

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



**ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΟΠΤΙΚΩΝ
ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΝΕΑΣ ΓΕΝΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Γαλανάκης

Επιβλέπων : Φ. Κωνσταντίνου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Μέλη επιτροπής : Η. Αβραμόπουλος , Ν. Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούνιος 2008

Copyright © Νικόλαος Γαλανάκης , 2008.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η χρήση των οπτικών ινών στην κατασκευή δικτύων σε περιοχές κατοικιών είναι βασικός παράγοντας για την ποιότητα των υπηρεσιών που προσφέρονται στους τελικούς χρήστες, αφού οι οπτικές ίνες είναι η μόνη μακροπρόθεσμη λύση που μπορεί να παρέχει το απαιτούμενο εύρος ζώνης για πολυμεσικές και αλληλεπιδραστικές εφαρμογές. Η διπλωματική εργασία αυτή απευθύνεται σε άτομα που έχουν βασικές γνώσεις πάνω στην τεχνολογία επικοινωνιών και θέλουν να αποκτήσουν νέες γνώσεις πάνω στις εφαρμογές και στο σχεδιασμό οπτικών τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Στην διπλωματική αυτή αναλύονται θέματα όπως : βασική θεωρία οπτικής, παράμετροι οπτικών ινών, τεχνολογία οπτικού καλωδίου, οπτικοί πομποί (Lazer, φωτοδίοδοι), οπτικοί ανιχνευτές, συνδετήρες και τεχνικές κόλλησης για οπτικά δίκτυα, οπτικοί ενισχυτές ίνας Erbium, σχεδιασμός και παραμετροποίηση οπτικών δικτύων και τεχνικές εγκατάστασης οπτικών καλωδίων.

Abstract

The use of fiber optics in the construction of residential networks is an essential factor for the quality of the provided services to the end users, since fiber optics is the only long-term solution that can provide the bandwidth required for multimedia and interactive applications. This paper is addressed in individuals that have basic knowledge on the technology of communications and want to acquire new knowledge on the applications and planning of optical telecommunication networks. In this paper are analyzed subjects as: basic theory of optics, parameters of optical fibers, technology of optical cable, optical transmitters (Lazer, photodiodes), optical detectors, splicing for optical networks, Erbium doped optical amplifiers, planning of optical networks and techniques of installation.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2. Ιστορική αναδρομή και οπτικά δίκτυα πρώτης γενιάς.....	4
1.3. Τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς.....	5
1.4. Τα μελλοντικά οπτικά δίκτυα τρίτης γενιάς.....	9
1.5. Σκοπός και δομή της διπλωματικής.....	9

Κεφάλαιο 2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΓΝΩΣΕΙΣ ΟΠΤΙΚΗΣ

1. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.....	11
2. Γεωμετρική Οπτική.....	12
2.1. Ανάκλαση.....	13
2.2. Διάθλαση.....	14
3. Διάθλαση μέσα σε φακό.....	14
4. Ολική ανάκλαση.....	15
5. Ανάκλαση φωτός με γωνία πρόσπτωσης 90° (Νόμος Fresnel).....	16
6. Ολική ανάκλαση μέσα σε οπτική ίνα.....	18
7. Σκέδαση Rayleigh και φως Tyndall.....	19

Κεφάλαιο 3 ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥΣ

1. Ρυθμοί Διάδοσης (Modes).....	22
1.1. Ομαλοποιημένη συχνότητα και ρυθμοί διάδοσης.....	23
1.2. Ρυθμός LP_{01} – Ο θεμελιώδης ρυθμός διάδοσης και η αποκοπή.....	25
2. Αριθμητικό άνοιγμα.....	27
3. Δείκτης διάθλασης ομάδας.....	28
4. Διάμετρος του πεδίου του ρυθμού διάδοσης.....	29
5. Αποτελεσματική περιοχή.....	29
6. Διασπορά.....	30
6.1. Intermodal διασπορά ή modal διασπορά.....	30
6.2. Intramodal διασπορά ή χρωματική διασπορά.....	31
6.3. Διασπορά πόλωσης του ρυθμού μετάδοσης (PMD).....	33
7. Μη γραμμικά φαινόμενα.....	33
8. Πολύτροπη ίνα με ορθογώνιο προφίλ δείκτη.....	36
9. Πολύτροπη ίνα με βαθμιαίο προφίλ δείκτη.....	37
10. Μονότροπη ίνα με ορθογώνιο προφίλ δείκτη.....	38
11. Ίνες μετατοπισμένου σημείου διασποράς.....	39
12. Συνήθης ίνα μετατοπισμένου σημείου διασποράς.....	40
12.1. Ίνα μη μηδενικού μετατοπισμένου σημείου διασποράς.....	40
12.2. Ίνες με συνεχές χρησιμοποιούμενο φάσμα από 1280 μέχρι 1625 (1700) nm.....	42

12.3. Ίνα αντιστάθμισης διασποράς.....	43
--	----

Κεφάλαιο 4 ΠΩΣ ΕΠΙΛΕΓΟΥΜΕ ΤΟ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟ ΚΑΛΩΔΙΟ ΟΠΤΙΚΗΣ ΙΝΑΣ

1. Πρώτη παράμετρος, η οπτική ίνα.....	47
1.1. Πρωτεύον επίστρωμα.....	48
1.2. Το Acrylate ως πρωτεύον επίστρωμα.....	48
1.3. Χαρακτηριστικά μετά από επικάλυψη με πρωτεύον επίστρωμα.....	49
1.4. Χρωματική κωδικοποίηση οπτικών ινών.....	50
1.5. Συστάσεις για οπτικές ίνες.....	50
2. Δεύτερη παράμετρος, οι απομονωτές.....	51
2.1. Loose tube buffer (loose fibers/ribbons in tube).....	51
2.2. Ίνες tight buffer.....	53
2.3. Τεχνική fibber ribbon (κορδέλα ινών).....	54
3. Τρίτη παράμετρος, παράγοντας αντοχής.....	58
3.1. Μεταλλικός παράγοντας αντοχής.....	58
3.2. Κεντρικός μη-μεταλλικός παράγοντας αντοχής.....	58
3.3. Νήμα Aramide.....	59
4. Τέταρτη παράμετρος, ο πυρήνας του καλωδίου.....	59
4.1. Καλώδια με κυκλικό πυρήνα.....	59
4.2. Καλώδιο με πυρήνα αυλακώσεων.....	60
4.3. Διαδικασία κατασκευής.....	62
4.4. Διαστολή και συστολή καλωδίων.....	62
4.5. Διαστολή και συστολή καλωδίων λόγω μεταβολών θερμοκρασίας.....	63
4.6. Οπτικό καλώδιο χωρίς πυρήνα.....	65
5. Πέμπτη παράμετρος, προστασία από νερό και υγρασία.....	66
5.1. Υλικό γέμισης καλωδίου.....	67
5.2. Ταινία διόγκωσης, ως μονωτής υγρασίας.....	67
5.3. Μεταλλικό κάλυμμα (φύλλο αλουμινίου).....	67
5.4. Μεταλλικός σωλήνας χαλκού.....	67
6. Έκτη παράμετρος, τελικό κάλυμμα (θήκη καλωδίου).....	68
6.1. Τοποθετώντας το τελικό κάλυμμα.....	68
6.2. Polyethylene (PE).....	69
6.3. Halogen free, Flame retardant materials (HFFR).....	70
6.4. Polyvinyl Chloride (PVC).....	70
6.5. Polyamide (PA, Nylon).....	71
6.6. Polybutylene terephthalate (PBT).....	72
6.7. Fluoroplastics (PTFE, FEP, E-TFE, E-CTFE).....	72
6.8. Thermoplastic polyurethane elastomer.....	72
7. Έβδομη παράμετρος, ενίσχυση.....	73

7.1. Μεταλλική ταινία με αυλακώσεις.....	73
7.2. Μεταλλικό νήμα, μεταλλική ταινία.....	74
7.3. HET (θερμο-διαστελλόμενη ταινία).....	74
7.4. Νήματα Aramide.....	75
7.5. Διαστελλόμενο εξωτερικό σκέλος.....	76
7.6. Οπτικό καλώδιο γείωσης (OPGW).....	76
8. Υβριδικά καλώδια.....	77
9. Παρουσίαση νέων τύπων οπτικών καλωδίων.....	78

Κεφάλαιο 5 LASERS ΚΑΙ LED's ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ

1. Δίοδοι LASER.....	82
1.1. Λειτουργία LASER.....	83
1.2. Σχεδιασμός διόδου LASER.....	84
1.3. Είδη LASER.....	86
1.3.1. Απλό LASER.....	86
1.3.2. Ετεροδομημένο LASER (heterostructure laser).....	87
1.4. Σύνδεση διόδου LASER με ίνα	89
1.4.1. Η ίνα ως φακός	89
1.4.2. Μικρο-φακοί (microlenses).....	90
1.4.3. Tapering.....	90
1.4.4. Ψύξη και προστασία διόδου LASER.....	90
2. Φωτοεκπέμπουσες δίοδοι (LIGHT EMITTING DIODES).....	91
2.1. Διπλό LED ετεροεπαφής (dual junction led).....	92
2.2. Διαφορετικοί τύποι LED	92
2.3. Απόδοση LED.....	94
3. Χαρακτηριστικά των LASERS και των LEDS.....	94
3.1. Ισχύς εξόδου.....	94
3.2. Λοβός ακτινοβολίας.....	95
3.3. Φασματικό εύρος των LDs και LEDs.....	95
3.4. Διαμόρφωση.....	97

Κεφάλαιο 6 ΟΠΤΙΚΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ

1. Φωτοδίοδος τύπου P-N.....	100
2. Φωτοδίοδος τύπου PIN.....	101
3. Avalanche φωτοδίοδος (APD).....	104
4. Παράμετροι που επηρεάζουν την ανίχνευση του φωτός σε συστήματα οπτικών ινών.....	106
4.1. Ένταση του παλμού φωτός.....	106
4.2. Παραμόρφωση του παλμού φωτός.....	106
4.3. Ευαισθησία δέκτη.....	106

4.4. Σύνδεση της οπτικής ίνας στον ανιχνευτή.....	108
4.5. Θόρυβος δέκτη.....	108
4.6. Ενσωματωμένος ενισχυτής σε οπτικό ανιχνευτή.....	110
4.7. Εύρος ζώνης.....	110
4.8. SNR και BER (Signal to noise ratio, Bit error rate).....	111
Κεφάλαιο 7 ΚΟΛΛΗΣΗ ΚΑΙ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ (OPTICAL FIBER SPLICING)	
1. Κολλήσεις και connectors.....	114
2. Απώλειες σε μια οπτική ζεύξη.....	116
2.1. Απώλειες που οφείλονται στην ίνα.....	116
2.2. Απώλειες που οφείλονται σε connectors/κολλήσεις	121
2.3. Άλλα αίτια απωλειών κόλλησης.....	124
2.4. Κοπή ίνας.....	124
3. Fusion κόλληση οπτικών ινών.....	125
3.1. Διαδικασία Fusion κόλλησης.....	126
3.2. Διαδικασία Fusion κόλλησης για κορδέλα ινών.....	126
3.3. Ανάλυση ηλεκτρονικής εικόνας σάρωσης.....	127
4. Μηχανικές κολλήσεις.....	128
4.1. V-block κόλληση.....	128
4.2. Σωλήνες ακριβείας.....	128
4.3. Κόλληση με τρεις ράβδους.....	129
4.4. Κολλήσεις κορδελών ινών.....	129
5. Ημι-μόνιμες κολλήσεις.....	130
6. Τύποι Connectors.....	130
6.1. Connectors με κυλινδρικό συνεκτικό δακτύλιο.....	130
6.2. Connectors με κωνικό συνεκτικό δακτύλιο.....	134
6.3. Connectors διαστελλόμενης δέσμης.....	134
6.4. Connectors κορδελών ινών.....	135
Κεφάλαιο 8 ΟΠΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΙΝΑΣ ΕΡΒΙΟΥ	
1. Θεωρία λειτουργίας.....	138
2. Διάφοροι τύποι σχεδιασμού ενισχυτή.....	141
2.1. Συστήματα με μοναδικό μήκος κύματος.....	141
2.2. Συστήματα με πολλαπλά μήκη κύματος.....	144
Κεφάλαιο 9 ΖΕΥΞΕΙΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	
1. Μέσο μετάδοσης.....	145
2. Τοπολογίες δικτύων.....	146
3. Προκαθορισμένες απαιτήσεις οπτικών δικτύων.....	148
4. Σχεδιασμός ενός οπτικού συστήματος.....	149

4.1. Σχεδιασμός συστήματος : Προϋπολογισμός ισχύος.....	149
4.2. Σχεδιασμός συστήματος : Εύρος ζώνης (Bandwidth).....	155

Κεφάλαιο 10 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΛΩΔΙΟΥ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

1. Άμεσα εγκατεστημένα καλώδια.....	164
2. Εγκατάσταση σε σωλήνες καλωδίων.....	166
2.1. Διαφορετικές μέθοδοι εγκατάστασης καλωδίου μέσα σε σωλήνα...	167
2.2. Τύποι καλωδίων για εγκατάσταση σε σωλήνες.....	167
3. Μέτρα προφύλαξης της οπτικής ίνας σε φρεάτια υπονόμων.....	168
4. Εγκατάσταση σε δίκτυα πρόσβασης (access networks).....	169
5. Κόμβος πρόσβασης.....	171
6. Εισαγωγή οπτοηλεκτρονικού εξοπλισμού στην πλευρά του χρήστη.....	172
7. Ενώσεις (joint closures – « Μούφες »).....	173
8. Τερματικά και οπτικοί κατανεμητές (LT – ODF).....	176

Κεφάλαιο 11 ΠΙΝΑΚΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Πίνακες.....	178
2. Αναφορές.....	182

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή

Η εποχή, την οποία διανύουμε, έχει χαρακτηριστεί δικαίως από πολλούς ως η εποχή της πληροφορίας. Οι μορφές πληροφόρησης που κατακλύζουν εδώ και κοντά έναν αιώνα την ανθρωπότητα είναι πολλές και ποικίλες. Η τηλεφωνία, το ραδιόφωνο, η τηλεόραση, το Internet κ.α. είναι μερικές από τις δυνατότητες επικοινωνίας και μεταφοράς πληροφορίας που πλαισιώνουν την καθημερινή μας ζωή. Η ανάπτυξη νέων μορφών πληροφόρησης και η περαιτέρω βελτίωση των δυνατοτήτων των ήδη γνωστών μορφών καθίσταται στις μέρες μας ως επιτακτική ανάγκη καθώς είναι γεγονός ότι η τάση της ανθρωπότητας για συνεχή και γρήγορη πληροφόρηση αυξάνει σε καθημερινή βάση. Χαρακτηριστική απόδειξη αυτής της ανάγκης είναι η ραγδαία εξάπλωση του Διαδικτύου που έχει εκπλήξει ακόμα και τους πιο αισιόδοξους αναλυτές. Πέρα όμως από την ραγδαία εξάπλωση η συνεχής αύξηση των χρηστών καθώς και του χρόνου χρήσης του Διαδικτύου αποτελούν τον βασικότερο λόγο για τις ραγδαίες αλλαγές, που συμβαίνουν στην βιομηχανία των τηλεπικοινωνιών, καθώς η ανάγκη αυτή συντελεί στη συνεχή ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και στην κατασκευή δικτύων με πολύ υψηλές ταχύτητες μετάδοσης. Οι σημαντικότεροι παράγοντες, που έχουν συντελέσει στη συνεχή αναζωογόνηση αυτής της ανάγκης, είναι :

- Η εκπληκτική ανάπτυξη του Διαδικτύου (Internet) και του Παγκόσμιου Ιστού (World Wide Web) αναφορικά με τον αριθμό των χρηστών, αλλά κυρίως με το χρόνο χρήσης και κατ' επέκταση το εύρος ζώνης που αντιστοιχεί σε καθένα από αυτούς.
- Η συνεχής βελτίωση της παροχής υπηρεσιών με ταυτόχρονη ανάπτυξη εφαρμογών ιδιαίτερα φιλικών προς τους χρήστες όλων των ηλικιών και ιδιαιτεροτήτων.
- Η εμφάνιση εφαρμογών πολυμέσων και επικοινωνιών με ξεχωριστά και πολλές φορές πρωτοποριακά χαρακτηριστικά που κυριολεκτικά δίνουν νέες διαστάσεις σε ήδη υπάρχοντες μορφές διασκέδασης και ψυχαγωγίας.
- Η δυνατότητα ανάπτυξης εφαρμογών εμπορίου αλλά και αξιόπιστων υπηρεσιών ενημέρωσης και εξυπηρέτησης των χρηστών με υψηλά επίπεδα ασφάλειας και λειτουργικότητας.
- Οι υποσχέσεις των εταιριών για συνεχή βελτίωση του Διαδικτύου τόσο ως προς την αύξηση των ταχυτήτων μετάδοσης όσο και προς τις παρεχόμενες υπηρεσίες και τα επίπεδα ασφάλειας.
- Η αυξανόμενη ανάπτυξη τεχνολογιών ευρυζωνικής πρόσβασης, όπως για παράδειγμα η ψηφιακή συνδρομητική γραμμή (Digital Subscriber Line-

DSL) και τα καλωδιακά modem, τα οποία μπορούν να προσφέρουν εύρος ζώνης της τάξης των μερικών Mb/s ανά χρήστη.

- Η συνεχής δικτύωση επιχειρήσεων με γραμμές μεταφοράς πολύ υψηλών ταχυτήτων. Τα δίκτυα αυτά χρησιμοποιούνται ευρέως είτε για εσωτερική αλληλοσύνδεση των διαφόρων τμημάτων της επιχείρησης, είτε για επικοινωνία διαφορετικών επιχειρήσεων μεταξύ τους.
- Η μείωση του κόστους παροχής εύρους ζώνης. Η μείωση αυτή είναι αποτέλεσμα αφενός της προόδου των τηλεπικοινωνιών, και αφετέρου της κατάργησης του μονοπωλίου μεμονωμένων παροχών υπηρεσιών (service providers), ως αποτέλεσμα της απελευθέρωσης του χώρου. Η εισροή πολλών ακόμα χρηστών, σύμφωνα με τις αναλύσεις, θα οδηγήσει σε ακόμα μεγαλύτερη μείωση του κόστους παροχής εύρους ζώνης.
- Οι αλλαγές στον τύπο της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, καθώς τα τελευταία χρόνια τα δίκτυα κατακλύζονται από πληροφορίες δεδομένων. Μεγάλες τηλεπικοινωνιακές εταιρίες, όπως η MCI WorldCom και η AT&T αναφέρουν ετήσια αύξηση στη μετάδοση δεδομένων 1000% και 300%, αντίστοιχα. Η αντίστοιχη αύξηση για τη μετάδοση φωνής είναι μόλις 10% ετησίως.

Η ανάγκη για όλο και μεγαλύτερη αύξηση των ταχυτήτων μετάδοσης, δηλαδή μεγαλύτερου εύρους συχνοτήτων, οδήγησε στην χρήση της οπτικής ίνας αντί του καλωδίου χαλκού. Η οπτική ίνα παρέχει σημαντικότερα πλεονεκτήματα σε σχέση με το απλό χάλκινο καλώδιο που χρησιμοποιείται εδώ και δεκαετίες στις ενσύρματες επικοινωνίες. Ορισμένα από αυτά τα πλεονεκτήματα αλλά και τα μειονεκτήματα είναι:

- Το τεράστιο εύρος ζώνης. Η οπτική ίνα παρέχει εύρος συχνοτήτων για μετάδοση περίπου ίσο με 25THz ή 25000GHz στην φασματική περιοχή του 1.5μm. Το εύρος αυτό είναι 1000 φορές μεγαλύτερο από ολόκληρο το διαθέσιμο φάσμα ραδιοσυχνοτήτων.
- Οι μικρές απώλειες κατά την διάδοση του σήματος. Η οπτική ίνα σε σχέση με το χάλκινο καλώδιο παρουσιάζει περιορισμένες απώλειες γεγονός που επιτρέπει την μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς να είναι αναγκαία η ενδιάμεση ενίσχυση του σήματος. Αλλά ακόμα και στην περίπτωση που απαιτείται ενίσχυση και αναγέννηση του σήματος δεδομένων η διαδικασία λαμβάνει χώρα σπανιότερα.
- Ακόμα η οπτική ίνα είναι πιο «ανθεκτική» όσον αφορά τον θόρυβο σε σύγκριση με το χάλκινο καλώδιο καθώς ο μανδύας της οπτικής ίνας λειτουργεί ταυτόχρονα και ως προστατευτικό ενώ το κυματοδηγούμενο οπτικό σήμα δεν επηρεάζεται (λόγω της φύσης του) από τις ποικίλες πηγές θορύβου.
- Τέλος στα πλεονεκτήματα συγκαταλέγονται και οι τεχνικές πολυπλεξίας που μπορούν να αυξήσουν σημαντικά την αποδοτικότητα της οπτικής ίνας επιτρέποντας την ταυτόχρονη μετάδοση πληροφορίας μέσω πολλών διαφορετικών καναλιών. Οι δύο τεχνικές πολυπλεξίας είναι η WDM (πολυπλεξία κατά μήκος κύματος) και OTDM (πολυπλεξία στο χρόνο).

- Μειονεκτήματα που παρουσιάζουν οι οπτικές ίνες είναι οι παραμορφώσεις που μπορεί να υποστεί το μεταδιδόμενο οπτικό σήμα εξαιτίας φαινομένων διασποράς, μη γραμμικότητας και διπλοθλαστικότητας. Η επίδραση όμως αυτών των φαινομένων επιλύεται χρησιμοποιώντας συγκεκριμένη ίνα, για αντιστάθμιση της διασποράς, μειώνοντας την μεταδιδόμενη ισχύς, για τις μη γραμμικότητες και φροντίζοντας να μην τσαλακωθεί η ίνα κατά την εγκατάσταση της, για την διπλοθλαστικότητα.

Το εύρος ζώνης είναι αναμφισβήτητα ο βασικότερος λόγος εξάπλωσης της οπτικής ίνας παρόλα αυτά δεν μπορούμε να αμελήσουμε και τα υπόλοιπα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει σαν καλώδιο. Το γεγονός όμως ότι η οπτική ίνα παρουσιάζει μεγάλο εύρος ζώνης και ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (υπάρχουν αυτή την στιγμή εμπορικά διαθέσιμα συστήματα που λειτουργούν στα 10Gbps και σε λίγο καιρό θα υπάρχουν και τα αντίστοιχα στα 40Gbps) δεν σημαίνει ότι εν τέλει μπορούμε να έχουμε πρακτικά τέτοιους ρυθμούς. Ο λόγος είναι ότι σε κάθε κόμβο το οπτικό σήμα πρέπει να μετατρέπεται σε ηλεκτρικό και να επεξεργάζεται καθώς δεν υπάρχει η δυνατότητα επεξεργασίας του στην οπτική μορφή. Αυτό προσθέτει σημαντική καθυστέρηση στην διαδικασία της μετάδοσης ενώ αν προσθέσουμε και το γεγονός ότι τα ηλεκτρονικά δεν μπορούν να δουλέψουν σε τόσο υψηλούς ρυθμούς οδηγούμαστε στην διαπίστωση ότι μένουν ανεκμετάλλευτες οι δυνατότητες που μας παρέχει η οπτική ίνα.

