνει μια κεντρική κυλινδρική ράβδο που ονομάζεται πυρήνας (core) και έναν σωλήνα, που περιβάλλει τον πυρήνα και ονομάζεται μανδύας (cladding). Για λόγους προστασίας από εξωτερικούς παράγοντες, ο μανδύας καλύπτεται από πρωτογενή επικάλυψη πλαστικού γνωστή ως πρωτεύουσα επικάλυψη ή εξωτερικό περίβλημα (coating). Τόσο ο πυρήνας, όσο και μανδύας είναι συνήθως κατασκευασμένα από συνθετικό γυαλί υψηλής καθαρότητας (SiO_2 – με συντελεστή διάθλασης 1,46), ενώ ο πυρήνας περιλαμβάνει νοθεύσεις GeO_2 (με συντελεστή διάθλασης 1,48) και άλλων προσμίξεων, που μεταβάλλουν τον συντελεστή διάθλασης του πυρήνα, επιτυγχάνοντας τη διαφορά ($\delta n=0,01$) από το συντελεστή διάθλασης του μανδύα που απαιτείται για την κυματοδότηση. Τυπικές τιμές συντελεστών διάθλασης είναι για τον πυρήνα $n_1=1,47$ ενώ για των μανδύα $n_2=1,46$. Επισημαίνουμε ότι η διαφορά “ δn ” είναι επιθυμητή για τη σωστή λειτουργία των οπτικών ινών.

2.7 Οι οπτικές ίνες ειδικού σχεδιασμού

2.7.1 Συνήθης ίνα μετατοπισμένου σημείου διασποράς

Για μια πλειάδα εφαρμογών, όπως ζεύξεις μεγάλου μήκους, συστήματα με EDFA (Erbium Doped Amplifiers) και συστήματα με πολυπλέκτες διαχωρισμού μήκους κύματος, είναι απαραίτητο να μετατοπίσουμε το σημείο μηδενικής διασποράς σε άλλα μήκη κύματος (σχετικά κοντά στα 1550 nm). Ίνες με το προηγούμενο χαρακτηριστικό ονομάζονται ίνες μετατοπισμένου σημείου διασποράς. Όταν μετατοπίζουμε το σημείο μηδενικής διασποράς από τα 1310 στα 1550 nm έχουμε σαν αποτέλεσμα την παραγωγή μιας ίνας με χαμηλότερη εξασθένιση και διασπορά. Η μετατόπιση του μηδενικού σημείου διασποράς επιτυγχάνεται με αλλαγή του προφίλ δείκτη διάθλασης της ίνας. Χρησιμοποιώντας την παραπάνω διαδικασία μπορούμε να φτιάξουμε μια ίνα με σημείο μηδενικής διασποράς σε μια περιοχή μήκους κύματος 1530 – 1565 nm.

Η πρώτη ίνα μετατοπισμένου σημείου διασποράς εμφανίστηκε κατά τα μέσα της δεκαετίας του '80 και παρουσίαζε μηδενική διασπορά στα 1550nm. Η ίνα αυτή έχει το μεγάλο μειονέκτημα, να παρουσιάζει μη γραμμικά φαινόμενα κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Η «παλιά» ίνα μετατοπισμένου σημείου διασποράς δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα συστήματα με πολυπλέκτες διαχωρισμού μήκους κύματος. Η συνήθης ίνα του παραπάνω τύπου θεωρείται πια ξεπερασμένη και έχει αντικατασταθεί στα νέα συστήματα με ίνες μη μηδενικού μετατοπισμένου σημείου διασποράς.

2.7.2 Ίνα μη μηδενικού μετατοπισμένου σημείου διασποράς

Για να ικανοποιηθεί η αυξημένη ζήτηση για εύρος ζώνης μετάδοσης, τα σημερινά συστήματα επικοινωνιών χρησιμοποιούν όλο και μεγαλύτερα bit rate. Από τα πρώτα στάδια ανάπτυξης των οπτικών ινών έχουν πραγματοποιηθεί πειράματα για τη χρήση συγκεκριμένων μηκών κύματος που θα μπορούσαν να μεταφέρουν πολλαπλά κανάλια πληροφορίας, ώστε να πολλαπλασιαστεί η χωρητικότητα των οπτικών ινών. Οι ίνες μη μηδενικού μετατοπισμένου σημείου διασποράς χρησιμοποιήθηκαν αρχικά σε συστήματα DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Μη γραμμικά φαινόμενα, όπως η μείξη τεσσάρων κυμάτων, μπορούν να περιοριστούν χρησιμοποιώντας ίνες με μικρή διασπορά, αποφεύγοντας το σημείο μηδενισμού. Οι συνήθεις ίνες μετατοπισμένου σημείου διασποράς δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα WDM και σε συστήματα υψηλού bit rate που παρουσιάζουν έντονα μη γραμμικά φαινόμενα, χωρίς να χρησιμοποιηθούν ιδιαίτερες τεχνικές μέθοδοι. Σε αντίθεση με τις ίνες που αναφέραμε προηγουμένως οι ίνες μη μηδενικού μετατοπισμένου σημείου διασποράς, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τέτοια συστήματα για μήκη κύματος 1530 – 1565nm όπου παρουσιάζουν διασπορά 2 - 6ps/nm*Km. Με τέτοιου τύπου ίνες έχουν διαδοθεί αρκετές εκατοντάδες κανάλια των 2,5 ή 10Gbit/s σε αποστάσεις πολλών χιλιομέτρων.

2.7.3 Ίνες με συνεχές χρησιμοποιούμενο φάσμα από 1280 μέχρι 1625nm

Μια νέου τύπου ίνα αναμένεται να ανοίξει ένα νέο «παράθυρο» για μετάδοση. Αυτό το νέο παράθυρο θα ενώνει το παράθυρο των 1310nm με αυτό των 1550nm και θα δίνει τη δυνατότητα χρήσης παραπάνω από 100nm εύρους ζώνης σε σχέση με την τυπική μονότροπη ίνα. Σε αυτή την ίνα η ολική εξασθένηση στο φασματικό εύρος 1285 - 1625nm είναι μικρότερη από 0,4dB. Χρησιμοποιώντας ίνες τέτοιου τύπου μπορούμε να παρέχουμε ταυτόχρονα διάφορα είδη υπηρεσιών. Για παράδειγμα η ίδια ίνα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για WDM αναλογικό video στο νέο πέμπτο παράθυρο (1350 -1450nm) και για μετάδοση πληροφοριών DWDM με bit rate κοντά στα 2,5Gbit/s στην περιοχή των 1450nm.

2.7.4 Ίνα αντιστάθμισης διασποράς

Είναι οικονομικά ασύμφορο να χρησιμοποιήσουμε ίνα μετατοπισμένου σημείου διασποράς σε δίκτυα μεγάλων αποστάσεων. Συνδυάζοντας τυπικές μονότροπες ίνες, ενισχυτές με ίνες ερβίου EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) και ίνες αντιστάθμισης διασποράς μπορούμε να πετύχουμε μεγάλες αποστάσεις μετάδοσης και πολύ υψηλές ταχύτητες με αρκετά μικρό κόστος. Ένα σοβαρό μειονέκτημα είναι ότι οι ενισχυτές ίνας ερβίου μεταδίδουν για μήκη κύματος κοντά στα 1550nm, γεγονός που (τουλάχιστον για το άμεσο μέλλον) αποκλείει τη μετάδοση στα 1310nm.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΑΡΧΕΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΠΟΥ ΔΙΕΠΟΥΝ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

Η λειτουργία των οπτικών ινών βασίζεται κατά το πλείστον σε κάποιες αρχές τις φυσικής ,αυτές τις αρχές θα αναλύσουμε παρακάτω.

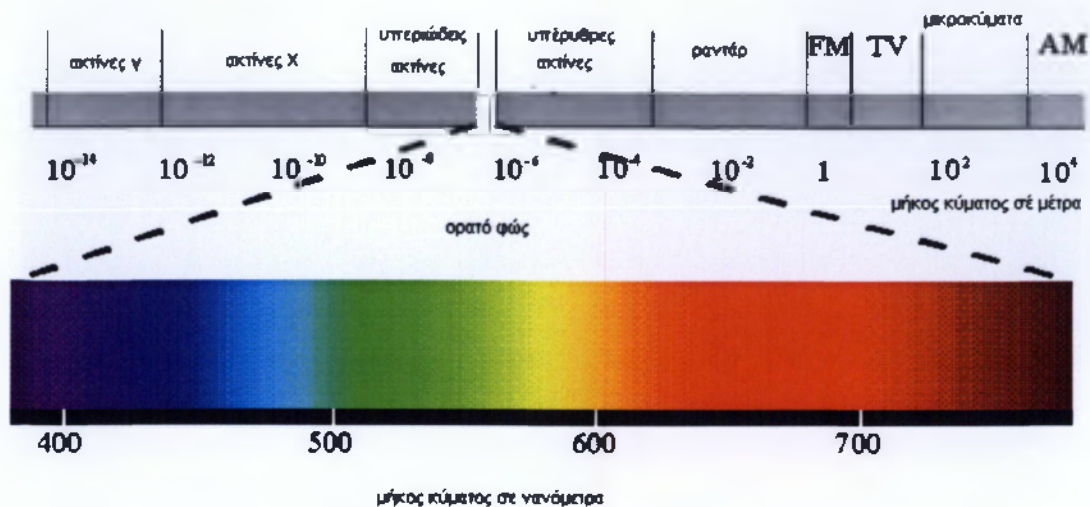
3.1 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Το φως συμπεριφέρεται με διαφορετικούς τρόπους κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Για να περιγράψουμε το φως πλήρως , πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μια ποικιλία προσεγγίσεων.

1. Γεωμετρική οπτική
2. Κυματική οπτική
3. Κβαντική οπτική

Για τη μελέτη μας , είναι επαρκές να θεωρήσουμε το φως σαν ηλεκτρομαγνητικό κύμα ή σαν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Το φως διαδίδεται σαν κύμα με τον ίδιο τρόπο όπως τα ράδιο-σήματα, οι ακτίνες X και η ακτινοβολία γ. Γενικά σήμερα έχει γίνει αποδεκτή η ταχύτητα του φωτός στο κενό ίση με 300.000 Km/sec και δίνεται από τον τύπο $c=\lambda \cdot f$ όπου (λ = μήκος κύματος , f =συχνότητα) Το φως αποτελεί ένα μικρό κομμάτι του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Το ορατό φως βρίσκεται στο κομμάτι του φάσματος με μήκος κύματος 390 μέχρι 760 nm.

Με την έννοια φως γενικά εννοούμε μόνο το ορατό φως, συνήθως όμως η έννοια του φωτός περιλαμβάνει την υπέρυθη και υπεριώδη ακτινοβολία. Μάλιστα ο όρος φως περιλαμβάνει κάθε είδους ακτινοβολία που μπορούμε να διαχειριστούμε με φακούς πρίσματα κ.τ.λ. Αυτό το ευρύτερο φάσμα εκτείνεται από 190nm (UV) μέχρι 2.000 nm (IR).



3.2 Γεωμετρική Οπτική

Το φως έχει ορισμένες ιδιότητες οι οποίες μπορούν να περιγραφούν απλά με έννοιες της Γεωμετρικής Οπτικής. Αρκετές άλλες ιδιότητες του φωτός πρέπει να περιγραφούν με τη βοήθεια της Κυματικής Οπτικής ενώ κάποιες άλλες μπορούν να εξηγηθούν μόνο με τη βοήθεια της Κβαντικής Μηχανικής (Φωτόνια).

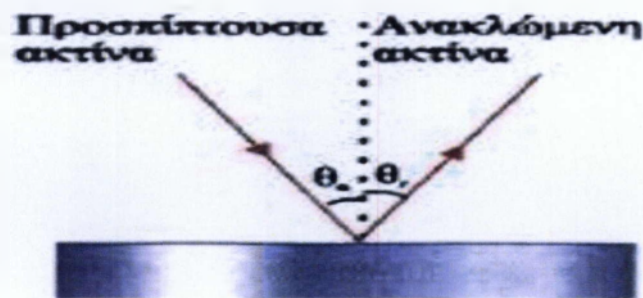
Η Γεωμετρική Οπτική έχει ιστορία χιλιάδων χρόνων και μελετά το φως ως αποτέλεσμα πολλών ακτινών που διασκορπίζονται από την πηγή σε ευθείες γραμμές μέσα σε ένα ομογενές περιβάλλον όπως το γυαλί, το νερό, τον αέρα ή το κενό. Ασχολείται κυρίως με την περιγραφή των περισσότερων φαινομένων που έχουν σχέση με το φως και με τις ποσοτικές σχέσεις αυτών χωρίς να υπεισέρχεται στην ερμηνεία της φύσεως αυτών των φαινομένων. Δηλαδή θεωρεί το φως ως ένα σύνολο από φωτεινές ακτίνες που διαδίδονται σύμφωνα με την αρχή του ελαχίστου χρόνου, όπως την διατύπωσε το 1650 ο Γάλλος μαθηματικός Πιέρ ντε Φερμά. Σύμφωνα με αυτή την αρχή όταν το φως διαδίδεται από ένα σημείο του χώρου σε ένα άλλο, ακολουθεί τη διαδρομή για την οποία απαιτείται ο ελάχιστος χρόνος. Συνέπεια της παραπάνω αρχής αποτελεί η διαπίστωση ότι μέσα σε κάθε ομοιογενές υλικό το φως ακολουθεί ευθύγραμμη πορεία διάδοσης που όμως είχε διατυπώσει πρώτος στην αρχαιότητα ο Ήρων. Φαινόμενα που ερμηνεύονται στα πλαίσια της Γεωμετρικής Οπτικής είναι η ανάκλαση και η διάθλαση του φωτός. Όταν μια ακτίνα φωτός χτυπά σε μια επιφάνεια που διαχωρίζει δύο μέσα τότε διαιρείται σε μια ανακλώμενη και μια διαθλώμενη ακτίνα. Όλοι έχουμε δει εικόνες να καθρεπτίζονται

σε γυαλί , σε μέταλλο ακόμα και σε ήρεμα νερά. Επίσης όλοι έχουμε παρατηρήσει το οπτικό φαινόμενο που λαμβάνει χώρα όταν μια ράβδος βυθίζεται μέσα σε νερό. Η ευθεία ράβδος μοιάζει σπασμένη κάτω από την επιφάνεια του νερού.

3.2.1 Ανάκλαση

Μια ακτίνα φωτός που χτυπά πάνω σε μια ευθεία επιφάνεια ανακλάται υπό γωνία (που σχηματίζεται από την ανακλώμενη ακτίνα και τον κάθετο άξονα στο σημείο πρόσπτωσης της επιφάνειας) ίση με τη γωνία πρόσπτωσης (που σχηματίζεται κατά αντίστοιχο τρόπο)

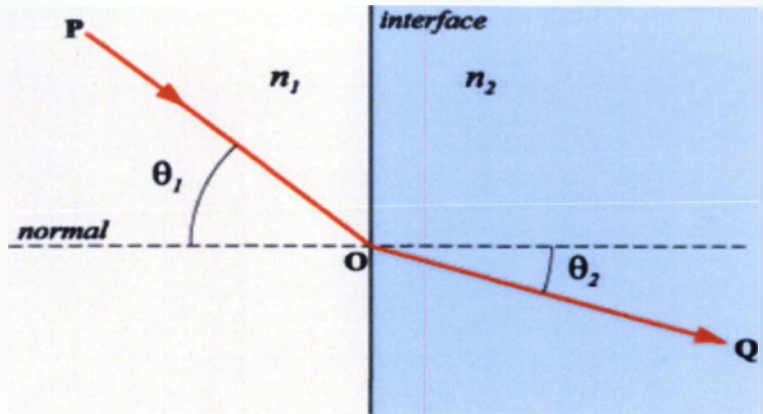
- Νόμος Ανάκλασης : Γωνία πρόσπτωσης (i) = Γωνία ανάκλασης (r)



3.2.2 Διάθλαση

Μια ακτίνα φωτός διαθλάται υπό διαφορετική γωνία από αυτή της γωνίας πρόσπτωσης (οι γωνίες σχηματίζονται από τις ακτίνες και τον κάθετο άξονα στο σημείο πρόσπτωσης της επιφάνειας). Η διάθλαση ακολουθεί το νόμο του Snell ή αλλιώς νόμο διάθλασης.

- Νόμος Snell: $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$.



Γενικά, ο δείκτης διάθλασης n για συνηθισμένα οπτικά μέσα δίνεται παρακάτω :

- Αέρας (κενό) = 1
- Νερό = 1.33
- Γυαλί πυριτίου = 1.444
- Σύνθετες γυαλί = 1.52

Το φως διαθλάται επειδή θα έχει μικρότερη ταχύτητα v σε ένα μέσο με υψηλότερο δείκτη διάθλασης (πυκνότερο), γεγονός που περιγράφεται από την παρακάτω σχέση.

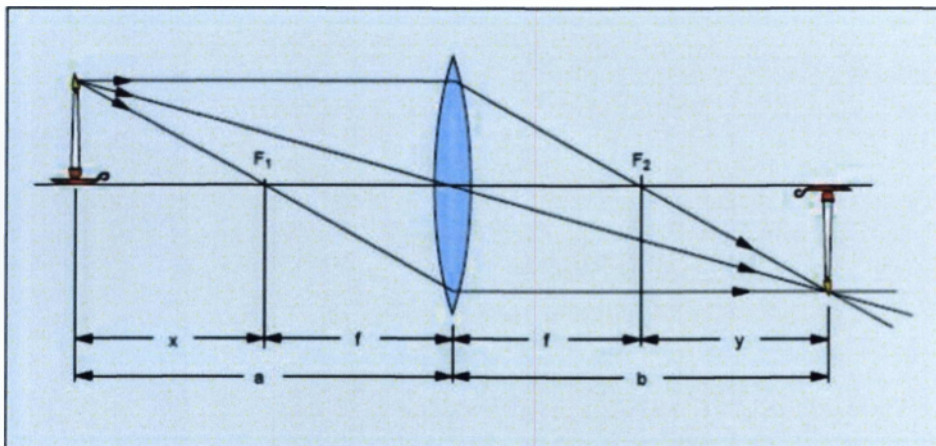
$$v = \frac{c}{n_f} \Rightarrow n_f = \frac{c}{v} \Rightarrow n_f \geq 1$$

Όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό (299.792.458 m/s). Ο δείκτης διάθλασης n_f εξαρτάται από το μήκος κύματος λ ως εξής :

$$n_f = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}$$

3.2.3 Διάθλαση μέσα σε φακό

Η πιο σημαντική εφαρμογή της Γεωμετρικής οπτικής είναι στον τομέα της τεχνολογίας οπτικών ειδώλων (κιάλια, κάμερες κτλ.) και πιο ειδικά στη διαδικασία σχεδιασμού οπτικών φακών. Οι φακοί και οι κοίλοι καθρέπτες χρησιμοποιούνται πάνω από 300 χρόνια ως βασικά στοιχεία απεικόνισης. Όταν ακτίνες φωτός από μια πηγή προσπίπτουν στην επιφάνεια ενός φακού ή ενός κοίλου καθρέπτη, θα ανακλαστούν ή θα διαθλαστούν διαφορετικά, ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης τους. Κάτω από τις πιο ιδανικές συνθήκες, οι περισσότερες ακτίνες μπορούν να εσπαστούν σε ένα και μοναδικό σημείο. Αν η πηγή βρίσκεται πολύ μακριά ή οι ακτίνες είναι παράλληλες μεταξύ τους ή και τα δύο, το φως θα συγκεντρωθεί στο σημείο εστίασης (F) του φακού ή του καθρέπτη. Η απόσταση μεταξύ του κεντρικού σημείου του φακού και του σημείου εστίασης ονομάζεται πλάτος εστίασης (f).



- Οι παρακάτω τύποι μπορούν να εφαρμοστούν :

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

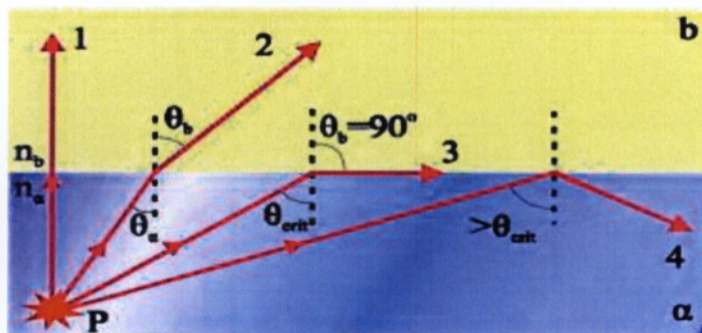
$$x \cdot y = f^2$$

3.3 Ολική ανάκλαση

Αν μια ακτίνα που ταξιδεύει σε ένα πυκνό οπτικό μέσο n_2 πέσει σε μια διαχωριστική επιφάνεια ενός λιγότερο πυκνού μέσου n_1 ($n_2 > n_1$) και η γωνία πρόσπτωσης αυξηθεί, η γωνία ανάκλασης θα πλησιάσει τις 90 μοίρες. Αν η γωνία πρόσπτωσης ξεπεράσει την οριακή τιμή κατά την οποία η γωνία ανάκλασης είναι 90 μοίρες, τότε θα έχουμε την εμφάνιση του φαινομένου της ολικής ανάκλασης. Τα παραπάνω διαφαίνονται και από τον τύπο :

$$n_2 \sin \beta = n_1 \sin 90^\circ \Rightarrow$$

$$\sin \beta = \frac{n_1}{n_2}$$



3.4 Ολική ανάκλαση μέσα σε οπτική ίνα

Η ολική ανάκλαση μπορεί να παρατηρηθεί εύκολα μέσα σε ένα πρίσμα ή σε ένα διαφανές γυαλί γεμάτο με νερό. Η αρχή διάδοσης του φωτός μέσα σε μια οπτική ίνα, βασίζεται στην αρχή της ολικής ανάκλασης. Μέσα σε μια οπτική ίνα, υπάρχουν δυο μέσα διάδοσης (ο πυρήνας και ο μανδύας) με δείκτες διάθλασης που διαφέρουν ελάχιστα. Οι πιο συνηθισμένες τιμές είναι $n_1 = 1.47$ και $n_2 = 1.46$, οι οποίες μας δίνουν κρίσιμη γωνία $i = 83.8$ μοίρες, η παραπάνω γωνία ονομάζεται αριθμητικό άνοιγμα.

3.5 Σκέδαση Rayleigh και φως Tyndall

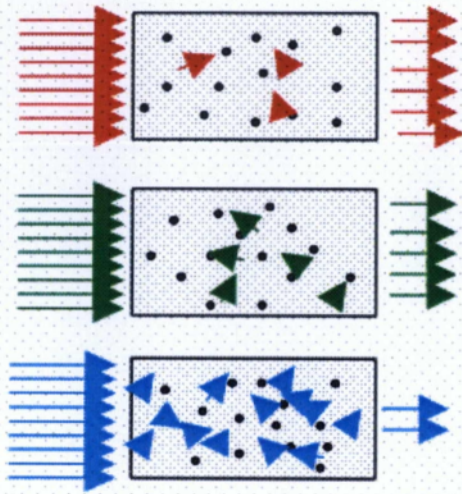
Σε ένα άμορφο υλικό, όπως το γυαλί, η πυκνότητα του υλικού δεν είναι ομοιόμορφη σε όλο τον όγκο του. Υπάρχουν σημεία στα οποία μπορεί να παρατηρήσουμε τοπικές αλλαγές στην πυκνότητα. Το ίδιο ισχύει για τα αέρια και τα υγρά. Επιπλέον, δεν είναι δυνατό να κατασκευαστεί ένα απολύτως καθαρό υλικό. Το γυαλί ποτέ δεν πρόκειται να είναι διάφανο 100 %. Μια ακτίνα που ταξιδεύει μέσα σε ένα τέτοιο υλικό θα σκεδαστεί προς διαφορετικές κατευθύνσεις (π.χ. μια ακτίνα ηλιακού φωτός μέσα σε ένα δωμάτιο με καπνό). Το φαινόμενο αυτό που ονομάζεται σκέδαση Rayleigh, οφείλεται στην παρουσία μικρών σωματιδίων στα οποία προσπίπτει το φως και σκεδάζεται προς όλες τις δυνατές κατευθύνσεις. Το φως που δημιουργείται λόγω αυτής της σκέδασης ονομάζεται φως Tyndall. Η υδροξυλομάδα (OH-), τα ιόντα μετάλλων και άλλου τύπου «ακαθαρσίες» προκαλούν το παραπάνω φαινόμενο μέσα σε μια οπτική ίνα.

Στη σκέδαση Rayleigh οφείλει ο ουρανός το μπλε χρώμα του ή το κόκκινο κατά την ανατολή και τη δύση. Αυτά τα χρωματικά φαινόμενα οφείλονται στη σκέδαση του φωτός από τα διάφορα μόρια του αέρα.

Η σκέδαση του φωτός (S) είναι ανάλογη του μήκους κύματος (λ) ως εξής :

$$S \propto \frac{1}{\lambda^4}$$

Στην ατμόσφαιρα, το φως μικρού μήκους κύματος (μπλε) σκεδάζεται περίπου 3 με 4 φορές περισσότερο από το φως μεγάλου μήκους κύματος (κόκκινο), γεγονός που δίνει στον ουρανό το χρώμα του ανάλογα με τη θέση του ήλιου. Η σκέδαση Rayleigh παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην επιλογή του μήκους κύματος στις τηλεπικοινωνίες οπτικών ινών. Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος τόσο μικρότερη είναι η σκέδαση Rayleigh. Μεγάλα σωματίδια όπως η σκόνη σκεδάζουν το φως σε μικρότερες γωνίες (περισσότερο ή λιγότερο ευθεία). Αν το σωματίδιο είναι αρκετά μεγάλο, ενδέχεται να λειτουργήσει σαν καθρέφτης και να ανακλάσει το φως προς τα πίσω. Το ουράνιο τόξο αποτελεί παράδειγμα αυτού του φαινομένου.