Για την αντιμετώπιση αυτού του σοβαρού προβλήματος η τεχνολογία προωθεί την δημιουργία και ανάπτυξη διατάξεων επεξεργασίας οπτικού σήματος σε ρυθμούς αντίστοιχους των ρυθμών μετάδοσης. Οι διατάξεις αυτές πρέπει να πραγματοποιούν όλες τις αναγκαίες ενέργειες που θα καθιστούν δυνατή την μετάδοση οπτικού σήματος χωρίς τη ενδιάμεση παρεμβολή ηλεκτρονικών. Οι διατάξεις αυτές θα παρέχουν δυνατότητες ενίσχυσης, αναγέννησης, μεταγωγής και επεξεργασίας του οπτικού σήματος. Απώτερος στόχος είναι η δημιουργία των αμιγώς οπτικών δικτύων, δηλαδή δικτύων όπου όλες οι λειτουργίες θα πραγματοποιούνται σε οπτικό επίπεδο εξασφαλίζοντας ταχύτητα και λειτουργικότητα. Αναφορικά ως προς αυτή κατεύθυνση έχει παρουσιαστεί μεγάλη εξέλιξη και τα δεδομένα είναι ενθαρρυντικά για το μέλλον.

Η εμφάνιση των φτηνών οπτικών ενισχυτών ίνας ερβίου που παρουσιάζουν ικανοποιητικό κέρδος σε ένα αρκετά μεγάλο φάσμα συχνοτήτων καθώς και η ύπαρξη πολυπλεκτών/αποπολυπλεκτών σε συνδυασμό με διατάξεις αναγέννησης, μετατροπής μήκους κύματος αλλά και των πρώτων οπτικών πυλών που βασίζονται σε συμβολόμετρα αποτελούν την καλύτερη παρακαταθήκη για το μέλλον της φωτονικής τεχνολογίας. Σήμερα η έρευνα επικεντρώνεται στην δημιουργία και βελτίωση εκείνων των επιμέρους διατάξεων που στο μέλλον θα είναι η βάση για την δημιουργία των πρώτων αμιγώς οπτικών δικτύων. Πριν όμως αναφερθούμε στα υπάρχοντα δίκτυα που χρησιμοποιούν οπτικές ίνες και σε εκείνα που σταδιακά εμφανίζονται στο προσκήνιο και έχουν ενσωματώσει περαιτέρω την φωτονική τεχνολογία θα παρουσιάσουμε τις

βασικότερες αρχές λειτουργίας των δικτύων καθώς και τα χαρακτηριστικά που αυτά θα πρέπει να έχουν για να θεωρούνται αξιόπιστα και λειτουργικά.

1.2. Ιστορική αναδρομή και οπτικά δίκτυα πρώτης γενιάς

Η οπτική ίνα χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά ως γραμμή μεταφοράς στο δίκτυο TAT-8 για τη μετάδοση υπεραστικών και υπερατλαντικών τηλεφωνικών σημάτων σε ρυθμό μετάδοσης 560 Mb/s. Η διείσδυση των οπτικών ινών στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα κορμού επιταχύνθηκε μετά την υλοποίηση των πρώτων οπτικών ενισχυτών με ίνες προσμίξεων ερβίου (Erbium Doped Fiber Amplifier-EDFA), οι οποίοι επέτρεψαν την ενίσχυση του σήματος απευθείας στο οπτικό επίπεδο χωρίς τη χρήση οπτο-ηλεκτρονικών μετατροπών, παρέχοντας τη δυνατότητα για την κατασκευή μεγαλύτερου μήκους οπτικών δικτύων. Έτσι, στα μέσα της δεκαετίας του 1990 ολοκληρώθηκε το υπερατλαντικό δίκτυο TAT-12/13, το οποίο διαχειρίζεται κίνηση σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s, το υποθαλάσσιο δίκτυο FLAG με παρόμοιες δυνατότητες και βάση τη Σύγχρονη Ψηφιακή Ιεραρχία (Synchronous Digital Hierarchy-SDH), και το παναφρικανικό δίκτυο Africa ONE. Με την έναρξη της νέας χιλιετίας ολοκληρώθηκε το παγκόσμιο δίκτυο SEA-ME-WE_3 (Ευρώπη-Ασία-Αυστραλία) με συνολική διέλευση 10 Gb/s, ενώ ανακοινώνεται και η έναρξη των δικτύων Flag-Atlantic1 και Flag-Pacific1 με διέλευση 5 και 10 Tb/s και βάση το SDH. Παράλληλα, έκαναν την εμφάνισή τους και τα πρώτα εμπορικά διαθέσιμα συστήματα μετάδοσης με ρυθμό μετάδοσης κάθε καναλιού στα 40 Gb/s.

Τα σημαντικά χαρακτηριστικά των οπτικών δικτύων, που οδήγησαν στην ταχύτερη διείσδυση τους στις τηλεπικοινωνίες, είναι οι χαμηλές τους απώλειες, η παροχή τεράστιου εύρους ζώνης, η δυνατότητα ενιαίας υποδομής για την παροχή πολλαπλών υπηρεσιών, και η διάθεση εύρους ζώνης *όπου* και *όποτε* χρειάζεται. Οι οπτικές ίνες έχουν πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης από το χαλκό και είναι πολύ λιγότερο ευάλωτες σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και σε άλλες ανεπιθύμητες επιδράσεις κατά τη μετάδοση πληροφορίας. Κατά συνέπεια, η οπτική ίνα προτιμάται έναντι του χαλκού ως μέσο μετάδοσης, όταν πρόκειται για μετάδοση δεδομένων με ρυθμό μετάδοσης μεγαλύτερο από μερικές δεκάδες Mb/s και σε αποστάσεις πάνω από 1 km.

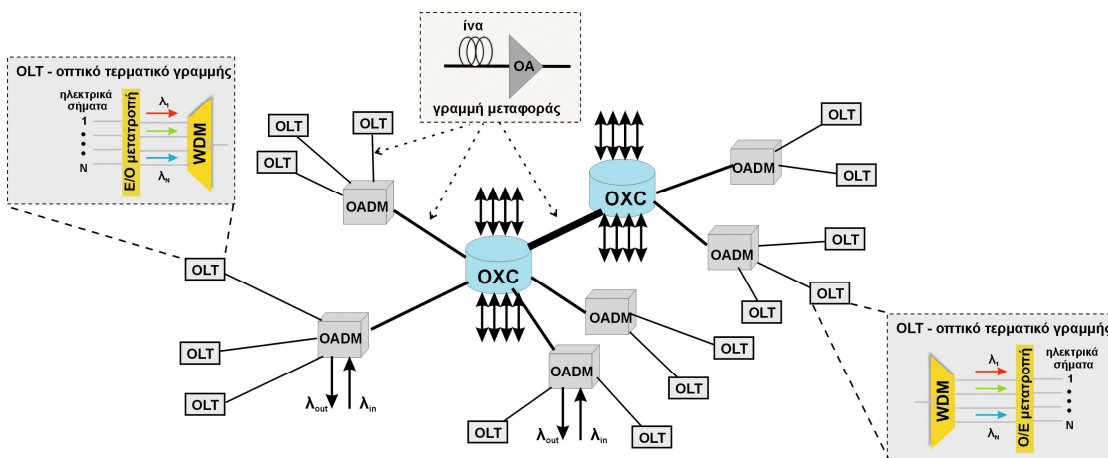
Τα οπτικά δίκτυα διαχωρίζονται σε δύο γενιές: στα δίκτυα πρώτης και στα δίκτυα δεύτερης γενιάς. Στα οπτικά δίκτυα πρώτης γενιάς η οπτική ίνα χρησιμοποιούνταν μόνο ως φυσικό μέσο μετάδοσης και παροχής χωρητικότητας, ενώ η μεταγωγή, η δρομολόγηση, καθώς και όλες οι άλλες ευφυείς δικτυακές διεργασίες επιτελούνταν από ηλεκτρονικά κυκλώματα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα των οπτικών δικτύων πρώτης γενιάς είναι το Σύγχρονο Οπτικό Δίκτυο (Synchronous Optical Network-SONET) και το SDH, τα οποία σχηματίζουν τον κορμό της τηλεπικοινωνιακής υποδομής στη Βόρεια Αμερική, την Ασία και την Ευρώπη. Στις μέρες μας σχηματίζονται σταδιακά τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς, στα οποία μέρος της δρομολόγησης, της μεταγωγής καθώς και των άλλων ευφυών διαδικασιών έχει μετακινηθεί στο οπτικό επίπεδο (optical layer).

Για την αξιοποίηση της τεράστιας χωρητικότητας των οπτικών ινών και τη βέλτιστη εκμετάλλευση αυτής χρησιμοποιούνται τυπικές τεχνικές οπτικής πολυπλεξίας σε πλήρη αναλογία με τις τεχνικές ηλεκτρονικής πολυπλεξίας. Η ανάγκη για πολυπλεξία γεννήθηκε από το γεγονός ότι είναι πολύ πιο οικονομική η μετάδοση δεδομένων με υψηλότερο ρυθμό μέσα από μία και μόνο ίνα, από το να χρησιμοποιούνται πολλές ίνες μεταφέροντας δεδομένα σε χαμηλούς ρυθμούς. Οι βασικοί τρόποι πολυπλεξίας μέσα σε μία οπτική ίνα, οι οποίοι έχουν αναφερθεί και στην αρχή στα πλεονεκτήματα των οπτικών δικτύων, είναι η πολυπλεξία κατά μήκος κύματος (Wavelength Division Multiplexing-WDM) και η οπτική πολυπλεξία δεδομένων στο πεδίο του χρόνου (Optical Time Division Multiplexing-OTDM). Η τεχνική WDM χρησιμοποιείται στα οπτικά δίκτυα σε πλήρη αντιστοιχία με την πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Multiplexing-FDM) στα δίκτυα ραδιοεπικοινωνιών. Σύμφωνα με την τεχνική WDM η μετάδοση των δεδομένων γίνεται με ταυτόχρονη μετάδοση πολλών μηκών κύματος μέσα από την ίδια ίνα, όπου το κάθε μήκος κύματος φέρει ένα ποσοστό του συνολικού όγκου των δεδομένων. Τα εμπορικά διαθέσιμα WDM δίκτυα, που έχουν ανακοινωθεί από μεγάλες τηλεπικοινωνιακές εταιρίες, περιλαμβάνουν ως και 160 κανάλια σε ρυθμό μετάδοσης 2.5–10 Gb/s το καθένα ή 80 κανάλια με ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s ανά κανάλι. Σε εργαστηριακό/ερευνητικό επίπεδο οι επιδόσεις των WDM συστημάτων μετάδοσης είναι πολύ πιο εντυπωσιακές. Η τεχνική πολυπλεξίας OTDM χρησιμοποιείται στα οπτικά συστήματα σε πλήρη αντιστοιχία με την ηλεκτρονική πολυπλεξία στο πεδίο του χρόνου (Electronic Time Division Multiplexing-ETDM), που χρησιμοποιείται στα ηλεκτρονικά δίκτυα, με μόνη διαφορά ότι στην OTDM πολυπλεξία οι ρυθμοί μετάδοσης είναι πολύ υψηλότεροι. Στην τεχνική OTDM τα δεδομένα μεταδίδονται σε ένα και μόνο κανάλι (φέρουσα συχνότητα) παρεμβάλλοντας με οπτικό τρόπο τα ψηφία πολλών ροών δεδομένων χαμηλής ταχύτητας σε μία μοναδική ροή δεδομένων υψηλού ρυθμού μετάδοσης. Οι βασικότεροι παράγοντες για την επίδοση των OTDM συστημάτων είναι ο ακριβής χρονισμός των οπτικών σημάτων και το χρονικό εύρος των οπτικών παλμών για την αποφυγή φαινομένων διασυμβολικής παρεμβολής (intersymbol interference) στο πολυπλεγμένο κανάλι. OTDM συστήματα μετάδοσης δεν υπάρχουν αυτή τη στιγμή ως εμπορικά διαθέσιμα προϊόντα, καθώς η OTDM πολυπλεξία δεν θεωρείται ακόμα αρκετά πρακτική τεχνική μετάδοσης.

1.3. Τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς

Αν και τα οπτικά δίκτυα υιοθετήθηκαν αρχικά μόνο για τη μετάδοση των δεδομένων, πολύ γρήγορα διαπιστώθηκε ότι έχουν τις δυνατότητες για την υλοποίηση περισσότερων λειτουργικών διεργασιών πέραν της ζεύξης από σημείο σε σημείο. Μεταφέροντας ορισμένες από τις διεργασίες μεταγωγής και δρομολόγησης, που επιτελούνταν από ηλεκτρονικά κυκλώματα, απευθείας στο οπτικό επίπεδο, προκύπτουν ορισμένα πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς έτσι ορισμένες λειτουργίες γίνονται σε συντομότερο χρονικό διάστημα και ταυτόχρονα απαλλάσσονται τα ηλεκτρονικά κυκλώματα από την επεξεργασία

όλου του όγκου δεδομένων. Η διαπίστωση αυτή οδήγησε στα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς, τα οποία έχουν ήδη αρχίσει να εγκαθίστανται σταδιακά.



Εικόνα 1. Τα βασικά δομικά τμήματα και η διασύνδεση αυτών στα WDM οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς

Στα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς είναι δυνατή η χρήση και των δύο τεχνικών πολυπλεξίας παρόλα αυτά στην πραγματικότητα χρησιμοποιείται μόνο η WDM. Τα βασικά δομικά συστήματα αυτών των δικτύων (σχήμα 1.2) είναι τα οπτικά τερματικά γραμμής (optical line terminal-OLT), οι οπτικοί πολυπλέκτες προσθήκης/αφαίρεσης δεδομένων (optical add/drop multiplexer-OADM) και τα οπτικά στοιχεία διασύνδεσης (optical cross-connect-OXC). Σημαντικά δομικά συστήματα είναι, επίσης, οι οπτικοί ενισχυτές, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ανά τακτές αποστάσεις μετάδοσης για την επανενίσχυση των οπτικών σημάτων.

Τα οπτικά τερματικά γραμμής χρησιμοποιούνται στα τερματικά άκρα μίας ζεύξης για τη μετατροπή του ηλεκτρικού σήματος σε οπτικό ή αντίστροφα και την πολυπλεξία ή αποπολυπλεξία κατά WDM των καναλιών διαφορετικού μήκους κύματος, ανάλογα με το αν το τερματικό είναι στην είσοδο ή στην έξοδο της ζεύξης. Κατά συνέπεια, N ηλεκτρικά σήματα αντιστοιχίζονται σε N κανάλια διαφορετικού μήκους κύματος. Για την υλοποίηση των WDM πολυπλεκτών και αποπολυπλεκτών χρησιμοποιούνται συστοιχίες φραγμάτων περίθλασης (Arrayed Waveguide Gratings-AWG), συστοιχίες διηλεκτρικών φίλτρων λεπτού φύλλου (dielectric thin-film filters), ή συστοιχίες φραγμάτων περίθλασης Bragg.

Οι αυξημένες λειτουργικές δυνατότητες των οπτικών δικτύων δεύτερης γενιάς οφείλονται στη χρήση των οπτικών πολυπλεκτών προσθήκης/αφαίρεσης δεδομένων (OADMs) και των οπτικών στοιχείων διασύνδεσης (OXCs). Τα στοιχεία αυτά τοποθετούνται σε ενδιάμεσα σημεία της ζεύξης, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.2, και ο βασικός τους ρόλος είναι η δρομολόγηση των εισερχόμενων WDM καναλιών. Οι OADMs επιλεκτικά «αφαιρούν» ορισμένα κανάλια από τη ζεύξη και επιτρέπουν τη διέλευση των υπολοίπων καναλιών, ενώ ταυτόχρονα μπορούν να «προσθέτουν» νέα κανάλια στη ζεύξη στη θέση αυτών που «αφαιρέθηκαν». Ανάλογη λειτουργία επιτελούν και οι OXCs, αλλά με πολύ μεγαλύτερο αριθμό καναλιών. Οι OXCs διαχειρίζονται σημαντικά περισσότερες

εισόδους/εξόδους και πιο πολύπλοκες τοπολογίες δικτύων από τους OADMs. Συνήθως χρησιμοποιούνται για την σύνδεση πολύπλοκων τοπολογιών δικτύου και διαφόρων υποδικτύων μεταξύ τους. Αντίθετα, οι OADMs χρησιμοποιούνται σε σημεία της ζεύξης, στα οποία απαιτείται ο τοπικός τερματισμός της μετάδοσης κάποιων καναλιών και η εισαγωγή και η δρομολόγηση νέων καναλιών σε διαφορετικούς προορισμούς του δικτύου, και συνδέονται σε τοπολογίες γραμμής ή τοπολογίες δακτυλίου. Δεδομένης της ικανότητας των OXCs να χειρίζονται πολύ μεγαλύτερο όγκο δεδομένων, οι OXCs τοποθετούνται σε κεντρικά ενδιάμεσα σημεία της ζεύξης, ενώ οι OADMs τοποθετούνται περισσότερο κοντά στα τερματικά σημεία της ζεύξης. Για την υλοποίηση και των δύο μπορούν να χρησιμοποιηθούν 2×2 διακόπτες μεταγωγής ή οπτικοί ενισχυτές ημιαγωγού (Semiconductor Optical Amplifier-SOA), μικρο-ηλεκτρο-μηχανικοί διακόπτες (Micro-Electro-Mechanical Switches-MEMS) ή μετατροπείς μήκους κύματος (wavelength converters).

Με βάση την παραπάνω ανάλυση τα WDM οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς παρέχουν συνδέσεις μήκους κύματος μεταξύ των τερματικών, και για το λόγο αυτό αποκαλούνται και δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος (wavelength-routed networks). Κατά συνέπεια οι συνδέσεις μεταξύ των τερματικών γραμμής είναι υψηλής χωρητικότητας και παρέχονται σε σταθερή βάση. Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά αυτής της αρχιτεκτονικής είναι τα εξής:

- **Επαναχρησιμοποίηση μήκους κύματος (wavelength reuse):** Δεδομένου ότι η σύνδεση μεταξύ δύο τερματικών γίνεται μέσω ενός μήκους κύματος, το ίδιο μήκος κύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ξανά για τη σύνδεση δύο άλλων τερματικών, αρκεί να μην υπάρχει επικάλυψη των δύο συνδέσεων σε κάποιο σημείο της ζεύξης. Η δυνατότητα αυτή παρέχει το πλεονέκτημα των πολλαπλών συνδέσεων με χρήση ενός περιορισμένου αριθμού μηκών κύματος.
- **Μετατροπή μήκους κύματος (wavelength conversion):** Η διαδικασία αυτή συνίσταται στην αντιγραφή των δεδομένων ενός μήκους κύματος, έστω λ_1 , σε ένα νέο μήκος κύματος, έστω λ_2 , και τη μετάδοση του νέου μήκους κύματος μέσα από το δίκτυο. Η μετατροπή μήκους κύματος επιτρέπει την αποδοτικότερη εκμετάλλευση των διαθέσιμων μηκών κύματος στο δίκτυο. Τα βασικότερα οπτικά στοιχεία, που χρησιμοποιούνται ως μετατροπείς μήκους κύματος, είναι οι οπτικοί ημιαγωγιμοί ενισχυτές (SOAs) και οι οπτικές συμβολομετρικές πύλες.
- **Διαφάνεια (Transparency):** Η διαφάνεια αφορά στο γεγονός ότι σε κάθε σύνδεση μήκους κύματος μπορούν να μεταδίδονται δεδομένα με διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης, διαφορετικά πρωτόκολλα ή διαφορετικό τύπο δεδομένων, δεδομένου ότι η δρομολόγηση αυτών γίνεται απευθείας στο οπτικό επίπεδο και με μοναδικό κριτήριο το φέρον μήκος κύματος. Κατά συνέπεια το δίκτυο μπορεί να εξυπηρετεί ταυτόχρονα μια ποικιλία τηλεπικοινωνιακών στρωμάτων υψηλότερου επιπέδου, όπως, για παράδειγμα, τερματικά SONET και δρομολογητές IP.
- **Μεταγωγή κυκλώματος (circuit switching) :** Οι συνδέσεις μήκους κύματος στα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς παραμένουν στατικές, αφού

εδραιωθούν, σε πλήρη αναλογία με τις συνδέσεις στα δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος. Στην πράξη, μία σύνδεση μήκους κύματος παραμένει «ανοιχτή» για μήνες ή ακόμα και για χρόνια μετά την εδραίωσή της.

- **Ανθεκτικότητα** : Το δίκτυο μπορεί να κατασκευαστεί κατά τέτοιο τρόπο, ούτως ώστε σε περίπτωση αποτυχίας κατά τη μετάδοση των δεδομένων αυτά να επαναδρομολογούνται αυτόματα μέσα από εναλλακτικές διαδρομές μέσα στο δίκτυο.

Με βάση τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά των WDM δικτύων δεύτερης γενιάς προκύπτει αναμφισβήτητο το συμπέρασμα, ότι τα δίκτυα αυτά παρέχουν τη δυνατότητα για ευρυζωνικές συνδέσεις υψηλής ταχύτητας δεδομένων και μεγάλης χρονικής διάρκειας, καθώς και τη δυνατότητα για αποδοτική διαχείριση ενός τεράστιου όγκου δεδομένων απευθείας στο οπτικό επίπεδο. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι ιδιαίτερα ελκυστικά για τα μεγάλης έκτασης δίκτυα ευρείας περιοχής (WANs), στα οποία η τηλεπικοινωνιακή κίνηση συναθροίζεται σε οντότητες δεδομένων μεγάλου μεγέθους και είναι επιθυμητή η δέσμευση υψηλής χωρητικότητας για μεγάλο χρονικό διάστημα. Για το λόγο αυτό, τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς βρίσκουν κυρίως εφαρμογή στα δίκτυα ευρείας περιοχής, χρησιμοποιώντας υψηλής χωρητικότητας στατικές συνδέσεις μηκών κύματος για τη διασύνδεσή τους.

Τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς δεν παρέχουν, όμως, τη δυνατότητα για χειρισμό οντοτήτων δεδομένων μικρού μεγέθους (granularity), αν και αυτή η δυνατότητα θα ανήκει σίγουρα στις βασικές απαιτήσεις των χρηστών από τα μελλοντικά οπτικά δίκτυα. Η επέμβαση στη μεταδιδόμενη πληροφορία περιορίζεται, όμως, στα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς σε επίπεδο μήκους κύματος και ο χρόνος μεταγωγής της πληροφορίας (switching period) είναι της τάξης δεκάδων λεπτών, με αποτέλεσμα η δέσμευση ενός τεράστιου εύρους ζώνης σε μία σύνδεση να διατηρείται στατική για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα μετά την εδραίωση της σύνδεσης, ακόμα και αν αυτή είναι ανενεργή. Κατά συνέπεια, τα δίκτυα αυτά επιτελούν μεταγωγή κυκλώματος, δεν είναι σε θέση να παρέχουν εύρος ζώνης κατ' απαίτηση και είναι πλήρως αδύνατη η εξυπηρέτηση εκρηκτικών ροών δεδομένων. Επιπλέον, ο αριθμός των δυνατών συνδέσεων στα οπτικά δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος καθορίζεται από το μέγιστο αριθμό χρησιμοποιούμενων καναλιών-μηκών κύματος, με αποτέλεσμα να υπάρχουν συγκρούσεις (collisions) στην κίνηση δεδομένων, όταν οι επιθυμητές συνδέσεις ξεπερνούν σε αριθμό τα διαθέσιμα μήκη κύματος. Τα μειονεκτήματα αυτά καθιστούν απαγορευτική τη χρήση των οπτικών συστημάτων δεύτερης γενιάς σε δίκτυα, στα οποία απαιτείται άμεσα η παροχή πολλαπλών υπηρεσιών τόσο συνεχούς, όσο και εκρηκτικής ροής δεδομένων σε υψηλές ταχύτητες μετάδοσης. Τέτοια δίκτυα είναι, για παράδειγμα, τα μητροπολιτικά δίκτυα (MANs). Η εκμετάλλευση του εύρους ζώνης στα δίκτυα αυτά προφανώς δε θα είναι αποδοτική, καθώς για κάθε μία από τις εν γένει πολλές συνδέσεις τους θα χρειάζεται και ένα ολόκληρο μήκος κύματος, το οποίο θα παραμένει ανενεργό στο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Επομένως, αν και οι επιδόσεις των οπτικών δικτύων δεύτερης γενιάς είναι αρκετά ικανοποιητικές για τα δίκτυα ευρείας περιοχής, δεν επαρκούν για την αποδοτική διασύνδεση σε δίκτυα μεγαλύτερης εκρηκτικότητας και αμεσότερης πρόσβασης. Για την εξυπηρέτηση αυτών των

δικτύων και τη βέλτιστη εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης οι ελπίδες έχουν εναποτεθεί στα μελλοντικά οπτικά δίκτυα τρίτης γενιάς, τα οποία έχουν συγκεντρώσει σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια, και για τα οποία γίνεται λόγος στην επόμενη ενότητα.

1.4. Τα μελλοντικά οπτικά δίκτυα τρίτης γενιάς

Ο βασικός στόχος των μελλοντικών οπτικών δικτύων τρίτης γενιάς είναι η αποδοτική εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης των οπτικών δικτύων, υπό την έννοια της παροχής συνδέσεων υψηλής χωρητικότητας μόνο κατά το χρονικό διάστημα, για το οποίο οι συνδέσεις αυτές είναι ενεργές. Για την επίτευξη της παροχής εύρους ζώνης κατ' απαίτηση τα οπτικά δίκτυα τρίτης γενιάς έχουν υιοθετήσει την τεχνική μεταγωγής πακέτου, η οποία ήδη λειτουργεί με αποδοτικό τρόπο στα ηλεκτρονικά δίκτυα. Ο όρος οπτικά δίκτυα τρίτης γενιάς είναι, επομένως, ταυτόσημος με τον όρο οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων (All-Optical Packet Switched Networks - OPS).

1.5. Σκοπός και δομή της διπλωματικής

Στις προηγούμενες παραγράφους έγινε αναφορά στον απώτερο στόχο που έχει η ανάπτυξη της φωτονικής τεχνολογίας και των οπτικών δικτύων. Η διπλωματική εργασία αυτή απευθύνεται σε άτομα που έχουν βασικές γνώσεις πάνω στην τεχνολογία επικοινωνιών και θέλουν να αποκτήσουν νέες γνώσεις πάνω στις εφαρμογές και στο σχεδιασμό οπτικών τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Στην διπλωματική αυτή αναλύονται θέματα όπως : βασική θεωρία οπτικής, παράμετροι οπτικών ινών, τεχνολογία οπτικού καλωδίου, οπτικοί πομποί (Lazer, φωτοδίοδοι), οπτικοί ανιχνευτές, συνδετήρες και τεχνικές κόλλησης για οπτικά δίκτυα, οπτικοί ενισχυτές ίνας Ερβίου, σχεδιασμός και παραμετροποίηση οπτικών δικτύων και τεχνικές εγκατάστασης οπτικών καλωδίων.

Η δομή της διπλωματικής είναι η εξής :

Κεφάλαιο 2: Βασική θεωρία οπτικής. Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται βασικές έννοιες της οπτικής όπως ανάκλαση, διάθλαση, ολική ανάκλαση μέσα σε οπτική ίνα και σκέδαση Rayleigh

Κεφάλαιο 3: Οπτικές ίνες και παράμετροι τους. Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται οι διάφορες παράμετροι βάσει των οποίων χαρακτηρίζονται και κατηγοριοποιούνται οι οπτικές ίνες. Επίσης αναλύονται οι διάφοροι τύποι οπτικών ινών που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας (μονότροπες, πολύτροπες, ίνες μετατοπισμένου σημείου διασποράς κτλ.), καθώς και τα βασικότερα φαινόμενα που εμφανίζονται κατά την διάδοση του φωτός μέσα από την οπτική ίνα.

Κεφάλαιο 4: Επιλογή κατάλληλου καλωδίου οπτικής ίνας. Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσονται οι διάφορες παράμετροι βάση των οποίων επιλέγουμε το κατάλληλο καλώδιο για το δίκτυο. Οι παράμετροι αυτές είναι οι εξής : τύπος

οπτικής ίνας, απομονωτής που χρησιμοποιείται, παράγοντας αντοχής καλωδίου, πυρήνας καλωδίου, προστασία από νερό και υγρασία, τελικό κάλυμμα καλωδίου και ενίσχυση καλωδίου. Επίσης παρουσιάζονται κάποιοι νέοι τύποι καλωδίων όπως τα υβριδικά οπτικά καλώδια που αναμένεται να αρχίσουν να χρησιμοποιούνται ευρέως σε λίγο καιρό.

Κεφάλαιο 5: LASERS και LED's για συστήματα πληροφοριών. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι διάφοροι τύποι LASERS και LED's που χρησιμοποιούνται στα οπτικά συστήματα επικοινωνιών σαν οπτικοί πομπόι. Επίσης δίνεται βάρος στη σύγκριση των αυτών των δύο κατηγοριών οπτικών πομπών.

Κεφάλαιο 6: Οπτικοί ανιχνευτές. Το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει τους διάφορους τύπους οπτικών ανιχνευτών (οπτικοί δέκτες) που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας και είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με το προηγούμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 7: Κόλληση και τερματισμός οπτικών ινών. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται όλοι οι τύποι συνδετήρων που χρησιμοποιούνται σε οπτικά δίκτυα όπως και οι διάφορες μέθοδοι κόλλησης και τερματισμού οπτικών καλωδίων. Επίσης παρουσιάζονται οι διάφοροι τύποι απωλειών που λαμβάνουν χώρα στα οπτικά δίκτυα λόγω των ενώσεων και κολλήσεων των οπτικών ινών.

Κεφάλαιο 8: Οπτικοί ενισχυτές ίνας Ερβίου. Το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει μια σύντομη αλλά αρκετά εμπειριστατωμένη ανάλυση της τεχνολογίας των οπτικών ενισχυτών ίνας Ερβίου. Γεγονός απαραίτητο, διότι οι ενισχυτές αυτοί αποτελούν την τελευταία λέξη της οπτικής τεχνολογίας που κυκλοφορεί στην αγορά.

Κεφάλαιο 9: Ζεύξεις οπτικών ινών και σχεδιασμός συστήματος. Το κεφάλαιο αυτό ασχολείται με τις πιο βασικές έννοιες για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό ενός οπτικού τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Σε συνδυασμό με τα προηγούμενα κεφάλαια παρέχει τις βασικές γνώσεις που χρειάζεται ένας μηχανικός για να σχεδιάσει από την αρχή ένα οπτικό δίκτυο. Επίσης στο ίδιο κεφάλαιο αναφέρονται και κάποιες βασικές αρχιτεκτονικές και τοπολογίες των διαφόρων τύπων οπτικών δικτύων.

Κεφάλαιο 10: Εγκατάσταση καλωδίου οπτικών ινών. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι διάφορες μέθοδοι εγκατάστασης οπτικών καλωδίων ακόμα για τις πιο αντίξοες συνθήκες.

Κεφάλαιο 11: Πίνακες και αναφορές. Το κεφάλαιο αυτό περιέχει κάποιους πίνακες που αφορούν στα οπτικά καλώδια και κάποιες σταθερές που χρησιμοποιούνται στους διάφορους τύπους που περιέχονται στη διπλωματική. Επίσης περιέχει τα συγγράμματα που μελετήσαμε για να συνθέσουμε αυτή την πτυχιακή όπως και κάποια συγγράμματα , περιοδικά και σελίδες διαδικτύου που μπορεί να ανατρέξει κάποιος για να εμπλουτίσει τις γνώσεις του πάνω στο αντικείμενο της πτυχιακής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΑΣΙΚΕΣ ΓΝΩΣΕΙΣ ΟΠΤΙΚΗΣ

Εισαγωγή

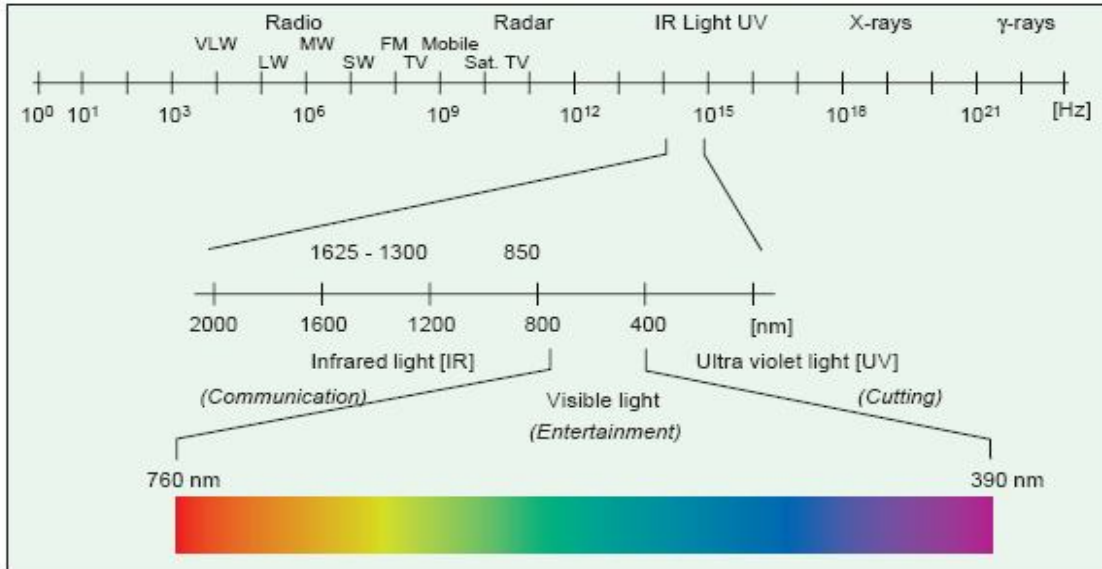
Ο τομέας των τηλεπικοινωνιών οπτικών ινών εισάγει πολλούς νέους όρους και έννοιες. Το κεφάλαιο αυτό ασχολείται με τις βασικές έννοιες και όρους της οπτικής και κατ' επέκταση της οπτικής ινών.

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.

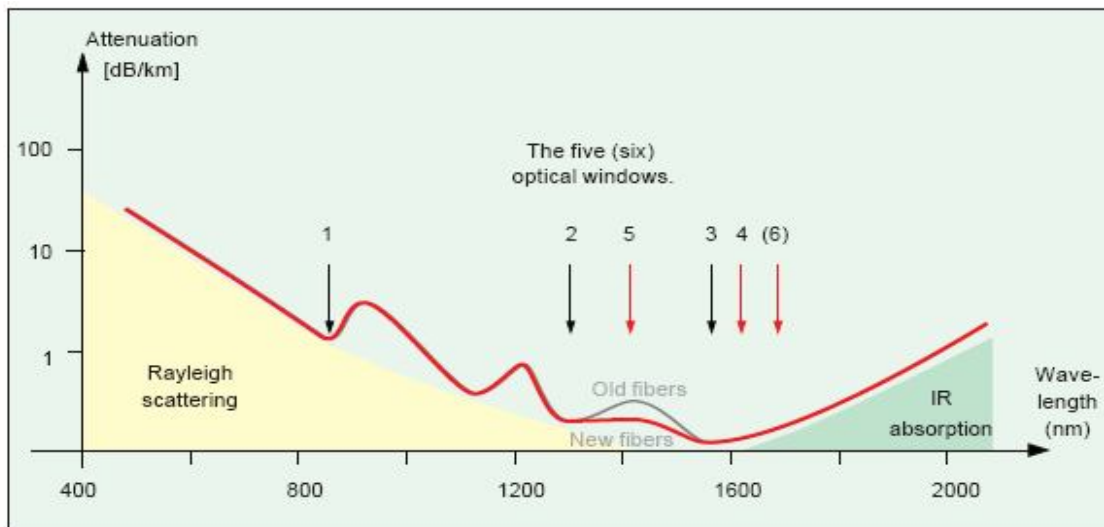
- Γεωμετρική οπτική
- Κυματική οπτική
- Κβαντική οπτική

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 Χ και η ακτινοβολία Γ. 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 εκτίνεται από 190 (UV) μέχρι 2.000 nm (IR).



Εικόνα 1. Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Η διαπερατότητα του γυαλιού της ίνας μπορεί να χωριστεί σε 5 (6) παράθυρα, όλα με μειωμένη εξασθένηση φωτός γύρω στα 850, 1310, 1390, 1550, 1610 nm και στο μέλλον γύρω στα 1700 nm.

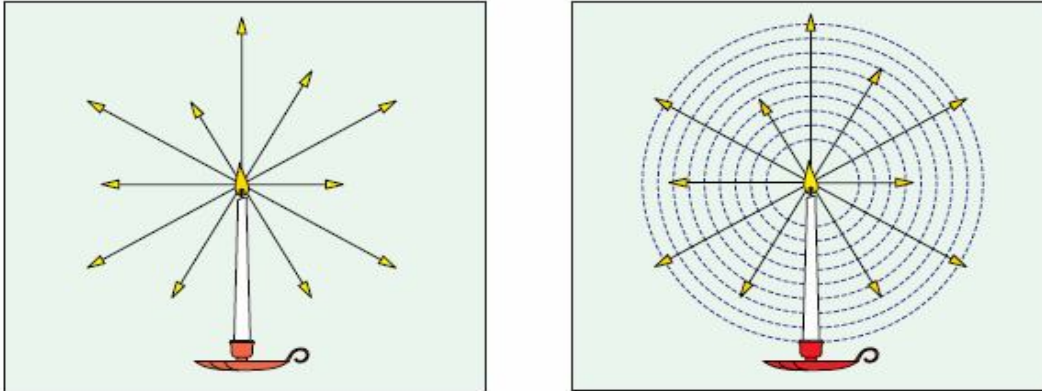


Εικόνα 2. Η εξασθένηση φωτός για γυαλί οπτικής ίνας. Παρατηρούμε τα «παράθυρα» στα διάφορα μήκη κύματος

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.



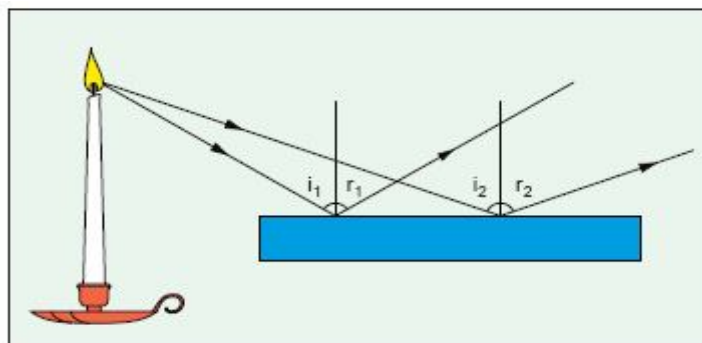
Εικόνα 3. Το φως διασκορπίζεται σε ευθείες γραμμές από την πηγή και ελαττώνεται ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης

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.

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)

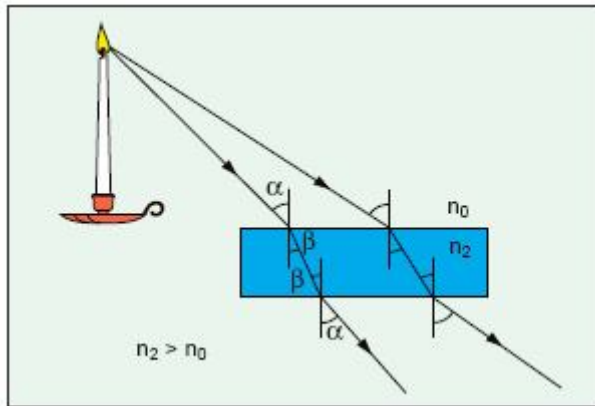


Εικόνα 4. Ανάκλαση σε λεία επιφάνεια

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.

$$\text{Νόμος Snell : } n_0 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$$



Εικόνα 5. Διάθλαση ακτίνας φωτός που περνά από το κενό σε ένα πυκνότερο οπτικό μέσο

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

- Αέρας (κενό) = 1
- Νερό = 1.33
- Γυαλί πυριτίου = 1.444
- Σύνηθες 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.

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

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

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

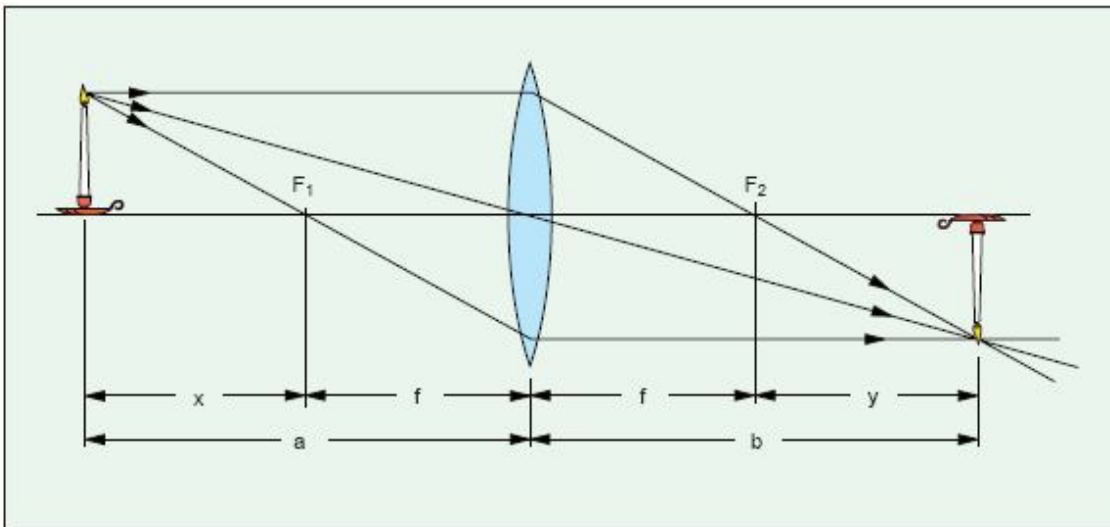
3. Διάθλαση μέσα σε φακό

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 εστιαστούν 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 2 τύποι μπορούν να εφαρμοστούν :

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

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



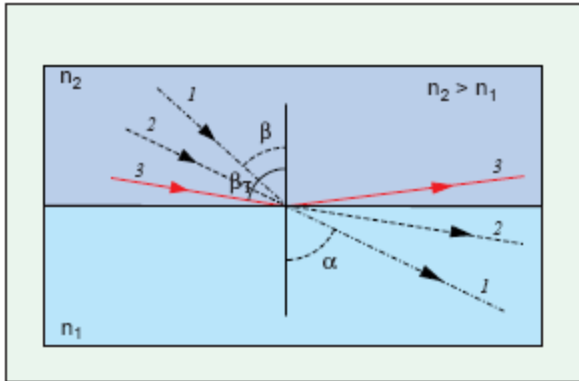
Εικόνα 6. Το μονοπάτι, η ανάκλαση και διάθλαση του φωτός που προσπίπτει σε οπτικό φακό

4. 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° , τότε θα έχουμε την εμφάνιση του φαινομένου της ολικής ανάκλασης. Τα παραπάνω διαφαίνονται και από τον τύπο :

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

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



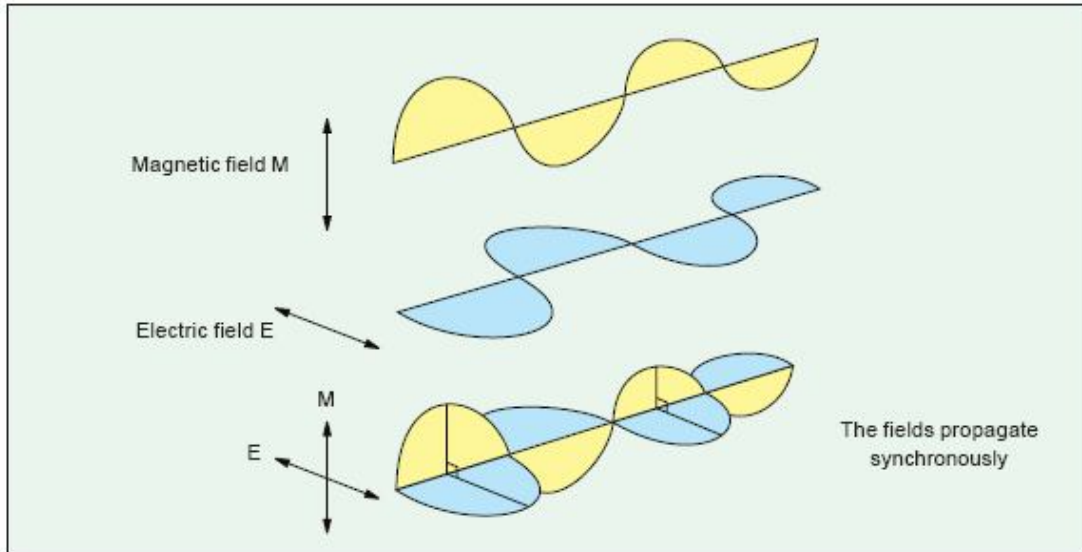
Εικόνα 7.
Όταν το φως ταξιδεύει από ένα πυκνότερο σε ένα λιγότερο πυκνό μέσο και η γωνία πρόσπτωσης ξεπεράσει την κρίσιμη τιμή α , τότε έχουμε ολική ανάκλαση

5. Ανάκλαση φωτός με γωνία πρόσπτωσης 90° (Νόμος Fresnel)

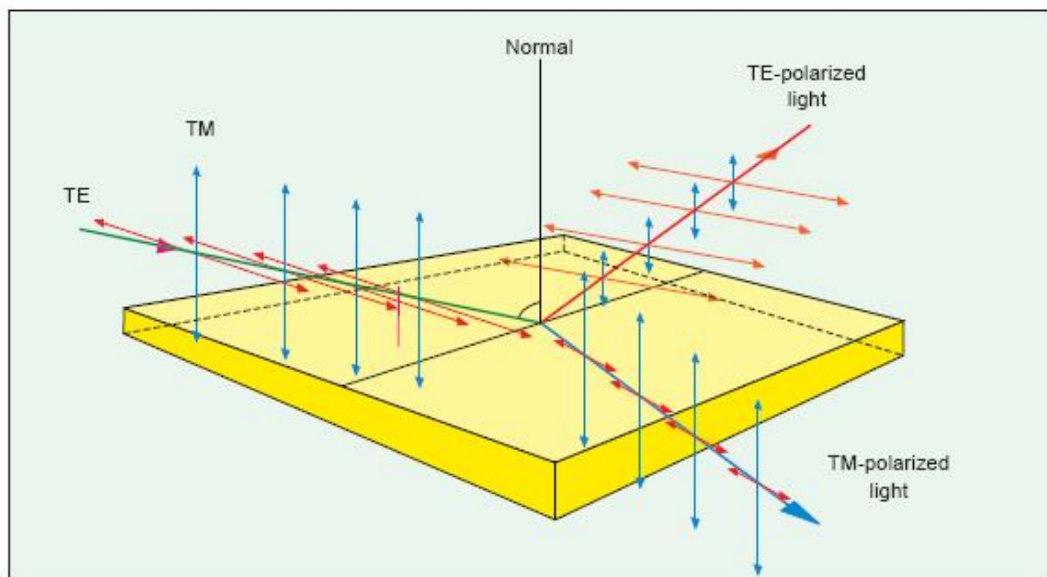
Ακόμα και όταν το φως προσπίπτει σε μια επιφάνεια υπό γωνία 90° δε μπορεί να τη διαπεράσει πλήρως. Μια μικρή ποσότητα φωτός πάντα ανακλάται. Οι λόγοι που λαμβάνει χώρα το παραπάνω φαινόμενο εξηγούνται στη συνέχεια.