Η ένταση της
σκεδαζόμενης
ακτινοβολίας
αυξάνεται
από το κόκκινο
προς το ιώδες

με τη σειρά που
εμφανίζονται οι
ακτινοβολίες
χρώματα στο φάσμα



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΤΡΟΠΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Για την κατασκευή οπτικών ινών μέσης και χαμηλής απώλειας έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι. Εδώ θα πρέπει να αναφέρουμε τη τεχνολογία εμποτισμού - εναπόθεσης οξειδίων του πυριτίου (DDS = Doped Deposited Silica) που ήταν η πρώτη μέθοδος με την οποία λήφθηκε η καθαρότητα του γυαλιού που χρειαζόταν για οπτικές ίνες χαμηλής απώλειας. Οι οπτικές ίνες, γενικά, κατασκευάζονται τοποθετώντας μια ράβδο καθαρού γυαλιού σε φούρνο και θερμαίνοντας τη μια άκρη (αιχμή) μέχρι που να μαλακώσει το γυαλί. Στη συνέχεια δημιουργείται η ίνα (τράβηγμα της ίνας) μαζί με το περίβλημα όπου οι γεωμετρικές σχέσεις μεταξύ του πυρήνα και του περιβλήματος διατηρούνται με αρκετή ακρίβεια αν και η ελάττωση της διαμέτρου μπορεί να είναι μέχρι και 300/1. Οι κρίσιμες ιδιότητες των οπτικών ινών είναι:

- 1) οπτικές
- 2) διαστασιακές
- 3) αντοχής

Η απροστάτευτη γυάλινη ίνα είναι συνεπώς ακατάλληλη για πρακτικές χρήσεις. Είναι αναγκαίο, όπως συμβαίνει με τους χάλκινους αγωγούς και τους κυματοδηγούς, να κατασκευάζονται οι ίνες αυτές σε μορφή οπτικών καλωδίων για να βρουν χρήση στο πεδίο εφαρμογών. Οι οπτικές ίνες, αμέσως μετά τη κατασκευή τους είναι δυνατόν να παρουσιάζουν δυνάμεις αντοχής μέχρι 400 Kpsi. Όμως, με την έκθεση σε υγρασία, αυτές οι ίνες μπορούν να υποστούν σημαντική υποβάθμιση στην αντοχή. Για το λόγο αυτό, αμέσως μετά το «τράβηγμα», οι οπτικές ίνες επιχρίονται (καλύπτονται επιφανειακά) με πλαστικό υλικό που χρησιμοποιείται για να προστατεύσει και διατηρήσει την επιφάνεια τους καθαρή. Ιστορικά, αυτή η προστασία αναφέρεται ως επίχριση (<250μm) ή κύριος απορροφητήρας κραδασμών (≥250μm). Κατά το σχηματισμό της ίνας σε μορφή καλωδίου αποκτάται περαιτέρω κατασκευαστική αντοχή.

Ουσιαστικές βελτιώσεις στις οπτικές ίνες προκύπτουν, όταν κατασκευάζονται από πολυμερή υλικά. Συγκεκριμένα τα υλικά παρουσιάζουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Μεγαλύτερη αντίσταση σε υπερβολικές θερμοκρασίες και στις μηχανικές αποξέσεις, καθώς και αντοχή στην υγρασία και τα διάφορα χημικά.
- Οι απώλειές τους για το μεταβιβαζόμενο οπτικό σήμα είναι περίπου το 1/10 των απωλειών που παρουσιάζουν διαθέσιμες μέχρι τώρα ίνες συνθετικών υλικών. Αυτές οι οπτικές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τοπικά δίκτυα (LANs) για επικοινωνίες με αποστάσεις επαναληπτών 1500 μέτρα περίπου αντί 150 μέτρων που απαιτούν οι πλαστικές ίνες μεταξύ επαναληπτών

4.2 Τρόποι κατασκευής οπτικών ινών

Υπάρχουν πέντε τρόποι κατασκευής μιας οπτικής ίνας:

1) Διεργασία εξωτερικής οξείδωσης από φάση ατμών (Outside Vapor-Phase Oxidation Process).

Αυτή η μέθοδος αναπτύχθηκε πρώτα από την εταιρία Corning Glass Works και περιλαμβάνει την εναπόθεση γυαλιού υψηλών οξειδίων του πυριτίου από πηγές ατμού-φάσης (vapor-phase sources). Όταν αφαιρεθεί ο άξονας ο σωλήνας με την «καπνιά» τινάσσεται και στη συνέχεια «τραβιέται» η ίνα.

2) Τροποποιημένη διεργασία χημικής εναπόθεσης ατμού (Modified Chemical Vapor Deposition (MCVD) Process).

Καλείται επίσης διεργασία IVPO. Η διεργασία αυτή ανακαλύφθηκε από την εταιρία Bell Laboratories. Σε αυτήν την περίπτωση, το γυαλί της επιθυμητής σύνθεσης εναποτίθεται εσωτερικά του σωλήνα οξειδίου του πυριτίου, στρώμα μετά από στρώμα μέσω μιας διεργασίας φλόγας - υδρόλυσης στο μήκος ενός άξονα. Όταν η εναπόθεση συμπληρωθεί, το υλικό τινάσσεται και αφαιρείται ο άξονας. Ο σωλήνας έπειτα λιώνει και σχηματίζει ταυτόχρονα μια προκατασκευασμένη ράβδο.

3) Διεργασία αξονικής εναπόθεσης από τη φάση ατμού (Vapor - Phase Axial Deposition (VAD) Process).

Αυτή η μέθοδος αναπτύχθηκε από την εταιρία Nippon Telegraph and Telephone Public Corporation. Είναι όμοια με την διεργασία ΟVPO εκτός από την εναπόθεση που γίνεται στην άκρη του αναπτυσσομένου κυλίνδρου «καπνιάς».

4) Διεργασία χημικής εναπόθεσης πλάσματος από ατμό (Plasma Chemical Vapor Deposition (PCVD) Process).

Η πρώτη εταιρία που ασχολήθηκε με αυτή τη διαδικασία είναι η Philips Company. Σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιείται το μικροκομματικό πλάσμα για τη διέγερση και εναπόθεση υαλώδους υλικού απευθείας στο εσωτερικό του κυλίνδρου οξειδίων του πυριτίου.

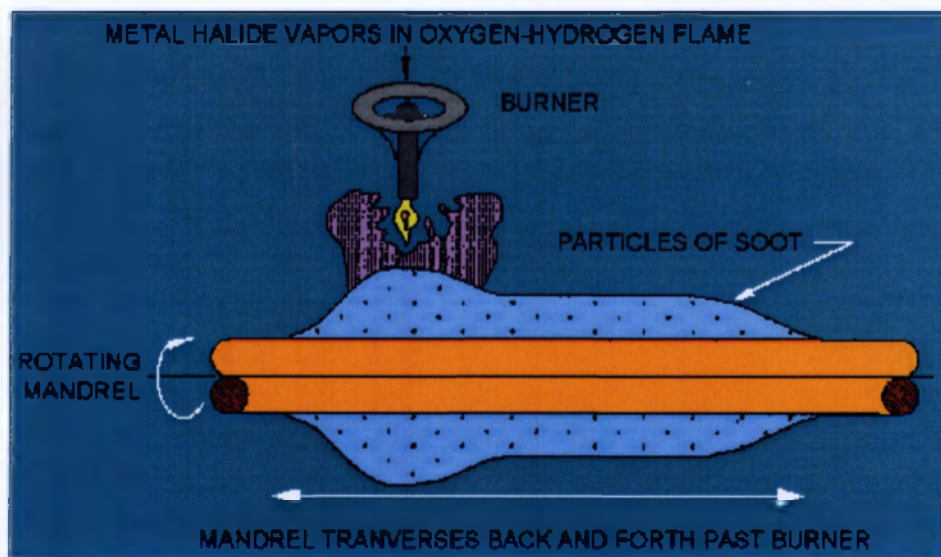
5) Διεργασία απευθείας τήξης.

Κατά τη διεργασία αυτή μια οπτική γυάλινη ίνα με μεταβαλλόμενη κατανομή δείκτη διάθλασης (τύπος ίνας βαθμιαίου δείκτη) κατασκευάζεται με τη μέθοδο διπλής χοάνης όπου χρησιμοποιούνται δυο ειδών πολλαπλές γυάλινες συνιστώσες διαφορετικών δεικτών. Το γυαλί με τον υψηλότερο δείκτη διάθλασης σχηματίζει τον πυρήνα, ενώ το άλλο σχηματίζει το περίβλημα.

4.2.1 Η διεργασία ΟVPO-Πλευρική εναπόθεση

Η μέθοδος της πλευρικής εναπόθεσης είναι μια περίπτωση της διεργασίας ΟVPO, όπου τα υλικά σε ατμώδη κατάσταση εναποτίθενται από ένα καυστήρα πάνω στη περιστρεφόμενη εγκάρσια ράβδο ώστε να σχηματίσουν τις συνθέσεις του πυρήνα και του γυάλινου περιβλήματος. Ένα ισχυρό πλεονέκτημα της διεργασίας αυτής είναι η δυνατότητα που έχει για ακριβή έλεγχο της κατανομής του δείκτη διάθλασης στην περιοχή του πυρήνα, επειδή περισσότερα από 200 ατομικά γυάλινα στρώματα εναποτίθενται για να αποτελέσουν τον πυρήνα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την κατασκευή οπτικών ινών πολλαπλού ρυθμού με μεγάλο εύρος ζώνης φθάνοντας τα 3.0 GHz*Κm.

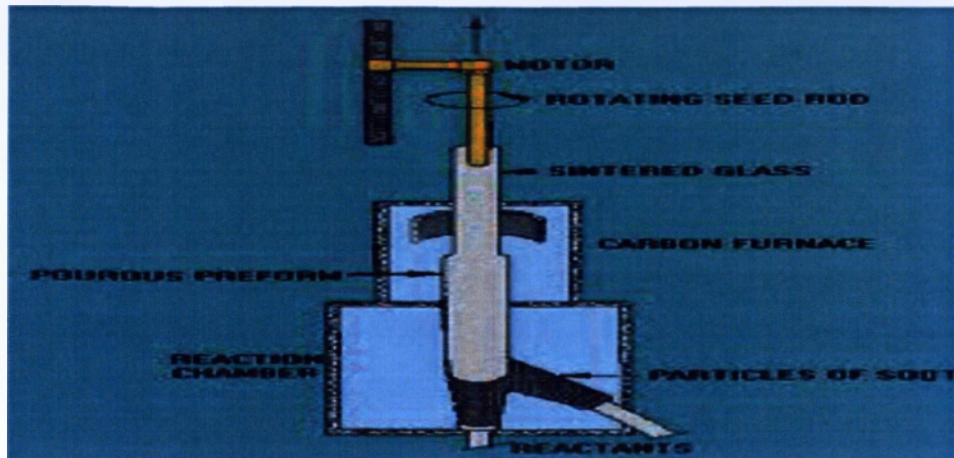
Ένα πρόβλημα που μπορεί να παρουσιαστεί στη διεργασία αυτή σχετίζεται με την κεντρική οπή που αφήνεται μετά την αφαίρεση του γεμίσματος. Αυτό συνεργεί στα σπασίματα της ίνας λόγω τάνυσης(τεντώματος), ιδιαίτερα όπου το αριθμητικό άνοιγμα (NA) της ίνας είναι μεγάλο. Για αντιστάθμιση του προβλήματος αυτού χρησιμοποιούνται τεχνικές, όπως είναι (α) η ισορροπημένη διαστολή σε όλο το μήκος της ίνας, (β) το κλείσιμο της οπής κατά τη διάρκεια του κύκλου της στερεοποίησης ή (γ) συνδυασμός της στερεοποίησης και του «τραβήγματος» της ίνας. Το αριθμητικό άνοιγμα, που αναφέρθηκε πιο πάνω, περιγράφει τη συμπεριφορά ενός οπτικού καλωδίου όταν γίνεται ζεύξη με πηγές φωτός, φωτοανιχνευτές ή άλλες οπτικές συνιστώσες (δηλαδή σε συνδέσεις συγκολλήσεως και σε συνδετήρες). Το αριθμητικό άνοιγμα ορίζεται ως το ημίτονο της γωνίας μεταξύ του άξονα της ίνας και ενός στοιχείου της επιφάνειας του κώνου που περιβάλλει όλο το φως που εξέρχεται από τον πυρήνα της ίνας μετά από ένα μήκος δύο μέτρων.



4.2.2 Η διεργασία OVPO-Αξονική εναπόθεση (VAD)

Ένας άλλος τρόπος διεργασίας OVPO είναι η VAD που αναπτύχθηκε στα εργαστήρια της NTT. Κατά την διεργασία, ο γυάλινος πυρήνας και μερικές φορές το υλικό του περιβλήματος εναποτίθενται ταυτόχρονα σε μια αξονική κατεύθυνση για να σχηματίσουν μια προκατασκευη ίνας σε σχήμα ράβδου. Χρησιμοποιώντας αυτή τη

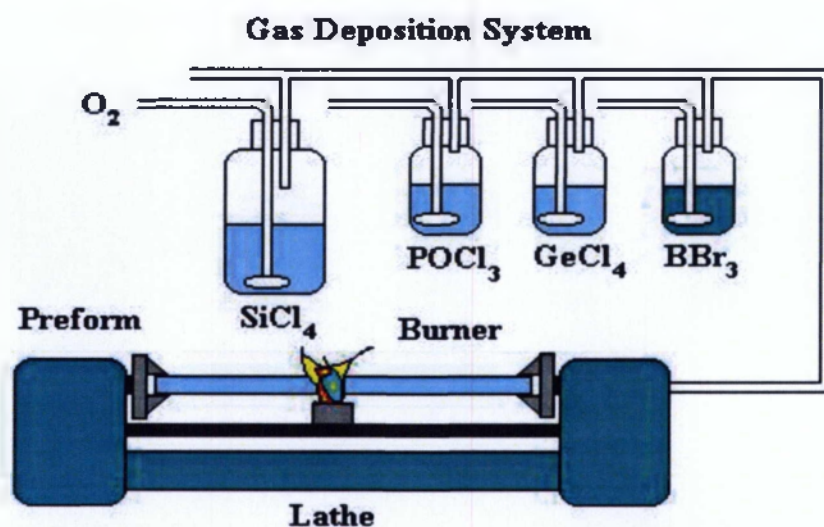
διεργασία είναι δυνατόν να αποφευχθεί η κεντρική οπή και έτσι κατασκευάζονται εξαιρετικές ίνες πολλαπλού ρυθμού και χαμηλών απωλειών. Μερικά προβλήματα με τη μέθοδο αυτή είναι ο δύσκολος έλεγχος της κλίσης του δείκτη διάθλασης, καθώς και ο σχετικά μικρός ρυθμός εναπόθεσης του υλικού.



4.2.3 Η διεργασία MCVD ή IVPO

Η διεργασία MCVD, που ονομάζεται επίσης και διεργασία εσωτερικής οξειδωσης από φάση ατμών (IVPO = Inside Vapor-Phase Oxidation Process), περιλαμβάνει εναπόθεση στρωμάτων γυαλιού με ατμό στα εσωτερικά τοιχώματα ενός σωλήνα (συνήθως από υαλώδες πυρίτιο). Μπορεί να δημιουργείται καπνιά, η οποία εναποτίθεται στα τοιχώματα του σωλήνα και τινάσσεται σε μια διαδοχική φάση. Αφού συμπληρωθεί η εναπόθεση του γυαλιού, η κεντρική τρύπα που μένει απαλείφεται με θέρμανση και στη συνέχεια η ίνα «τραβιέται». Εξαιρετικές ίνες χαμηλής εξασθένησης, μπορούν να ληφθούν με αυτή τη διεργασία σε υψηλούς επιλεκτικούς ρυθμούς που επηρεάζουν ευνοϊκά και το κόστος. Μια μεγάλη επιλογή από γυάλινες συνθέσεις είναι δυνατή γιατί η κεντρική οπή μπορεί να κλείσει όταν το διάκενο είναι ακόμα ζεστό. Έτσι, αποκλείει οποιεσδήποτε ελεύθερες επιφάνειες στις οποίες τανύσεις και καταπονήσεις θα μπορούσαν να δημιουργηθούν κατά την ψύξη. Κατάλληλες συνθέσεις από GeO_2 , P_2O_5 , SiO_2 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τους γυάλινους πυρήνες ινών πολλαπλού ρυθμού-βαθμιαίου δείκτη ώστε να επιτευχθούν χαμηλές απώλειες και να διατηρούνται μεγάλα εύρη ζώνης σε

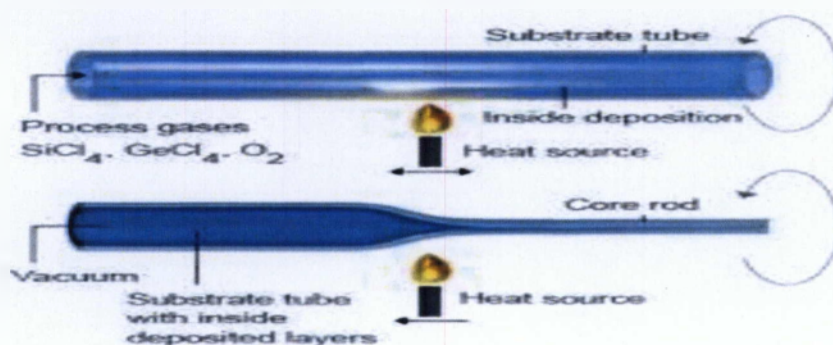
πολλαπλά μήκη κύματος. Προσθέσεις του P_2O_5 είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για να ελαχιστοποιήσουν τη διασπορά του δείκτη διάθλασης. Για παράδειγμα, σε μια ορισμένη διεργασία και για ορισμένο υλικό που περιλαμβάνει ίσες μοριακές στάθμες P_2O_5 και GeO_2 , ενώ στα 900nm η εξασθένηση είναι 1,6dB/Km και το γινόμενο εύρους ζώνης επί απόσταση είναι 850 MHz*Km, στα 1300nm η εξασθένηση είναι 0,70dB/Km και το αντίστοιχο γινόμενο εύρους ζώνης επί απόσταση μπορεί να είναι 700 MHz*Km ή 450 MHz*Km (εξαρτώμενο από την κατανομή του δείκτη διάθλασης). Αν και η χρήση γυάλινων σωλήνων στη διεργασία IVPO βοηθάει στο να παρέχει καθαρό κλειστό περιβάλλον, εντούτοις παρουσιάζει προβλήματα σχετικά με τη γεωμετρία της ίνας, την εξασθένηση (παρουσία του υδροξυλίου -OH και των άλλων προσμίξεων), το εύρος ζώνης (κατανομή του n) και την αντοχή. Είναι δυνατόν να ελαττωθούν αυτές οι επιδράσεις στη συμπεριφορά της ίνας, αλλά με τίμημα το υψηλότερο κόστος. Εναλλακτικές διεργασίες κατασκευής του σωλήνα μπορούν να υιοθετηθούν από τη OVPO τεχνολογία για οικονομικές λύσεις.



4.2.4 Η διεργασία PCVD

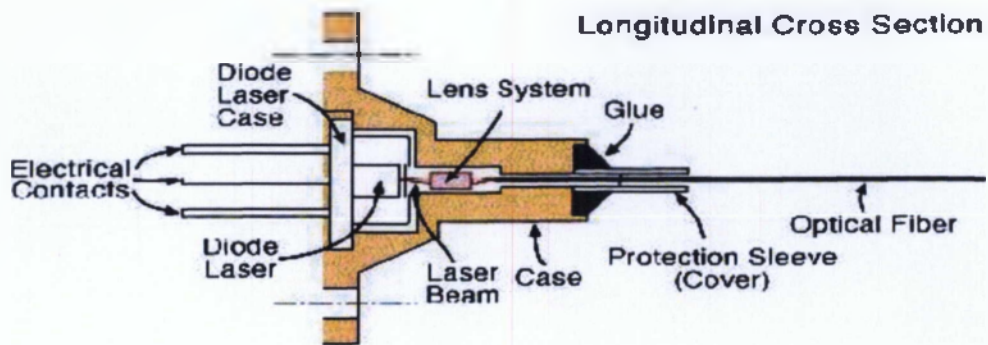
Η διεργασία PCVD έχει μερικά κοινά χαρακτηριστικά με άλλες μεθόδους χημικής εναπόθεσης για την προπαρασκευή της ίνας. Στοιχεία χημικής αντίδρασης σε πτητική κατάσταση εισέρχονται στο σωλήνα οξειδίου του πυριτίου όπου αντιδρούν σε μία ζώνη που κινείται μπρος-πίσω κατά μήκος του σωληνοειδούς περιβλήματος.

Στην περίπτωση της διεργασίας PCVD, ο σωλήνας «σαρώνεται», όχι από τον καυστήρα, αλλά από ένα μικροκομμητικό συντονιστή (resonator) και το φούρνο. Έτσι τα αέρια μέσα στο σωλήνα υφίστανται ιονισμό από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα της διεργασίας PCVD είναι ότι το πλάσμα και επομένως η ζώνη εναπόθεσης μπορούν να κινηθούν με μεγάλη ταχύτητα. Αυτό επιτρέπει το σχηματισμό λεπτού στρώματος εναπόθεσης με πάχη μικρότερα του 1μm στο κάθε πείραμα. Σε δύο ώρες είναι δυνατόν να εναποθετηθούν 3000 στρώματα 30cm με καλή προσέγγιση στην επιθυμητή κατανομή του δείκτη διάθλασης. Τα πλεονεκτήματα της διεργασίας αυτής περιλαμβάνουν γεωμετρική και συνθετική ευελιξία (για παράδειγμα, πολύ υψηλά αριθμητικά ανοίγματα της τάξης των 0.4-0.5 και πυρήνες ινών με μεγάλη διάμετρο μπορούν να κατασκευαστούν) καθώς και ελάχιστο αριθμό βημάτων κατά την κατασκευή οπτικών ινών πολλαπλού ρυθμού-βαθμισίου δείκτη. Ένα μειονέκτημα είναι οι χαμηλές ταχύτητες «τραβήγματος» της τάξης των 0.2-0.3 m/sec για μια ίνα 100-400 MHz*Km.



4.2.5 Η διεργασία απευθείας τήξης

Μια απλοποιημένη σχηματική διάταξη της διεργασίας παραγωγής οπτικής ίνας με απευθείας τήξη σε διπλή χοάνη. Γυάλινες ράβδοι συνήθως γίνονται από ξεχωριστές καθαρές τήξεις υλικών για πυρήνα και η συνισταμένη ίνα «τραβιέται» από το κάτω τμήμα της διάταξης.



4.3 Η υποβάθμιση του οπτικού σήματος

Το οπτικό σήμα κατά τη διάδοση του μέσα στην οπτική ίνα υφίσταται εξασθένιση (attenuation) και διασπορά (dispersion). Τόσο η εξασθένιση όσο και η διασπορά παίζουν σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό ενός οπτικού συστήματος. Από τη μια πλευρά, η εξασθένιση καθορίζει τη μέγιστη απόσταση μεταξύ μεταδότη και ανιχνευτή και από την άλλη, ο μηχανισμός της διασποράς προκαλεί διεύρυνση του παλμού με αποτέλεσμα οι διαδοχικοί παλμοί να αλληλεπικαλύπτονται και να παρουσιάζονται λάθη στο τελικό στάδιο της ανίχνευσης. Γενικά μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η εξασθένιση της ισχύος στο εσωτερικό μιας οπτικής ίνας περιγράφεται από τη σχέση:

- $Dp / dz = -A \cdot P$

όπου "A" είναι ο συντελεστής εξασθένισης (μονάδα μέτρησης το 1/m) και "P" η οπτική ισχύς. Το σύμβολο "A" στην παραπάνω εξίσωση συμπεριλαμβάνει όχι μόνο την απορρόφηση από το υλικό της ίνας αλλά και άλλες πηγές εξασθένισης της ισχύος. Δεδομένου ότι "P" είναι η ισχύς εισόδου σε μια οπτική ίνα μήκους "L", η ισχύς εξόδου θα δίνεται από τη σχέση:

- $P_{out} = P_{in} \cdot \exp(-A \cdot L)$

4.3.1 Εξασθένηση

Διακρίνουμε δύο είδη εξασθένησης:

Εξασθένηση που σχετίζεται με το υλικό της ίνας (material attenuation – M.A.) και εξασθένηση κατασκευαστικής φύσεως (structural attenuation – S.A.) Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν η απορρόφηση που εξαρτάται από το υλικό (material absorption – M.A.) και οι απώλειες λόγω σκέδασης (scattering losses). Η δεύτερη περιλαμβάνει τις απώλειες λόγω κύρτωσης της ίνας (bending loss), τις απώλειες λόγω συγκολλήσεων (splicing loss) και τις απώλειες στους συζεύκτες (coupling loss).

1. Για την εξασθένηση M.A.(Material absorption), τρεις είναι οι μηχανισμοί που την προκαλούν:

- Ατέλειες στη δομή του υλικού της ίνας, όπως μόρια που λείπουν ή μεγάλη πυκνότητα ατόμων.
- Προσμίξεις στο υλικό της ίνας (κυρίως ιόντα σιδήρου, χρωμίου, κοβαλτίου, χαλκού και υδροξυλίου (-OH)), οι οποίες προκαλούν εξασθένηση 1-10 dB/Km για κάθε 10ppb.
- Η ενδογενής απορρόφηση από τα βασικά άτομα που συνιστούν το υλικό της ίνας. Στο υπεριώδες εμφανίζονται οι ηλεκτρονικές ζώνες απορρόφησης, ενώ στο κοντινό υπέρυθρο οι ζώνες ατομικών ταλαντώσεων. (Οι τελευταίες οφείλονται σε απορρόφηση ενέργειας από το χημικό δεσμό των ατόμων της ίνας). Για μήκη κύματος πάνω από τα 1.2μm κυριαρχεί η απορρόφηση στο υπέρυθρο και η απορρόφηση εξαιτίας του (-OH).

Η σοβαρότερη αιτία απωλειών στις οπτικές ίνες, είναι η σκέδαση. Η σκέδαση συμβαίνει, όταν το φως προσπέσει πάνω σε συγκεκριμένα άτομα του υλικού. Το φως που σκεδάζεται με γωνίες μεγαλύτερες της κρίσιμης γωνίας για την οπτική ίνα, απορροφάται από το μανδύα ή σκεδάζεται προς όλες τις κατευθύνσεις, ακόμη και πίσω προς την πηγή. Η σκέδαση αποτελεί και αυτή συνάρτηση του μήκους κύματος. Είναι αντιστρόφως ανάλογη της τέταρτης δύναμης του μήκους κύματος. Έτσι, για διπλάσιο μήκος κύματος η σκέδαση μειώνεται στο 1/16. Επομένως, για μετάδοση μεγάλων αποστάσεων, είναι προτιμότερη η χρήση του μεγαλύτερου δυνατού μήκους κύματος, για ελάχιστες απώλειες και μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ των

επαναληπτών (αναμεταδοτών) σήματος. Τα συστήματα οπτικών ινών λειτουργούν σε παράθυρα μεταξύ των ζωνών απορρόφησης στα 850nm, 1300nm, 1550nm και 1625nm, εκεί όπου η φυσική επιτρέπει την εύκολη κατασκευή lasers και φωτοανιχνευτών. Οι πλαστικές ίνες έχουν μικρότερο παράθυρο μηκών κύματος, το οποίο πρακτικά περιορίζεται γύρω από τα 660nm.