Πολωμένο φως

Το φως μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα κύμα, το οποίο αποτελείται από δυο πεδία κάθετα μεταξύ τους : ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό. Στο συνηθισμένο φως υπάρχουν άπειρα κάθετα μεταξύ τους πεδία που διαδίδονται προς την κατεύθυνση που ταξιδεύει το φως. Λόγω της ανάκλασης και της διάθλασης το φως μπορεί να πολωθεί. Για παράδειγμα, πολλοί από μας αγοράζουμε πολωμένα γυαλιά ηλίου για να αποφεύγουμε το έντονο φως που προκύπτει από την ανάκλαση του ηλιακού φωτός σε ένα βρεγμένο δρόμο ή στην επιφάνεια της θάλασσας. Το φως στο οποίο η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου παραμένει αμετάβλητη καθώς η ένταση του μαγνητικού πεδίου μειώνεται, ονομάζεται TE-πολωμένο φως. Το φως στο οποίο η ένταση του μαγνητικού πεδίου παραμένει αμετάβλητη καθώς μειώνεται η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, ονομάζεται TM-πολωμένο φως.



Εικόνα 8. Το φως αποτελείται από 2 πεδία : ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό. Τα 2 πεδία έχουν διαφορά φάσης 90°

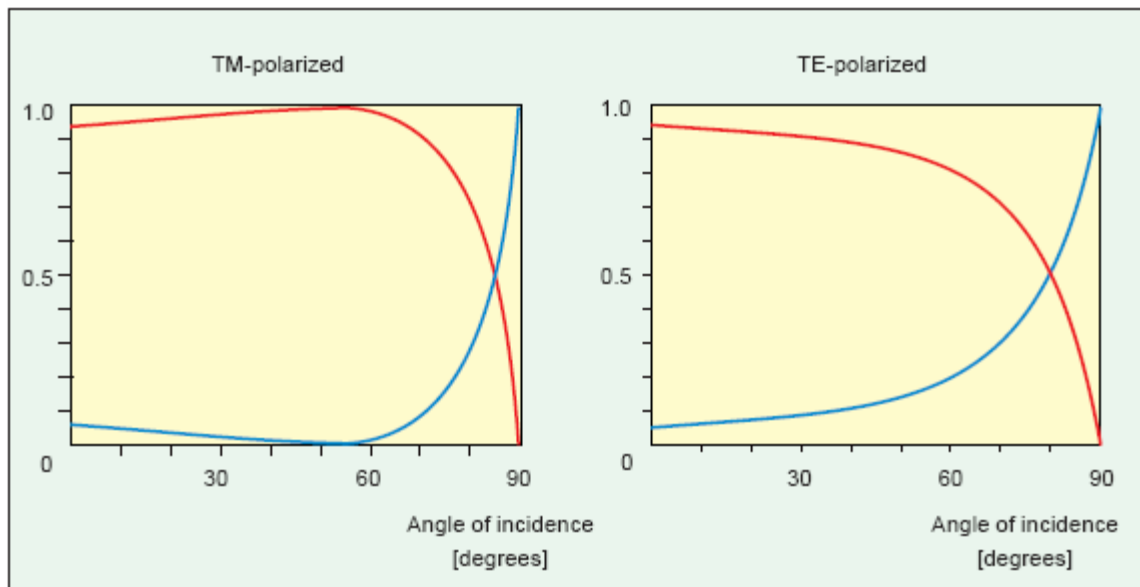


Εικόνα 9. Το φως που χτυπά σε μια επιφάνεια θα πολωθεί , τα 2 πεδία θα πολωθούν διαφορετικά

Οι δυο τύποι πόλωσης έχουν κατά κάποιο τρόπο διαφορετικούς συντελεστές ανάκλασης, οι οποίοι περιγράφονται από το νόμο ανάκλασης του Fresnel. Η ένταση του ανακλώμενου φωτός αυξάνεται από 4 μέχρι 100 % καθώς η γωνία πρόσπτωσης αυξάνεται από 0 μέχρι 90° και για τις δυο πολώσεις (η ένταση του φωτός που διαπερνά την επιφάνεια μειώνεται κατά αντίστοιχο τρόπο). Για TM-πόλωση όμως, η ένταση αρχικά μειώνεται από 4 μέχρι 0 % πριν αυξηθεί ξανά

μέχρι 100 %. Η γωνία στην οποία η TM-ανάκλαση είναι μηδέν ονομάζεται γωνία Brewster. Ο συντελεστής ανάκλασης για γωνία πρόσπτωσης 90° δίνεται από τον τύπο του Fresnel :

$$R_0 = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2}$$



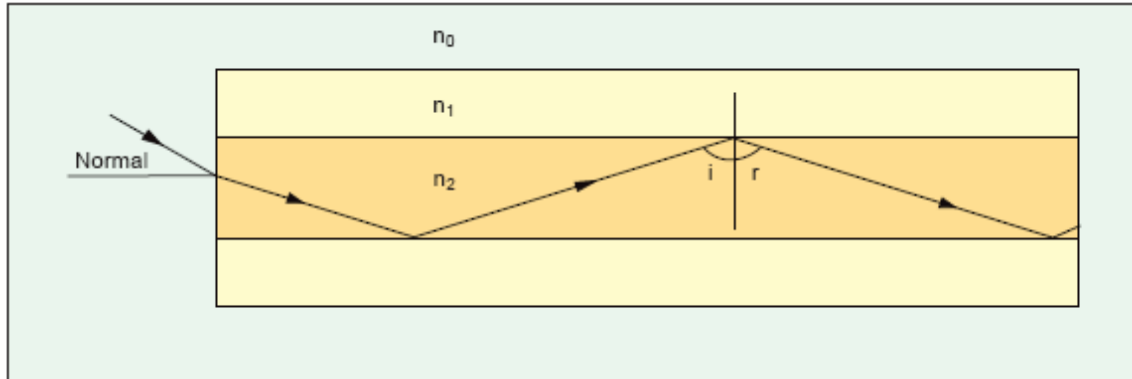
Εικόνα 10. Γραφικές παραστάσεις που μας δείχνουν τις διαφορές μεταξύ των συντελεστών ανάκλασης για τις δυο διαφορετικές πολώσεις

Σε άλλες γωνίες, ο τύπος γίνεται αρκετά πολύπλοκος. Για παράδειγμα, για κρύσταλλο χαλαζία με δείκτη διάθλασης $n=1.46$, ο συντελεστής ανάκλασης είναι περίπου 3.5 % στον αέρα, ενώ για ειδικό γυαλί με $n=1.81$ ο συντελεστής ανάκλασης είναι 8.3 %. Για το πυρίτιο που χρησιμοποιείται σαν οπτικό υλικό για IR φως, ο συντελεστής ανάκλασης είναι 31 % ($n=3.5$). Από το πυρίτιο προς τον αέρα η κρίσιμη γωνία είναι 43.5°.

6. 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 $i = 83.8^\circ$. Για φως που διαδίδεται μέσα σε ίνα, η μεγαλύτερη δυνατή γωνία πρόσπτωσης του μέσα στην ίνα θέλει ιδιαίτερη μελέτη, η οποία θα πραγματοποιηθεί στο κεφάλαιο «οπτικές ίνες και παράμετροι

τους». Αναφέρουμε απλά ότι η παραπάνω γωνία ονομάζεται αριθμητικό άνοιγμα. Αργότερα επίσης θα αναφερθούμε στις πολύτροπες και μονότροπες ίνες. Για να εξηγήσουμε επαρκώς τη μονότροπη ίνα θα χρειαστούμε από θεωρία τις εξισώσεις Maxwell.



Εικόνα 11. Διάθλαση του φωτός καθώς εισέρχεται στην ίνα και ολική ανάκλασή του μέσα στην ίνα

7. 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.

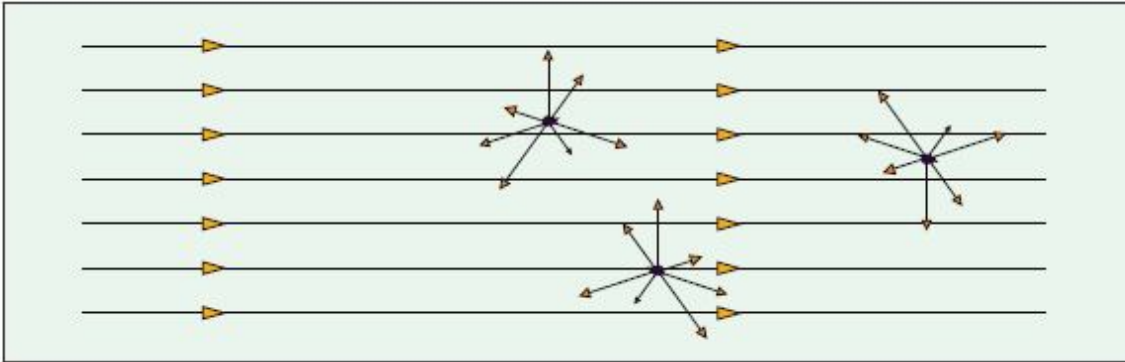
Στη σκέδαση Rayleigh οφείλει ο ουρανός το μπλε χρώμα του ή το κόκκινο κατά την ανατολή και τη δύση. Αυτά τα χρωματικά φαινόμενα οφείλονται στη σκέδαση του φωτός από τα διάφορα μόρια του αέρα.

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 καθρέπτης και να ανακλάσει το φως προς τα πίσω. Το ουράνιο τόξο αποτελεί παράδειγμα αυτού του φαινομένου. Εκτεταμένη μελέτη του φαινομένου της σκέδασης πραγματοποιείται στο κεφάλαιο «οπτικές ίνες και παράμετροί τους»



Εικόνα 12. Σκέδαση Rayleigh λόγω «ακαθαρσιών» κατά τη διεύθυνση μετάδοσης του φωτός

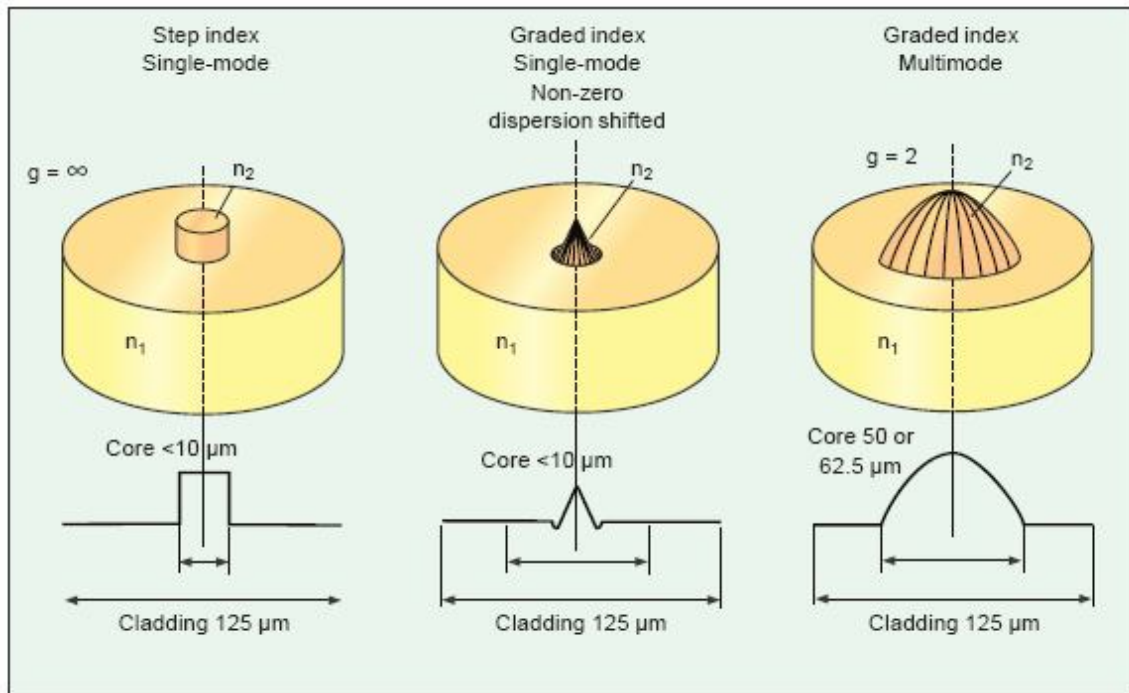
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥΣ

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.



Εικόνα 1. Γραφική παράσταση της μεταβολής του δείκτη διάθλασης στον πυρήνα τριών διαφορετικών τύπων οπτικής ίνας

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.

1. 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 Σκωτσέζος 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

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 υποστηρίξουν μόνο ένα ρυθμό μετάδοσης (ονομάζονται μονότροπες ίνες) ή να υποστηρίξουν 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»

1.1. Ομαλοποιημένη συχνότητα και ρυθμοί διάδοσης

Ένα σημαντικό μέτρο διάκρισης των διαφορετικών τύπων οπτικών ινών, είναι η ομαλοποιημένη συχνότητα (V) και ο αριθμός των ρυθμών διάδοσης (N). Αν :

a = ακτίνα πυρήνα [μm]

NA = αριθμητικό άνοιγμα

λ = μήκος κύματος [μm]

k = αριθμός μηκών κύματος φωτός ανά μήκος 2π

Η ομαλοποιημένη συχνότητα δίνεται από τον τύπο :

$$V = 2\pi \frac{a}{\lambda} NA = k \cdot a \cdot NA$$

Ο αριθμός των ρυθμών διάδοσης που μπορούν να περάσουν μέσα από τον πυρήνα μιας ίνας εξαρτάται από την παράμετρο V και για μια ίνα βηματικού δείκτη μπορεί να προσεγγιστεί από τον τύπο :

$$N \approx \frac{V^2}{2} \cdot \frac{g}{g+2}$$

Για μια ίνα με βηματικό δείκτη και $g = \infty$, ο αριθμός N των ρυθμών διάδοσης μπορεί να προσεγγιστεί από τον τύπο :

$$N \approx \frac{V^2}{2}$$

Για μια ίνα με βαθμιαίο δείκτη και $g = 2$ (συνήθης ίνα παραβολικού βαθμιαίου δείκτη) ο αριθμός N προσεγγίζεται από τον τύπο :

$$N \approx \frac{V^2}{4}$$

Το επόμενο αριθμητικό παράδειγμα μας δείχνει ότι μέσα σε μια ίνα με σχετικά μεγάλο πυρήνα μπορεί να μεταδίδεται μεγάλος αριθμός ρυθμών διάδοσης. Μια ίνα τέτοιου τύπου ονομάζεται πολύτροπη ίνα.

Αριθμητικό παράδειγμα 1

Ας θεωρήσουμε μια ίνα με :

*Βαθμιαίο προφίλ δείκτη $g = 2$
Διάμετρο πυρήνα $2a = 50 \mu\text{m}$ ($a = 25 \mu\text{m}$)
Αριθμητικό άνοιγμα $NA = 0.2$ για $\lambda = 1 \mu\text{m}$*

Η τιμή του V μπορεί να υπολογιστεί από τον παραπάνω τύπο :

$$V = 2 \pi \frac{25}{1} \cdot 0.2 = 2 \cdot \pi \cdot 5 \approx 31.4$$

Και ο αριθμός των ρυθμών διάδοσης από τον παραπάνω τύπο πάλι είναι :

$$N = \frac{V^2}{4} = \frac{31.4^2}{4} \approx 247$$

Αν θέλουμε να μειώσουμε τον αριθμό των ρυθμών διάδοσης, άρα κατ' επέκταση την παράμετρο V , μια ή περισσότερες από τις παρακάτω παραμέτρους πρέπει να μεταβληθούν :

- να μικρύνει η διάμετρος του πυρήνα
- να μικρύνει το αριθμητικό άνοιγμα
- να μεγαλώσει το μήκος κύματος του φωτός

Κάνοντας αλλαγές σε μία ή περισσότερες από τις παραπάνω παραμέτρους, μπορεί να δημιουργηθεί μια μονότροπη ίνα. Οι αλλαγές αυτές όμως συνοδεύονται από ένα πλήθος περιπλοκών. Για παράδειγμα, μια ελάττωση του αριθμητικού ανοίγματος θα προκαλέσει προβλήματα στο ποσό του φωτός που εισέρχεται στην ίνα, γεγονός που σημαίνει ότι το NA πρέπει να είναι όσο το δυνατό μεγαλύτερο. Άλλος ένας παράγοντας είναι η εξασθένηση μέσα σε γυαλί πυριτίου για διάφορα μήκη κύματος (επιλογή μήκους κύματος διάδοσης). Τελικά είναι δυσκολότερο και οικονομικά ασύμφορο να κατασκευάσουμε διοδικά Laser, LED και φωτοδιόδους που μπορούν να λαμβάνουν μεγαλύτερα μήκη κύματος.

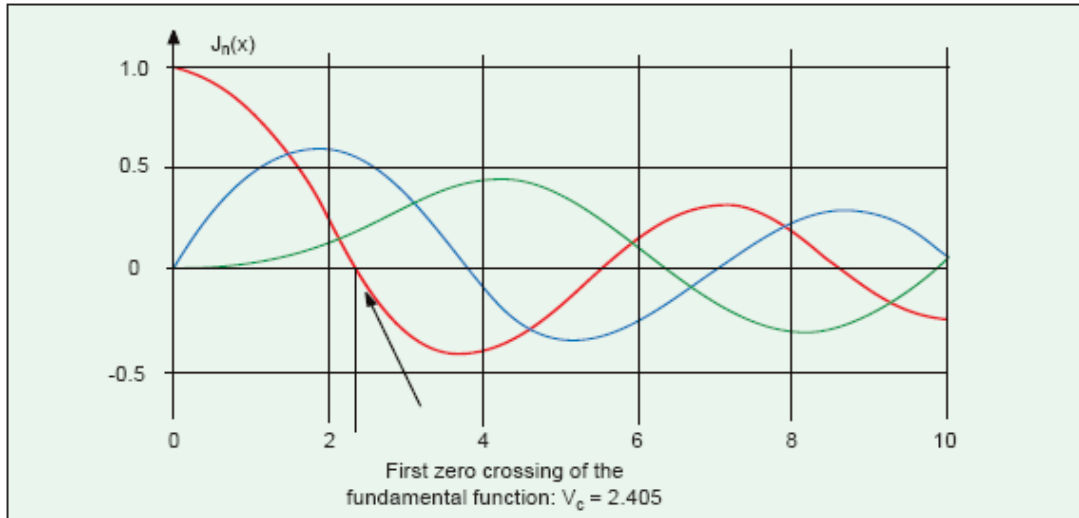
1.2. Ρυθμός LP₀₁ – Ο θεμελιώδης ρυθμός διάδοσης και η αποκοπή

Μέσα σε μια ίνα με βηματικό προφίλ δείκτη ($g = \infty$), για να εξασφαλίσουμε μετάδοση φωτός με ένα και μοναδικό τρόπο, το θεμελιώδη ρυθμό διάδοσης, πρέπει $V \leq 2.405 = V_c$. Μία ίνα που ικανοποιεί τον προηγούμενο περιορισμό ονομάζεται μονότροπη ίνα.

Η σταθερά $V_c = 2.405$ αποτελεί την τιμή x η οποία λαμβάνεται όταν ο θεμελιώδης ρυθμός διάδοσης της συνάρτησης Bessel $J_0(x)$ μηδενίζεται για πρώτη φορά. Οι συναρτήσεις Bessel μοιάζουν με μειωμένες καμπύλες ημιτόνου και είναι συνηθισμένο εργαλείο για την περιγραφή της μετάδοσης κυμάτων σε κυλινδρικούς συμμετρικούς κυματοδηγούς όπως το ομοαξονικό καλώδιο, κενούς κυματοδηγούς (μικροκύματα) και οπτικές ίνες.

Στη σταθερά V_c , το c δηλώνει το μήκος κύματος αποκοπής. Αν θέλουμε να υπολογίσουμε το μήκος κύματος αποκοπής, η τιμή της V_c πρέπει να υπολογιστεί για το προφίλ δείκτη της ίνας που θα χρησιμοποιήσουμε. Για μονότροπη ίνα ισχύει $V_c = 2.405$. Το μήκος κύματος αποκοπής δίνεται από τον τύπο :

$$\lambda_c = \pi \frac{2a}{V_c} NA = \pi \frac{2a}{2.405} \cdot NA$$



Εικόνα 2. Γραφική παράσταση συνάρτησης Bessel

Αριθμητικό παράδειγμα 2

Για μια ίνα με ορθογώνιο προφίλ δείκτη και τις παρακάτω παραμέτρους :

Διάμετρο πυρήνα $d = 2a = 8.5 \mu\text{m}$

Αριθμητικό άνοιγμα (NA) = 0.11

Το κρίσιμο μήκος κύματος ή αλλιώς μήκος κύματος αποκοπής λ_c , υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο :

$$\lambda_c = \pi \frac{2a}{V_c} \text{NA} = \pi \frac{8.5}{2.405} \cdot 0.11 \approx 1220 [\text{nm}]$$

(το παραπάνω παράδειγμα αποτελεί μόνο θεωρητικό υπολογισμό)

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι για μήκη κύματος μεγαλύτερα ή ίσα με το λ_c μόνο ένας ρυθμός μπορεί να διαδίδεται μέσα στον κυματοδηγό. Μια οπτική ίνα μεταφέρει φως σε αυτά τα μήκη κύματος ως μονότροπη ίνα. Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε ότι η αποκοπή είναι επίσης συνάρτηση διαφόρων γεωμετρικών μεταβλητών. Κάτω από πραγματικές συνθήκες οι μεταβλητές αυτές επηρεάζουν. Για αυτό το λόγο οι κατασκευαστές οπτικών ινών και καλωδίων συνήθως καθορίζουν τη θεωρητική αποκοπή, την αποκοπή της οπτικής ίνας και την αποκοπή του καλωδίου. Η αποκοπή καλωδίου είναι η μικρότερη και εγγυάται μονότροπη λειτουργία όταν ικανοποιούνται συγκεκριμένες προϋποθέσεις.