- **Οι απώλειες σκέδασης προέρχονται από:**

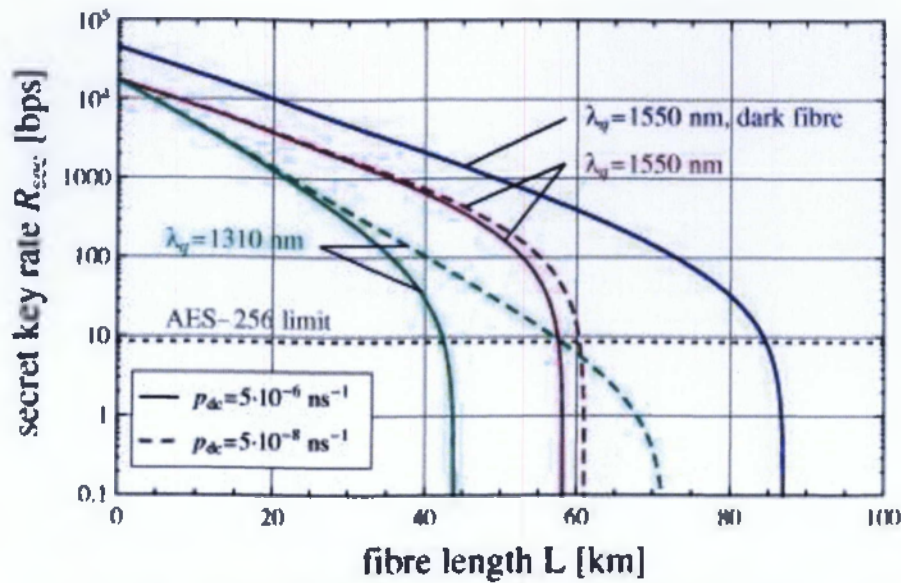
1. Μικροσκοπικές μεταβολές της πυκνότητας του υλικού της ίνας. Αυτές προκαλούν διακυμάνσεις του δείκτη διάθλασης της ίνας με Rayleigh.
2. Δομικές ανομοιογένειες και ατέλειες. Με τις νέες κατασκευαστικές μεθόδους ο ρόλος τους στις απώλειες έχει περιοριστεί κατά πολύ.

Γενικά, μπορούμε να πούμε ότι για μήκος κύματος μικρότερο από 1μm, ο κυριότερος μηχανισμός απωλειών είναι η σκέδαση Rayleigh ενώ για λ μεγαλύτερο από 1μm κυριαρχεί η απορρόφηση στο υπέρυθρο.

Ωστόσο, ένας θεμελιώδης εσωτερικός μηχανισμός απωλειών είναι οι **απώλειες σκέδασης Raman**, οι οποίες προκύπτουν από μικροσκοπικές διακυμάνσεις του δείκτη διάθλασης στον πυρήνα της οπτικής ίνας κατά τη διάρκεια της κατασκευής της. Οι διακυμάνσεις της πυκνότητας οδηγούν σε διακυμάνσεις στην τιμή του δείκτη διάθλασης του πυρήνα σε κλίμακα μικρότερη του οπτικού μήκους κύματος. Με την προσθήκη διαφόρων προσμίξεων στον πυρήνα, αυξάνεται το ποσοστό των απωλειών σκέδασης Rayleigh μιας και το υλικό γίνεται όλο και πιο ανομοιογενές. Μια καλή προσέγγιση του **συντελεστή σκέδασης Rayleigh** δίνεται από τον τύπο :

$$\alpha_s \text{ (dB / km)} = \frac{(0.75 + 66\Delta n_{Ge})}{\lambda^4}$$

Τυπικές τιμές του α_s είναι 0,12 - 0,16dB/Km για $\lambda = 1,55\mu\text{m}$. Αυτές οι απώλειες περιορίζουν τελικά την απόσταση στην οποία μπορούν να μεταδοθούν σήματα και απαιτούν την ύπαρξη οπτικής ενίσχυσης

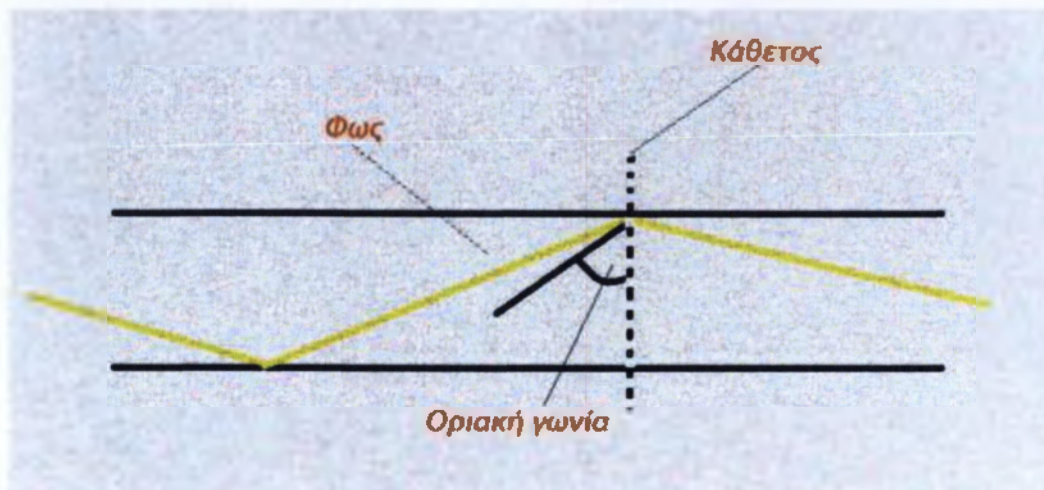


- Πίνακας εξασθένησης οπτικού σήματος συναρτήσει του μήκους κύματος

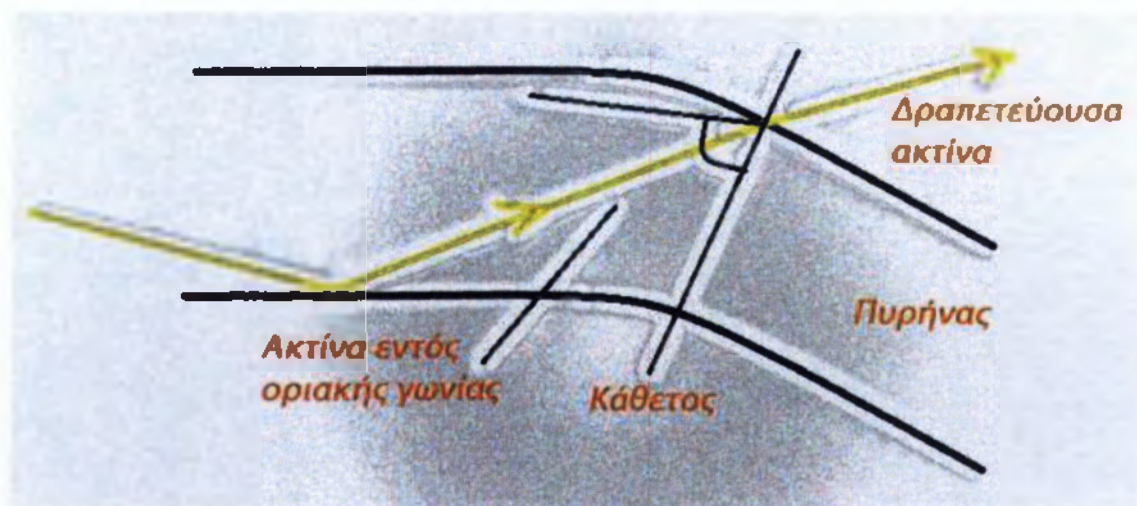
Είδος Ύψας	Διαστάσεις Πυρήνα/Μανδύα	Εξασθένηση (dB/km)
Μονότροπη	9/125	2 - 5 για $\lambda = 850$ nm 0,35 για $\lambda = 1300$ nm 0,21 για $\lambda = 1550$ nm
Πολύτροπη (βαθμιαίας μεταβολής)	50/125	4,00 για $\lambda = 850$ nm 2,50 για $\lambda = 1300$ nm
	62,5/125	6,00 για $\lambda = 850$ nm
	85/125	7,00 για $\lambda = 850$ nm
Πολύτροπη (βηματικής μεταβολής)	200/380	6,00 για $\lambda = 850$ nm
	300/440	6,00 για $\lambda = 850$ nm
PCS (γυάλινου πυρήνα με πλαστικό μανδύα)	200/350	10,00 για $\lambda = 790$ nm
	400/550	10,00 για $\lambda = 790$ nm
	600/900	6,00 για $\lambda = 790$ nm
Πλαστική	750	150 για $\lambda = 650$ nm
	1000	200 για $\lambda = 650$ nm

2. Εξασθένηση κατασκευαστικής φύσεως (structural attenuation – S.A.)

Μια αιχμηρή καμπή της ίνας μπορεί να προκαλέσει σημαντικές απώλειες καθώς και την πρόκληση μηχανικής αποτυχίας. Είναι πιο εύκολο να κάμψεις ένα μικρό κομμάτι οπτικής ίνας για να προκαλέσεις μεγάλες απώλειες από ότι ένα χιλιόμετρο οπτικής ίνας σε κανονική λειτουργία. Η ακτίνα που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα βρίσκεται έξω από την οριακή γωνία και επομένως ορθά διαδιδόμενη.



Αν τώρα ο πυρήνας καμφθεί όπως στο παρακάτω σχήμα η ακτίνα θα βρεθεί σε λάθος πλευρά της οριακής γωνίας και θα δραπετεύσει. Επομένως, πολύ συμπεσμένες κάμψεις είναι καλό να αποφεύγονται. Αλλά πως προσδιορίζουμε το πολύ συμπεσμένες; Η πραγματική απάντηση βρίσκεται στα χαρακτηριστικά του καλωδίου οπτικής ίνας. Μια γυμνή ίνα είναι ασφαλής εάν η ακτίνα κάμψης είναι τουλάχιστον 50mm. Όσο πιο συμπεσμένη είναι η καμπή τόσο μεγαλύτερες θα είναι οι απώλειες.



4.3.2 Διασπορά

Διασπορά είναι η επιμήκυνση των παλμών κατά τη διάδοση τους στο μέσον. Η υπερβολική επιμήκυνση προκαλεί εσφαλμένα bit (bit-errors) στον δέκτη, δηλαδή προκαλεί δυσκολία διάκρισης μεταξύ 0 και 1. Υπάρχουν 3 κύρια είδη διασποράς:

1. Διασπορά τρόπου μετάδοσης: Η διασπορά τρόπου μετάδοσης (modal dispersion) εμφανίζεται μόνο σε πολύτροπες ίνες και οφείλεται στο γεγονός ότι το οπτικό σήμα διαδίδεται εντός της ίνας με παραπάνω του ενός τρόπου διάδοσης. Με άλλα λόγια, το οπτικό σήμα κατά την διάδοση του εντός της πολύτροπής ίνας διασπάται σε διαφορετικές ακτίνες φωτός οι οποίες ακολουθούν διαφορετικούς δρόμους τεθλασμένων γραμμών. Κατά συνέπεια κάθε διαδρομή έχει και διαφορετική ταχύτητα. Η τιμή της διασποράς του τρόπου μετάδοσης αυξάνεται ανάλογα με το πλήθος των τρόπων μετάδοσης που υποστηρίζει ο κυματοδηγός. Άρα εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος του πυρήνα. Σε πολύτροπες ίνες βηματικού δείκτη, μια τυπική τιμή διασποράς είναι τα 30ns/Km, ενώ σε ίνες βαθμιαίου δείκτη η διασπορά του τρόπου μετάδοσης είναι μικρότερη του 1ns/Km.

2. Διασπορά υλικού (DM): Η διασπορά υλικού (material dispersion) ή χρωματική διασπορά (chromatic dispersion) εμφανίζεται τόσο σε πολύτροπες όσο και σε μονότροπες ίνες, και οφείλεται στο γεγονός ότι ο συντελεστής διάθλασης του πυρήνα εξαρτάται και από το μήκος κύματος της οδηγούμενης ακτίνας φωτός. Όταν το οπτικό σήμα του πομπού περιλαμβάνει περισσότερα από ένα μήκη κύματος τότε κάθε ένα από αυτά βλέπει διαφορετικό συντελεστή διάθλασης πυρήνα ($n = n(\lambda)$) και το αντίστοιχο μεταφερόμενο μέρος του σήματος κινείται με διαφορετική ταχύτητα ($u=c/n$) προκαλώντας διασπορά του οπτικού σήματος στο δέκτη. Πιθανόν το οπτικό σήμα να προέρχεται από τη σύνθεση διαφορετικών μηκών κύματος. Άλλωστε δεν υπάρχει ιδανική πηγή φωτός που να εκπέμπει φως συγκεντρώνοντας την ισχύ του σε ένα και μόνο μήκος κύματος. Από τη σχέση $u=c/n$ διαπιστώνουμε ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο δείκτης διάθλασης της ίνας, τόσο μειώνεται η ταχύτητα διάδοσης του κύματος. Επίσης γνωρίζουμε ότι κατά τη διάδοση κύματος σε οποιοδήποτε υλικό ισχύει σχέση $\lambda=u/f$ (για την διάδοση κύματος στο κενό ισχύει $\lambda=c/f$). Άρα συνδυάζοντας τις δύο σχέσεις καταλήγουμε στη $\lambda=u/f = c/(f \cdot n)$. Παρατηρούμε ότι όσο το μήκος κύματος του φωτός μεγαλώνει, τόσο πιο γρήγορα ταξιδεύει αφού ο δείκτης διάθλασης γίνεται μικρότερος.

3. Διασπορά κυματοδηγού (DW): Η διασπορά κυματοδηγού (waveguide dispersion) οφείλεται στη διαφορετική ταχύτητα μετάδοσης μεταξύ πυρήνα και μανδύα, λόγω της μικρής μεταξύ τους διαφοράς ως προς το συντελεστή διάθλασης. Εμφανίζεται κυρίως σε μονότροπες ίνες, όπου ένα μεγάλο μέρος της κυματοδηγούμενης οπτικής ενέργειας διέρχεται από το μανδύα, ενώ είναι ασήμαντη στις πολύτροπες ίνες .

4. Συνολική διασπορά (D): Ως συνολική διασπορά της μονότροπης ίνας ορίζουμε το άθροισμα της διασποράς υλικού και της διασποράς κυματοδηγού (total dispersion). Η συνολική διασπορά εξαρτάται τόσο από το μήκος κύματος της πηγής φωτός, όσο και από το υλικό της ίνας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°

ΚΟΛΛΗΣΗ ΚΑΙ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ (OPTICAL FIBER SPLICING)

5.1 Εισαγωγή

Για να συνδέσουμε τα διάφορα μέρη ενός οπτικού δικτύου επικοινωνιών, πρέπει να κολλήσουμε και να τερματίσουμε τα καλώδια οπτικών ινών και να ενώσουμε τους πομπούς και τους δέκτες. Οι κατασκευαστές συνήθως παράγουν καλώδια ινών με προκαθορισμένα μήκη 2, 4 και 6 km. Μόνο για δίκτυα μικρών αποστάσεων είναι εφικτό να χρησιμοποιήσουμε ένα καλώδιο μήκους 2-6 km. Σε δίκτυα μεγάλων αποστάσεων χρησιμοποιούνται πολλαπλά καλώδια μήκους 2-6 km, τα οποία ενώνονται μεταξύ τους με συγκεκριμένες τεχνικές κόλλησης. Οι τεχνικές αυτές έχουν σαν αποτέλεσμα δύο είδη κολλήσεων:

- Μόνιμη κόλληση

1. Fusion splicing (οι ίνες λιώνουν και στη συνέχεια συνδέονται). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως σε δίκτυα μεγάλων αποστάσεων

2. Mechanical splicing. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε μικρού μήκους indoor δίκτυα

- Ημι-μόνιμη κόλληση.

Αυτός ο τύπος κόλλησης χρησιμοποιείται σε δίκτυα των οποίων οι χρήστες κινούν τον εξοπλισμό τους συνεχώς ή σε δίκτυα τα οποία ανανεώνονται συνέχεια (π.χ. LAN).

Για μεγάλες αποστάσεις, απαιτείται συνήθως ενίσχυση του οπτικού σήματος. Η διαδικασία αυτή επιτελείται από ενισχυτές που ονομάζονται επαναλήπτες. Η λειτουργία ενός συνηθισμένου επαναλήπτη βασίζεται στη μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό. Το ηλεκτρικό σήμα ενισχύεται με χρήση διαφόρων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και στη συνέχεια μετατρέπεται ξανά σε οπτικό. Ένας νέος τύπος επαναλήπτη είναι οι ενισχυτές ίνας ερβίου (Erbium doped fiber amplifiers). Οι επαναλήπτες αυτού του τύπου ενισχύουν το οπτικό σήμα χωρίς να το

μετατρέψουν σε ηλεκτρικό. Η οπτικές ίνες τερματίζονται σε κάθε επαναλήπτη με χρήση connectors. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι διάφορες μέθοδοι κόλλησης και τερματισμού (με connectors) οπτικών ινών.

5.2 Κολλήσεις και connectors

Όπως και στα συνηθισμένα δίκτυα χάλκινων καλωδίων, έτσι και στα οπτικά δίκτυα χρησιμοποιούνται κολλήσεις και συγκολλητές (connectors). Για να δημιουργηθεί μια κόλληση σε ένα οπτικό δίκτυο, πρέπει δυο ίνες διαμέτρου 125 μm να ευθυγραμμιστούν με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Η ευθυγράμμιση αυτή επιτυγχάνεται με τη μέθοδο fusion splicing ή με μηχανικό τρόπο. Στις μέρες μας τα fusion 123 κολλητήρια είναι αυτόματα και τερματίζουν τις ίνες με connectors για ευκολότερη τοποθέτηση. Στις περισσότερες Ευρωπαϊκές χώρες οι συνηθέστερες εγκαταστάσεις που καλούνται να περατώσουν οι μηχανικοί, αποτελούν προεκτάσεις ήδη υπαρχόντων οπτικών δικτύων μεγάλων αποστάσεων. Καθώς η οπτική τεχνολογία φτάνει όλο και πιο κοντά στον κοινό χρήστη, τα δίκτυα παίρνουν τη μορφή «νησιών» (LANs, καλωδιακή τηλεόραση κ.τ.λ.). Οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν διάφορους τύπους υλικών και εξοπλισμού, γι' αυτό το λόγο πρέπει να είναι πλήρως καθορισμένα τα χαρακτηριστικά των δικτύων νησιών (ως προς τις διαστάσεις, τους connectors και το λοιπό εξοπλισμό) ώστε να μην εμφανίζονται προβλήματα στη μελλοντική αντικατάσταση εξοπλισμού και στην επικοινωνία αυτών των δικτύων μεταξύ τους.

5.3 Απαιτήσεις

Στις μέρες μας περίπου μισό εκατομμύριο τηλεφωνικές συνομιλίες μπορεί να περνούν ταυτόχρονα από μια κόλληση ή έναν οπτικό connector. Για το λόγο αυτό υπάρχουν αυστηρές απαιτήσεις όσον αφορά τις κολλήσεις στα οπτικά δίκτυα :

- Ευκολία εγκατάστασης. Ο τερματισμός οπτικών καλωδίων με connectors πρέπει να επιτυγχάνεται με χρήση σχετικά φθηνού εξοπλισμού και να μην αποτελεί μια ιδιαίτερα χρονοβόρα διαδικασία

- Χαμηλή εξασθένηση. Ένα οπτικό δίκτυο παρουσιάζει πολύ χαμηλή εξασθένηση εντός των καλωδίων. Το ίδιο πρέπει να ισχύει και για τις κολλήσεις και τους connectors. Οι περισσότερες fusion κολλήσεις παρουσιάζουν εξασθένηση μικρότερη από 0.08dB ενώ οι connectors μικρότερη από 0.5dB
- Ευκολία στη χρήση και ανθεκτικότητα. Είναι απαραίτητο οι πολλαπλές συνδέσεις/αποσυνδέσεις ενός connector σε ένα rack π.χ. να μην επηρεάζουν αισθητά την εξασθένησή του
- Οικονομία. Μια fusion κόλληση στοιχίζει λιγότερο από 1\$, παρόλα αυτά απαιτείται μεγάλη επένδυση χρημάτων για τεχνικό εξοπλισμό. Η τιμή μιας μηχανικής κόλληση είναι περίπου δεκαπλάσια και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται είναι πολύ φθηνότερος σε σχέση με τον προηγούμενο.

Από τα παραπάνω διαφαίνεται ο λόγος για τον οποίο η μέθοδος κόλλησης fusion χρησιμοποιείται κατά κόρον σε δίκτυα μεγάλων αποστάσεων, όπου απαιτείται μηχανική ποιότητα και χαμηλή εξασθένηση. Η μέθοδος μηχανικών κολλήσεων εφαρμόζεται κυρίως σε indoor δίκτυα όπως τα LANs. Σε γενικές γραμμές μια fusion κόλληση είναι καλύτερη από μια μηχανική. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφέρουμε ότι η μέθοδος μηχανικής κόλλησης οπτικών καλωδίων έχει σχεδόν εγκαταλειφθεί λόγω του αυξημένου κόστους και της μεγάλης εξασθένησης που παρουσιάζεται.

5.4 Fusion κόλληση οπτικών ινών

Η πιο αξιόπιστη μέθοδος κόλλησης οπτικών ινών είναι η μέθοδος fusion. Θερμαίνοντας δυο οπτικές ίνες «καθαρισμένες» και κομμένες με μεγάλη ακρίβεια, ακριβώς στη θερμοκρασία που λιώνουν και πιέζοντας τις τη μια προς την άλλη, συνδέονται δημιουργώντας μια κόλληση με πολύ μικρή απώλεια (< 0.08dB). Η διαδικασία κόλλησης με τη μέθοδο fusion έχει ως εξής : Αρχικά τα τελειώματα των δυο ινών τοποθετούνται απέναντι. Στα σύγχρονα κολλητήρια όλη η διαδικασία που περιγράφεται είναι πλήρως αυτοματοποιημένη. Με χρήση μικροεπεξεργαστών, μικρό-μηχανισμών και εξαιρετικά εξελιγμένης τεχνολογίας σάρωσης, τα τελειώματα των δύο ινών τοποθετούνται απέναντι και ευθυγραμμίζονται με ακρίβεια

1/10.000 mm. Η ευθυγράμμιση συμπεριλαμβάνει έλεγχο της γωνίας κοπής και της καθαρότητας των τελειωμάτων των ινών. Τα δύο τελειώματα θερμαίνονται (χρήση δυο ηλεκτροδίων) με μεγάλη ακρίβεια στη θερμοκρασία που λιώνουν και πλησιάζουν το ένα με το άλλο με χρήση μικρό-μηχανισμών, ώστε τελικά να δημιουργηθεί μια ομογενοποιημένη κόλληση. Κατά τη διαδικασία fusion λαμβάνονται κάποιες εικόνες σάρωσης ώστε να μπορεί να ελεγχθεί η ποιότητα των κολλήσεων. Μετά τη συγκόλληση των δύο ινών το σημείο κόλλησης ασφαρίζεται με τη χρήση θερμο-συστελλόμενων σωλήνων (περιέχουν ενσωματωμένο κεραμικό ή μεταλλικό μέρος).

5.4.1 Διαδικασία Fusion κόλλησης για κορδέλα ινών

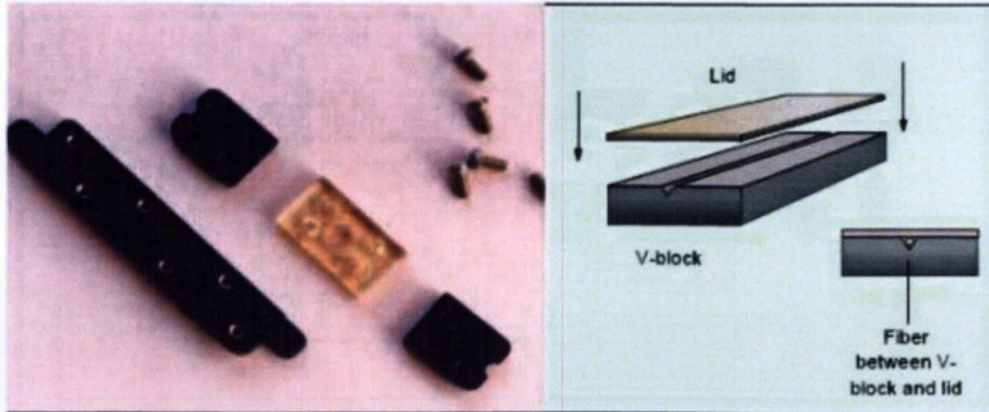
Όταν κολλάμε μια ίνα, τα δυο κομμάτια μπορούν να ευθυγραμμιστούν ανεξάρτητα το ένα από το άλλο, με χρήση ηλεκτρονικών μικρό-μηχανισμών. Όταν κολλάμε κορδέλες όμως, τα πράγματα δεν είναι τόσο εύκολα. Δεν είναι δυνατόν να ευθυγραμμίσουμε τις ίνες ξεχωριστά. Το acrylate που τις συγκρατεί, πρέπει να αφαιρεθεί από την κορδέλα σε μήκος 40 mm. Η κοπή των κορδελών είναι καθοριστική για την ποιότητα των κολλήσεων. Όλες οι ίνες πρέπει να κοπούν ακριβώς στο ίδιο μήκος και υπό γωνία 90°. Όταν μια κορδέλα είναι έτοιμη για κόλληση, τοποθετείται σε ένα «πίνακα» V-groove, ο οποίος έχει την ιδιότητα να ευθυγραμμίζει τις ίνες μεταξύ τους. Στη συνέχεια ακολουθούνται αντίστοιχα βήματα όπως κατά τη διαδικασία κόλλησης μιας μόνο ίνας. Παρατηρήσουμε ότι κατά το λιώσιμο των ινών, η θερμοκρασία πρέπει να είναι ίδια παντού ώστε να έχουμε ομοιόμορφες κολλήσεις. Κατά τη διάρκεια των κολλήσεων λαμβάνονται εικόνες ηλεκτρονικής σάρωσης, ώστε να είναι ορατή η ποιότητα των κολλήσεων (όπως συμβαίνει και κατά την κόλληση μιας μόνο ίνας). Τέλος οι κολλήσεις ασφαρίζονται με ειδικά θερμο-συστελλόμενα μέλη.

5.5 Μηχανικές κολλήσεις

5.5.1 V-block κόλληση

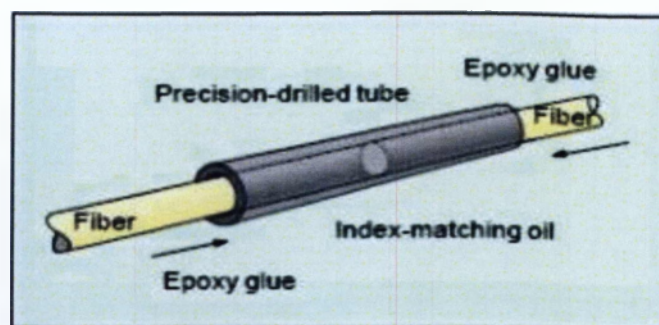
Η μέθοδος V-block αποτελεί την πιο απλή μέθοδο για μηχανική κόλληση οπτικών ινών. Σε ένα πλαστικό block υπάρχει ένα αυλάκι σχήματος V, μέσα στο οποίο τοποθετείται η ίνα. Όταν τοποθετηθεί ένα πλαστικό καπάκι πάνω από το block

οι ίνες δέχονται πίεση από τρεις διαφορετικές μεριές με αποτέλεσμα τα δύο άκρα να πλησιάζουν μεταξύ τους. Χρησιμοποιώντας ειδικό έλαιο με δείκτη διάθλασης που δε διαφέρει αρκετά από αυτό των ινών, πετυχαίνουμε μια κόλληση με απώλειες μικρότερες από 0.2 dB. Τέτοιου τύπου κολλήσεις χρησιμοποιούνται μόνο σε εσωτερικού χώρου εφαρμογές και ελάχιστες φορές σε δίκτυα μεγάλων αποστάσεων (ως κολλήσεις έκτακτης ανάγκης).



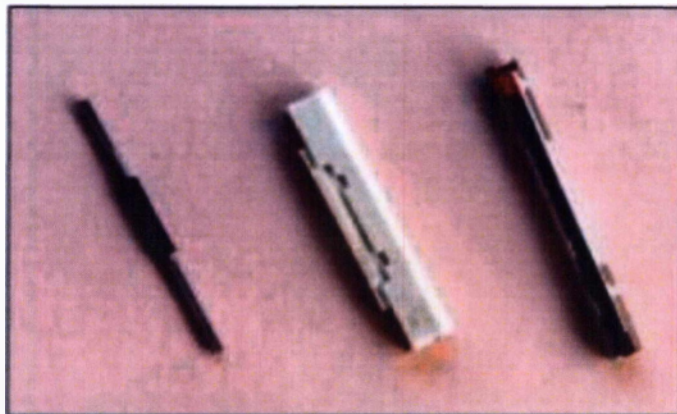
5.5.2 Σωλήνες ακριβείας

Σε αρκετές μεθόδους μηχανικής κόλλησης χρησιμοποιούνται σωλήνες. Τα δυο τελειώματα των ινών πλησιάζουν μεταξύ τους μέσα στο σωλήνα. Ως υλικό γέμισης χρησιμοποιείται έλαιο με δείκτη διάθλασης πολύ κοντά σε εκείνο των οπτικών ινών. Τέλος η κόλληση ασφαρίζεται με ειδική κόλλα.



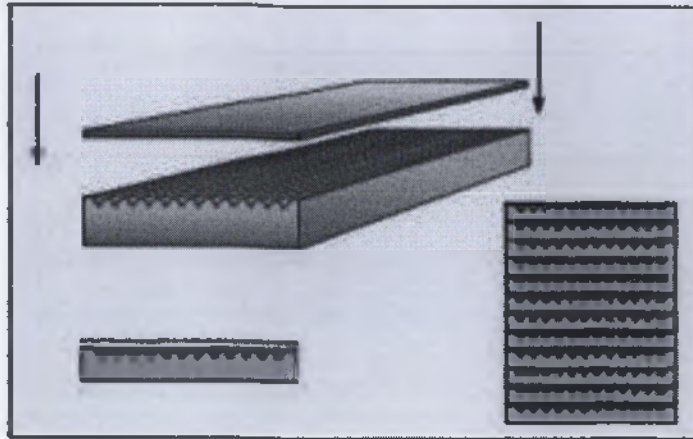
5.5.3 Κόλληση με τρεις ράβδους

Κατά τη μέθοδο κόλλησης με τρεις ράβδους, χρησιμοποιούνται μεταλλικοί ράβδοι με διάμετρο τέτοια ώστε όταν οι ίδιες τοποθετούνται όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, το κανάλι που δημιουργείται να έχει ακριβώς την ίδια διάμετρο με εκείνη της ίνας που πρόκειται να κολληθεί. Για να παραμένουν οι ράβδοι ενωμένες χρησιμοποιείται ελαστικό υλικό. Μετά από τη γέμιση του καναλιού με κατάλληλο έλαιο, οι ίνες πλησιάζουν μεταξύ τους δημιουργώντας μια ημι-μόνιμη μηχανική κόλληση. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για άμεσες κολλήσεις οργάνων πάνω στο σύστημα. Η κόλληση που προκύπτει παρουσιάζει απώλειες κοντά στα 0.2 dB.



5.5.4 Κολλήσεις κορδελών ινών

Η μηχανική κόλληση καλωδίων που περιέχουν κορδέλες ινών είναι μια αρκετά περίπλοκη διαδικασία. Τα τελειώματα από όλες τις ίνες καθαρίζονται και αφαιρούνται από τα ίδια το πρωτεύον και δευτερεύον κάλυμμα. Στη συνέχεια οι ίνες τοποθετούνται απέναντι, ανάμεσα σε δυο πλάκες σιλικόνης (μια πλάκα έχει αυλακώσεις τύπου V). Στη συνέχεια γεμίζουμε τα κενά με ειδικό έλαιο και οι ίνες πλησιάζουν μεταξύ τους. Τέλος αφού ολοκληρωθούν οι κολλήσεις, οι πλάκες σιλικόνης τοποθετούνται η μια πάνω στην άλλη (κατά αυτό τον τρόπο μπορούμε να κολλήσουμε μέχρι και 12x12 ίνες).



5.6 Ημι-μόνιμες κολλήσεις

Τα προβλήματα που αντιμετωπίζουμε στις ημι-μόνιμες κολλήσεις είναι κάπως διαφορετικά από εκείνα που αντιμετωπίζουμε σε άλλους τύπους κολλήσεων. Είναι απαραίτητο για μια ημι-μόνιμη κόλληση να μπορούμε να συνδέουμε και να αποσυνδέουμε τις ίνες πολλές φορές χωρίς να εμφανίζονται απώλειες. Αυτό σημαίνει ότι είναι απαραίτητη η αυξημένη ακρίβεια και ανθεκτικότητα σε τέτοιου είδους κολλήσεις (ειδικά για μονότροπες ίνες).

Τα αίτια απωλειών για τις ημι-μόνιμες κολλήσεις είναι όμοια με αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω για τους άλλους τύπους κολλήσεων. Μερικές ιδιαίτερες απαιτήσεις για τις ημι-μόνιμες κολλήσεις αναφέρονται παρακάτω :

- Ειδική προστασία από σκόνη και υγρασία
- Ομοκεντρικότητα (Πολύ μεγάλη ακρίβεια)
- Ικανότητα κόλλησης να αντέχει διαμήκεις δυνάμεις χωρίς να αυξάνονται οι απώλειες
- Ικανότητα σύνδεσης και αποσύνδεσης της κόλλησης
- Μεγάλη αντοχή

5.7 Τύποι Connectors

Στην αγορά σήμερα υπάρχουν πολλοί τύποι connectors, οι οποίοι μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω κατηγορίες :

- Connectors με κυλινδρικό συνεκτικό δακτύλιο
- Connectors με κωνικό συνεκτικό δακτύλιο
- Connectors διαστελλόμενης δέσμης
- Connectors κορδελών ινών

5.7.1 Connectors με κυλινδρικό συνεκτικό δακτύλιο

Η πιο συνηθισμένη και φθηνή μέθοδος δημιουργίας μιας μηχανικής κόλλησης είναι η χρήση κεραμικού ή μεταλλικού συνεκτικού δακτυλίου κυλινδρικού σχήματος. Ο συνεκτικός δακτύλιος (ferrule) της μιας ίνας τοποθετείται απέναντι από το συνεκτικό δακτύλιο της άλλης μέσα σε ένα κυλινδρικό κάλυμμα. Η κόλληση αυτού του τύπου εξαρτάται κατά πολύ από την ομοκεντρικότητα. Οι απώλειες αυτού του τύπου κόλλησης κυμαίνονται από 0.2 μέχρι 1 dB.

5.7.2 Connectors με κωνικό συνεκτικό δακτύλιο

Οι μηχανικές κολλήσεις που είναι πιο περίπλοκες (από πλευράς κατασκευής) περιέχουν connectors με κωνικό συνεκτικό δακτύλιο. Τα τελειώματα των ινών που συνδέονται παρουσιάζουν κωνικό σχήμα, ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη ευθυγράμμιση. Η συνηθισμένη τιμή των απωλειών αυτών των κολλήσεων είναι 0.3 dB/connector.

5.7.3 Connectors διαστελλόμενης δέσμης

Για κολλήσεις οι οποίες εκτίθενται σε υγρασία και σκόνη, χρησιμοποιείται μια πιο ακριβή και περίπλοκη μέθοδος. Το φως που προέρχεται από την ίνα μετάδοσης περνάει μέσα από ένα οπτικό φακό, έτσι ώστε να δημιουργηθεί μια δέσμη από παράλληλες ακτίνες φωτός. Μετά την κόλληση οι ακτίνες συγκεντρώνονται ξανά με τη βοήθεια ενός δεύτερου οπτικού φακού στην ίνα «δέκτη». Το πλεονέκτημα αυτής

της μεθόδου είναι ότι οι επιφάνειες κόλλησης δεν εκτίθενται σε παράγοντες που μπορούν να αυξήσουν τις απώλειες.

5.7.4 Connectors κορδελών ινών

Οι connectors κορδελών ινών δεν παρουσιάζουν κυλινδρική κατασκευή. Οι κορδέλες ινών αποτελούνται από 2,4,8,12 ή και παραπάνω παράλληλες ίνες με πρωτεύον επίστρωμα. Ο connector λοιπόν αποτελείται από ένα αριθμό οπών διαμέτρου 125 μm σε σειρά. Η απόσταση μεταξύ των οπών πρέπει να είναι ίση με την απόσταση μεταξύ των ινών της κορδέλας για να αποφεύγονται παραμορφώσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥΣ

6.1 Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός και η παραγωγή των οπτικών καλωδίων παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με εκείνη των χάλκινων καλωδίων. Οι ομοιότητες αυτές ώθησαν τους κατασκευαστές χάλκινων καλωδίων να ξεκινήσουν παράλληλη παραγωγή οπτικών. Βέβαια τα φυσικά χαρακτηριστικά του γυαλιού επιβάλλουν τη δημιουργία μιας εξειδικευμένης μεθόδου σχεδιασμού για τα οπτικά καλώδια, ειδικά κατά τα πρώτα στάδια της αλυσίδας παραγωγής.

Οι βασικές διαφορές μεταξύ των χάλκινων και οπτικών καλωδίων προκύπτουν από τις διαφορές των ίδιων των αγωγών, δηλαδή του χαλκού και του γυαλιού. Κατά το σχεδιασμό των οπτικών καλωδίων πρέπει ο κατασκευαστής να σιγουρευτεί με διάφορες ειδικές μεθόδους, ότι :

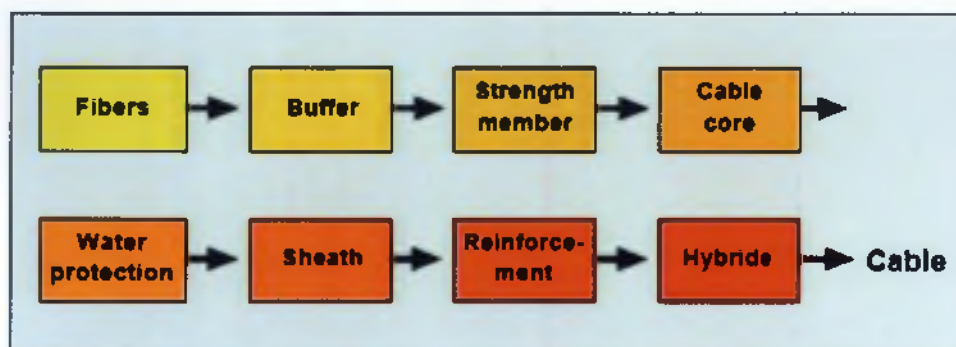
- 1) Η ίνα δεν είναι αρκετά λυγισμένη, γιατί :
 - μπορεί εύκολα να σπάσει
 - μπορεί να μετατραπεί σε χαμηλής ποιότητας κυματοδηγό (αύξηση εξασθένησης)
 - αυξάνεται το ρίσκο να σπάσει η ίνα αν ασκηθούν στην ίδια διαμήκεις δυνάμεις.
Αν η ίνα τεντωθεί θα πρέπει να υπάρχει αρκετά μικρή πιθανότητα να σπάσει
- 2) Δεν έχουν ασκηθεί στην ίνα ακτινικές δυνάμεις, λόγω του ότι η συμπίεση της ίνας μπορεί να αυξήσει δραματικά την εξασθένηση
- 3) Η ίνα δεν έχει εκτεθεί σε υγρασία. Η έκθεση της ίνας σε υγρασία μπορεί να σπάσει τη χημική της σύνθεση, με αποτέλεσμα να αυξηθεί η εξασθένηση και να ελαττωθεί η διάρκεια ζωής της.

Δεν είναι πρακτική η χρήση οπτικής ίνας χωρίς τους διάφορους τύπους προστασίας που παρέχει η κατασκευή καλωδίων. Έτσι ο σχεδιασμός ενός οπτικού καλωδίου συμπεριλαμβάνει τη συσκευασία ενός πολύ ευαίσθητου οδηγού φωτός από γυαλί, κατά τέτοιο τρόπο ώστε όλοι οι παραπάνω παράγοντες να αποφεύγονται όσο το δυνατόν περισσότερο. Δεκαπέντε χρόνια έρευνας πάνω σε αυτόν τον τομέα,

κατέληξαν στη δημιουργία ειδικών μεθόδων σχεδιασμού για κάθε είδους εφαρμογή ξεχωριστά. Στις μέρες μας υπάρχουν τυποποιημένες μέθοδοι σχεδιασμού για τα παρακάτω πεδία εφαρμογών :

- Καλώδια indoor
- Καλώδια rack
- Καλώδια υπόγειων αγωγών
- Εναέρια καλώδια
- Καλώδια άμεσης βύθισης
- Υποβρύχια καλώδια

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει τις διάφορες παραμέτρους που εμπλέκονται στη διαδικασία επιλογής του κατάλληλου καλωδίου οπτικής ίνας. Κάθε μεγάλο κατασκευαστικό πρόγραμμα έχει τις δικές του ειδικές προδιαγραφές. Το να ικανοποιήσουμε όλες αυτές τις ειδικές παραμέτρους και ταυτόχρονα να παραμείνουμε εντός των standard των διαφόρων κατασκευαστών αποτελεί ένα σχεδόν αδύνατο στόχο. Απαιτείται λοιπόν πολύ στενή συνεργασία μεταξύ πελάτη και κατασκευαστή για έργα μεγάλης κλίμακας.



6.2 Πρώτη παράμετρος, η οπτική ίνα

Μια οπτική ίνα είναι τελείως απροσπάτευτη για τα πρώτα 1 – 3 δευτερόλεπτα της ζωής της. Πριν αποχωρήσει η ίνα από τον πύργο σχεδιασμού (σε απόλυτα καθαρό εργαστηριακό περιβάλλον) της δίνεται το πρώτο προστατευτικό στρώμα, το πρωτεύον επίστρωμα. Μια τελείως απροσπάτευτη ίνα είναι άκρως ευαίσθητη στο

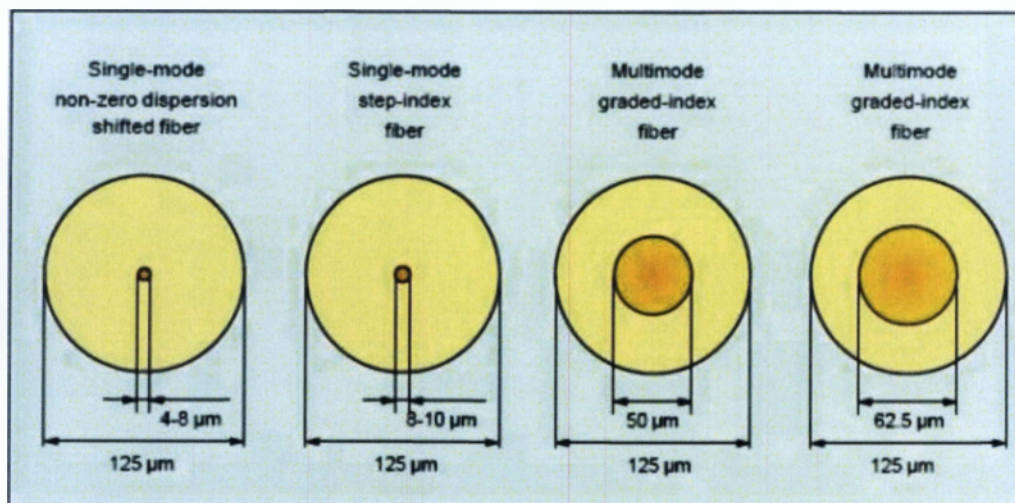
λύγισμα και σε διαμήκεις δυνάμεις. Επίσης μια απροστάτευτη ίνα είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στην υγρασία και σε αρκετά χημικά.

Στα περισσότερα σύγχρονα δίκτυα χρησιμοποιούνται ίνες που ανήκουν σε έναν από τους παρακάτω τύπους :

- Μονότροπη ίνα βηματικού δείκτη 8 -10/125 μm
- Μονότροπη ίνα μετατοπισμένου σημείου διασποράς 4 – 8/125 μm
- Πολύτροπη ίνα βαθμιαίου δείκτη 50/125 μm
- Πολύτροπη ίνα βαθμιαίου δείκτη 62.5/125 μm

Όλες οι παραπάνω ίνες όπως βλέπουμε έχουν διάμετρο μανδύα 125 μm .

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι τέσσερις πιο συνηθισμένοι τύποι οπτικών ινών που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα οπτικά δίκτυα :



6.2.1 Πρωτεύον επίστρωμα

Για να μπορέσουμε να χρησιμοποιήσουμε μια γυάλινη ίνα πρέπει πρώτα να επικαλυφθεί με ένα ή περισσότερα προστατευτικά στρώματα. Η διαδικασία επικάλυψης λαμβάνει χώρα κατά το σχεδιασμό της ίνας, λίγα μέτρα κάτω από το φούρνο του πύργου σχεδιασμού. Το πρωτεύον επίστρωμα καλύπτει την ίνα σε υγρή μορφή με χρήση διαφόρων μηχανημάτων από τα οποία η ίνα περνά με ταχύτητα 300 – 900 m/min.

6.2.2 Το Acrylate ως πρωτεύον επίστρωμα

Γενικά η ίνα καλύπτεται από δύο στρώματα Acrylate κατά τη διάρκεια της ίδιας διαδικασίας, ένα λεπτό εσωτερικό στρώμα και ένα πολύ σκληρό εξωτερικό. Τα δύο παραπάνω συνδυασμένα στρώματα μετατρέπουν τη διάμετρο της ίνας σε 240 – 250 μm. Το Acrylate πρέπει να είναι εξαιρετικά καθαρό (χρήση ακτινών UV). Χρήση μη καθαρού Acrylate μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή των γεωμετρικών παραμέτρων της ίνας, όπως και την αύξηση της ευαισθησίας της ίνας σε περιβαλλοντικούς παράγοντες. Αξίζει να αναφέρουμε ότι παλιότερα οι κατασκευαστές χρησιμοποιούσαν σιλικόνη ως πρωτεύον επίστρωμα. Η μέθοδος αυτή εγκαταλείφθηκε όμως, διότι υπήρχαν αρκετά προβλήματα κατά τον τερματισμό των ινών (η σιλικόνη απομακρύνεται πολύ δύσκολα).

6.2.3 Χρωματική κωδικοποίηση οπτικών ινών

Για να είναι δυνατή η αναγνώριση των διαφορετικών ινών κατά τη διαδικασία εγκατάστασης τους, χρωματίζονται σύμφωνα με κάποια διεθνή ή παγκόσμια πρότυπα. Οι ίνες είναι δυνατόν να χρωματίζονται με ξεχωριστή διαδικασία ή κατά την τοποθέτηση του απομονωτή. Όταν διαλέγουμε το χρώμα πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη μας τους παρακάτω παράγοντες για το υλικό χρωματισμού :

- Δεν πρέπει να επηρεάζει τη δυνατότητα μετάδοσης της ίνας
- Πρέπει να είναι αρκετά ανθεκτικό
- Δεν πρέπει να επηρεάζεται από το γύρω χημικό περιβάλλον

Fiber No.	Color	Fiber No.	Color
1	Red	7	Brown
2	Blue	8	Black
3	White	9	Orange
4	Green	10	Violet
5	Yellow	11	Pink
6	Gray	12	Turquoise

6.3 Δεύτερη παράμετρος, οι απομονωτές

Μια ίνα με πρωτεύον επίστρωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ορισμένες τεχνικές εφαρμογές, όπως πίνακες ανακοινώσεων, χωρίς επιπλέον προστατευτικά στρώματα. Γενικά όμως πάνω από το πρωτεύον επίστρωμα τοποθετείται άλλο ένα προστατευτικό στρώμα που ονομάζεται απομονωτής.

Μέχρι στιγμής χρησιμοποιούνται τρεις μέθοδοι :

- Loose tube buffer (loose fibers or ribbons in tube)
- Tight buffer
- Fiber ribbon

6.3.1 Loose tube buffer

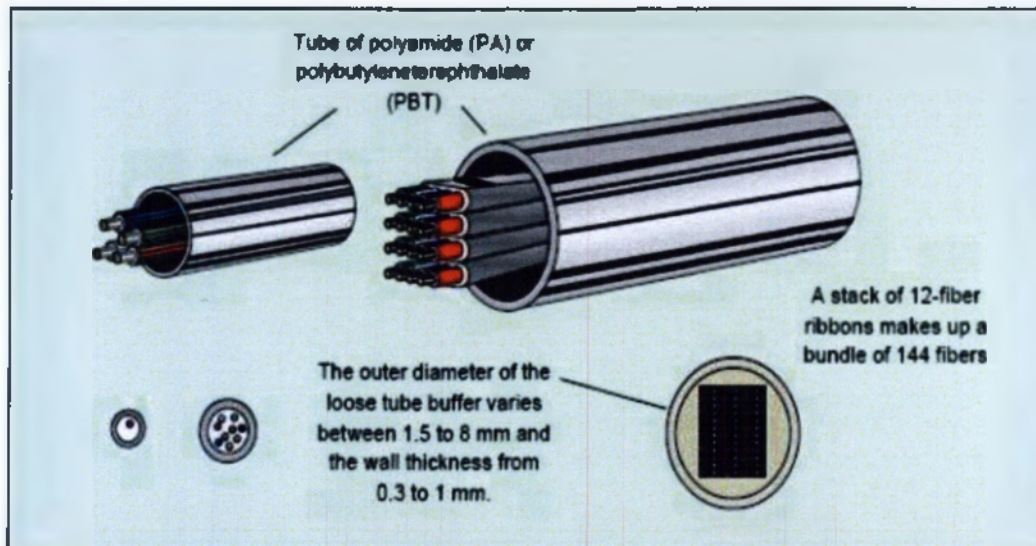
Για να αποφύγουμε αλλαγές στις παραμέτρους μιας ίνας λόγω πίεσης, λυγίσματος, τεντώματος και άλλων όμοιων μηχανικών δυνάμεων, η ίνα (ή μια κορδέλα ινών) με πρωτεύον επίστρωμα τοποθετείται χαλαρά μέσα σε ένα στενό σωλήνα. Η πιο απλή περίπτωση είναι να έχουμε μια μόνο ίνα μέσα σε ένα πλαστικό σωλήνα. Μια πιο περίπλοκη περίπτωση είναι να τοποθετούνται αρκετές ίνες (μέχρι 12) ή κορδέλες ινών μέσα σε ένα χαλαρό πλαστικό σωλήνα.

Γενικά τοποθετούνται το πολύ 4 – 6 ίνες/κορδέλες ανά σωλήνα. Ο σωλήνας πρέπει να πληροί τις παρακάτω προϋποθέσεις :

- Πρέπει να μην παραμορφώνεται από τις διάφορες μηχανικές δυνάμεις
- Πρέπει να είναι ανθεκτικός
- Πρέπει να αντέχει τη σκληρή μεταχείριση κατά τη διαδικασία τοποθέτησης του καλωδίου, χωρίς να αλλάζουν οι παράμετροι της ίνας

Η κατασκευή των ινών (μέσα σε χαλαρούς σωλήνες) είναι μια συνεχής διαδικασία κατά την οποία κατασκευάζεται μέχρι και 25 km μήκος σωλήνα. Ο σωλήνας τοποθετείται γύρω από την ίνα (ή μέχρι και 12 ίνες) ενώ ταυτόχρονα γεμίζει με thixotropic gel. Η εξωτερική διάμετρος του σωλήνα έχει μήκος που κυμαίνεται από 1.5 μέχρι 8 mm και εξαρτάται από τον αριθμό των ινών που περιέχει. Το πάχος του σωλήνα είναι περίπου 0.3 μέχρι 1 mm. Το thixotropic gel προστατεύει την ίνα από

την υγρασία. Ο σωλήνας κατασκευάζεται από polyamide (PA-12 ή nylon) ή από polybutyleneterephthalate (PBTP). Και τα δύο προηγούμενα είδη πλαστικών έχουν αρκετά καλές φυσικές παραμέτρους που ικανοποιούν τις προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω.



Οι ίνες χρωματίζονται πριν την τοποθέτησή τους μέσα στο σωλήνα. Όταν ο σωλήνας βρίσκεται μέσα σε καλώδιο, οι ίνες εντός του σωλήνα κινούνται ελεύθερα, γεγονός που αποτρέπει την παραμόρφωσή τους από διάφορες μηχανικές δυνάμεις και από αλλαγές της θερμοκρασίας.

6.3.2 Ίνες tight buffer

Ένας άλλος τρόπος προστασίας μιας ίνας με πρωτεύον επίστρωμα είναι η τοποθέτηση ενός λεπτού και στενού στρώματος πλαστικού αμέσως μετά το πρωτεύον επίστρωμα (245 – 500 μm). Σε θερμοκρασία 250° C τοποθετείται στην ίνα μετατρέποντας τη διάμετρο της σε 0.8 – 1 mm.