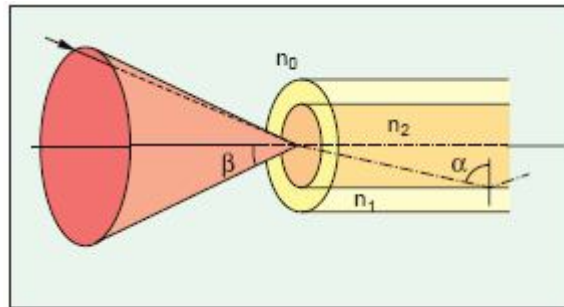
Επίσης πρέπει να θυμόμαστε ότι όλοι οι ρυθμοί διάδοσης, συμπεριλαμβανομένου και του θεμελιώδη ρυθμού, στην πραγματικότητα (μέσω πόλωσης) αποτελούνται από δυο ρυθμούς διάδοσης οι οποίοι ταλαντώνονται κάθετα μεταξύ τους.

2. 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 ημιτόνου 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.



Εικόνα 3. Ο κώνος αποδοχής μιας ίνας

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.

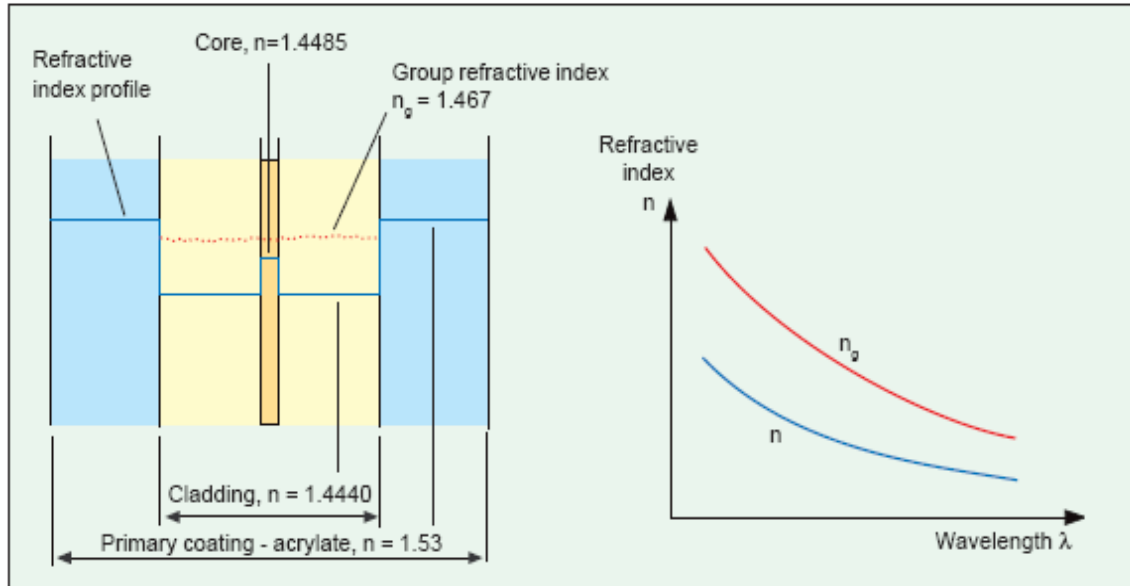
Η κατανομή των ρυθμών μετάδοσης είναι τέτοια, ώστε οι χαμηλής τάξης ρυθμοί να διαδίδονται κοντά στον κεντρικό άξονα, οι υψηλής τάξης ρυθμοί να διαδίδονται κοντά στο μανδύα ενώ κάποιοι ρυθμοί να χάνονται μέσα στο μανδύα. Οι τελευταίοι ρυθμοί ονομάζονται ρυθμοί διαρροής. Οι ρυθμοί διαρροής κατά ένα βαθμό ακτινοβολούνται και κατά ένα άλλο διαδίδονται μέσα στην ίνα.

3. 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 επιστρώματος 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.



Εικόνα 4. Προφίλ δείκτη διάθλασης για μια ίνα με βασικό επίστρωμα, συμπεριλαμβανομένου και του δείκτη διάθλασης του acrylate. Το διάγραμμα παριστάνει το δείκτη διάθλασης και το δείκτη διάθλασης ομάδας συναρτήσει του μήκους κύματος που χρησιμοποιείται

4. 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 LP_{01} 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.

5. 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

κατασκευαστές οπτικών ινών εισήγαγαν τις ίνες μη μηδενικού μετατοπισμένου σημείου διασποράς.

6. Διασπορά

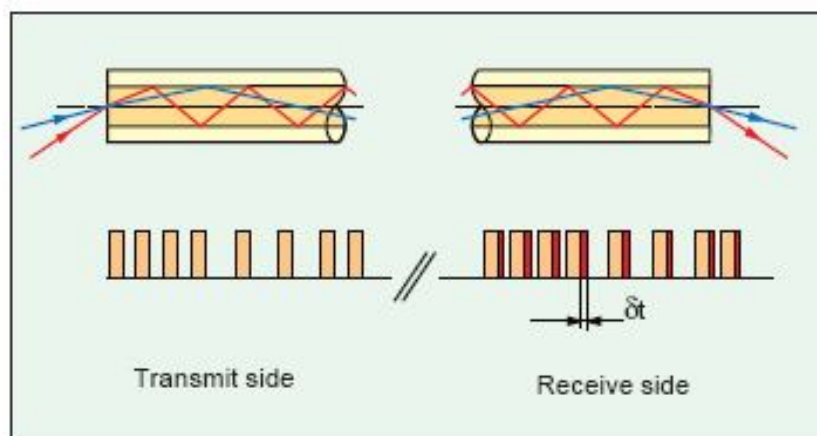
Το φως που ταξιδεύει μέσα σε ένα κυματοδηγό θα υποστεί παραμόρφωση. Το εκπεμπόμενο φως θα διευρυνθεί στο πεδίο του χρόνου. Στον τομέα της οπτικής ινών το παραπάνω φαινόμενο ονομάζεται διασπορά. Υπάρχουν δυο διαφορετικά είδη διασποράς :

- Η intermodal διασπορά που εμφανίζεται στις πολύτροπες ίνες (modal)
- Η intramodal διασπορά (χρωματική) που εμφανίζεται στις μονότροπες και στις πολύτροπες ίνες

6.1. Intermodal διασπορά ή modal διασπορά

Ένας παλμός φωτός που διαδίδεται μέσα σε μια πολύτροπη ίνα πρέπει να θεωρείται ως ένας μεγάλος αριθμός υπο-παλμών, ο καθένας με τη χαρακτηριστική του γωνία πρόσπτωσης μέσα στην ίνα. Το μήκος της ακτίνας διαδρομής διαφέρει λόγω των γωνιών πρόσπτωσης και διάθλασης. Έτσι οι παλμοί φωτός που διαδίδονται ταυτόχρονα θα φτάσουν στο τέλος της ίνας σε ελάχιστα διαφορετικούς χρόνους. Το γεγονός αυτό μπορεί να περιγραφεί ως διεύρυνση του παλμού (κατά τη διάρκεια διάδοσης του μέσα στην ίνα), λόγω αύξησης της διάρκειας του. Το φαινόμενο αυτό περιορίζει αρκετά τις τηλεπικοινωνίες οπτικών ινών.

Για παράδειγμα ας θεωρήσουμε ότι φως διαδίδεται μέσα σε οπτική ίνα μήκους 1 km σε χρόνο 5 μ s. Για το συγκεκριμένο παράδειγμα η διαφορά χρόνου θα είναι $\delta t = 50$ ns. Η χρονική καθυστέρηση κάθε ρυθμού διάδοσης παραμορφώνει το σήμα.



Εικόνα 5. Λόγω του ότι οι διαφορετικοί τρόποι ακολουθούν διαφορετικές διαδρομές μέσα στην ίνα, ένας παλμός διευρύνεται ανάλογα με το μήκος της ίνας

Η modal διασπορά προκαλεί τα παρακάτω προβλήματα :

- Μείωση του εύρους μετάδοσης (Mbit/s)
- Μείωση της απόστασης μετάδοσης

Υπάρχει ένας φυσικός τρόπος μείωσης της modal διασποράς μέσα σε μια ίνα. Ο κάθε ρυθμός διάδοσης μεταφέρει ενέργεια από και προς κάποιον άλλο. Οι ρυθμοί χαμηλής τάξης (ρυθμοί με μικρή γωνία ως προς τον κεντρικό άξονα) μετατρέπονται σε ρυθμούς υψηλής τάξης (μεγάλη γωνία ως προς τον κεντρικό άξονα) μετά τη μεταφορά ενέργειας. Το mode coupling, όπως ονομάζεται το προηγούμενο φαινόμενο, λαμβάνει χώρα περισσότερο σε σημεία «μη καθαρότητας» του πυρήνα, σε κολλήσεις (splices) και σε απότομα λυγίσματα της οπτικής ίνας. Στις σύγχρονες ίνες, ήταν δυνατό να μειώσουμε το mode coupling, βελτιώνοντας την ποιότητα της ίνας. Σαν αποτέλεσμα έχουμε την ουσιαστική αδρανοποίηση του παράγοντα διαφοράς χρόνου δt . Η διαφορά αυτή δεν αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση του μήκους της ίνας, αλλά σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο :

$$\delta t \approx \sqrt{\text{fiber length}(L)}$$

Η modal διασπορά μπορεί να αδρανοποιηθεί πλήρως, μειώνοντας τη διάμετρο του πυρήνα, έτσι ώστε να διαδίδεται μέσα στην ίνα μόνο ένας ρυθμός, ο θεμελιώδης (μονότροπη οπτική ίνα).

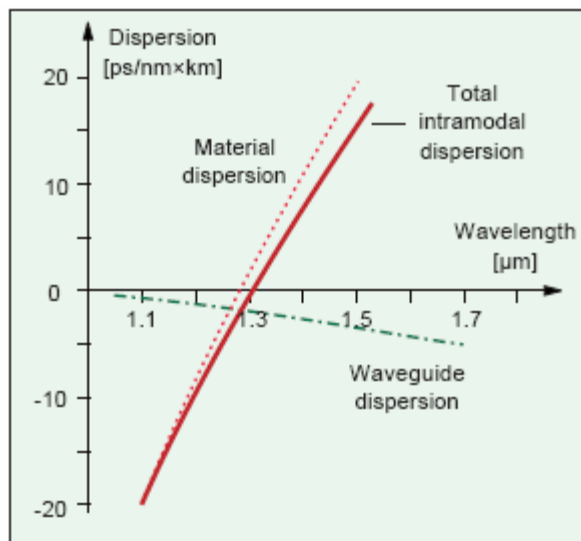
6.2. Intramodal διασπορά ή χρωματική διασπορά

Ακόμα και αν αδρανοποιηθεί πλήρως η modal διασπορά, επιτρέποντας μόνο στο θεμελιώδη ρυθμό να μεταδίδεται μέσα στην ίνα (μονότροπη), θα συνεχίσει να υπάρχει διασπορά του συγκεκριμένου ρυθμού. Η παραμόρφωση αυτού του τύπου ονομάζεται χρωματική διασπορά μαζί με διασπορά πόλωσης ρυθμού μετάδοσης (επόμενη παράγραφος). Η χρωματική διασπορά μέσα σε μια μονότροπη ίνα συνίσταται από τη διασπορά υλικού και τη διασπορά κυματοδηγού.

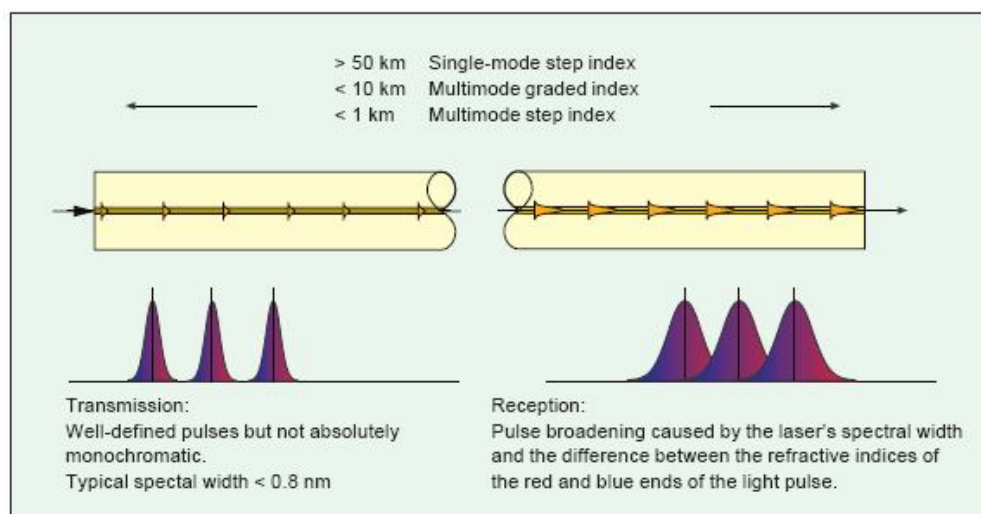
Η διασπορά υλικού και κυματοδηγού τείνουν να αλληλοαναιρούνται σε μήκη κύματος κοντά στα 1310 nm, όπου η χρωματική διασπορά θεωρείται μηδέν. Για μικρότερα μήκη κύματος η χρωματική διασπορά είναι αρνητική ενώ για μεγαλύτερα μήκη κύματος είναι θετική. Η διασπορά υλικού μπορεί να διορθωθεί μόνο αν αλλάξουμε τη σύσταση του γυαλιού στον πυρήνα και στο μανδύα της ίνας. Η διασπορά κυματοδηγού οφείλεται στο προφίλ δείκτη διάθλασης του κυματοδηγού και μπορεί να διορθωθεί μόνο αλλάζοντας αυτό το προφίλ.

Ο πρωτεύων λόγος εμφάνισης του φαινομένου της χρωματικής διασποράς είναι η πηγή διάδοσης του φωτός. Τα laser δεν είναι 100% μονοχρωματικά, γεγονός που σημαίνει ότι κάθε παλμός που διαδίδεται περιέχει φως το οποίο ξεφεύγει από το κόκκινο και μπλε όριο (άνω και κάτω όριο) του φάσματος του συγκεκριμένου μήκους κύματος που χρησιμοποιείται (Αν αναφέρεσαι με το όρο

μπλε και κόκκινο όρο στην εικόνα 7 σημείωσε το δίπλα να μην νομίζει κανείς ότι αναφέρεσαι στα μήκη κύματος του μπλε και κόκκινου φωτός). Ο παράγοντας αυτός καλείται φασματικό εύρος και για εμβέλεια μήκους κύματος 1 – 1.5 μm , μια δίοδος laser έχει φασματικό εύρος 0.1 – 1 nm ενώ ένα LED 50 – 100 nm. Η χρωματική διασπορά είναι μηδέν ή περίπου μηδέν κοντά στα 1310 nm για μια συνηθισμένη μονότροπη ίνα. Η ελάχιστη εξασθένηση της ίνας λαμβάνει χώρα γύρω στα 1550 nm. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην κατασκευή ειδικών ινών, των οποίων το σημείο μηδενισμού της χρωματικής διασποράς έχει μετατοπιστεί σε μεγαλύτερα μήκη κύματος.



Εικόνα 6. Η χρωματική διασπορά είναι το άθροισμα της διασποράς υλικού και κυματοδηγού



Εικόνα 7. Διεύρυνση παλμού λόγω διασποράς. Σε μονότροπη ίνα εμφανίζονται η χρωματική διασπορά και η διασπορά πόλωσης τρόπου μετάδοσης PMD. Σε πολύτροπη ίνα η modal διασπορά προκαλεί κατά κύριο λόγο τη διεύρυνση του παλμού

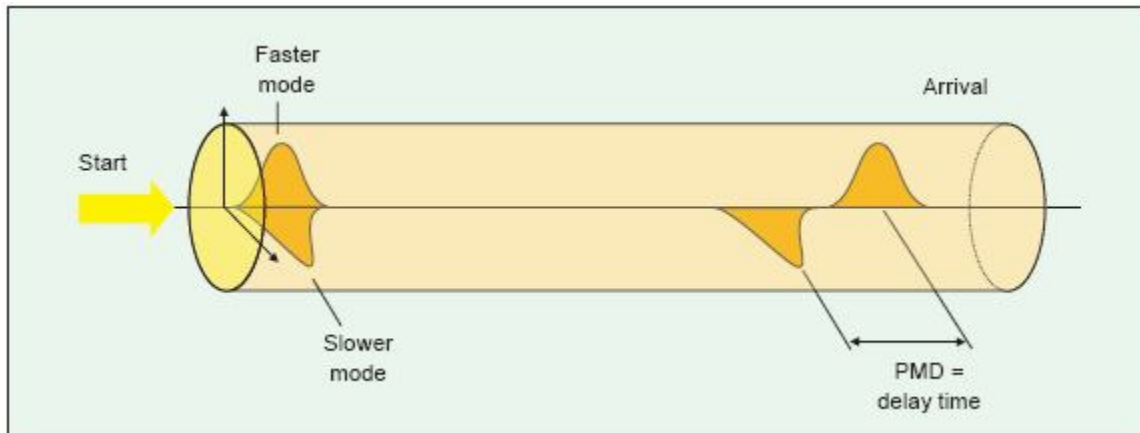
6.3. Διασπορά πόλωσης του ρυθμού μετάδοσης (PMD)

Η μονότροπη διάδοση δεν είναι ποτέ στην πραγματικότητα μονότροπη. Υπάρχουν πάντα δυο ρυθμοί διάδοσης, όπως έχουμε αναφέρει και στο κεφάλαιο «Βασικές γνώσεις οπτικής». Όταν το φως εισέρχεται στην ίνα από το laser, τα πεδία αυτά είναι σύγχρονα και κάθετα μεταξύ τους. Κάθε ένα από αυτά τα πεδία αποτελεί έχει διαφορετική πόλωση.

Η διαφορά μεταξύ των χρόνων άφιξης στο τέρμα της ίνας των δυο αυτών ρυθμών διαφορετικής πόλωσης, ονομάζεται διασπορά πόλωσης του ρυθμού μετάδοσης ή PMD και είναι της τάξης των psec. Μετρώντας για ένα χιλιόμετρο ο παράγοντας PMD μιας ίνας έχει μονάδα ps / $\sqrt{\text{km}}$. Αυτό συμβαίνει λόγω του mode coupling και η εξήγησή του είναι πέρα από τους στόχους της διπλωματικής. Κάποιες από τις πρώτες οπτικές ίνες και κάποιες ίνες χαμηλής ποιότητας που κατασκευάζονται ακόμα και σήμερα έχουν παράγοντα PMD μέχρι και 6 ps / $\sqrt{\text{km}}$ ενώ ίνες υψηλής ποιότητας έχουν παράγοντα μικρότερο από 0.2 . Οι οργανισμοί τυποποίησης προτείνουν ο παράγοντας PMD μιας ίνας να μην ξεπερνά το 1/10 της περιόδου bit. Αυτό μεταφράζεται σε μέγιστο PMD 40 ps για σύστημα 2.5 Gbit/s και 10 ps για σύστημα 10 Gbit/s. Για μια ζεύξη 400 km οι τιμές PMD είναι :

- $40/\sqrt{400} = 2 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$ για σύστημα 2.5 Gbit/s
- $10/\sqrt{400} = 0.5 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$ για σύστημα 10 Gbit/s

Η τιμή 0.5 είναι η τυποποιημένη τιμή που απαιτείται για οπτικά καλώδια ζεύξης. Νέες απαιτήσεις για υψηλότερα bit rate θα είναι 0.1 για σύστημα 40 Gbit/s.



Εικόνα 8. Διεύρυνση παλμού λόγω PMD

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 :

- Διεγερόμενη σκέδαση
- 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.

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.

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 W. Η διεγερόμενη σκέδαση Raman αποτελεί σημαντικότατο πρόβλημα για την μετάδοση μέσω μίας οπτικής ίνας αλλά εμφανίζεται, όπως προαναφέραμε, αποκλειστικά όταν η ισχύς εισόδου είναι αρκετά υψηλή (περίπου 1 W). 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.

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 μονότροπικές 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 ξεπερνάνε αυτά στα οποία αρχίζει να εμφανίζεται το φαινόμενο της αυτό-διαμόρφωσης φάσης.

Cross phase modulation, XPM (ετερο-διαμόρφωση φάσης)

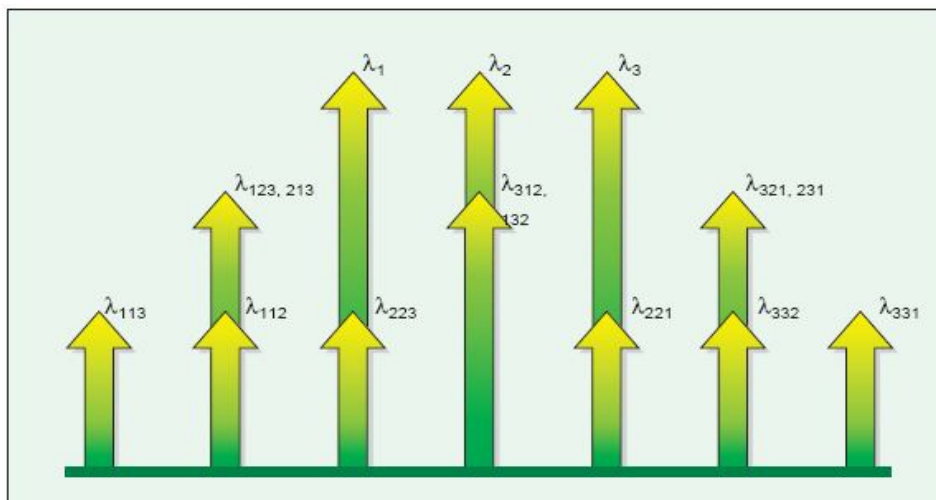
Η XPM σχετίζεται αρκετά με την SPM. Η SPM περιγράφει την επίδραση που έχει ένας παλμός στον εαυτό του ενώ η XPM περιγράφει την επίδραση που έχει ένας παλμός στους παλμούς άλλων καναλιών. Η SPM μπορεί να εμφανιστεί σε μονοκάναλα και πολυκάναλα συστήματα ενώ η XPM εμφανίζεται μόνο σε πολυκάναλα συστήματα. 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.

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 σχήμα 9 παριστάνει το παραπάνω φαινόμενο για 3 κανάλια που ισαπέχουν μεταξύ τους λ_1 , λ_2 και λ_3 . Οι συντελεστές μείξης εμφανίζονται για

$$\lambda_{xyz} = \lambda_x + \lambda_y - \lambda_z$$

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.