Κατά στην παραπάνω διαδικασία η ίνα χρωματίζεται ώστε να αναγνωρίζεται εύκολα κατά την τοποθέτησή της. Τα καλώδια ινών tight buffer χρησιμοποιούνται κυρίως σε εσωτερικές εφαρμογές, σαν καλώδια διασύνδεσης ή rack. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της κατηγορίας καλωδίων είναι ότι τοποθετούνται πολύ εύκολα

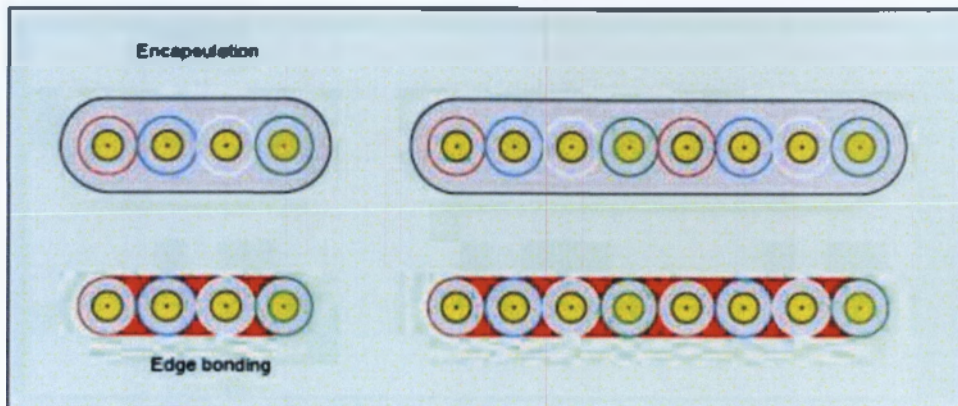
(είναι πιο λεπτά και πιο συμπαγή από πλευράς κατασκευής), επίσης τερματίζονται ευκολότερα. Στις μέρες μας στα δίκτυα LAN χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά καλώδια πολύτροπων ινών αυτής της κατηγορίας (τελευταία έχουν αρχίσει και χρησιμοποιούνται καλώδια μονότροπων ινών λόγω του ότι παρουσιάζουν μεγαλύτερο εύρος μετάδοσης και οι εκπομποί laser έχουν φθηνώνει).

6.3.3 Τεχνική fibber ribbon

Μια τρίτη τεχνική τοποθέτησης απομονωτή σε ίνα είναι η εξής : αρχικά ίνες με πρωτεύον επίστρωμα τοποθετούνται η μια δίπλα στην άλλη και στη συνέχεια καλύπτονται με επιπλέον στρώματα προστασίας (απομονωτή). Η τεχνική αυτή δεν είναι ευρέως διαδεδομένη, χρησιμοποιείται κυρίως στην Ιαπωνία, την Αμερική, τη Μαλαισία, την Ιταλία, τη Σουηδία και σε μερικές ακόμα χώρες. Η κορδέλα ινών κατασκευάζεται με έναν από τους παρακάτω τρόπους :

- Edge bonding
- Encapsulating

Η διαδικασία Encapsulating αποτελεί μια από τις τελευταίες εξελίξεις στον τομέα κατασκευής καλωδίων οπτικών ινών. Οι ίνες τοποθετούνται η μια δίπλα στην άλλη και στη συνέχεια επικαλύπτονται από ένα λεπτό στρώμα Acrylate (2-16 ίνες). Το στρώμα αυτό παρέχει προστασία στις ίνες από τις διάφορες μηχανικές δυνάμεις και τις καθιστά πιο εύχρηστες όσον αφορά τον μηχανικό τερματισμό και εγκατάστασή τους. Η διαφορά αυτής της μεθόδου κατασκευής κορδελών με τη μέθοδο edge bonding είναι ότι κατά τη δεύτερη το στρώμα Acrylate δεν επικαλύπτει τις ίνες, απλά γεμίζει τα κενά ανάμεσά τους, με αποτέλεσμα να τις καθιστά πιο ευαίσθητες σε μηχανικές δυνάμεις σε σχέση με την πρώτη μέθοδο. Ο μεγαλύτερος κατασκευαστής τέτοιου τύπου ινών είναι η εταιρία Ericsson.



6.4 Τρίτη παράμετρος, παράγοντας αντοχής

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το ρίσκο να σπάσει μια ίνα είναι αρκετά μεγάλο όταν της ασκούνται διαμήκεις δυνάμεις (π.χ. τέντωμα κατά την εγκατάσταση του καλωδίου). Έτσι όλα τα καλώδια οπτικών ινών, εφοδιάζονται με κάποιο παράγοντα που αυξάνει την αντοχή τους σε τέτοιου είδους δυνάμεις που προκαλούν παραμόρφωση. Ο παράγοντας αντοχής αποτελείται από υλικά που είναι ανθεκτικά σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και παρουσιάζουν αρκετά μεγάλη ελαστικότητα.

6.4.1 Μεταλλικός παράγοντας αντοχής

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, ως πυρήνας του καλωδίου χρησιμοποιείται μια μεταλλική χορδή ή ένα μεταλλικό καλώδιο διαμέτρου 2 – 3.5 mm. Γύρω από αυτή τη χορδή (ή καλώδιο) τυλίγονται ελικοειδώς 4 μέχρι και 12 ίνες loose tube buffer ή tight buffer. Ο μεταλλικός παράγοντας αντοχής μπορεί και να επικολληθεί πάνω στο οπτικό καλώδιο. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται ένα επιπλέον τελικό κάλυμμα ώστε να σταθεροποιηθεί ο παράγοντας αντοχής πάνω στο καλώδιο.

6.4.2 Κεντρικός μη-μεταλλικός παράγοντας αντοχής

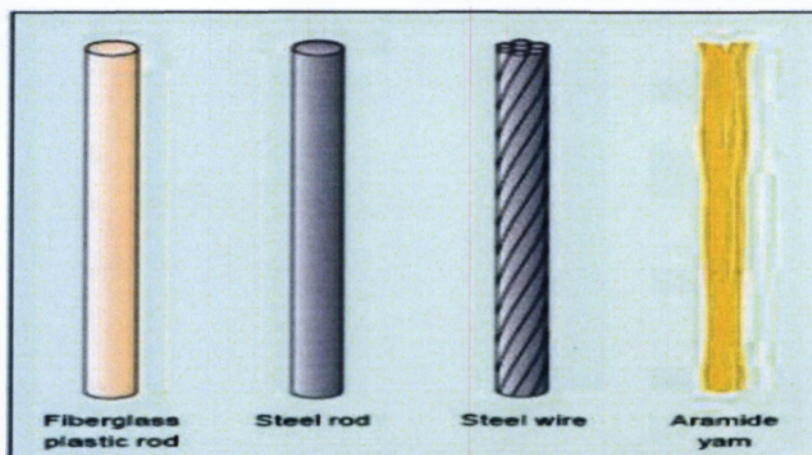
Σε περίπτωση που θέλουμε ένα καλώδιο που δεν περιέχει καθόλου μέταλλο, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια λεπτή ράβδο ενισχυμένης πλαστικής οπτικής ίνας ως πυρήνα του καλωδίου αντί για μια μεταλλική χορδή. Βέβαια ο προηγούμενος παράγοντας αντοχής δεν παρέχει τόσο μεγάλη ανθεκτικότητα σε διαμήκεις δυνάμεις

όσο ο μεταλλικός παράγοντας. Στο μέλλον αναμένεται να χρησιμοποιηθούν και άλλου τύπου υλικά σαν παράγοντες αντοχής. Ήδη έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται νήμα aramide.

6.4.3 Νήμα Aramide

Τα νήματα aramide χρησιμοποιούνται ως παράγοντες αντοχής για καλώδια οπτικών ινών τα οποία απαιτούν υψηλό βαθμό ελαστικότητας και ανθεκτικότητας. Το νήμα aramide τοποθετείται κατά μήκος μιας ή πολλών tight buffer ινών, έτσι ώστε να αποτελεί ένα απλό αλλά πολύ ισχυρό παράγοντα αντοχής. Το υλικό αυτό είναι εξαιρετικά ανθεκτικό σε ισχυρές διαμήκεις δυνάμεις και πολύ ελαστικό.

Τα νήματα aramide χρησιμοποιούνται επίσης σαν επιπλέον ενίσχυση για εναέρια ή άμεσα βυθιζόμενα καλώδια. Τα νήματα περικλείουν το σώμα του καλωδίου ή βρίσκονται ανάμεσα στο εσωτερικό και εξωτερικό περίβλημα του. Ο συγκεκριμένος παράγοντας αντοχής χρησιμοποιείται κυρίως σε patch cords και pig-tails.



6.5 Τέταρτη παράμετρος, ο πυρήνας του καλωδίου

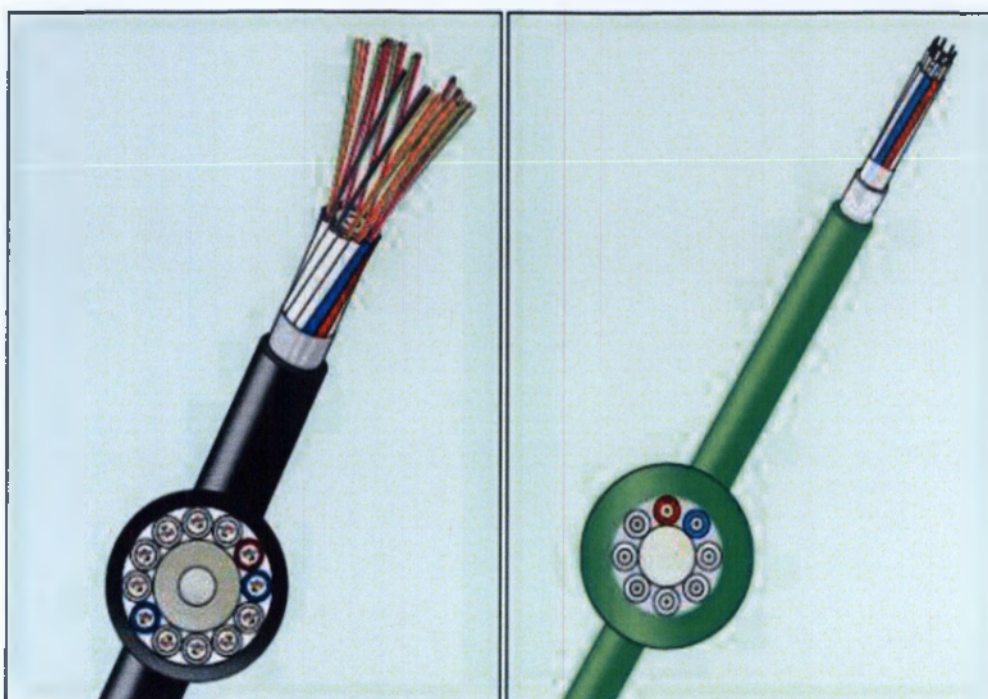
6.5.1 Καλώδια με κυκλικό πυρήνα

Ο πιο απλός τύπος οπτικού καλωδίου με πυρήνα έχει σαν πυρήνα τον παράγοντα αντοχής. Τα καλώδια τέτοιου τύπου γενικά ονομάζονται ομόκεντρα καλώδια. Οι loose tube buffer και tight buffer ίνες τυλίγονται γύρω από τον παράγοντα αντοχής ελικοειδώς (πολύ προσεκτικά υπολογισμένο τύλιγμα). Το τύλιγμα υπολογίζεται έτσι ώστε να αντισταθμίζει την εξασθένηση του καλωδίου, που οφείλεται κυρίως στις απότομες αλλαγές θερμοκρασίας όπως και στο λύγισμά του, κατά την κατασκευή, την τοποθέτηση και τον τερματισμό.

Γύρω από τον παράγοντα αντοχής τυλίγονται 4 μέχρι και 12 ίνες (tight buffer ή Loose tube buffer), πάνω από τις οποίες τοποθετείται ένα λεπτό στρώμα πλαστικού. Το στρώμα αυτό συγκρατεί τις ίνες πάνω στον πυρήνα. Αν το καλώδιο προορίζεται για εξωτερική εγκατάσταση τότε ανάμεσα στις ίνες και το λεπτό στρώμα πλαστικού, τοποθετείται παχύρρευστο υλικό που μονώνει το καλώδιο όσον αφορά την υγρασία και το νερό κατά τον διαμήκη άξονα. Αν το καλώδιο προορίζεται για εσωτερική εγκατάσταση, αντί για το παραπάνω παχύρρευστο υλικό (gel) τοποθετείται ειδική μονωτική ταινία. Τέλος πάνω από το λεπτό στρώμα πλαστικού τοποθετείται η πλαστική θήκη του καλωδίου.

Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε δύο οπτικά καλώδια ομόκεντρης κατασκευής. Το πρώτο αποτελείται από ίνες loose tube buffer τυλιγμένες γύρω από τον παράγοντα αντοχής (πυρήνα) , ενώ το δεύτερο από ίνες tight buffer.

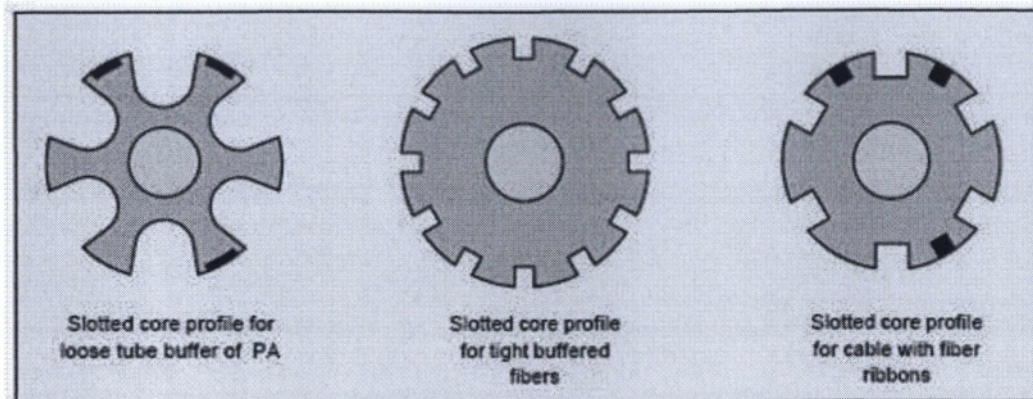
Το πρώτο καλώδιο ονομάζεται GRHLDV ενώ το δεύτερο GNHLBDUV



6.5.2 Καλώδιο με πυρήνα αυλακώσεων

Για καλώδια που αναμένεται να εκτίθενται συνεχώς σε ακτινικές δυνάμεις, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εγκατάστασής τους και όχι μόνο, πρέπει να ληφθούν ειδικά μέτρα για την προστασία των ινών που περιέχουν. Γι' αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι πυρήνων καλωδίου. Οι περισσότεροι από αυτούς κατασκευάζονται σύμφωνα με τη μέθοδο των αυλακώσεων. Κατά την παραπάνω μέθοδο οι ίνες τοποθετούνται σε ειδικά διαμορφωμένες αυλακώσεις του πυρήνα. Συνήθως ένα υλικό με 3 ως 12 αυλακώσεις τοποθετείται γύρω από τον μεταλλικό ή μη μεταλλικό παράγοντα αντοχής. Οι αυλακώσεις παρουσιάζουν ελικοειδές τύλιγμα S, Z ή τύλιγμα SZ γύρω από τον παράγοντα αντοχής. Οι ελικοειδείς πυρήνες (S, Z) με αυλακώσεις παρουσιάζουν την ίδια κατεύθυνση στρέψης σε όλο το μήκος του καλωδίου, ενώ εκείνοι που ακολουθούν SZ τύλιγμα αλλάζουν κατεύθυνση στρέψης κατά μήκος του κεντρικού άξονα. Το τύλιγμα τύπου SZ έχει απλοποιήσει αρκετά την κατασκευή και την εγκατάσταση τέτοιου τύπου καλωδίων. Όλοι οι τύποι πυρήνα αυλακώσεων κατασκευάζονται από πλαστικό polyethylene (PE) ή polypropylene

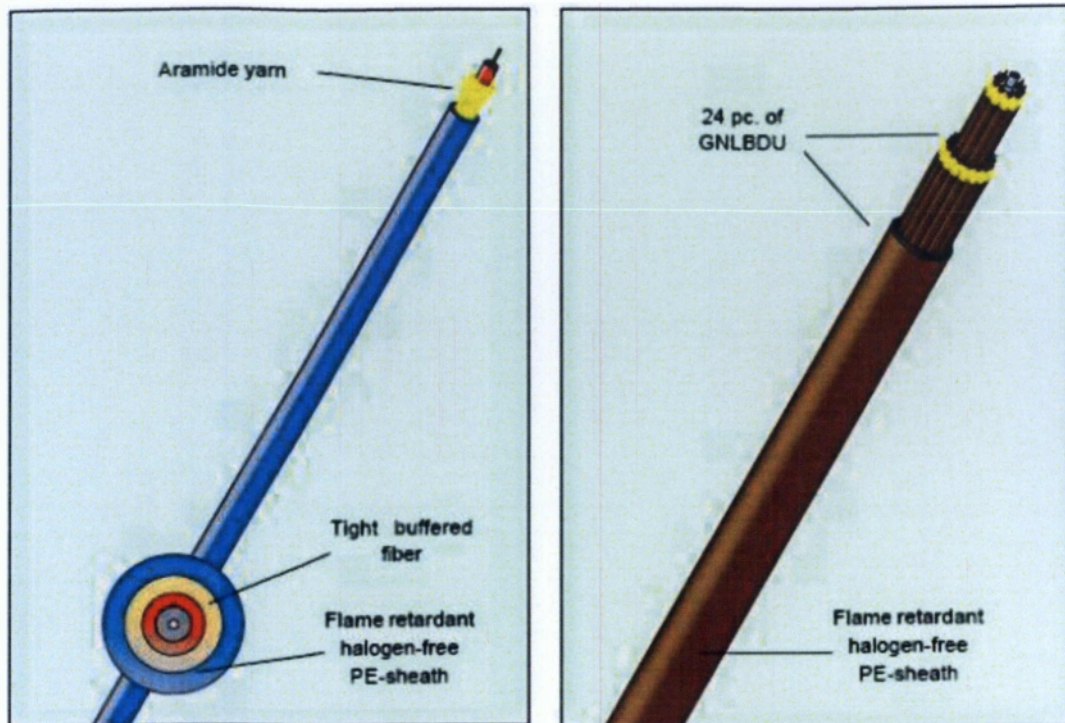
(PP) και τοποθετούνται γύρω από μεταλλικό παράγοντα αντοχής ή ενισχυμένη πλαστική οπτική ίνα. Οι πυρήνες έχουν 3 μέχρι και 24 αυλακώσεις, κάθε μια από τις οποίες μπορεί να συγκρατήσει 1 μέχρι και 40 οπτικές ίνες.



6.5.3 Οπτικό καλώδιο χωρίς πυρήνα

Το πιο απλό οπτικό καλώδιο αποτελείται από μία ή δυο μονότροπες ή πολύτροπες ίνες (συνήθως τύπου tight buffer), καλυμμένες από νήματα aramide και ένα τελικό πλαστικό κάλυμμα από PE ή PVC. Τα καλώδια αυτά κατασκευάζονται σε αρκετές ποικιλίες με ένα ή δύο καλύμματα aramide και πλαστικό. Χρησιμοποιώντας thermoplastic polyurethane elastomer (TPU) για εξωτερικό κάλυμμα τα καλώδια αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για στρατιωτικές εφαρμογές.

- Το μπλε καλώδιο είναι το πιο απλό οπτικό καλώδιο το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συνδέσεις καλωδίων και για εσωτερικά δίκτυα μεταφοράς δεδομένων (GNLBDU)
- Το καφέ καλώδιο αποτελείται από αρκετά υποκαλώδια και ένα επιπλέον κάλυμμα, με αποτέλεσμα να έχουμε ένα πακέτο με 24 GNLBD και διάμετρο μόνο 15 mm (GNHLLBDU)



6.6 Πέμπτη παράμετρος, προστασία από νερό και υγρασία

Πολλά καλώδια τοποθετούνται σε περιβάλλον που ενδέχεται να καταστρέψει την εξωτερική τους θήκη. Τα outdoor (εξωτερικά) καλώδια κυρίως, εκτίθενται σε νερό και υγρασία, παράγοντες που μπορούν να διαπεράσουν τα καλύμματα ενός καλωδίου και να καταστρέψουν μια κόλληση χαμηλής ποιότητας. Αν το νερό διαπεράσει ένα καλώδιο που έχει κενό χώρο ανάμεσα στις ίνες ή στους σωλήνες (απομονωτές) που περιέχει, θα ακολουθήσει την πορεία του πυρήνα μέχρι να φτάσει το χαμηλότερο σημείο του καλωδίου, όπου και θα συσσωρευτεί. Το νερό μειώνει τη διάρκεια ζωής της ίνας, αφού διαβρώνει το γυαλί της και αυξάνει την εξασθένηση λόγω συσσώρευσης υδροξειδίου.

6.6.1 Υλικό νέμισης καλωδίου

Όταν τοποθετείται ο πλαστικός σωλήνας πάνω στις ίνες ώστε να δημιουργηθεί ένα καλώδιο loose tube buffer, το κενό που δημιουργείται γεμίζεται με thixotropic gel. Το gel αυτό λειτουργεί σαν διαμήκης μονωτής νερού. Ο πιο απλός τρόπος για να αποφύγουμε τη διάβρωση λόγω νερού και υγρασίας, είναι να γεμίσουμε το κενό μεταξύ των ινών, των σωλήνων, των κορδελών ινών και του τελικού καλύμματος με μονωτικό υλικό. Το υλικό αυτό δε θα πρέπει να επηρεάζει τα πλαστικά και τις ίνες με κανένα τρόπο. Για indoor καλώδια δεν είναι υποχρεωτική η ύπαρξη του παραπάνω μονωτικού παράγοντα.

6.6.2 Ταινία διόγκωσης, ως μονωτής υγρασίας

Για indoor/outdoor καλώδια τελευταία χρησιμοποιείται ένας πιο απλός και ξηρός τρόπος μόνωσης. Μεταξύ των ινών και του τελικού καλύμματος τοποθετείται μια ταινία που διογκώνεται όταν έρθει σε επαφή με νερό. Η ταινία αυτή αποτρέπει τη συσσώρευση νερού κατά μήκος του καλωδίου. Αυτός ο τρόπος μόνωσης έχει γίνει πολύ δημοφιλής τελευταία σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα μεγάλων πόλεων, γιατί η εγκατάσταση καλωδίων τέτοιου τύπου είναι γρηγορότερη και ευκολότερη από καλώδια που περιέχουν gel (γλιτώνουμε το χρόνο που απαιτείται για τον καθαρισμό και τη γύμνωση των καλωδίων).

6.6.3 Μεταλλικό κάλυμμα (φύλλο αλουμινίου)

Καλώδια τα οποία εκτίθενται σε πολύ υγρασία, όσο προσεκτικά κι αν έχουν τοποθετηθεί είναι σχεδόν σίγουρο ότι θα διαβρωθούν. Για να αποτρέψουμε το νερό να περάσει στο εσωτερικό του καλωδίου μπορούμε να τοποθετήσουμε ένα λεπτό φύλλο αλουμινίου ως μονωτή μεταξύ των ινών και του τελικού καλύμματος.

6.6.4 Μεταλλικός σωλήνας χαλκού

Καλώδια τα οποία τοποθετούνται μέσα σε νερό ή σε πολύ υγρό έδαφος πρέπει να καλύπτονται εξολοκλήρου από μεταλλικό κάλυμμα. Σε βάθος χρόνου το νερό διαπερνά κάθε τύπου πλαστικό κάλυμμα. Το υλικό μόνωσης που χρησιμοποιείται σε τέτοιες περιπτώσεις είναι ο χαλκός. Ο χαλκός μορφοποιείται σε σωλήνα που καλύπτει την εξωτερική θήκη του καλωδίου. Στη συνέχεια τοποθετούνται αρκετά καλύμματα μεταλλικών νημάτων που κάνουν το καλώδιο πολύ ανθεκτικό σε παραμορφώσεις που προκαλούνται από εξωτερικές δυνάμεις. Τέλος τοποθετούνται αρκετά στρώματα PP – νημάτων και αντισκωρικών παραγόντων.

Παλιότερα αντί για το σωλήνα χαλκού οι κατασκευαστές χρησιμοποιούσαν σωλήνα μόλυβδου. Κυρίως για περιβαλλοντικούς λόγους όμως μεθοδεύτηκε η παραπάνω αντικατάσταση.

6.7 Έκτη παράμετρος, τελικό κάλυμμα

6.7.1 Τοποθετώντας το τελικό κάλυμμα

Η τοποθέτηση του τελικού καλύμματος αποτελεί την τελική επεξεργασία που περνά ένα οπτικό καλώδιο πριν χρησιμοποιηθεί στην πράξη. Η θήκη του καλωδίου έχει τις εξής λειτουργίες :

- Παρέχει μηχανική προστασία
- Παρέχει θερμική μόνωση
- Προστατεύει το καλώδιο από τα διάφορα χημικά
- Παρέχει προστασία από υγρασία και νερό
- Παρέχει προστασία από τρωκτικά

Η τεχνική τοποθέτησης του τελικού καλύμματος σε ένα οπτικό καλώδιο είναι πανομοιότυπη με εκείνη που χρησιμοποιείται για ένα συνηθισμένο καλώδιο χαλκού. Το τελικό κάλυμμα αποτελείται από ένα ή δύο πλαστικά υλικά, με ή χωρίς περεταίρω κάλυμμα αλουμινίου και μονωτικό υγρασίας. Τα πλαστικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του τελικού καλύμματος είναι τα παρακάτω :

- ✓ Polyethylene (PE)
- ✓ Halogen free, Flame retardant materials (HFFR)
- ✓ Polyvinyl chloride (PVC)
- ✓ Polyamide (PA)
- ✓ Fluoroplastic
- ✓ Polyurethane (PU)
- ✓ Χάλκινος σωλήνας (Cu)

Τα παραπάνω πλαστικά υλικά έχουν διαφορετικές θερμικές, μηχανικές, και ηλεκτρικές σταθερές. Επίσης διαφέρει η ανθεκτικότητά τους σε παράγοντες όπως τα χημικά, το κατά πόσο είναι εύφλεκτα σαν υλικά και οι αλληλεπίδρασή τους με άλλα υλικά. Έτσι η επιλογή του κατάλληλου υλικού καλύμματος είναι αρκετά κρίσιμη για τη σωστή λειτουργία του συστήματος που σχεδιάζουμε.

6.7.2 Polyethylene (PE)

- Θερμικές ιδιότητες

Λόγω των θερμικών ιδιοτήτων του συγκεκριμένου υλικού, η υψηλότερη συνιστώμενη θερμοκρασία συνεχούς λειτουργίας είναι 60 – 70° C. Επίσης είναι αποδεκτή μια μικρή περίοδος λειτουργίας στους 90° C αν και μόνο αν, δεν ασκούνται στο καλώδιο εξωτερικές δυνάμεις. Το σημείο καταστροφής του PE είναι περίπου 110 – 130° C.

- Μηχανικές ιδιότητες

Οι μηχανικές ιδιότητες του PE είναι αρκετά καλές για πολλές εφαρμογές. Το σημείο καταστροφής λόγω πίεσης για θερμοκρασία 20° C είναι τουλάχιστον 10 Mpa. Όταν το PE χρησιμοποιείται σαν τελικό κάλυμμα καλωδίου μπορεί να επιμηκυνθεί κατά 500% και μπορεί να δεχτεί πιέσεις τουλάχιστον 12 Mpa.

- Αντοχή στο χρόνο

Το PE έχει μεγάλη αντοχή στο χρόνο και πρακτικά έχει εγγύηση εφόρου ζωής, όταν χρησιμοποιείται σε indoor εφαρμογές και δεν εκτίθεται άμεσα σε ηλιακό φως. Παρόλα αυτά η UV ακτινοβολία μπορεί να καταστρέψει το PE κάλυμμα αν δεν έχει εμποτιστεί με παράγοντα UV – stabilizer.

Ο πιο συνηθισμένος UV – stabilizer είναι το carbon – black. Έτσι όλα τα καλώδια PE που χρησιμοποιούνται σε outdoor εφαρμογές είναι χρωματισμένα μαύρα.

- Αντοχή σε χημικά

Σε θερμοκρασία δωματίου το PE είναι εξαιρετικά ανθεκτικό στα περισσότερα χημικά (έλαια και διαλύτες).

- Αντοχή σε υγρασία

Το PE αποτελεί ένα πολύ καλό μονωτή όσον αφορά την υγρασία γι' αυτό και χρησιμοποιείται στις περισσότερες εγκαταστάσεις σε υγρό περιβάλλον.

- Επιδράσεις σε άλλα υλικά

Το PE δεν επηρεάζει άλλα υλικά αφού δεν περιέχει κάποιο plasticizer παράγοντα. Όταν βέβαια έρχεται σε επαφή με PVC, το PE μπορεί να απορροφήσει ένα μικρό ποσό plasticizer. Σε τέτοιες περιπτώσεις το PE πρέπει να προστατεύεται με διάφορους χημικούς παράγοντες.

- Ικανότητα ανάφλεξης

Το PE είναι αρκετά εύφλεκτο, έτσι πρέπει να χρησιμοποιούνται διάφορες προσθετικές ουσίες ώστε να αυξάνουν την αντοχή του στη θερμότητα.

6.7.3 Halogen free, Flame retardant materials (HFFR)

Τα καλώδια που απαιτείται να μην περιέχουν αλογόνα και να έχουν μεγάλη θερμική αντοχή κατασκευάζονται με ειδικές διαδικασίες. Η εξωτερική θήκη των καλωδίων αυτών δεν πρέπει να αποτελείται από PE, PVC και Fluoroplastic. Το υλικό των καλυμμάτων καλωδίων με μεγάλη θερμική αντοχή είναι το Polyolefin σε συνδυασμό με αρκετές πρόσθετες χημικές ουσίες. Μια τέτοια ουσία που χρησιμοποιείται κατά κόρον είναι το aluminium trihydroxide $Al(OH)_3$. Τα καλώδια που δεν περιέχουν αλογόνα είναι φιλικά προς το περιβάλλον. Επίσης είναι απαραίτητο για περιβαλλοντικούς λόγους τα καλώδια να μην περιέχουν κάδμιο και μόλυβδο.

6.7.4 Polyvinyl Chloride (PVC)

- Θερμικές ιδιότητες

Το PVC είναι θερμοπλαστικό. Αυτό σημαίνει ότι μαλακώνει όταν ζεσταίνεται και σκληραίνει όταν ψύχεται. Η ικανότητά του να μαλακώνει στις διάφορες θερμοκρασίες εξαρτάται από το ποσό του plasticizer που περιέχει. Λόγω της ικανότητας του PVC να σκληραίνει όταν τοποθετείται σε ψυχρό περιβάλλον, συνιστάται να μην εγκαθίσταται σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από -10°C . Γενικά καλώδια που περιέχουν PVC χρησιμοποιούνται σε θερμοκρασίες μέχρι 70°C .

- Μηχανικές ιδιότητες

Οι μηχανικές ιδιότητες του PVC είναι πολύ καλές. Παρουσιάζει μεγάλη αντοχή σε εξωτερικές δυνάμεις. Οι ιδιότητες αυτές μπορούν να βελτιωθούν αυξάνοντας το ποσό plasticizer που περιέχει.

- Αντοχή στο χρόνο

Το PVC είναι αρκετά ανθεκτικό στο πέρασμα του χρόνου, ειδικά όταν χρησιμοποιείται σε indoor εφαρμογές. Για outdoor εφαρμογές χρησιμοποιούμαι μαύρο PVC ή ελαφρά χρωματισμένο. Το PVC είναι εξαιρετικά ανθεκτικό στο όζον.

- Αντοχή σε χημικά

Το PVC είναι εξαιρετικά ανθεκτικό σε οξέα, έλαια και στους περισσότερους διαλύτες. Κάποιοι διαλύτες μπορούν να απομακρύνουν το plasticizer από το PVC κάνοντάς το πολύ σκληρό. Προστασία ενάντια αυτών των διαλυτών μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας νέες εξελιγμένες μορφές plasticizer.

- Επιδράσεις σε άλλα υλικά

Λόγω του ότι το PVC περιέχει plasticizer μπορεί να καταστρέψει, σε βάθος χρόνου αρκετά υλικά με τα οποία έρχεται σε επαφή. Τα υλικά που επηρεάζονται περισσότερο είναι αυτά που περιέχουν polystyrene. Γενικά το PVC σκληραίνει και μπορεί να καταστρέψει τα περισσότερα υλικά στα οποία μπορεί να μεταδοθεί plasticizer.

- Ικανότητα ανάφλεξης

Το καθαρό PVC περιέχει 57% chlorine. Το γεγονός αυτό καθιστά το PVC πολύ ανθεκτικό σε μεγάλες θερμοκρασίες. Όμως το PVC που χρησιμοποιείται σε καλώδια υφίσταται μια διαδικασία που το κάνει πιο μαλακό, με προσθήκη διαφόρων ουσιών που μπορεί να είναι άκρως εύφλεκτες. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται κάποιοι ειδικοί χημικοί παράγοντες ώστε να αυξήσουν την ανθεκτικότητα του PVC σε μεγάλες θερμοκρασίες.

6.7.5 Polyamide (PA, Nylon)

Το polyamide χρησιμοποιείται κυρίως σαν προστατευτικό κάλυμμα πάνω από PE και PVC καλύμματα καλωδίων, για να αυξήσει την αντοχή του καλωδίου σε εξωτερικές δυνάμεις και χημικά. Το PA χρησιμοποιείται επίσης σαν απομονωτής οπτικών ινών. Το PA 12 χρησιμοποιείται σαν απομονωτής ενώ το PA 6 χρησιμοποιείται σαν κάλυμμα μηχανικής προστασίας.

- Θερμικές ιδιότητες

Το PA μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Συνιστώνται οι 90° C σαν θερμοκρασία συνεχούς λειτουργίας. Το PA αρχίζει να μαλακώνει στους 150° C ενώ μπορεί να παραμείνει εύκαμπτο ακόμα και στους - 40° C.

- Μηχανικές ιδιότητες

Σε σύγκριση με το PE και το PVC, το PA είναι πολύ ανθεκτικότερο σε εξωτερικές δυνάμεις. Στους 20° C το PA παρουσιάζει σημείο καταστροφής λόγω πίεσης 50 Μρα και μπορεί να επιμηκυνθεί κατά 100%.

- Αντοχή στο χρόνο και σε χημικά

Το PA είναι εξαιρετικά ανθεκτικό στο πέρασμα του χρόνου τόσο για indoor όσο και για outdoor εφαρμογές. Επίσης είναι ανθεκτικότερο από τα PE και PVC όσον αφορά τους διάφορους χημικούς παράγοντες που μπορεί να έρθει σε επαφή (έλαια και διαλύτες).

- Επιδράσεις σε άλλα υλικά

Το PA δεν περιέχει καθόλου plasticizer, έτσι δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου τα υλικά με τα οποία έρχεται σε επαφή. Επίσης σημαντικό είναι ότι δεν επηρεάζεται από το PVC αφού δεν είναι δυνατό να του μεταδοθεί plasticizer.

6.7.6 Polybutylene terephthalate (PBT)

Το PBT χρησιμοποιείται σαν δευτερεύον κάλυμμα για οπτικές ίνες, όπως το PA 12. Ανήκει στην κατηγορία των semicrystalline thermoplastic polyester και έχει εξαιρετικές μηχανικές και θερμικές ιδιότητες. Παρουσιάζει θερμικό σημείο καταστροφής στους 225o C και χρησιμοποιείται σε εύρος θερμοκρασιών 40° C μέχρι 140° C. Μπορεί να επιμηκυνθεί μέχρι και 100% πριν σπάσει και παρουσιάζει σημείο καταστροφής λόγω πίεσης στα 40 Mpa. Είναι εξαιρετικός μονωτής όσον αφορά την υγρασία και τα χημικά και δεν επηρεάζει κανένα υλικό που έρχεται σε επαφή, αφού δεν περιέχει σχεδόν καθόλου προσθετικές χημικές ουσίες.

6.7.7 Fluoroplastics (PTFE, FEP, E-TFE, E-CTFE)

Τα υλικά που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία περιέχουν halogens, fluorine και chlorine. Οι μηχανικές ιδιότητες αυτών των υλικών είναι εξαιρετικές. Επίσης, η αντοχή τους στο χρόνο, στις διάφορες χημικές ουσίες και στη θερμότητα είναι πολύ καλή, γεγονός που επιτρέπει τη χρήση τους σε πολύ μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και σε περιβαλλοντικές συνθήκες που η εγκατάσταση καλωδίων με καλύμματα από υλικά που αναφέρθηκαν παραπάνω θα ήταν αδύνατη.

6.7.8 Thermoplastic polyurethane elastomer

Το polyurethane ή thermoplastic polyurethane elastomer (TPU) είναι το ακριβότερο υλικό σε σχέση με τα παραπάνω, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται σπανιότερα στη βιομηχανία κατασκευής οπτικών καλωδίων. Παρουσιάζει τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες απ' όλα τα παραπάνω υλικά (55 Mpa) και μπορεί να

επιμηκυνθεί μέχρι και 700%. Η θερμική αντοχή του υλικού αυτού είναι επίσης πολύ καλή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των -40°C . Το TPU είναι εξαιρετικά ανθεκτικό σε όλες τις χημικές ουσίες και στο όζον και δεν περιέχει καθόλου plasticizer με αποτέλεσμα να μην επηρεάζει τα υλικά που έρχεται σε επαφή.

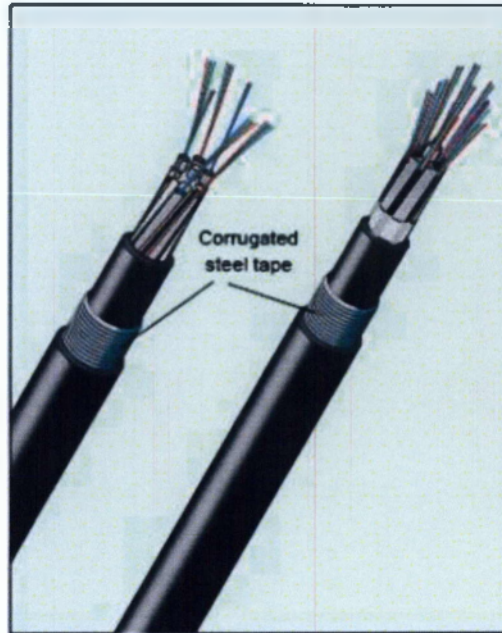
6.8 Έβδομη παράμετρος, ενίσχυση

Στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι απαραίτητο να τοποθετηθεί σε ένα οπτικό καλώδιο περαιτέρω ενίσχυση από αυτές που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τα οπτικά καλώδια που δεν έχουν extra ενίσχυση μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε όλες τις indoor όπως και στις περισσότερες outdoor εφαρμογές. Καλώδια που πρόκειται να εγκατασταθούν σε εξαιρετικά δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες, πρέπει να περιβάλλονται από συγκεκριμένη extra ενίσχυση για κάθε διαφορετική εφαρμογή. Οι πιο διαδεδομένοι τύποι extra ενίσχυσης είναι οι παρακάτω :

- Μεταλλική ταινία με αυλακώσεις
- Μεταλλικό νήμα
- Μεταλλική ταινία
- Ενθυλάκωση με αλουμίνιο ή χαλκό (υποβρύχια καλώδια)
- HET (θερμο-διαστελλόμενη ταινία) με κάλυμμα HDPE
- Νήματα aramide
- Διαστελλόμενο εξωτερικό σκέλος

6.8.1 Μεταλλική ταινία με αυλακώσεις

Προσθέτοντας ένα κάλυμμα μεταλλικής ταινίας με αυλακώσεις και ένα δεύτερο κάλυμμα polyethylene κατασκευάζουμε ένα οπτικό καλώδιο το οποίο μπορεί να εγκατασταθεί κάτω από την επιφάνεια. Τα καλώδια τέτοιου τύπου μπορούν να τοποθετηθούν κατευθείαν μέσα στο υπέδαφος ή μέσα σε μεγάλους υπόγειους αγωγούς. Τα οπτικά καλώδια με μεταλλική ταινία αυλακώσεων είναι πιο εύκαμπτα και πιο εύκολα στην εγκατάσταση από εκείνα που ενισχύονται με μεταλλικά νήματα.



6.8.2 Μεταλλικό νήμα, μεταλλική ταινία

Το μεταλλικό νήμα ή η μεταλλική ταινία τοποθετείται γύρω από το καλώδιο σπειροειδώς. Στη συνέχεια τοποθετείται ένα κάλυμμα από HD – polyethene σαν τελική θήκη του καλωδίου. Το πλεονέκτημα της ενίσχυσης αυτού του τύπου είναι ότι καθιστά το καλώδιο εξαιρετικά ανθεκτικό σε διαμήκεις και ακτινικές δυνάμεις.



6.8.3 HET (θερμο-διαστελλόμενη ταινία)

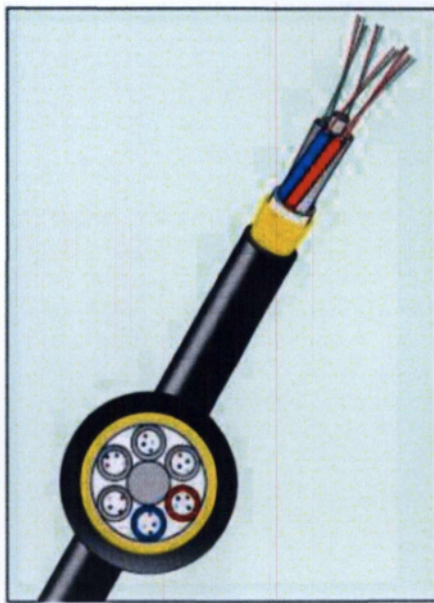
Μια νέα μέθοδος για την αύξηση της αντοχής των οπτικών καλωδίων σε ακτινικές δυνάμεις έχει εξελιχθεί από την εταιρία Ericsson. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη χρήση θερμο-διαστελλόμενης ταινίας. Τοποθετώντας μια HET πάνω από το πρωτεύον κάλυμμα του καλωδίου και στη συνέχεια άλλο ένα πλαστικό κάλυμμα, επιτυγχάνεται δραματική αύξηση της αντοχής του καλωδίου σε ακτινικές δυνάμεις (η ταινία διαστέλλεται όταν θερμανθεί αρκετά το τελικό κάλυμμα, με αποτέλεσμα το πρωτεύον κάλυμμα να μένει ανέπαφο).

Η ταινία αποτελείται από polyester μέσα στο οποίο υπάρχουν μικροσκοπικές φυσαλίδες που περιέχουν isobutene. Για θερμοκρασίες μεταξύ των 90 και 120° C οι φυσαλίδες διαστέλλονται καθώς διαστέλλεται το αέριο που περιέχουν. Η HET μπορεί να διαστέλλεται 300 με 400%. Καλώδια τέτοιου τύπου χρησιμοποιούνται για άμεση βύθιση στο υπέδαφος χωρίς χρήση μεγάλων αγωγών.



6.8.4 Νήματα Aramide

Όπως έχει περιγραφεί και στις παραπάνω παραγράφους, τα νήματα aramide χρησιμοποιούνται σαν ενίσχυση για τα πιο απλά οπτικά καλώδια. Τα νήματα aramide αυξάνουν κατά πολύ την αντοχή του καλωδίου σε διαμήκεις δυνάμεις. Η ενίσχυση αυτού του τύπου χρησιμοποιείται επίσης και για εναέριες εγκαταστάσεις.



6.8.5 Διαστελλόμενο εξωτερικό σκέλος

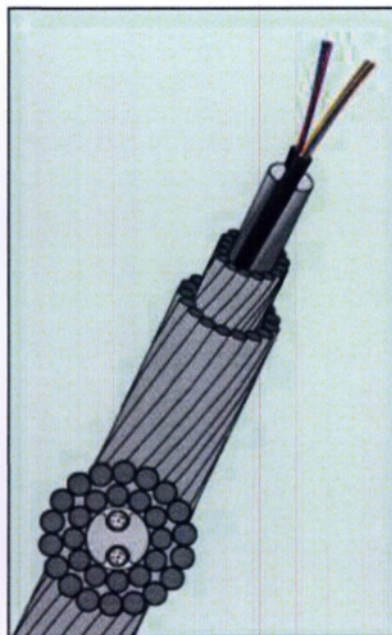
Η τεχνική αυτή είναι όμοια με εκείνη της HET. Τέτοιου τύπου ενισχύσεις εφαρμόζονται κυρίως σε οπτικά καλώδια με πυρήνα αυλακώσεων. Η παρακάτω εικόνα είναι αρκετά κατατοπιστική.



6.8.6 Οπτικό καλώδιο γείωσης (OPGW)

Το καλώδιο αυτό αποτελεί μια από τις τελευταίες εξελίξεις της βιομηχανίας κατασκευής οπτικών καλωδίων και αναμένεται να χρησιμοποιηθεί σε νέες γραμμές μεταφοράς ισχύος.

Ο κεντρικός πυρήνας κατασκευάζεται από αλουμίνιο, γύρω από το οποίο τυλίγονται ελικοειδώς σωλήνες που περιέχουν μέχρι και 12 ίνες. Γύρω από τον πυρήνα τοποθετούνται νήματα αλουμινίου, ώστε να παρέχεται αυξημένη αντοχή σε εξωτερικές δυνάμεις και μεγάλη αγωγιμότητα.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΛΗΛΟΥ ΚΑΛΩΔΙΟΥ ΟΠΤΙΚΗΣ

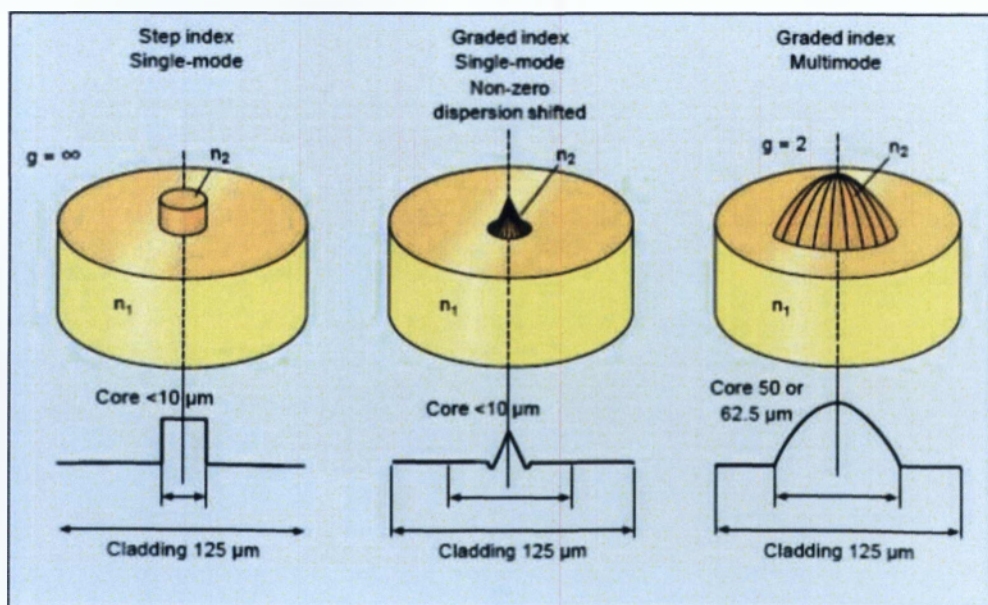
ΙΝΑΣ

7.1 Εισαγωγή

Αν θεωρήσουμε το δείκτη διάθλασης ενός οπτικού κυματοδηγού σαν συνάρτηση της ακτίνας του, τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον όρο «προφίλ δείκτη» για να περιγράψουμε, το πώς άγεται το φως μέσα στον κυματοδηγό. Το προφίλ δείκτη παρουσιάζει το πώς αλλάζει η τιμή του δείκτη από τον κεντρικό άξονα του κυματοδηγού προς την περιφέρειά του ή την επένδυσή του. Το φως θα άγεται ή/και θα διαθλάται σύμφωνα με το παραπάνω προφίλ. Ο δείκτης διάθλασης δίνεται ως συνάρτηση της ακτίνας :

$$n = n(r)$$

Ο τρόπος μετάδοσης του φωτός μέσα σε κυματοδηγό εξαρτάται από το προφίλ του δείκτη διάθλασης. Η γραφική παράσταση της μεταβολής του δείκτη διάθλασης στον πυρήνα τριών διαφορετικών τύπων οπτικής ίνας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Ο δείκτης διάθλασης μέσα σε μια ίνα μπορεί να περιγραφεί από τον παρακάτω μαθηματικό τύπο. Η βασική χρήση του τύπου είναι για πρακτικές εφαρμογές, ειδικά για εφαρμογές με πολύτροπες ίνες.

$$n(r) = n_2 \left[1 - \Delta \left(\frac{r}{a} \right)^g \right]$$

Ενώ για την επένδυση του πυρήνα, δηλαδή τον μανδύα της οπτικής ίνας, ισχύει ότι ο δείκτης διάθλασης παραμένει σταθερός και ίσος με n_1 . Για τον παραπάνω τύπο ισχύει:

n_2 = ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα της ίνας

Δ = η σχετική διαφορά στους δείκτες διάθλασης μεταξύ πυρήνα και μανδύα (επένδυσης) $\{\Delta = (n_2 - n_1) / n_2\}$

r = απόσταση από τον κεντρικό άξονα της ίνας σε μm

a = η ακτίνα του πυρήνα σε μm

g = προφίλ δείκτη

n_1 = ο δείκτης διάθλασης του μανδύα

Ο όρος Δ συνδέεται με το αριθμητικό άνοιγμα (NA) ή με τους δείκτες διάθλασης n_1 , n_2 ως εξής:

$$\Delta = \frac{NA^2}{2n_2^2} = \frac{n_2^2 - n_1^2}{2n_2^2} \approx \frac{n_2 - n_1}{n_2} \approx \frac{\Delta n}{n} \quad \text{for } \Delta \ll 1$$

Για το προφίλ δείκτη « g » υπάρχουν κάποιες ειδικές περιπτώσεις που αξίζει να αναφέρουμε:

$g = 1$ για τριγωνικό προφίλ δείκτη

$g = 2$ για παραβολικό προφίλ δείκτη

$g = \infty$ για ορθογώνιο βηματικό προφίλ δείκτη

Μόνο στην τελευταία περίπτωση ο δείκτης διάθλασης είναι σταθερός $n(r) = n_2$ για όλη τη διάμετρο του πυρήνα. Στις άλλες περιπτώσεις, ο δείκτης διάθλασης αλλάζει βαθμιαία από τον κεντρικό άξονα του πυρήνα προς τον μανδύα. Τα προφίλ στα

οποία ο δείκτης διάθλασης αλλάζει ονομάζονται βαθμιαία προφίλ δείκτη. Ο πιο συνηθισμένος τύπος βαθμιαίου προφίλ δείκτη είναι για $g = 2$ (παραβολικό), ο οποίος μας δίνει ουσιαστικά μια τέλεια αγωγήμη πολύτροπη ίνα.

7.2 Ρυθμοί Διάδοσης (Modes)

Οι «ρυθμοί διάδοσης» αποτελούν μαθηματικές και φυσικές μεθόδους περιγραφής της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε ένα αυθαίρετο μέσο. Στη μαθηματική τους μορφή, η θεωρία των ηλεκτρομαγνητικών ρυθμών διάδοσης προέρχεται από τις εξισώσεις Maxwell. Ο James Clark Maxwell ήταν ένας μεγάλος Σκοτσέζος μαθηματικός και φυσικός που έζησε στα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Με τις εξισώσεις του, ο Maxwell έδειξε ότι η ηλεκτρική και η μαγνητική ενέργεια αποτελούν δυο μορφές της ίδιας ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Οι 31 εξισώσεις του επίσης έδειξαν ότι η διάδοση ακολουθεί αυστηρούς κανόνες και οι ίδιες αποτελούν τη βάση της θεωρίας του ηλεκτρομαγνητισμού.

Ένας ρυθμός διάδοσης τελικά είναι μια δεκτή λύση των εξισώσεων Maxwell. Για λόγους ευκολίας, ένας ρυθμός διάδοσης μπορεί να περιγραφεί σαν μια δυνατή κατεύθυνση που μπορεί να ακολουθήσει ένα κύμα φωτός, όπως μέσα σε μια ίνα. Ο αριθμός των δυνατών ρυθμών διάδοσης ή αλλιώς των ενεργειακών διευθύνσεων που μπορούν να υπάρξουν μέσα σε μια οπτική ίνα μπορεί να είναι ένας μέχρι και εκατοντάδες χιλιάδες. Ο ακριβής αριθμός των δυνατών ρυθμών διάδοσης που μπορεί να υποστηρίξει μια ίνα, μπορεί να καθοριστεί από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ίνας και από τις οπτικές παραμέτρους της.