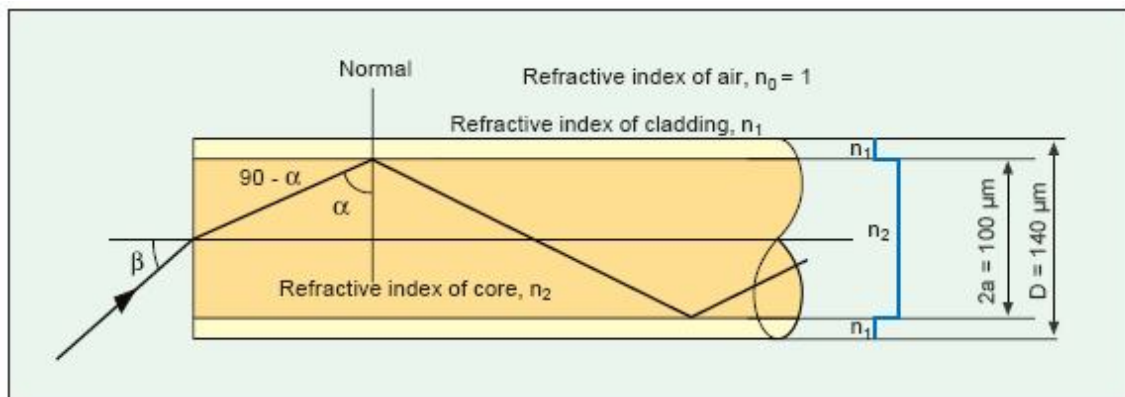
Εικόνα 9. Λόγω του ότι τα κανάλια (μήκη κύματος) λ_1 , λ_2 και λ_3 ισαπέχουν μεταξύ τους σε αυτό το παράδειγμα, κάποια από τα σήματα που δημιουργούνται επιδρούν στα ήδη υπάρχοντα κανάλια

Ο αριθμός των καναλιών (κυμάτων) που δημιουργούνται υπολογίζεται από τον τύπο: $\frac{1}{2} (N^3 - N^2)$ όπου N είναι ο αριθμός των αρχικών καναλιών. Για ένα σύστημα με 3 κανάλια, δημιουργούνται 9 κανάλια σύμφωνα με τον τύπο, ενώ για ένα σύστημα με 16 κανάλια δημιουργούνται 1920. Η διαδικασία μείξης τεσσάρων κυμάτων αποτελεί πολύ σοβαρό ζήτημα για το μήκος κύματος μηδενικής διασποράς, αφού έρχεται σε πλήρη αντίθεση με την προσπάθειά μας να κρατήσουμε τη διασπορά στο ελάχιστο.

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). Η εικόνα 10 παρουσιάζει το προφίλ δείκτη (μπλε) και τη διάθλαση σε μια ίνα με βηματικό προφίλ δείκτη. 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. Παρακάτω δίνονται οι παράμετροι για δυο τυπικές ίνες βηματικού δείκτη :

	<u>Γυαλί</u>	<u>Πλαστικό</u>
Διάμετρος πυρήνα	100 μm	980 μm
Διάμετρος μανδύα	140 μm	1000 μm
Δείκτης διάθλασης πυρήνα	1.48	
Δείκτης διάθλασης μανδύα	1.45	

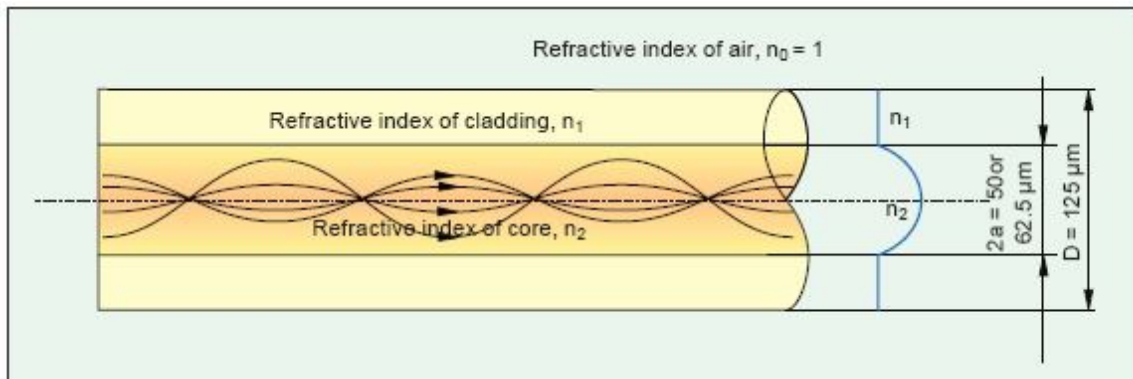


Εικόνα 10. Ενεργειακό μονοπάτι σε πολύτροπη ίνα με βηματικό δείκτη. Παρατηρούμε ότι η γωνία $(90^\circ - \alpha) < \beta$

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 ελάχιστα 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.

Στην εικόνα 11, έχουν σχεδιαστεί τέσσερα κύματα (ρυθμοί). Το ένα διαδίδεται κατά μήκος του κεντρικού άξονα, όπου ο δείκτης διάθλασης είναι μέγιστος. Επίσης φαίνονται δυο κύματα υψηλής τάξης και ένα χαμηλής τάξης. Το φως που διανύει τη μεγαλύτερη απόσταση μέσα στην ίνα είναι αυτό που ταξιδεύει μέσα στο γυαλί με χαμηλό δείκτη διάθλασης με συνέπεια να ταξιδεύει γρηγορότερα αν και διανύει τη μεγαλύτερη απόσταση. Όσο η μεταβολή του δείκτη διάθλασης μιας ίνας πλησιάζει την παραβολική μεταβολή, τόσο πιο πολύ μειώνεται η modal διασπορά. Η διασπορά σε μια πολύτροπη ίνα με βαθμιαίο δείκτη προκαλεί διαφορά χρόνου μικρότερη από 1 nsec σε μήκος ίνας 1 km.



Εικόνα 11. Διαδρομή φωτός μέσα σε πολύτροπη ίνα με βαθμιαίο δείκτη διάθλασης

Τυπικές τιμές ίνας με βαθμιαίο δείκτη :

Διάμετρος πυρήνα	50 ή 62.5 μm
Διάμετρος μανδύα	125 μm
Μέγιστος δείκτης διάθλασης πυρήνα	1.46
Σχετική διαφοροποίησης δείκτη διάθλασης	0.010

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.

10. Μονότροπη ίνα με ορθογώνιο προφίλ δείκτη

Συνήθως οι μονότροπες ίνες χρησιμοποιούνται σε ζεύξεις επικοινωνιών μεγάλων αποστάσεων. Για μια συνηθισμένη μονότροπη ίνα η διασπορά εμφανίζεται στα 1310 nm και η μικρότερη εξασθένηση στα 1550 nm. Αν συνδυαστούν οι παράμετροι : Τιμή αποκοπής και Διάμετρος πεδίου ρυθμού μετάδοσης μπορούμε να έχουμε ένα παράγοντα που χαρακτηρίζει την ευαισθησία της ίνας στο λύγισμα. Υψηλή τιμή αποκοπής και μικρή διάμετρος πεδίου ρυθμού μετάδοσης μας δίνουν μια ίνα αρκετά ανθεκτική στο λύγισμα. Η εικόνα 12 μας δείχνει τη διαδρομή του φωτός μέσα σε μια συνηθισμένη μονότροπη ίνα και το προφίλ δείκτη διάθλασής της. Τυπικές παράμετροι μιας μονότροπης ίνας είναι οι παρακάτω :

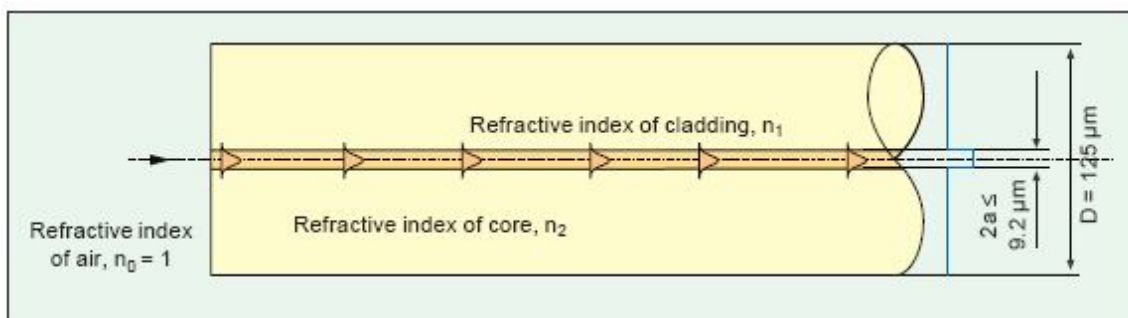
Διάμετρος μανδύα	125 nm
Δείκτης διάθλασης πυρήνα	1.4485
Δείκτης διάθλασης μανδύα	1.4440
Διαφοροποίηση δείκτη διάθλασης	0.003 = 0.3 %

Μια ίνα με τις παραπάνω παραμέτρους παρουσιάζει αριθμητικό άνοιγμα $NA = 0.11$ το οποίο δίνει γωνία αποδοχής $\beta = 6^\circ$. Δεν είναι μόνο η διάμετρος του πυρήνα μιας μονότροπης ίνας που είναι μικρότερη από εκείνη της πολύτροπης. Το αριθμητικό άνοιγμα όπως και η γωνία αποδοχής είναι αρκετά μικρότερα σε μια μονότροπη ίνα. Οι προηγούμενοι τρεις παράγοντες δυσκολεύουν αρκετά την εισαγωγή φωτός μέσα στη μονότροπη ίνα.

Το μήκος κύματος αποκοπής για την ίνα του προηγούμενου παραδείγματος μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο :

$$\lambda_c = \pi \frac{2a}{V_c} NA = \pi \frac{9.2}{2.405} \cdot 0.11 \approx 1322 \text{ [nm]}$$

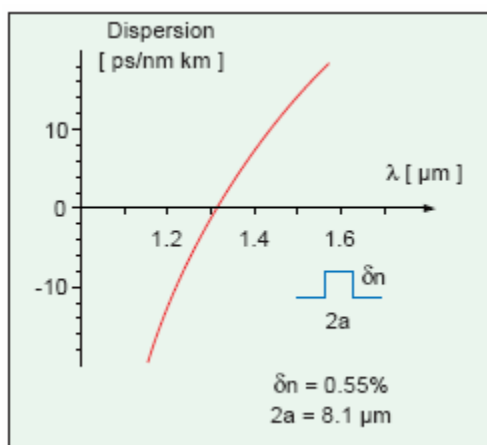
Ο προηγούμενος υπολογισμός παρουσιάζει την τιμή αποκοπής της ίνας. Ίνες που αποτελούν καλώδια οπτικών ινών θα έχουν χαμηλότερο μήκος κύματος αποκοπής, την τιμή αποκοπής του καλωδίου.



Εικόνα 12. Διαδρομή ενέργειας μέσα σε μια ιδανική μονότροπη ίνα

Φως με το παραπάνω μήκος κύματος (λ_c) ή με μεγαλύτερο μπορεί να διαδοθεί μέσα στην οπτική ίνα μόνο με το θεμελιώδη τρόπο μετάδοσης. Οι μη μετατοπισμένου σημείου διασποράς ίνες (συνηθισμένη μονότροπη ίνα), βγήκαν στο εμπόριο το 1983. Από τότε οι κατασκευαστές βελτιώνουν συνεχώς τις γεωμετρικές παραμέτρους και τις παραμέτρους μετάδοσης αυτών των ινών.

Η εικόνα 13 παρουσιάζει το προφίλ δείκτη για μια συνηθισμένη μονότροπη ίνα (μπλε) τύπου βηματικού δείκτη με διαφορά δn των δεικτών διάθλασης πυρήνα και μανδύα. Η διασπορά κυματοδηγού και υλικού αλληλοαναιρούνται για μήκη κύματος λίγο μετά τα 1300 nm, έτσι ώστε η ολική (χρωματική) διασπορά να είναι μηδενική.



Εικόνα 13. Η χρωματική διασπορά σε μια συνηθισμένη μονότροπη ίνα για μήκη κύματος από 1150 μέχρι 1600 nm

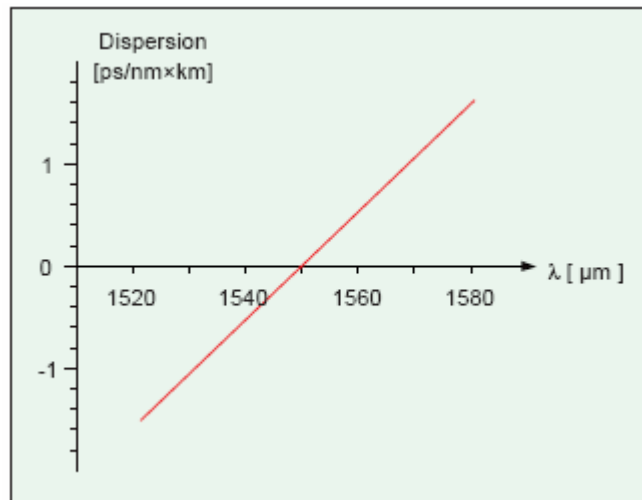
11. Ίνες μετατοπισμένου σημείου διασποράς

Για μια πλειάδα εφαρμογών, όπως ζεύξεις μεγάλου μήκους (και χαμηλής εξασθένισης), 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.

12. Συνήθης ίνα μετατοπισμένου σημείου διασποράς

Η πρώτη ίνα μετατοπισμένου σημείου διασποράς εμφανίστηκε κατά τα μέσα της δεκαετίας του '80 και παρουσίαζε μηδενική διασπορά στα 1550 nm. Η μετατόπιση του σημείου μηδενισμού επιτυγχανόταν μετατρέποντας το προφίλ δείκτη του πυρήνα σε τριγωνικό ή δημιουργώντας δύο «σκαλοπάτια» στο δείκτη διάθλασης του μανδύα. Η ίνα αυτή έχει το μεγάλο μειονέκτημα, να παρουσιάζει μη γραμμικά φαινόμενα κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Η «παλιά» ίνα μετατοπισμένου σημείου διασποράς δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα συστήματα με πολυπλέκτες διαχωρισμού μήκους κύματος (1993). Η συνήθης ίνα του παραπάνω τύπου θεωρείται πια ξεπερασμένη και έχει αντικατασταθεί στα νέα συστήματα με ίνες μη μηδενικού μετατοπισμένου σημείου διασποράς.

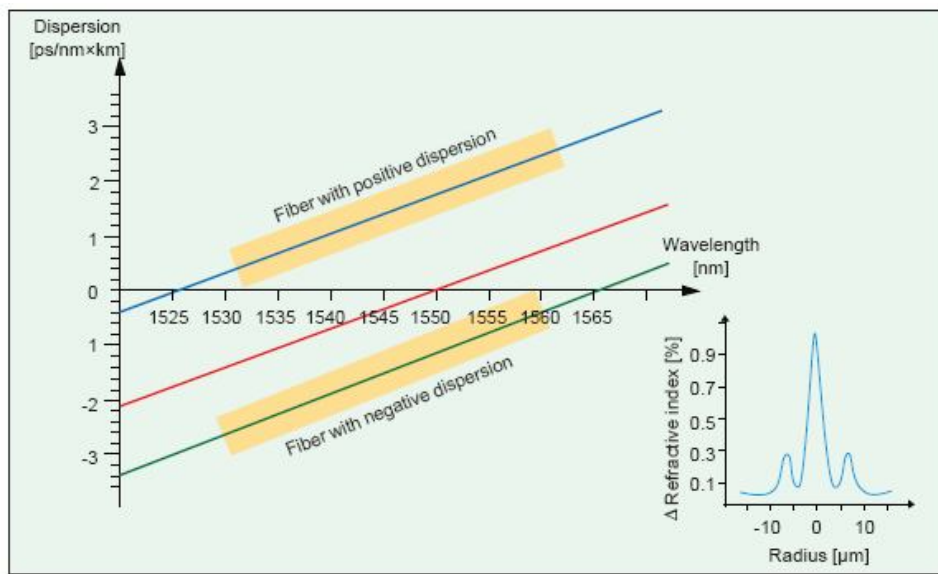


Εικόνα 14. Χρωματική διασπορά για μια ίνα μετατοπισμένου σημείου διασποράς

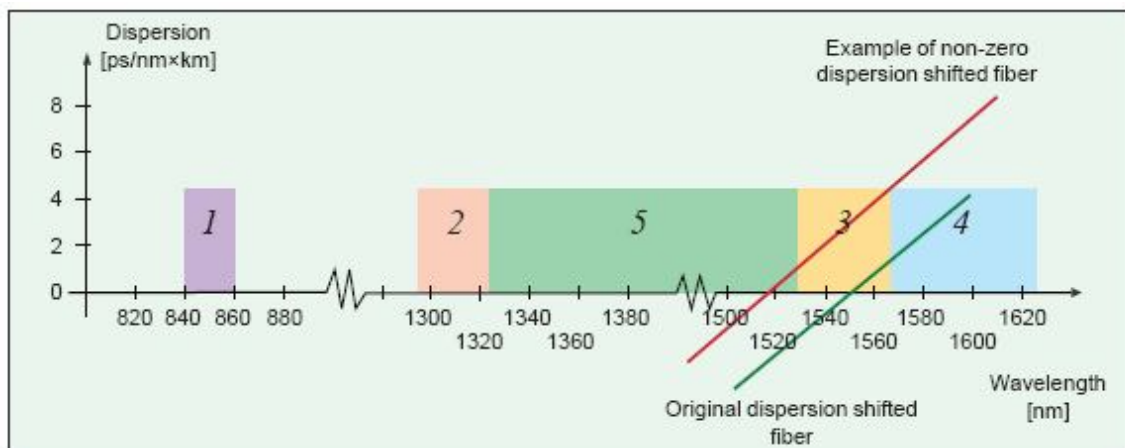
12.1. Ίνα μη μηδενικού μετατοπισμένου σημείου διασποράς

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) στο τρίτο «παράθυρο», 1530 – 1565 nm. Σήμερα αρχίζουν και χρησιμοποιούνται και τα παράθυρα τέσσερα και πέντε για τέτοιου τύπου ίνες. Έτσι υπάρχουν πολλά είδη τέτοιου τύπου ινών με διαφορετικές τιμές διασποράς και αποτελεσματικής περιοχής. Δυο παραδείγματα δίνονται στην εικόνα 15.



Εικόνα 15. Η γραφική παράσταση παρουσιάζει δυο διαφορετικούς τύπους ίνας μη μηδενικού μετατοπισμένου σημείου διασποράς σε σύγκριση με μια ίνα μετατοπισμένου σημείου διασποράς (κόκκινο). Επίσης συμπεριλαμβάνεται και το προφίλ του δείκτη διάθλασης

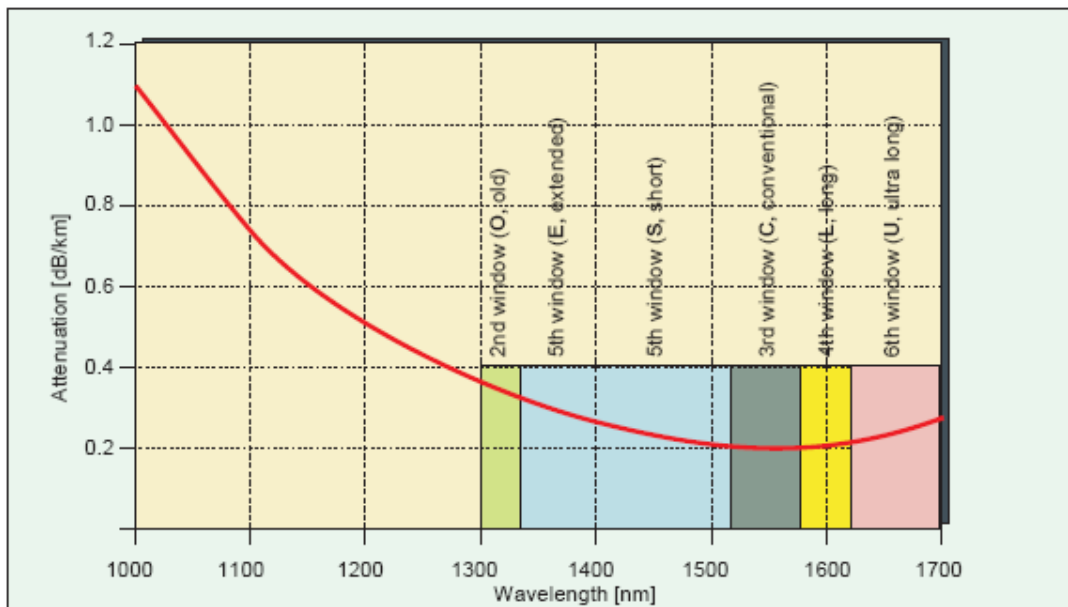


Εικόνα 16. Η γραφική παράσταση παρουσιάζει τη διασπορά μιας ίνας μη μηδενικού μετατοπισμένου σημείου διασποράς και μιας μετατοπισμένου σημείου διασποράς. Νέες τεχνικές άνοιξαν δυο νέα «παράθυρα» (4 και 5) για WDM. Το παράθυρο 3 χρησιμοποιείται εδώ και χρόνια για συστήματα DWDM

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 δε 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 – 1565 nm όπου παρουσιάζουν διασπορά 2 – 6 ps / nm * km. Με τέτοιου τύπου ίνες έχουν διαδοθεί αρκετές εκατοντάδες κανάλια των 2.5 ή 10 Gbit/s σε αποστάσεις πολλών χιλιομέτρων.

12.2. Ίνες με συνεχές χρησιμοποιούμενο φάσμα από 1280 μέχρι 1625 (1700) nm

Μια νέου τύπου ίνα αναμένεται να ανοίξει ένα νέο «παράθυρο» για μετάδοση. Αυτό το νέο παράθυρο θα ενώνει το παράθυρο των 1310 nm με αυτό των 1550 nm και θα δίνει τη δυνατότητα χρήσης παραπάνω από 100 nm εύρους ζώνης σε σχέση με την τυπική μονότροπη ίνα. Σε αυτή την ίνα η ολική εξασθένηση στο φασματικό εύρος 1285 – 1625 nm είναι μικρότερη από 0.4 dB. 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 – 1450 nm) και για μετάδοση πληροφοριών DWDM με bit rate κοντά στα 2.5 Gbit/s στην περιοχή των 1450 nm.