Ένας συγκεκριμένος ρυθμός διάδοσης θα μεταφέρει και ένα χαρακτηριστικό ποσό ενέργειας. Οι οπτικές ίνες που χρησιμοποιούνται σήμερα μπορεί να υποστηρίζουν μόνο ένα ρυθμό μετάδοσης (ονομάζονται μονότροπες ίνες) ή να υποστηρίζουν αρκετές εκατοντάδες ρυθμούς διάδοσης (ονομάζονται πολύτροπες ίνες). Όταν το φως εισέρχεται σε μια ίνα (κοντά στην πηγή φωτός) οι διάφοροι τρόποι θα μεταφέρουν πολύ μεγάλο ή πολύ μικρό ποσό ενέργειας ανάλογα με το φως που εισέρχεται. Ανάλογα με το μονοπάτι διάδοσης, η ενέργεια θα μεταφερθεί και θα διαχωριστεί στους διάφορους ρυθμούς διάδοσης (mode coupling) μέχρι ο καθένας απ' αυτούς να μεταφέρει το δικό του χαρακτηριστικό ποσό ενέργειας. Όταν το φως φτάσει στο παραπάνω στάδιο, δημιουργείται και διατηρείται μια ισορροπία

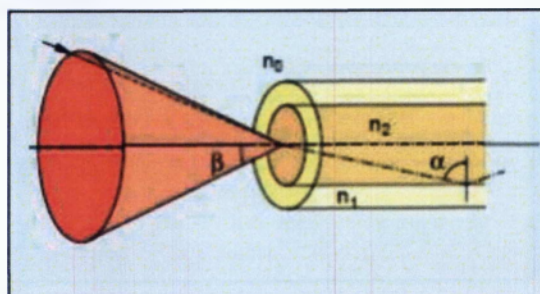
μεταξύ των ρυθμών διάδοσης. Σε πλαστική ίνα η ισορροπία αυτή λαμβάνει χώρα μετά από 1 -2m ίνας. Σε μια εξαιρετικής ποιότητας γυάλινη ίνα, η ισορροπία λαμβάνει χώρα μετά από αρκετές εκατοντάδες μέτρα μέχρι και ένα χιλιόμετρο. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα δυσκολίες στη μέτρηση και πιστοποίηση δικτύων οπτικών ινών, θέμα το οποίο θα μελετήσουμε πιο αναλυτικά στο κεφάλαιο «Όργανα μετρήσεων οπτικών ινών και πιστοποίηση σε μονότροπα δίκτυα».

7.3 Αριθμητικό άνοιγμα

Όταν το φως εισέρχεται σε μια οπτική ίνα, διαθλάται σε σχέση με τον κεντρικό άξονα, δημιουργώντας μια κάπως μεγαλύτερη τιμή για την γωνία πρόσπτωσης, τη γωνία αποδοχής. Η τιμή του ημίτονου της γωνία αποδοχής ονομάζεται αριθμητικό άνοιγμα (NA) και υπολογίζεται σαν συνάρτηση των δεικτών διάθλασης των δυο υλικών :

$$\sin \beta = \sqrt{n_2^2 - n_1^2}$$

Στην πραγματικότητα το άνοιγμα μέσω του οποίου εισέρχεται το φως μέσα στην ίνα είναι τριών διαστάσεων. Έτσι η γωνία αποδοχής είναι η γωνία ενός κώνου που ονομάζεται κώνος αποδοχής.



- Αριθμητικό άνοιγμα για ίνα με βαθμιαίο προφίλ δείκτη

Λόγω του ότι ο δείκτης διάθλασης σε μια ίνα με βαθμιαίο προφίλ δείκτη αλλάζει σε σχέση με την απόσταση από τον κεντρικό άξονα της ίνας $n(r)$, η γωνία αποδοχής του φωτός που εισέρχεται στην ίνα αλλάζει επίσης. Έτσι η γωνία αποδοχής δίνεται συναρτήσει της απόστασης r από τον παρακάτω τύπο :

$$\sin \beta(r) = \sqrt{n_2^2(r) - n_1^2} = NA \sqrt{1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2} \leq NA$$

Αυτό σημαίνει ότι η γωνία αποδοχής πλησιάζει πολύ τον κεντρικό άξονα της ίνας, καθώς μειώνεται βαθμιαία η τιμή προς τον μανδύα. Για μια συγκεκριμένη ίνα βαθμιαίου προφίλ δείκτη όπως στο προηγούμενο παράδειγμα, το αριθμητικό άνοιγμα δίνεται από τον τύπο :

$$NA = n_2 \sqrt{2 \cdot \Delta} = 1.46 \sqrt{2 \cdot 0.01} \approx 0.206$$

Η παραπάνω τιμή δίνει τη μέγιστη τιμή της γωνίας αποδοχής β_{\max} (η γωνία πλησιάζει πολύ τον άξονα της ίνας) :

$$\sin \beta_{\max} = NA \approx 0.206: \Rightarrow \beta_{\max} \approx 12^\circ$$

Με μια πιο ενδελεχή μελέτη, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι μια ίνα με βαθμιαίο προφίλ δείκτη και διάμετρο 50 μm δέχεται μόνο τη μισή ποσότητα φωτός από εκείνη που θα δεχόταν μια ίνα με την ίδια διάμετρο αλλά με βηματικό προφίλ δείκτη.

Η κατανομή των ρυθμών μετάδοσης είναι τέτοια, ώστε οι χαμηλής τάξης ρυθμοί να διαδίδονται κοντά στον κεντρικό άξονα, οι υψηλής τάξης ρυθμοί να διαδίδονται κοντά στο μανδύα, ενώ κάποιοι ρυθμοί να χάνονται μέσα στο μανδύα.

Οι τελευταίοι ρυθμοί ονομάζονται ρυθμοί διαρροής. Οι ρυθμοί διαρροής κατά ένα βαθμό ακτινοβολούνται και κατά ένα άλλο διαδίδονται μέσα στην ίνα.

7.4 Δείκτης διάθλασης ομάδας

Οι τιμές των δεικτών διάθλασης που βρίσκουμε στους πίνακες ή σε διάφορες λίστες αναφέρονται σε συγκεκριμένα υλικά. Σε μια οπτική ίνα, συνδυάζονται δυο ή περισσότεροι τύποι γυαλιού και στη συνέχεια χρησιμοποιείται acrylate ως βασικό επίστρωμα. Οι δείκτες διάθλασης των υλικών αυτών διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ τους

(συνήθεις τιμές είναι για τον πυρήνα 1.4485 , για τον μανδύα 1.444 και για το βασικό επίστρωμα acrylate 1.53). Όταν ένας παλμός φωτός μεταδίδεται μέσα σε ένα μέσο, χρησιμοποιείται μια διαφορετική παράμετρος, η οποία ονομάζεται δείκτης διάθλασης ομάδας. Για μια τυπική ίνα για την οποία οι δείκτες διάθλασης πυρήνα, μανδύα και βασικού επίστρώματος διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ τους, ο δείκτης διάθλασης ομάδας θα είναι κάπως μεγαλύτερος από εκείνο του πυρήνα. Το παραπάνω γεγονός πρέπει να το έχουμε πάντα στο μυαλό μας όταν χρησιμοποιούμε ένα οπτικό όργανο όπως το OTDR, αφού η λειτουργία του βασίζεται στη μέτρηση της ταχύτητας του φωτός μέσα στο εξεταζόμενο μέσο. Η ταχύτητα κάθε παλμού φωτός μέσα σε μια ίνα δίνεται από τον τύπο :

$$v = \frac{c}{n_g} \Rightarrow n_g = \frac{c}{v}; \quad n_g = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}$$

Όπου v είναι η ταχύτητα του παλμού του φωτός μέσα στην ίνα, c η ταχύτητα του φωτός στο κενό και n_g είναι ο δείκτης διάθλασης ομάδας της ίνας.

7.5 Διάμετρος του πεδίου του ρυθμού διάδοσης

Ο όρος διάμετρος πεδίου τρόπου, $2w_0$ εισήχθη στην οπτική ινών, για να περιγράψει την ακτινική διάδοση του θεμελιώδους ρυθμού διάδοσης LP₀₁ μέσα σε μια ίνα. Για να παραχθεί μια ίνα με χαμηλή εξασθένηση (step index fiber), ή αλλιώς μια ίνα με βηματικό προφίλ δείκτη που επιτρέπει τη διάδοση του θεμελιώδους ρυθμού μόνο σε μήκη κύματος μεγαλύτερα από 1200 nm, η διάμετρος του πεδίου του ρυθμού διάδοσης $2w_0$ μειώνεται στα 9 μm περίπου. Μια ίνα που επιτρέπει τη διάδοση μόνο του θεμελιώδους ρυθμού διάδοσης ονομάζεται μονότροπη ίνα.

7.6 Αποτελεσματική περιοχή

Το φαινόμενο της χρωματικής διασποράς (περιγράφεται αργότερα) στο παράθυρο των 1550 nm μειώθηκε δραματικά με τη χρήση της ίνας μετατοπισμένης διασποράς. Ένα μεγάλο μειονέκτημα της ίνας αυτής είναι ότι με τη χρήση της μειώνεται η αποτελεσματική περιοχή του πυρήνα. Η περιοχή αυτή αποτελεί το

«κομμάτι» του πυρήνα που οδηγεί το φως μέσα στην ίνα και σχετίζεται αλλά δεν ισούται με τη διάμετρο του πεδίου του ρυθμού διάδοσης. Η αποτελεσματική περιοχή μιας συνηθισμένης μονότροπης ίνας είναι περίπου 80 μm^2 και για μια αντίστοιχη ίνα μετατοπισμένης διασποράς είναι 55 μm^2 . Με τη χρήση των νέων laser υψηλής ισχύος μετάδοσης και των ενισχυτών EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifiers) η εισερχόμενη ισχύς στο σύστημα δημιούργησε αρκετά ανεπιθύμητα μη γραμμικά φαινόμενα. Γύρω στο 1996 οι μεγάλοι 38 κατασκευαστές οπτικών ινών εισήγαγαν τις ίνες μη μηδενικού μετατοπισμένου σημείου διασποράς.

7.7 Μη γραμμικά φαινόμενα

Η ισχύς εισόδου μιας ίνας έχει αυξηθεί σημαντικά στις μέρες μας. Η ανακάλυψη των οπτικών ενισχυτών σε συνδυασμό με την ταυτόχρονη μετάδοση πολλών μηκών κύματος έκανε πιο έντονη την εμφάνιση φαινομένων όπως τα μη γραμμικά φαινόμενα καθώς αυτά εμφανίζονται αποκλειστικά σε υψηλά επίπεδα ισχύος. Τα μη γραμμικά φαινόμενα χωρίζονται σε δυο κατηγορίες :

- 1) Διεγερόμενη σκέδαση
- 2) Διακυμάνσεις του δείκτη διάθλασης

Τα επίπεδα ισχύος στα οποία εμφανίζονται τα μη γραμμικά φαινόμενα ονομάζονται «κατώτατα όρια». Δε θα μελετήσουμε τα φαινόμενα αυτά σε βάθος, δεν είναι μέσα στους στόχους της εργασίας, εκτός από το φαινόμενο μείξης τεσσάρων κυμάτων που αποτελεί το πρώτο φαινόμενο που πρέπει να αντιμετωπίσουμε όταν έχουμε να κάνουμε με πολυπλεξία μήκους κύματος.

7.7.1 Διεγερόμενη σκέδαση Brillouin, SBC

Η διεγερόμενη σκέδαση Brillouin είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ ακουστικών κυμάτων και κυμάτων φωτός μέσα στην οπτική ίνα. Κάποιο ποσοστό του διαδιδόμενου φωτός διαδίδεται ξανά προς τα πίσω, με αποτέλεσμα να «κλέβει» ισχύ από το εμπρός διαδιδόμενο φως. Έτσι μειώνεται η ισχύς που φτάνει στο δέκτη. Η SBC εμφανίζεται για ισχύ εισόδου 6 – 20 dBm.

7.7.2 Διεγερόμενη σκέδαση Raman, SRS

Η διεγερόμενη σκέδαση Raman είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ του φωτός και των δονήσεων των μορίων της ίνας. Η SRS σκεδάζει φως και προς τα εμπρός και προς τα πίσω. Η μετάδοση ισχύος προς τα πίσω μπορεί να μηδενιστεί χρησιμοποιώντας ένα οπτικό απομονωτή. Η SRS εμφανίζεται για ισχύ εισόδου μεγαλύτερη από 27 dBm, δηλαδή κοντά στο 1 Watt. Η διεγερόμενη σκέδαση Raman αποτελεί σημαντικότερο πρόβλημα για την μετάδοση μέσω μίας οπτικής ίνας αλλά εμφανίζεται, όπως προαναφέραμε, αποκλειστικά όταν η ισχύς εισόδου είναι αρκετά υψηλή (περίπου 1 Watt). Τέτοια πάντως επίπεδα ισχύος στην είσοδο της οπτικής ίνας θεωρούνται υπερβολικά υψηλά ιδιαίτερα για τις μονότροπες ίνες. Γι αυτό η διεγερόμενη σκέδαση Raman υπό φυσιολογικές συνθήκες δεν εμφανίζεται σε ένα δίκτυο οπτικών ινών.

Σε αντίθεση με τη σκέδαση Raman η σκέδαση Brillouin εμφανίζεται για χαμηλότερη ισχύ εισόδου αλλά η επίδραση της δεν είναι τόσο σημαντική. Γενικώς, καλό είναι η ισχύς εισόδου να μην ξεπερνάει τα 6 dBm για να αποφεύγονται τα μη γραμμικά φαινόμενα που εμφανίζονται όταν το διαδιδόμενο σήμα έχει υψηλή ισχύ.

7.7.3 Self phase modulation, SPM (αυτό-διαμόρφωση φάσης)

Η SPM περιγράφει την επίδραση που έχει ένας παλμός φωτός στην ίδια του τη φάση. Η ίδια η ισχύς του διαδιδόμενου παλμού μπορεί να μεταβάλλει τον δείκτη διάθλασης της ίνας μέσα στην οποία διαδίδεται ο παλμός με διαφορετικό τρόπο για τα διάφορα μήκη κύματος. Ο μεταβαλλόμενος δείκτης διάθλασης διαμορφώνει τη φάση του μεταδιδόμενου κύματος. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί στην διεύρυνση το φάσματος του διαδιδόμενου παλμού. Αν είναι αρκετά μεγάλη αυτή η διεύρυνση μπορεί να επικαλυφθούν κανάλια σε συστήματα DWDM. Η SPM εμφανίζεται για ισχύ εισόδου μεγαλύτερη από 5 dBm.

Η αυτό-διαμόρφωση φάσης είναι ένα αρκετά σύνηθες φαινόμενο στα οπτικά δίκτυα που χρησιμοποιούν μονοτροπικές ίνες. Πέρα από την φασματική διεύρυνση του παλμού η αυτό-διαμόρφωση φάσης μπορεί να προκαλέσει και έντονη

παραμόρφωση της μορφής του παλμού. Η επίδραση του φαινομένου της αυτό-διαμόρφωσης γίνεται πιο έντονη καθώς αυξάνεται η ισχύς. Οπότε κρίνεται αναγκαίο κατά την διάδοση ενός παλμού μέσα από την οπτική ίνα, τα επίπεδα ισχύος του να μην ξεπερνούν αυτά στα οποία αρχίζει να εμφανίζεται το φαινόμενο της αυτό-διαμόρφωσης φάσης.

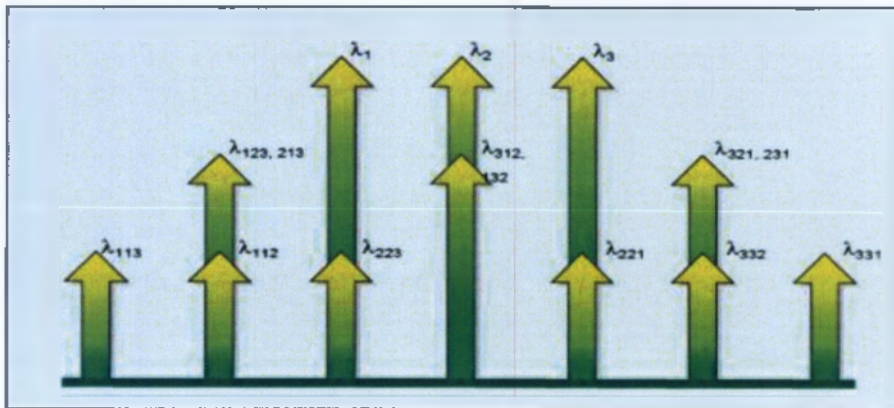
7.7.4 Cross phase modulation, XPM (ετερο-διαμόρφωση φάσης)

Η XPM σχετίζεται αρκετά με την SPM. Η SPM περιγράφει την επίδραση που έχει ένας παλμός στον εαυτό του ενώ η XPM περιγράφει την επίδραση που έχει ένας παλμός στους παλμούς άλλων καναλιών. Η SPM μπορεί να εμφανιστεί σε μονοκάναλα και πολυκάναλα συστήματα ενώ η XPM εμφανίζεται μόνο σε πολυκάναλα συστήματα. Η XPM εμφανίζεται για ισχύ εισόδου μεγαλύτερη από 5 dBm ενώ η επίδρασή της είναι ίδια με την SPM. Συνήθως το φαινόμενο της ετερο-διαμόρφωση φάσης εμφανίζεται στις πολύτροπες ίνες όπου κύματα με διαφορετικά μήκη κύματος διαδίδονται.

7.7.5 Μείξη τεσσάρων κυμάτων

Ένα από τα πιο σοβαρά μη γραμμικά φαινόμενα είναι η μείξη τεσσάρων κυμάτων. Εμφανίζεται όταν πολλαπλά σήματα μεταδίδονται ταυτόχρονα. Τα σήματα αυτά «αναμειγνύονται» με αποτέλεσμα να παράγουν νέα κανάλια που μπορούν να «κλέψουν» ισχύ από τα ήδη υπάρχοντα κανάλια και να τα επικαλύψουν. Το παρακάτω σχήμα παριστάνει το παραπάνω φαινόμενο για 3 κανάλια που ισαπέχουν μεταξύ τους λ_1 , λ_2 και λ_3 .

Λόγω του ότι τα κανάλια (μήκη κύματος) ισαπέχουν μεταξύ τους σε αυτό το παράδειγμα, κάποια από τα σήματα που δημιουργούνται επιδρούν στα ήδη υπάρχοντα κανάλια. Το φαινόμενο της μείξης των τεσσάρων κυμάτων εμφανίζεται για ισχύ εισόδου μεγαλύτερη από 0 dBm.



7.8 Πολύτροπη ίνα με ορθογώνιο προφίλ δείκτη

Αν χρησιμοποιήσουμε μια ίνα με ορθογώνιο προφίλ δείκτη (πλαστική ίνα ή ίνα με κρυσταλλικό πυρήνα και πλαστικό μανδύα) για τη μετάδοση φωτός χρησιμοποιώντας τον παράγοντα ολικής ανάκλασης, πρέπει ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα να είναι μεγαλύτερος από τον δείκτη διάθλασης του μανδύα. Αν ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα είναι σταθερός σε όλη την ακτίνα του πυρήνα, η ίνα ονομάζεται ίνα βηματικού δείκτη (step index).

Αυτού του είδους η ίνα είναι εύκολο να κατασκευαστεί, αλλά λόγω των σχετικά χαμηλών δυνατοτήτων μετάδοσής που παρουσιάζει, χρησιμοποιείται μόνο για μετάδοση πληροφοριών σε μικρές αποστάσεις.

7.9 Πολύτροπη ίνα με βαθμιαίο προφίλ δείκτη

Όπως αναφέρθηκε και πριν, μια πολύτροπη ίνα με ορθογώνιο προφίλ δείκτη μεταδίδει ταυτόχρονα ένα μεγάλο αριθμό τρόπων. Κάθε ένας από αυτούς τους τρόπους έχει διαφορετικό μήκος διαδρομής μέσα στην ίνα, έτσι κάθε ένας φτάνει στο τέλος της ίνας σε ελάχιστο διαφορετικό χρόνο (modal διασπορά). Η modal διασπορά μπορεί να μειωθεί αισθητά, αν ο δείκτης διάθλασης μεταβάλλεται από το κέντρο του πυρήνα προς το μανδύα. Ο δείκτης διάθλασης μεταβάλλεται παραβολικά, έτσι ώστε να παρουσιάζει μέγιστο στο κέντρο του πυρήνα και ελάχιστο στο σημείο ένωσης του

πυρήνα με το μανδύα. Μια ίνα της οποίας ο δείκτης διάθλασης μεταβάλλεται παραβολικά με $g = 2$ ονομάζεται ίνα βαθμιαίου δείκτη.

Τα κύματα φωτός διαδίδονται στο εσωτερικό της ίνας ακολουθώντας ελικοειδή κίνηση. Η modal διασπορά οφείλεται στη διαφοροποίηση του δείκτη από το ιδανικό παραβολικό προφίλ. Διαφοροποιήσεις όπως η τιμή του g και η σχετική διαφοροποίηση δείκτη διάθλασης εξαρτώνται από το μήκος κύματος. Οι πολύτροπες ίνες γενικά χρησιμοποιούνται σε εσωτερικά δίκτυα. Η μεγαλύτερη διάμετρος του πυρήνα επιτρέπει ευκολότερη σύνδεση της ίνας στον εξοπλισμό μετάδοσης. Η ίνα αυτή χρησιμοποιείται σε δίκτυα δεδομένων, σε εφαρμογές αισθητήρων και ικανοποιεί τις απαιτήσεις των FDDI δικτύων (Fiber Distributed Data Interface). Γενικά, όταν αναφερόμαστε σε πολύτροπη ίνα θα εννοούμε πολύτροπη ίνα με βαθμιαίο δείκτη. Αυτές οι ίνες μπορεί να χρησιμοποιηθούν για μήκη κύματος 850 nm και 1300 nm ή σε εφαρμογές διπλού παραθύρου.

Τεχνικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στο τέλος της διπλωματικής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΠΗΓΕΣ ΦΩΤΟΣ

8.1 Εισαγωγή στις πηγές φωτός

Ο σκοπός του πομπού είναι η μετατροπή του ηλεκτρικού σήματος στο απαραίτητο ηλεκτρικό ρεύμα έτσι ώστε να λειτουργήσει μια πηγή φωτός. Τα ηλεκτρικά σήματα είναι είτε αναλογικά είτε ψηφιακά. Εάν το σήμα είναι ήδη ψηφιακό, ο πομπός πρέπει να αποτελείται από ένα ολοκληρωμένο το οποίο θα παρέχει ταχύτατη εναλλαγή παλμικής κωδικοποίησης. Εάν το σήμα είναι αναλογικό, ο πομπός θα πρέπει να παρέχει ρεύμα σε μια πηγή φωτός έτσι ώστε να γίνει η εκπομπή των εναλλαγών του σήματος.

Οι κυριότερες πηγές που χρησιμοποιούνται στα οπτικά συστήματα μετάδοσης είναι οι ημιαγώγιμες δίοδοι **Laser** και οι **LED**. Και τα δυο είδη πηγών είναι κατάλληλα γι' αυτά τα συστήματα γιατί:

1. Η εξερχόμενη απ' αυτές οπτική ισχύς είναι επαρκής για μεγάλο εύρος εφαρμογών.
2. Η εξερχόμενη ισχύς μπορεί απ' ευθείας να διαμορφωθεί μεταβάλλοντας απλά το ρεύμα εισόδου της πηγής.
3. Έχουν μεγάλη αποδοτικότητα.
4. Οι διαστάσεις των διατομών τους ταιριάζουν μ' αυτές των οπτικών ινών.

Η επιλογή του είδους της πηγής φωτός που θα χρησιμοποιηθεί σε ένα οπτικό σύστημα μετάδοσης βασίζεται σε αρκετούς παράγοντες όπως:

1. Μήκος κύματος εκπομπής.
2. Σχέση ισχύος και απόστασης μετάδοσης.
3. Το πλάτος του εύρους των μηκών κύματος.
4. Αποτελεσματικός τρόπος διοχέτευσης του παραγόμενου φωτός στην οπτική ίνα μετάδοσης.

8.2 LED

Δίοδος Εκπομπής Φωτός, LED (Light Emitting Diode), αποκαλείται ένας ημιαγωγός ο οποίος εκπέμπει φωτεινή ακτινοβολία στενού φάσματος όταν του παρέχεται μία ηλεκτρική τάση κατά τη φορά ορθής πόλωσης (forward-biased). Το χρώμα του φωτός που εκπέμπεται εξαρτάται από την χημική σύσταση του ημιαγωγίμου υλικού που χρησιμοποιείται, και μπορεί να είναι στο υπεριώδες, στο ορατό ή στο υπέρυθρο. Το μήκος κύματος του φωτός που εκπέμπεται και κατά συνέπεια, το χρώμα του, εξαρτάται από το ενεργειακό χάσμα των υλικών τα οποία χρησιμοποιούνται για την δημιουργία του περάσματος p-n (επαφή p-n), όπου:

- p = Υλικό εμπλουτισμένο με αποδέκτες (πλεόνασμα θετικού φορτίου, δέκτες ηλεκτρονίων).
- n = Υλικό εμπλουτισμένο με δότες (πλεόνασμα αρνητικού φορτίου, δότες ηλεκτρονίων)

Η βασική αρχή των LED είναι μια επαφή p-n η οποία πολώνεται ορθά για να εγχέει ηλεκτρόνια και οπές μέσα στις p- και n- πλευρές, αντίστοιχα. Το εγχέομενο φορτίο μειονότητας επανασυνδέεται με το φορτίο πλειονότητας στην περιοχή απογύμνωσης ή στην ουδέτερη περιοχή. Σε ημιαγωγούς άμεσου διάκενου η επανασύνδεση οδηγεί σε εκπομπή φωτός (φωτόνια). Αυτή η ακτινοβολία επανασύνδεσης κυριαρχεί σε υλικά υψηλής ποιότητας. Σε υλικά έμμεσου χάσματος, η απόδοση εκπομπής φωτός είναι αρκετά φτωχή και οι περισσότερες από τις διαδρομές επανασύνδεσης είναι μη ακτινοβόλες. Σε αυτές εκπέμπεται περισσότερο θερμότητα παρά φως.

Η δομή ενός LED πρέπει να είναι τέτοια ώστε τα εκπεμπόμενα φωτόνια να μπορούν να απομακρύνονται από την διάταξη χωρίς να επαναπορροφώνται από το ημιαγωγίμο υλικό. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πολλά ημιαγωγίμα υλικά άμεσου ενεργειακού διάκενου, τα οποία μπορούν εύκολα να νοθευτούν (εμπλουτιστούν) και να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή εμπορικών LED που εκπέμπουν ακτινοβολία στην ερυθρή και την υπέρυθρη περιοχή μηκών κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η εξωτερική απόδοση ($\eta_{\text{εξ}}$) ενός LED είναι ένα μέτρο της απόδοσης της μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε εξωτερικά εκπεμπόμενη φωτεινή ενέργεια. Στο μέγεθος αυτό συνυπολογίζεται η εσωτερική απόδοση της ακτινοβολούσας διαδικασίας επανασύνδεσης και η επακόλουθη απόδοση της εξόδου

των φωτονίων από την διάταξη. Η ισχύς της ηλεκτρικής ενέργειας στην είσοδο ενός LED ισούται απλά με το γινόμενο του ρεύματος επί την ηλεκτρική τάση της διόδου ($I \times V$). Αν η φωτεινή ισχύς που εκπέμπεται από την διάταξη είναι P_{out} , τότε:

$$\eta_{εξ} = (P_{εξ,(οπτική)} / I \cdot V) \times 100\%$$

Για τους ημιαγωγούς εμμέσου ενεργειακού διακένου, η τιμή της απόδοσης είναι μικρότερη από 1%, ενώ για τους ημιαγωγούς αμέσου ενεργειακού διακένου με την ορθή δομή διάταξης, η $\eta_{εξ}$ μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη.