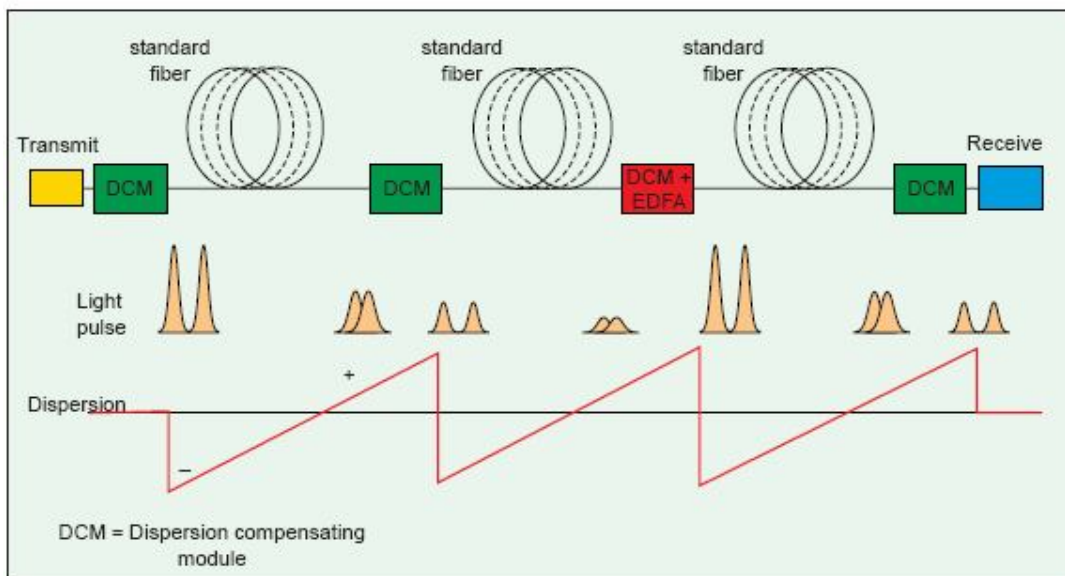


Εικόνα 17. Εξασθένηση σε συνάρτηση με το μήκος κύματος για μια ίνα συνεχούς χρησιμοποιούμενου φάσματος (1285 – 1625 nm)

12.3. Ίνα αντιστάθμισης διασποράς

Όπως αναφέραμε και νωρίτερα σε αυτό το κεφάλαιο, 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 1550 nm, γεγονός που (τουλάχιστον για το άμεσο μέλλον) αποκλείει τη μετάδοση στα 1310 nm. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τις παραμέτρους μιας τυπικής μονότροπης ίνας και μιας ίνας αντιστάθμισης διασποράς.

Type of fiber	Dispersion at 1550 nm [ps/nm × km]	Attenuation at 1550 nm [dB/km]
Standard single-mode fiber	17 - 18	0.18 - 0.21
Dispersion compensating fiber	(-65) - (-90)	0.56 - 0.60



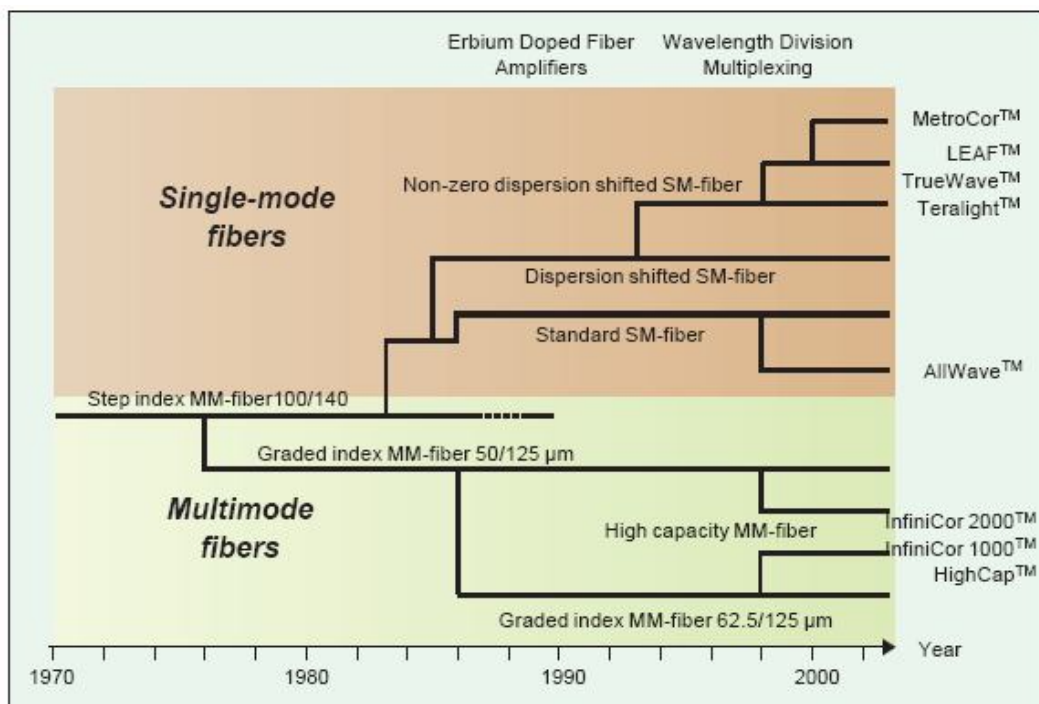
Εικόνα 18. Οι μέθοδοι αντιστάθμισης διασποράς μπορούν να εφαρμοστούν στην αρχή και στο τέλος μιας ζεύξης μετάδοσης. Κατά προτίμηση συνδυάζονται με ενισχυτές EDFA

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από τον παραπάνω πίνακα, η ίνα αντιστάθμισης διασποράς παρουσιάζει αρκετά υψηλή αρνητική τιμή διασποράς για μήκη κύματος κοντά στα 1550 nm. Χρησιμοποιώντας μεθόδους

αντιστάθμισης διασποράς με ίνες αντιστάθμισης ή με συνδυασμό ιών αντιστάθμισης και ενισχυτών EDFA σε οπτικά συστήματα, μπορούμε να χρησιμοποιούμε καλώδια ιών μεγάλου μήκους χωρίς να λαμβάνουν χώρα σημαντικά φαινόμενα διασποράς. Το μόνο μειονέκτημα της ίνας αντιστάθμισης διασποράς είναι ότι παρουσιάζει αρκετά υψηλή τιμή εξασθένησης (0.60 dB/km). Το γεγονός αυτό όμως μπορεί να αντισταθμιστεί με τη χρήση ενισχυτών EDFA. Η τυπική μονότροπη ίνα βηματικού προφίλ δείκτη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεγάλες αποστάσεις χωρίς την ανάγκη επαναληπτών. Τα παλιά συστήματα οπτικών ιών μπορούν να αναβαθμιστούν για λειτουργία σε υψηλά bit rate και καλύτερη απόδοση με προσθήκη πολυπλεκτών διαχωρισμού μήκους κύματος.

Περίληψη

Από το 1970 που κατασκευάστηκε η πρώτη οπτική ίνα χαμηλής εξασθένησης από την Corning, είναι συνεχής η προσπάθεια των κατασκευαστών για παραγωγή ιών καλύτερης ποιότητας. Οι ίνες που παράγονται σήμερα έχουν εξαιρετικά μικρές τιμές εξασθένησης. Η διασπορά των ιών εξαρτάται από τον τύπο συστήματος στον οποίο χρησιμοποιούνται. Το εύρος ζώνης μετάδοσης των μονότροπων ιών έχει αυξηθεί έτσι ώστε να μεγαλώσει ο αριθμός των μηκών κύματος που μπορούν να διαδοθούν μέσα σε μια μονότροπη ίνα. Στις μέρες μας η τιμή των καλωδίων οπτικής ίνας ανά μέτρο είναι μικρότερη από εκείνη ενός χάλκινου καλωδίου. Η εικόνα 19 παρουσιάζει την ιστορία των οπτικών ιών και την ανάπτυξη των συστημάτων στα οποία χρησιμοποιείται κάθε τύπος ίνας.



Εικόνα 19. Η εξέλιξη της οπτικής ίνας

Η τυποποίηση των οπτικών ινών στις μέρες μας είναι αρκετά ευρεία. Ακόμα και μέσα στην κατηγορία ενός προτύπου υπάρχει μεγάλη ποικιλία τύπων ινών. Το γεγονός αυτό επιτρέπει στους κατασκευαστές να αναπτύξουν ο καθένας τις δικές του διαφορετικές ίνες μέσα στα πλαίσια ενός προτύπου. Κάτι τέτοιο βέβαια σημαίνει ότι μπορεί να υπάρξει πρόβλημα συμβατότητας μεταξύ ινών διαφορετικών κατασκευαστών.

- Τυπική μονότροπη ίνα (σχεδόν όλα τα σύγχρονα οπτικά δίκτυα)
- Ίνα μετατοπισμένου σημείου διασποράς (ξεπερασμένη στις μέρες μας)
- Ίνα μη μηδενικού μετατοπισμένου σημείου διασποράς Truwave TM (Lucent) ή Teralight TM (Alcatel) (χρήση με πολυπλέκτες διαχωρισμού μήκους κύματος)
- Ίνα μη μηδενικού μετατοπισμένου σημείου διασποράς με μεγάλη αποτελεσματική περιοχή LEAF TM (χρήση με πολυπλέκτες διαχωρισμού μήκους κύματος και laser μεγάλης ισχύος, Corning Inc.)
- Ίνα με συνεχές χρησιμοποιούμενο φάσμα 1285 – 1625 nm, Allwave TM (Lucent)
- Ίνα καθαρού πυριτίου χωρίς προσμείξεις και χαμηλή εξασθένησης για υποβρύχια συστήματα (Sumitomo)
- Πολύτροπη ίνα με πυρήνα 50 μm
- Πολύτροπη ίνα με πυρήνα 62.5 μm
- Ίνες ερβίου (ίνα ενίσχυσης)
- Ίνες τιτανίου (αύξηση δύναμης)
- Βελτιστοποιημένες πολύτροπες ίνες laser, InfiniCor TM (Corning Inc) HiCap TM (Plasma Optical Fiber)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΩΣ ΕΠΙΛΕΓΟΥΜΕ ΤΟ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟ ΚΑΛΩΔΙΟ ΟΠΤΙΚΗΣ ΙΝΑΣ

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 :

- Η ίνα δεν είναι αρκετά λυγισμένη, γιατί :
 1. μπορεί εύκολα να σπάσει
 2. μπορεί να μετατραπεί σε χαμηλής ποιότητας κυματοδηγό (αύξηση εξασθένησης)
 3. 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
- Δεν έχουν ασκηθεί στην ίνα ακτινικές δυνάμεις, λόγω του ότι η συμπίεση της ίνας μπορεί να αυξήσει δραματικά την εξασθένηση
- 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

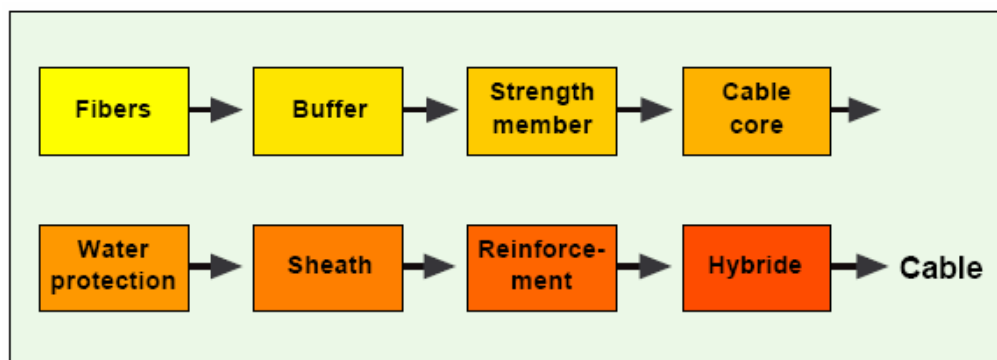
Δεν είναι πρακτική η χρήση οπτικής ίνας χωρίς τους διάφορους τύπους προστασίας που παρέχει η κατασκευή καλωδίων. Έτσι ο σχεδιασμός ενός οπτικού καλωδίου συμπεριλαμβάνει τη συσκευασία ενός πολύ ευαίσθητου οδηγού φωτός από γυαλί, κατά τέτοιο τρόπο ώστε όλοι οι παραπάνω παράγοντες να αποφεύγονται όσο το 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 (κτηριακές εγκαταστάσεις)
- Καλώδια rack (εύκαμπτα, συχνά μίας ίνας όπως patch cords και pig-tails)
- Καλώδια υπόγειων αγωγών (duct)
- Εναέρια καλώδια (aerial)
- Καλώδια άμεσης βύθισης (direct burial)
- Υποβρύχια καλώδια

Διάφορες παράμετροι

Η εικόνα 1 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.

Το κεφάλαιο αυτό ασχολείται με όλα τα βασικά βήματα της διαδικασίας επιλογής του κατάλληλου οπτικού καλωδίου. Συγκεκριμένες παράμετροι που επιλέγονται αρχικά μπορεί να εξαιρέσουν άλλες παραμέτρους.



Εικόνα 1. Οι βασικές παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαδικασία επιλογής ενός καλωδίου οπτικής ίνας. [οπτική ίνα, απομονωτής, παράγοντας αντοχής, πυρήνας καλωδίου, προστασία από νερό, θήκη (τελικό κάλυμμα), ενίσχυση, υβριδικά καλώδια]

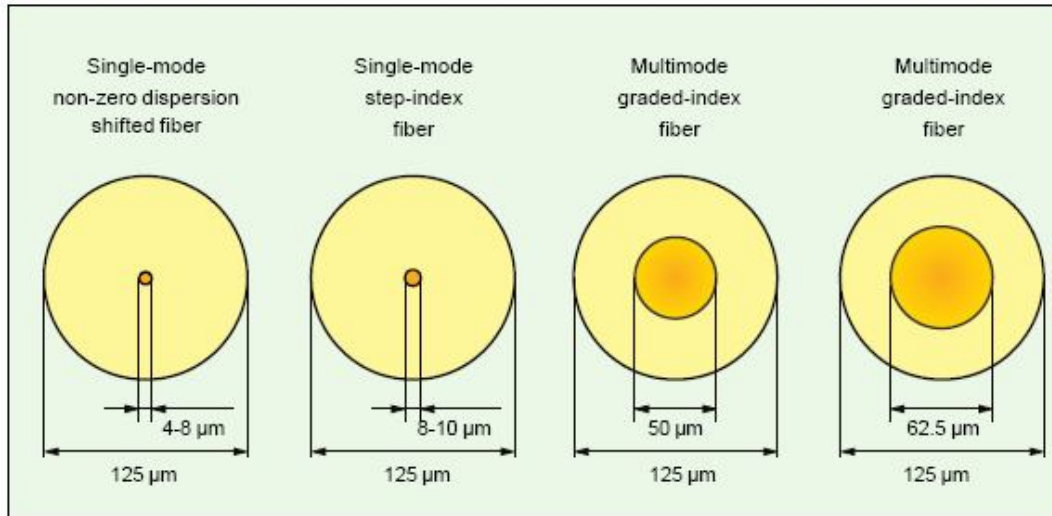
1. Πρώτη παράμετρος, η οπτική ίνα

Μια οπτική ίνα είναι τελείως απροστάτευτη 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 απροστάτευτη ίνα είναι άκρως ευαίσθητη στο λύγισμα και σε διαμήκεις δυνάμεις. Επίσης μια απροστάτευτη ίνα είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στην υγρασία και σε αρκετά χημικά.

Στην αγορά υπάρχουν ίνες με μεγάλη ποικιλία γεωμετρικών χαρακτηριστικών, στην εργασία μας όμως θα ασχοληθούμε με ίνες που έχουν διάμετρο μανδύα 125 μm. 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.



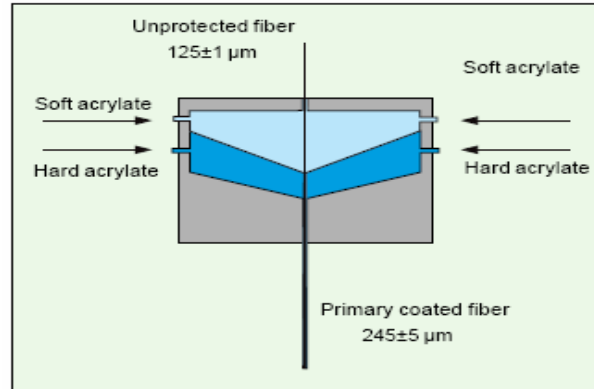
Εικόνα 2. Οι τέσσερις πιο συνηθισμένοι τύποι οπτικών ινών που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα οπτικά δίκτυα

1.1. Πρωτεύον επίστρωμα

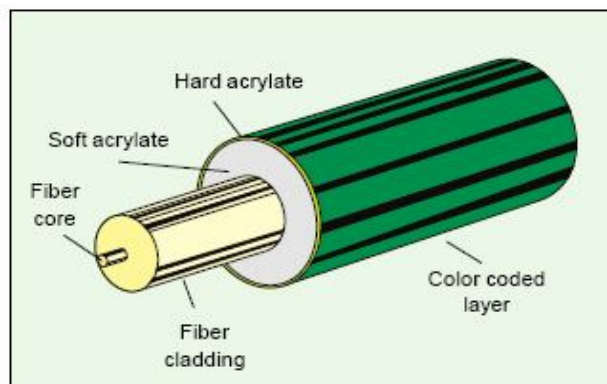
Για να μπορέσουμε να χρησιμοποιήσουμε μια γυάλινη ίνα πρέπει πρώτα να επικαλυφθεί με ένα ή περισσότερα προστατευτικά στρώματα. Η διαδικασία επικάλυψης λαμβάνει χώρα κατά το σχεδιασμό της ίνας, λίγα μέτρα κάτω από το φούρνο του πύργου σχεδιασμού. Το πρωτεύον επίστρωμα καλύπτει την ίνα σε υγρή μορφή με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

1.2. 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).



Εικόνα 3. Επικάλυση ίνας με Acrylate ως πρωτεύον επίστρωμα



Εικόνα 4. Ίνα με πρωτεύον επίστρωμα

1.3. Χαρακτηριστικά ίνας μετά από επικάλυψη με πρωτεύον επίστρωμα

Το πρωτεύον επίστρωμα αυξάνει δραματικά τη μηχανική αντοχή της γυάλινης οπτικής ίνας. Μια ίνα με πρωτεύον επίστρωμα πρέπει να αντέχει δύναμη 10 N για να πληρεί τους όρους εγγύησης. Η μεγαλύτερη δύναμη που μπορεί να αντέξει είναι περίπου 50 N. Το πρωτεύον επίστρωμα επίσης προστατεύει την ίνα από τη σκόνη, την υγρασία και τα χημικά.

Parameter	IEC 60793-2
Cladding diameter	125 ± 1 μm
Cladding non-circularity	< 1%
Coating diameter	245 ± 5 μm
Mode field concentricity error	< 0.5 μm
Curl radius, max	4 m

Πίνακας 1. Τα πιο συνηθισμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά μιας μονότροπης ίνας 8 – 10/125μm

1.4. 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

Πίνακας 2. Χρωματική κωδικοποίηση που χρησιμοποιείται από την Telia AB, στη Σουηδία

1.5. Συστάσεις για οπτικές ίνες

Έχουν δημιουργηθεί αρκετά πρότυπα και συστάσεις για την κατασκευή οπτικών ινών. Μέχρι στιγμής υπάρχουν δύο διαφορετικά πρότυπα : της ITU και της IEC. Οι παρακάτω συστάσεις έχουν δημοσιευτεί :

ITU Rec. G.650	Μέθοδοι πιστοποίησης οπτικών ινών
ITU Rec. G.651	50/125 μm πολύτροπη ίνα βαθμιαίου δείκτη
ITU Rec. G.652	Μονότροπη ίνα
ITU Rec. G.653	Μονότροπη ίνα μετατοπισμένου σημείου διασποράς
ITU Rec. G.654	Μονότροπη ίνα χαμηλής εξασθένισης
ITU Rec. G.655	Μονότροπη ίνα μη μηδενικού μετατοπισμένου σημείου διασποράς
IEC 60793-1-1	Γενικές συστάσεις
IEC 60793-1-2	Μέθοδοι πιστοποίησης συστημάτων
IEC 60793-1-3	Μέθοδοι μέτρησης μηχανικών χαρακτηριστικών
IEC 60793-1-4	Μέθοδοι μέτρησης χαρακτηριστικών μετάδοσης και οπτικών χαρακτηριστικών
IEC 60793-1-5	Μέθοδοι μέτρησης περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών

2. 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 :

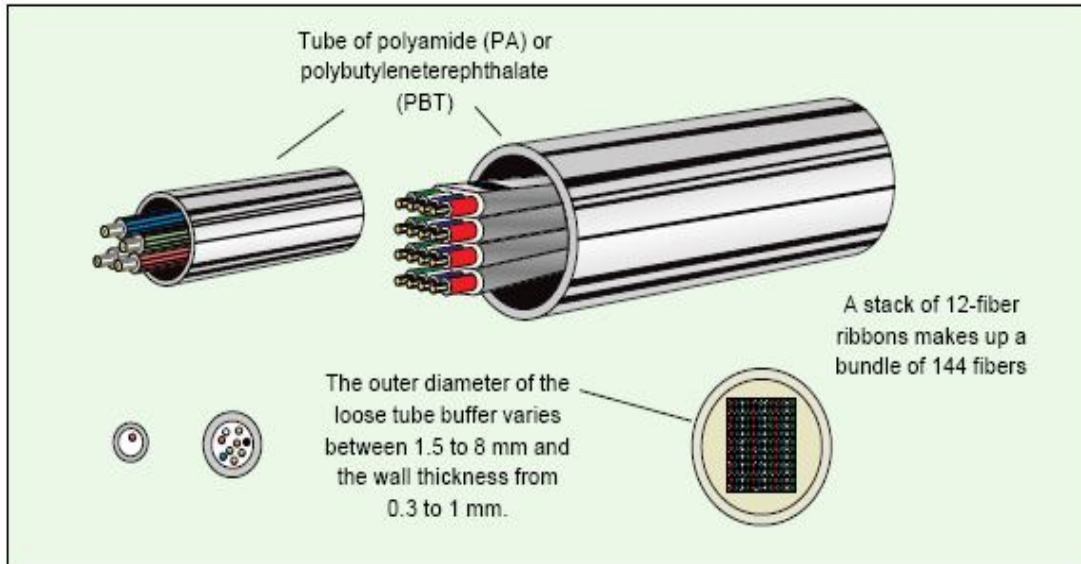
- Loose tube buffer (loose fibers or ribbons in tube)
- Tight buffer
- Fiber ribbon

2.1. Loose tube buffer (loose fibers/ribbons in tube)

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 πληρεί 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.



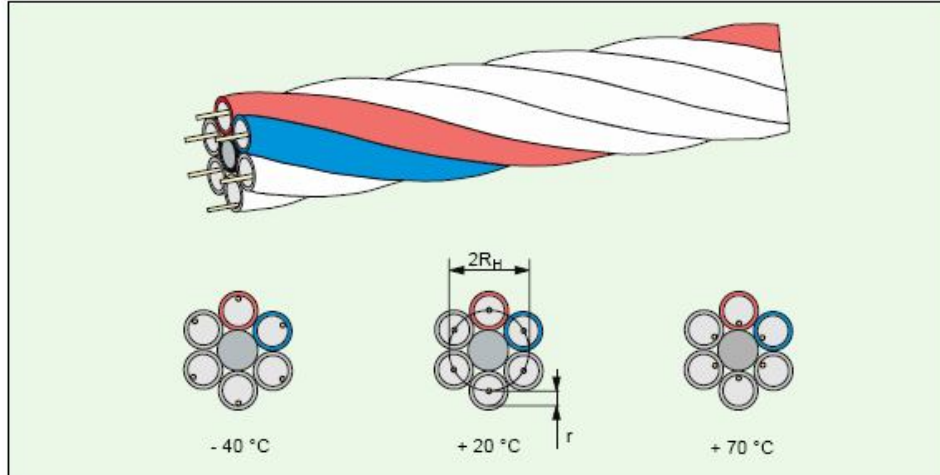
Εικόνα 6. Ίνες με πρωτεύον επίστρωμα ή κορδέλες ινών μπορεί να τοποθετηθούν χαλαρά μέσα σε σωλήνα, ο οποίος παίζει ρόλο απομονωτή

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.