8.2.1 Πλεονεκτήματα των LED

1. Η κατασκευή τους είναι απλούστερη σε σύγκριση με τα laser αφού δεν απαιτούνται κάτοπτρα και η γεωμετρία τους είναι απλή.
2. Το κόστος κατασκευής και συντήρησης τους είναι χαμηλό.
3. Είναι αξιόπιστες πηγές καθώς δεν εμφανίζουν καταστροφική υποβάθμιση και δεν είναι τόσο ευαίσθητες στη σταδιακή γήρανση όσο τα laser.
4. Η εξερχόμενη οπτική ισχύς, η οποία συνδέεται με τη χαρακτηριστική του ρεύματος, δεν εξαρτάται τόσο από τη θερμοκρασία όσο η αντίστοιχη οπτική ισχύς του laser. Αυτό το γεγονός αυξάνει την πολυπλοκότητα του κυκλώματος του laser, γιατί χρησιμοποιούνται επιπρόσθετα είτε μηχανισμοί ψύξης του, είτε μηχανισμοί ρύθμισης του ρεύματος πρόληψης του προκειμένου η θερμοκρασία του να διατηρείται σταθερή. Επίσης η LED δεν είναι μια διάταξη κατωφλίου και έτσι αυξάνοντας τη θερμοκρασία δεν αυξάνεται το ρεύμα κατωφλίου πάνω από το σημείο λειτουργίας, πράγμα που θα οδηγούσε στην κακή λειτουργία του συστήματος.
5. Κάτω από ιδανικές συνθήκες, έχει γραμμική έξοδο, όσον αφορά τη χαρακτηριστική ρεύματος, σε αντίθεση με το laser. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία σε περιπτώσεις όπου έχουμε αναλογική διαμόρφωση.

8.2.2 Μειονεκτήματα των LED

1. Κόστος αγοράς

Ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα των LEDs είναι φυσικά το κόστος αγοράς. Και όταν λέμε κόστος, το αναφέρουμε βάσει κόστους/μονάδας μέτρησης φωτεινότητας. Πιο απλά, για να παράγουμε συγκεκριμένη φωτεινότητα, θα πρέπει να πληρώσουμε πιο πολλά για αγορά led, παρά για αγορά πυρακτώσεως - φθορισμού - αλογόνου.

2. Ευαισθησία σε θερμοκρασίες

Τα LEDs αποτελούνται από μικροσκοπικά λαμπάκια και ένα κύκλωμα που τους επιτρέπει να λειτουργούν όπως απαιτείται για τη χρήση τους. Όλο το σύνολό τους, αν και δεν ζεσταίνεται συνήθως, είναι ευαίσθητο στις υψηλές θερμοκρασίες. Αν για κάποιο λόγο ζεσταθεί, υπάρχει κίνδυνος να αστοχήσει κάποιο μέρος του κυκλώματος κι έτσι να μην λειτουργεί όλο το κύκλωμα, οπότε να χρειάζεται εξολοκλήρου αντικατάσταση.

3. Ευαισθησία στην τάση

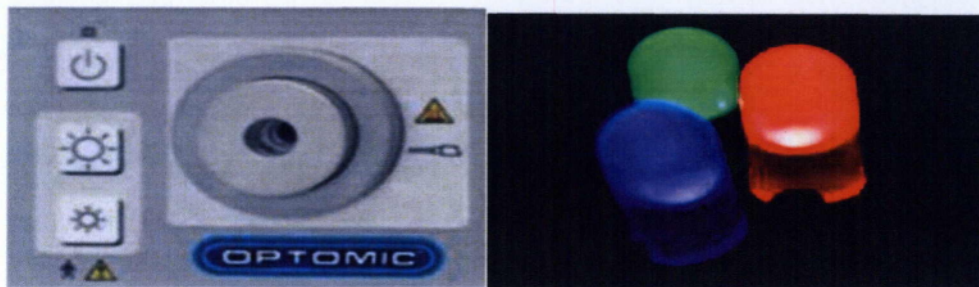
Ένα άλλο μειονέκτημα των LEDs είναι ότι είναι ευαίσθητα στην τάση. Αν για κάποιο λόγο εφαρμοστεί τάση μεγαλύτερη από την προτεινόμενη, τότε αυτά καταστρέφονται.

4. Παράγουν κυρίως κατευθυνόμενο φως

Το συγκεκριμένο, μερικές φορές μας εξυπηρετεί και δεν θα λέγαμε ότι αποτελεί ένα από τα βασικά μειονεκτήματα των LEDs. Τα LEDs κατευθύνουν το φως που παράγουν προς μία κατεύθυνση συγκεκριμένα, κάνοντας έτσι δυσκολότερη τη διάχυση. Πιο συγκεκριμένα, ένα σύνολο από LEDs που "κοιτάνε" προς διάφορες κατευθύνσεις, δεν θα μας δώσει μία ομοιόμορφη διαχυτικότητα φωτός όπως θα μας έδινε, για παράδειγμα, μία λάμπα πυρακτώσεως. Αντίστοιχα, σε έναν κρυφό φωτισμό, αν δεν τοποθετηθούν επιδέξια, μπορεί να μη φαίνεται το απαλό ομοιόμορφο φως, αλλά μικρές "έντονες" λάμπεις επάνω στον τοίχο, που παράγονται από κάθε led.

5. Μόλυνση από το μπλε

Επειδή τα μπλε LEDs και αυτά του ψυχρού λευκού είναι πλέον ικανά να εκπέμπουν περισσότερο μπλε φως απ' όπi οι κοινές πηγές φωτός, όπως οι λάμπες νατρίου υψηλής πίεσης, η ισχυρή εξάρτηση από το μήκος κύματος της σκέδασης Rayleigh σημαίνει ότι τα LED μπορούν να προκαλέσουν περισσότερη φωτορύπανση απ' όπi οι άλλες πηγές φωτός.



8.3 Laser

Ο όρος λέιζερ προέρχεται από το αγγλικό ακρωνύμιο Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) 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 λέιζερ παράγουν σύμφωνο, μονοχρωματικό φως (δηλαδή φως με συγκεκριμένο μήκος κύματος-χρώμα) το οποίο διαδίδεται σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, σχηματίζοντας στενές δέσμες. Αντίθετα, οι συνηθισμένες πηγές φωτός, όπως οι λαμπτήρες πυρακτώσεως, παράγουν μη-σύμφωνο φως προς όλες τις διευθύνσεις και, επιπλέον, έχουν μεγάλο φασματικό εύρος. Η λειτουργία των λέιζερ ερμηνεύεται από την θεωρία της κβαντικής μηχανικής και της θερμοδυναμικής. Πολλά υλικά έχουν βρεθεί ότι έχουν τα απαραίτητα χαρακτηριστικά για να αποτελέσουν ενεργό υλικό των λέιζερ, με αποτέλεσμα την δημιουργία πολλών τύπων λέιζερ με διαφορετικά χαρακτηριστικά, που χρησιμοποιούνται σε μεγάλο εύρος εφαρμογών. Η εφεύρεση των λέιζερ στηρίχθηκε στην κατασκευή των Μείζερ στην δεκαετία του 1950. Το πρώτο λέιζερ κατασκευάστηκε το 1960, από τότε όμως τα λέιζερ βρήκαν εφαρμογή στις θετικές επιστήμες, στην βιομηχανία, στην ιατρική, και στην ηλεκτρονική.

8.3.1 Τύποι Laser

Μπορούμε να κατατάξουμε τα laser σε κατηγορίες σύμφωνα με το είδος του ενεργού υλικού τους (στερεό, αέριο), την περιοχή εκπομπής τους (υπεριώδης, μικροϋπέρυθρη, υπέρυθρη, μακροϋπέρυθρη) ή την ισχύ τους (από mW έως TW). Ο πιο συνηθισμένος διαχωρισμός τους είναι με βάση τον τρόπο διέγερσης τους και έχουμε τις ακόλουθες κατηγορίες:

1. Laser οπτικής άντλησης: στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα laser στερεού, με βασικούς εκπροσώπους τα laser ερυθρού Nd:YAG και Nd:Glass. Βασικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι η αναστροφή των πληθυσμών επιτυγχάνεται με τη διαδικασία της οπτικής άντλησης, δηλαδή με τον έντονο φωτισμό του ενεργού μέσου. Άλλα χαρακτηριστικά τους είναι η υψηλή ισχύς εξόδου τους (τάξης MWatt σε παλμική λειτουργία) και η δυνατότητα παραγωγής παλμών μικρής χρονικής διάρκειας της τάξης των nsec.

2. Laser ηλεκτρικής εκκένωσης: στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα laser των ατομικών, μοριακών και ιοντικών αερίων. Μπορούν να λειτουργήσουν συνεχώς ή παλμικά. Η περιοχή εκπομπής τους αρχίζει από την υπεριώδη και φθάνει μέχρι τη μακροϋπέρυθρη περιοχή ακτινοβολίας. Αντιπροσωπευτικά laser της κατηγορίας αυτής είναι τα N₂, He-Ne, CO₂, κλπ. Στα laser αυτά, η διέγερση είναι αποτέλεσμα μιας ηλεκτρικής εκκένωσης (αυτή είναι και η βασική τους αρχή). Ηλεκτρόνια επιταχύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο, που δημιουργείται από μία μεγάλη διαφορά δυναμικού, συγκρούονται με τα άτομα, μόρια ή ιόντα του ενεργού αερίου και τα διεγείρουν.

3. Χημικά laser: στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα laser της σειράς του HF και του CO. Η αναστροφή των πληθυσμών στην περίπτωση αυτή, είναι άμεσο ή έμμεσο αποτέλεσμα μίας σειράς εξώθερμων χημικών αντιδράσεων. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των χημικών laser και ιδιαίτερα του HF, είναι ότι μπορούν να λειτουργήσουν συνεχώς ή παλμικά με ηλεκτρική απόδοση μεγαλύτερη του 100%. Αυτό βέβαια οφείλεται στο ότι σαν ηλεκτρική απόδοση ορίζεται ο λόγος της φωτεινής ενέργειας που παράγεται από το laser, προς την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνει το laser.

4. **Laser δέσμης ηλεκτρονίων**: σε αυτά τα laser έχουμε μια κατευθυνόμενη δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας. Χαρακτηριστικό τους γνώρισμα, πέρα από την υψηλή ενέργειά τους, είναι η ισχύς τους. Προς το παρόν, η χρήση τους περιορίζεται κυρίως σε ενεργά υλικά CO₂, HF και DF.

5. **Laser διεγερμένων διμερών**: πρόκειται για μια ενδιαφέρουσα κατηγορία laser (π.χ. ArF με $\lambda=193\text{nm}$), που εκπέμπουν στην περιοχή της υπεριώδους ακτινοβολίας. Οι διεργασίες άντλησης και δημιουργίας αναστροφής πληθυσμών αυτών των laser είναι πολύπλοκες. Ο συνήθης τρόπος διεγερσης είναι η ηλεκτρική εκκένωση. Πολλές φορές, όμως, όταν απαιτείται μεγάλη ισχύς laser, χρησιμοποιούνται και δέσμες ηλεκτρονίων.

6. **Laser φωτολυτικής άντλησης**: στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται ένα φλας για να διασπάσει μία χημική ένωση και να δημιουργήσει το διεγερμένο ενεργό υλικό. Τα πιο γνωστά laser της κατηγορίας αυτής είναι το laser ιωδίου, που εκπέμπει στα 1315 μm .

7. **Laser που διεγείρονται από άλλα laser**: η εξωτερική πηγή άντλησης είναι ένα άλλο laser. Τα συστήματα αυτά παράγουν δέσμες laser στη μακροϋπέρυθρη περιοχή ακτινοβολίας και συγκεκριμένα σε μήκος κύματος $\lambda=20\text{-}2000\mu\text{m}$, όταν γίνεται χρήση αντλίας υπέρυθρης ακτινοβολίας. Από τους πιο επιτυχημένους συνδυασμούς είναι τα laser CO₂.

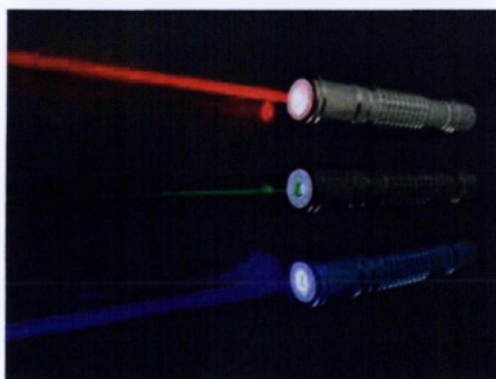
8. **Laser ημιαγωγών**: είναι τα πιο μικρά σε διαστάσεις laser και παράγονται μαζικά με τεχνολογία και μεθόδους κατασκευής διόδων και τρανζίστορ. Λόγω του μικρού τους μεγέθους και της υψηλής απόδοσης τους, είναι πιο κατάλληλες πηγές για συστήματα τηλεπικοινωνιακών οπτικών ινών. Η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη σήμερα κρυσταλλοδίοδος laser είναι η κρυσταλλοδίοδος GaAlAs η οποία εκπέμπει στα 0,82 μm και αποτελεί ιδανική φωτεινή πηγή για οπτικές επικοινωνίες.

Όταν η δίοδος είναι ορθά πολωμένη, τότε εκπέμπει ακτινοβολία, ενέργειας ίσης με αυτήν του ενεργειακού χάσματος του ημιαγωγού και μήκους κύματος που συνήθως βρίσκεται στην περιοχή του ορατού ή του εγγύς υπέρυθρου φωτός. Αν δημιουργηθεί αναστροφή πληθυσμών τότε η εκπομπή θα είναι εξαναγκασμένη και θα έχουμε εκπομπή laser. Αν η εκπομπή είναι αυθόρμητη τότε θα έχουμε εκπομπή

φωτοδίοδου (L.E.D.) και όχι εκπομπή laser. Το μήκος κύματος εκπομπής ορίζεται σαφώς ως το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού. Οι περισσότερες φωτοδίοδοι εκπέμπουν κόκκινο ή πορτοκαλί χρώμα. Για να μετατραπεί μια φωτοδίοδος σε δίοδο laser πρέπει να υπάρχουν απαραίτητες συνθήκες laser. Το ενεργό υλικό βρίσκεται στην περιοχή επαφής της δίοδου και η αύξηση του ρεύματος διέγερσης οδηγεί σε δημιουργία αναστροφής πληθυσμών. Δεν υπάρχει ανάγκη για εξωτερικά κάτοπτρα, γιατί εξασφαλίζεται μεγάλη ανακλαστικότητα λόγω των μεγάλων δεικτών διάθλασης αυτών των ημιαγωγών. Οι δίοδοι, που μπορούν να λειτουργήσουν σαν laser ή σαν φωτοδίοδοι, παρουσιάζουν διαφορετικό εύρος φάσματος εκπομπής

8.3.2 Πλεονεκτήματα Laser

1. Έχει μικρότερο χρόνο απόκρισης, με αποτέλεσμα να είναι εφικτοί υψηλότεροι ρυθμοί διαμόρφωσης, άρα και υψηλότεροι ρυθμοί μεταφοράς.
2. Παρέχει στενότερο φασματικό εύρος το οποίο σημαίνει μικρότερη διαταραχή του σήματος λόγω μικρότερης διασποράς. Αυτό έχει μεγάλη σημασία όταν η διάδοση γίνεται στα 800-900nm όπου το φασματικό εύρος μιας LED και η διασπορά των ινών από SiO_2 περιορίζουν το γινόμενο του ρυθμού δεδομένων επί την απόσταση σε $150(\text{Mb/s}) \cdot \text{Km}$.
3. Όταν επιζητούνται τιμές μέχρι $2500(\text{Mb/s}) \cdot \text{Km}$, τότε σίγουρα χρησιμοποιούνται Laser. Αντίθετα, σε μήκος κύματος γύρω στα 1.3μm, όπου η διασπορά του σήματος είναι πολύ μικρή, επιτυγχάνονται τουλάχιστον $1500(\text{Mb/s}) \cdot \text{Km}$ με LED, ενώ με InGaAsP lasers πάνω από $25(\text{Gb/s}) \cdot \text{Km}$.
4. Μεγαλύτερο ποσοστό οπτικής ισχύος (περίπου 10-15dB περισσότερο) μπορεί να συζευχθεί σε μια οπτική ίνα από μια δίοδο laser, επιτρέποντας μ' αυτόν τον τρόπο τη μετάδοση του σήματος σε μεγαλύτερες αποστάσεις.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο

Εφαρμογές των οπτικών ινών

9.1 Εισαγωγή

Οι οπτικές ίνες έχουν πάρα πολλές εφαρμογές στην καθημερινότητά μας. Χρησιμοποιούνται ευρέως για την φωταγωγή καταστημάτων αλλά και έργων τέχνης, για τον φωτισμό πλυσίμων, σε συστήματα αρχιτεκτονικού φωτισμού καθώς επίσης και για βιομηχανικό έλεγχο. Μεγάλη εφαρμογή, επίσης, βρίσκουν και σε συστήματα οικονομικών υπηρεσιών, σε τοπικά και μητροπολιτικά δίκτυα, αλλά κυρίως στην ιατρική και στις τηλεπικοινωνίες. Να αναφέρουμε επίσης ότι οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται σε σύγχρονα επιστημονικά όργανα ανίχνευσης παραμορφώσεων, πίεσης, θερμοκρασίας (ηφαιστειών και πυρηνικών αντιδραστήρων), καθώς και άλλων μεγεθών.

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.

9.2 Τηλεπικοινωνίες

Η χρήση των οπτικών ινών στον τομέα των τηλεπικοινωνιών έφερε την επανάσταση στις επικοινωνίες για πολλούς λόγους:

- Με την βοήθεια μιας ίνας μπορούμε να μεταφέρουμε ταυτόχρονα και χωρίς παρεμβολές χιλιάδες τηλεφωνήματα και δεκάδες εκπομπές τηλεοπτικών καναλιών.
- Ένα καλώδιο οπτικών ινών μπορεί να αντικαταστήσει χάλκινο καλώδιο δεκαπλάσιας διαμέτρου και τριακονταπλάσιου βάρους.
- Κατά την διάρκεια μετάδοσης της πληροφορίας δεν υπάρχουν παράσιτα.

- Είναι δύσκολη η υποκλοπή των δεδομένων (τοποθέτηση καρτών).
- Δυνατότητα παραγωγής από κάθε χώρα με αποτέλεσμα την απεξάρτηση από τις χώρες που παράγουν χαλκό.

9.3 Ιατρική

Οι οπτικές ίνες εκτός από τις τηλεπικοινωνίες βρίσκουν εφαρμογές και στην ιατρική.

- Υιοθέτηση ταυτόχρονα με τη χρήση των λέιζερ.
- Οι οπτικές ίνες δίνουν τη δυνατότητα μεταφοράς της φωτεινής δέσμης λέιζερ από την πηγή μέχρι τη λαβή, που πρέπει να χειρίζεται ο γιατρός δίπλα στον ασθενή.
- Στην ιατρική, οι οπτικές ίνες ονομάζονται και φωταγωγοί, όπου χρησιμοποιούνται ευρύτατα και ειδικότερα σε ενδοσκοπήσεις δίνοντας οπτική εικόνα από τον περιορισμένο χώρο των εσωτερικών οργάνων του ανθρώπινου σώματος.
- Οι γιατροί μπορούν να δουν την εσωτερική επιφάνεια μέρους του στομαχιού ή άλλου οργάνου χρησιμοποιώντας ζεύγος οπτικών ινών.
- Η μικρή διάσταση του πυρήνα παρέχει τη δυνατότητα μετάδοσης εικόνας ακόμα και χωρίς τη χρήση άλλων οπτικών συστημάτων (π.χ. φακών)

9.4 Πλεονεκτήματα των οπτικών ινών

Η υψηλή διείσδυση της τεχνολογίας των οπτικών ινών στις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες δεν είναι τυχαία, αλλά αντίθετα οφείλεται στον μεγάλο αριθμό πλεονεκτημάτων της, τα οποία συνοψίζονται στα εξής:

1. Χαμηλό κόστος;

Η δημιουργία ενός καλωδίου οπτικών ινών είναι πιο συμφέρουσα οικονομικά, σε σχέση με ένα χάλκινο καλώδιο ίδιας απόστασης και δυνατοτήτων. Αυτό ωφελεί αρχικά τους πάροχους υπηρεσιών τηλεπικοινωνιών, οι οποίοι με μικρότερο κόστος

παρέχουν ποιοτικές υπηρεσίες. Τελικά αυτό μειώνει και τις ανάγκες απόσβεσης εξόδων των παρόχων, επομένως ωφελεί και τον καταναλωτή, που επιβαρύνεται με μικρότερες χρεώσεις για τις υπηρεσίες που χρησιμοποιεί.

2. Υψηλό bandwidth;

Το bandwidth ξεπερνά κατά εκατοντάδες φορές αυτό ενός κοινού καλωδίου. Οι υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, εξασφαλίζουν ταχύτητες της τάξεως των Gbps, που με τη σειρά τους προσφέρουν αστραπιαία διαμεταγωγή δεδομένων και αξιόπιστες υπηρεσίες τηλεφωνίας μέσω πρωτοκόλλου IP.

3. Μικρή εξασθένιση του σήματος;

Χάρη στην υψηλή ποιότητα του γυαλιού που χρησιμοποιείται ως μέσο μετάδοσης. Ακόμη και αν υπάρξει εξασθένιση σήματος, αυτό ενισχύεται πολύ εύκολα μέσω των κατάλληλων ενισχυτών.

4. Μικρές απαιτήσεις σε ενέργεια;

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν παρατηρούνται σημαντικές απώλειες σήματος, καθώς και στον τρόπο μετάδοσης δεδομένων, δηλαδή με τη χρήση φωτεινής δέσμης, που απαιτεί πολύ μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, σε σχέση με το ηλεκτρικό σήμα.

5. Αμιγώς ψηφιακό σήμα;

Εξασφαλίζει υψηλότερη ποιότητα επικοινωνίας και αποφυγή προβλημάτων που θα προέκυπταν σε μια αναλογική μετάδοση. Στον κόσμο της ψηφιακής πληροφορίας, τα δεδομένα αναπαρίστανται από τους αριθμούς 0 και 1, οι οποίοι ονομάζονται bits. Το 0 ισοδυναμεί με την κατάσταση «κλειστό» και το 1 με την κατάσταση «ανοικτό». Μια ακολουθία 8 bits σχηματίζουν 1 ψηφιακή λέξη που λέγεται byte. Οι οπτικές ίνες μεταδίδουν τις φωτεινές αναλαμπές με υψηλή αξιοπιστία, μεταφέροντας τα bytes με πολύ μικρότερες αλλοιώσεις σε σχέση με αυτές ενός κοινού καλωδίου δικτύου, ή μιας ασύρματης σύνδεσης δεδομένων.

6. Υψηλή διαθεσιμότητα;

Αυτό οφείλεται κυρίως στην ανθεκτική κατασκευή των σύγχρονων οπτικών καλωδίων, που μειώνει στο ελάχιστο το ενδεχόμενο εξωτερικής ζημιάς.

7. Το error rate;

Ο ρυθμός εμφάνισης σφαλμάτων σε καλώδια οπτικών ινών είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Μπορούμε να πούμε με σιγουριά ότι είναι καλύτερος από τα ενσύρματα μέσα μετάδοσης κατά 3 τάξεις μεγέθους.

8. Μικρές διαστάσεις και βάρος;

Ένα μικρό και ελαφρύ καλώδιο οπτικών ινών, μεταφέρει πολύ περισσότερα δεδομένα από ένα μεγαλύτερο και πιο βαρύ χάλκινο καλώδιο. Έτσι, απαιτείται πολύ λιγότερος χώρος για την υλοποίηση ενός δικτύου οπτικών ινών

9.5 Μειονεκτήματα των οπτικών ινών

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

1. Η διαδικασία εγκατάστασης των οπτικών ινών είναι πιο ακριβή από αυτή των χάλκινων καλωδίων.
2. Είναι πιο δύσκολη η εγκατάστασή τους.
3. Είναι πολύ εύθραυστες.
4. Δεν είναι αρκετά ευλύγιστες. Θα πρέπει η εγκατάσταση τους να γίνεται με ελαφριά κλίση γιατί διαφορετικά θα υπάρχει απώλεια δεδομένων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- <http://poseidon.library.tuc.gr/artemis/MT2013-0021/MT2013-0021.pdf>
- http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9F%CF%80%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%AF%CE%BD%CE%B1
- <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CE%AC%CE%BA%CE%BB%CE%B1%CF%83%CE%B7>
- <http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGYM-C201/368/2458.9401/>
- <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A4%CE%B7%CE%BB%CE%B5%CF%80%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CE%B9%CE%BD%CF%89%CE%BD%CE%AF%CE%B5%CF%82>
- <http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGL-C107/144/1034.3734/>
- <http://digilib.lib.unipi.gr/dspace/bitstream/unipi/2401/1/Panagotiannopoulos.pdf>
- ΙΝΟΟΠΤΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ (Τεχνολογία και εφαρμογές)
ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ Κ.ΠΑΓΙΑΤΑΚΗΣ (ΔΡ.ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧ. ΟΤΕ)
ΕΚΔΩΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ
- ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΜΕ ΟΠΤΙΚΕΣ ΪΝΕΣ, AGRAWAL
GOVIND P., 4Η ΈΚΔΟΣΗ/2011, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ
- ΦΥΣΙΚΗ ΓΙΑ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥΣ: ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ
ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ, ΦΩΣ ΚΑΙ ΟΠΤΙΚΗ, ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΦΥΣΙΚΗ, RAYMOND
A. SERWAY, JOHN W. JEWLETT, 8Η ΈΚΔΟΣΗ/2013, ΕΚΔΟΣΕΙΣ
ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ
- ΔΙΚΤΥΑ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ, GREEN PAUL E., Κ. ΚΑΡΟΥΜΠΑΛΟΣ, 1Η
ΈΚΔΟΣΗ/1994, ΕΚΔΟΤΗΣ: Α. ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