2.1.1. Αλλαγές θερμοκρασίας

Το γυαλί της ίνας και το πλαστικό από το οποίο κατασκευάζεται ο σωλήνας παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές όσον αφορά τους συντελεστές διαστολής τους. Το πλαστικό έχει μεγάλο συντελεστή διαστολής ενώ το γυαλί πολύ μικρό. Αυτό σημαίνει ότι το καλώδιο θα είναι μακρύτερο το καλοκαίρι ενώ το γυαλί δε θα αλλάξει σχεδόν καθόλου μήκος. Έτσι λόγω του ότι η ίνα κινείται ελεύθερα μέσα στο καλώδιο, κάτω από φυσιολογικές συνθήκες, αποφεύγεται το τέντωμα της. Το αντίθετο φαινόμενο λαμβάνει χώρα όταν επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες (συστολή καλωδίου).

Πριν γίνουν καλώδια οι σωλήνες χρωματίζονται σύμφωνα με κάποιο πρότυπο ή σύμφωνα με τις απαιτήσεις του πελάτη.



Εικόνα 7. Οι ίνες μπορούν να κινούνται ελεύθερα μέσα στο χαλαρό σωλήνα, ώστε να μη δημιουργούνται προβλήματα με τις αλλαγές θερμοκρασίας

2.1.2. Πεδία εφαρμογής ινών Loose tube buffer

Υπάρχουν αρκετά πεδία εφαρμογής για τις ίνες loose tube buffer. Έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς στα περισσότερα πεδία μετάδοσης δεδομένων. Η χρήση των παραπάνω ινών είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη σε δίκτυα μεγάλων αποστάσεων, όπου μέσα σε κάθε καλώδιο περιέχονται από 12 μέχρι 500 ίνες, αναλόγως την εφαρμογή. Όσον αφορά εσωτερικές εφαρμογές, τα καλώδια αυτά (περιέχουν λιγότερες ίνες), χρησιμοποιούνται σε δίκτυα κορμού μεταξύ υπολογιστών, σε PABX ή μεταξύ concentrators δικτύων.

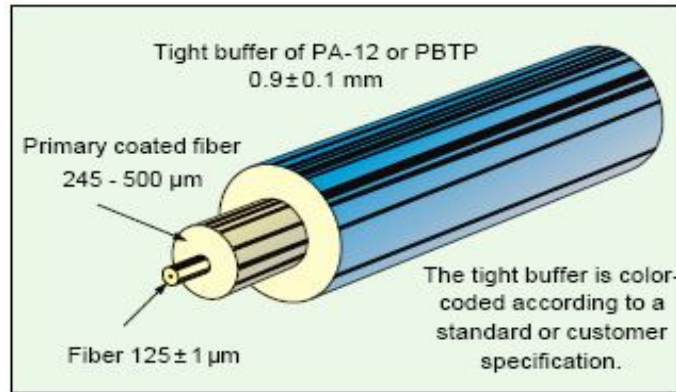
2.2. Ίνες tight buffer

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 ένα στρώμα PA-12 ή PBTP, μετατρέποντας τη διάμετρο της σε 0.8 – 1 mm. Κατά την παραπάνω διαδικασία η ίνα χρωματίζεται ώστε να αναγνωρίζεται εύκολα κατά την τοποθέτηση της.

2.2.1. Πεδία εφαρμογής ινών tight buffer

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 φθηνύνει).

Δίκτυα μεγάλων αποστάσεων στα οποία χρησιμοποιούνται καλώδια ινών loose tube buffer συνήθως τερματίζονται (για μήκος περίπου 1m) με καλώδια tight buffer (rig-tails). Η διαδικασία αυτή διευκολύνει αρκετά τη σύνδεση καλωδίων μεγάλου μήκους σε rack. Προφανώς η ίνα των καλωδίων τερματισμού πρέπει να είναι ίδιου τύπου με την ίνα των καλωδίων του δικτύου (μονότροπη/πολύτροπη).



Εικόνα 8. Ίνα tight buffer

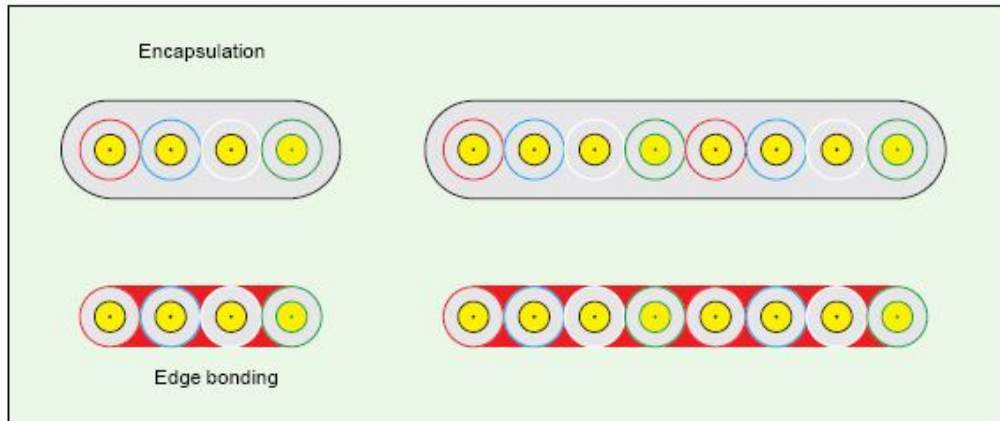
2.3. Τεχνική fibber ribbon (κορδέλα ινών)

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

2.3.1. Encapsulating και Edge bonding

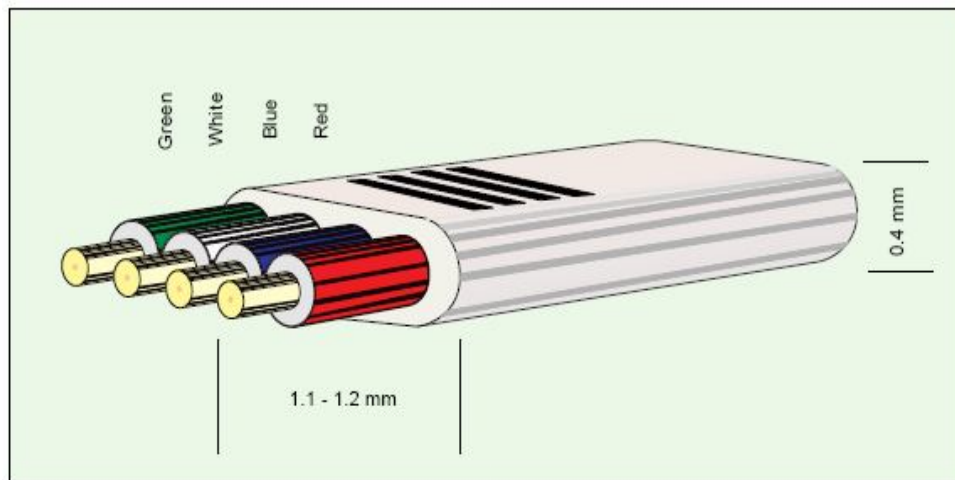
Η διαδικασία Encapsulating αποτελεί μια από τις τελευταίες εξελίξεις στον τομέα κατασκευής καλωδίων οπτικών ινών. Οι ίνες τοποθετούνται η μια δίπλα στην άλλη και στη συνέχεια επικαλύπτονται από ένα λεπτό στρώμα acrylate (2-16 ίνες). Το στρώμα αυτό παρέχει προστασία στις ίνες από τις διάφορες μηχανικές 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. Η παρακάτω εικόνα είναι άκρως κατατοπιστική.



Εικόνα 9. Οι δύο πιο διαδεδομένες διαδικασίες κατασκευής κορδελών ινών

2.3.2. Χρωματική κωδικοποίηση κορδέλας ινών

Η χρωματική κωδικοποίηση για τις κορδέλες ινών μπορεί να βασίζεται στο ήδη υπάρχον πρότυπο κωδικοποίησης για ίνες με πρωτεύον επίστρωμα ή στο νέο πρότυπο κατά το οποίο χρησιμοποιούνται τυπωμένες ευθείες πάνω στην κορδέλα. Μια τυπωμένη ευθεία σηματοδοτεί την κορδέλα No1, δύο ευθείες την κορδέλα No2 και ου το καθεξής. Περισσότερες πληροφορίες για την κωδικοποίηση κορδέλας ινών υπάρχουν στο τέλος της εργασίας, στο κεφάλαιο «πίνακες»



Εικόνα 10. Χρωματική κωδικοποίηση κορδέλας ινών κατασκευασμένη σύμφωνα με τη μέθοδο Encapsulation

2.3.3. Τερματισμός κορδέλας (Fusion splicing)

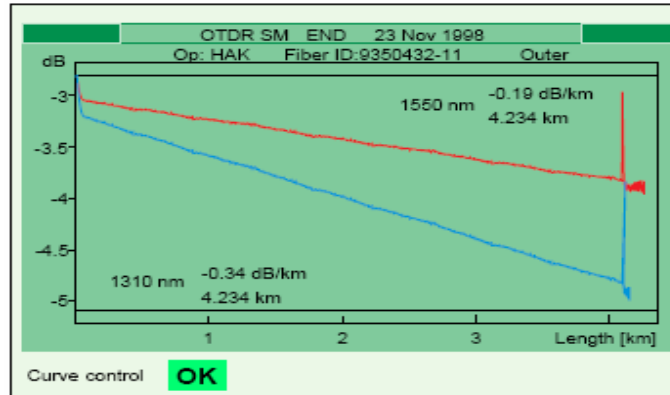
Το βασικό πλεονέκτημα της κορδέλας ινών είναι ότι η διαδικασία εγκατάστασης και τερματισμού είναι ευκολότερη και γρηγορότερη από εκείνη των συνηθισμένων καλωδίων ίνας. Βέβαια η κορδέλα ινών απαιτεί τη χρήση ακριβότερου και λίγο πιο περίπλοκου εξοπλισμού. Γενικά οι κορδέλες τερματίζονται με χρήση ειδικού εξοπλισμού όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα και στη συνέχεια μετρούνται οι απώλειες κολλήσεων και η εξασθένηση στα 1550 nm.



Εικόνα 11. Φωτογραφίες που έχουν ληφθεί πριν και μετά την κόλληση μιας κορδέλας 12 ινών. Στη δεύτερη φωτογραφία φαίνονται οι μετρήσεις των απωλειών κολλήσεων. Για την κόλληση χρησιμοποιήθηκε το Fusion splicer RSU12

2.3.4. Εξασθένηση

Η μέτρηση της εξασθένησης της κορδέλας πρέπει να αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της διαδικασίας παραγωγής της. Μελέτες έχουν δείξει ότι αν έχει ακολουθηθεί ποιοτική διαδικασία κατασκευής που περιλαμβάνει διάφορα τεστ, δεν είναι απαραίτητο να μετρηθούν ξανά οι παράμετροι μετάδοσης της κορδέλας. Είναι απαραίτητο λοιπόν κατά την παρασκευή της κορδέλας να μετρηθεί η εξασθένηση στα 1550 nm με OTDR.

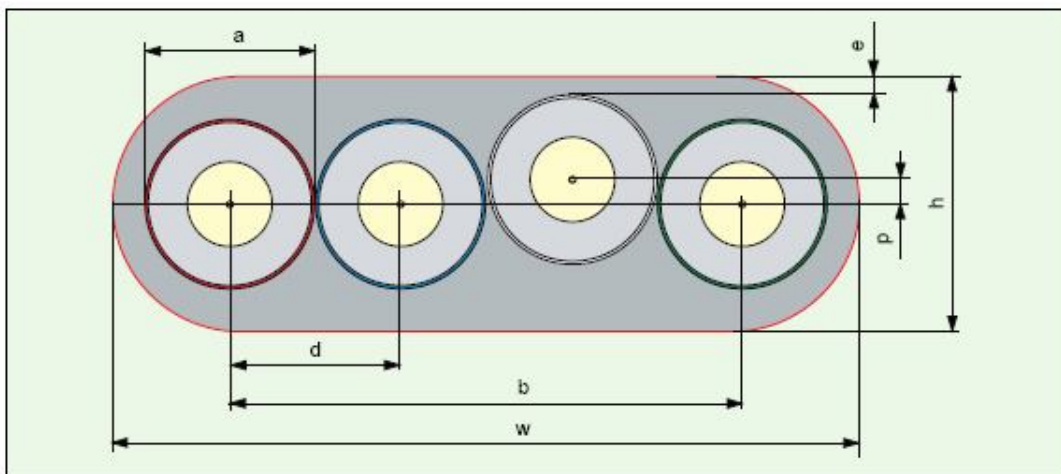


Εικόνα 12. Μέτρηση εξασθένησης κορδέλας με OTDR για μήκη κύματος 1310 και 1550 nm

2.3.5. Γεωμετρία κορδέλας

Οι γεωμετρικές παράμετροι μιας κορδέλας ινών μετρούνται αρκετές φορές κατά τη διαδικασία παραγωγής της. Οι διαστάσεις της κορδέλας δεν παίζουν σημαντικό ρόλο μόνο στην κόλλησή της, αποτελούν και μέθοδο επιβεβαίωσης της ποιότητας κατασκευής. Οι παρακάτω παράμετροι μετρούνται και αποτελούν μέρος του προτύπου που έχει δημιουργηθεί στη Σουηδία από το 1993.

- a = ίνα μαζί με στρώμα χρώματος
- b = απόσταση μεταξύ των πυρήνων των δυο ακριανών ινών
- d = απόσταση μεταξύ των πυρήνων δυο διαδοχικών ινών
- e = ελάχιστο πάχος acrylate γύρω από τις ίνες
- h = ύψος κορδέλας
- p = κάθετη απόσταση μεταξύ πυρήνων (χειρίστη περίπτωση)
- w = πλάτος κορδέλας



Εικόνα 13. Γεωμετρία μιας κορδέλας τεσσάρων ινών

Parameter	IEC	Swedish requirements
a [μm]	250 \pm 15	250 \pm 15
b [μm]	max 835	760 \pm 30
d [μm]	max 280	max 280
e [μm]	—	min 30
h [μm]	max 480	375 \pm 50
p [μm]	max 50	max 25
w [μm]	max 1 220	1 100 \pm 100

Πίνακας 3. Τυποποίηση γεωμετρικών παραμέτρων κορδέλας ινών

3. 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.

3.1. Μεταλλικός παράγοντας αντοχής

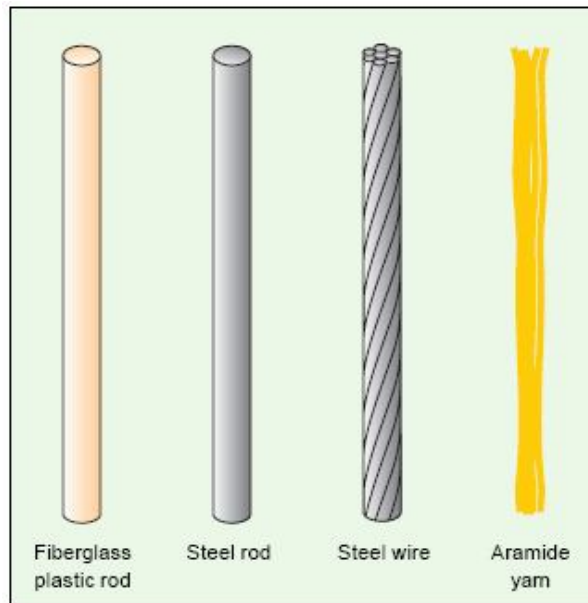
Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, ως πυρήνας του καλωδίου χρησιμοποιείται μια μεταλλική χορδή ή ένα μεταλλικό καλώδιο διαμέτρου 2 – 3.5 mm. Γύρω από αυτή τη χορδή (ή καλώδιο) τυλίγονται ελικοειδώς 4 μέχρι και 12 ίνες loose tube buffer ή tight buffer. Ο μεταλλικός παράγοντας αντοχής μπορεί και να επικολληθεί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

3.2. 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.

3.3. 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 μίας 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 extra 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.



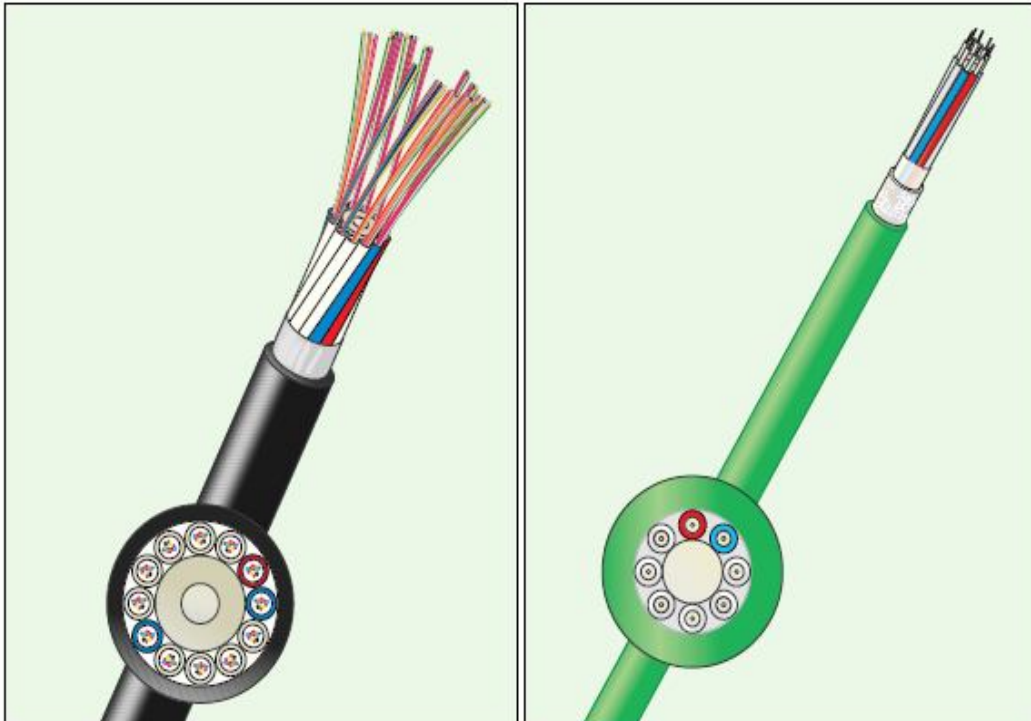
Εικόνα 14. Οι διάφοροι παράγοντες αντοχής που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας

4. Τέταρτη παράμετρος, ο πυρήνας του καλωδίου

4.1. 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.

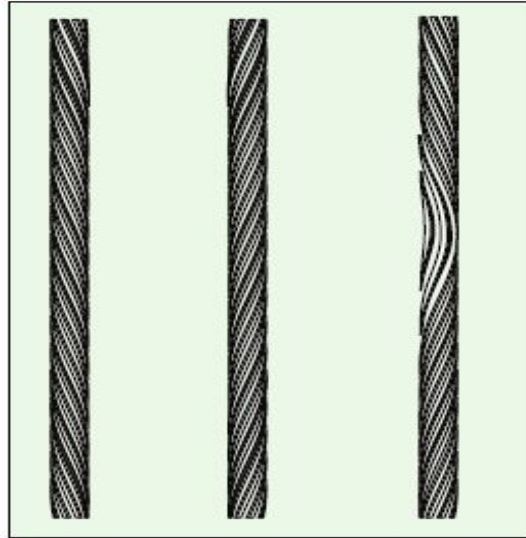


Εικόνα 15. Παρατηρούμε δύο οπτικά καλώδια ομόκεντρης κατασκευής. Το πρώτο αποτελείται από ίνες loose tube buffer τυλιγμένες γύρω από τον παράγοντα αντοχής (πυρήνα) , ενώ το δεύτερο από ίνες tight buffer. Το πρώτο καλώδιο ονομάζεται GRHLDV ενώ το δεύτερο GNHLBDUV

4.2. Καλώδιο με πυρήνα αυλακώσεων

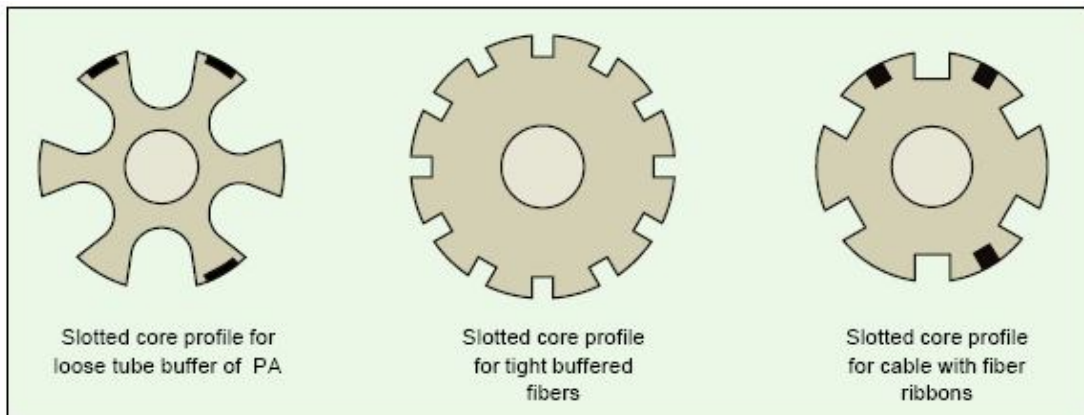
Για καλώδια που αναμένεται να εκτίθενται συνεχώς σε ακτινικές δυνάμεις, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εγκατάστασής τους και όχι μόνο, πρέπει να ληφθούν ειδικά μέτρα για την προστασία των ινών που περιέχουν. Γι' αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι πυρήνων καλωδίου. Οι περισσότεροι από αυτούς 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.



Εικόνα 16. Τρόποι τυλίγματος πυρήνα αυλακώσεων. Από αριστερά προς τα δεξιά : S, Z και SZ

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.



Εικόνα 17. Τρεις τύποι πυρήνων με αυλακώσεις

4.3. Διαδικασία κατασκευής

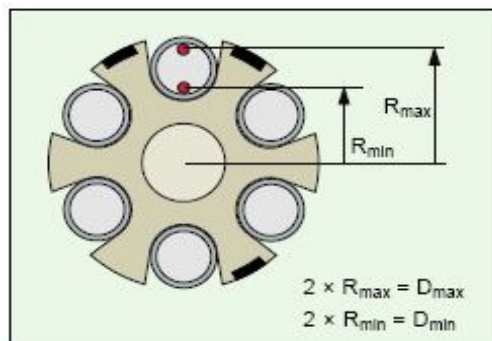
Το υλικό με τις αυλακώσεις τοποθετείται πάνω στον παράγοντα αντοχής για να ολοκληρωθεί η κατασκευή του πυρήνα του καλωδίου. Στις αυλακώσεις μπορούν να τοποθετηθούν ίνες tight buffer (συνήθως 1 μέχρι 4 σε κάθε αυλάκι). Καλώδια που περιέχουν ίνες τέτοιου τύπου χρησιμοποιούνται κυρίως σε indoor εφαρμογές. Για outdoor εφαρμογές, κάθε αυλάκι περιέχει ένα καλώδιο τύπου loose tube buffer με 2 ως 12 ίνες (με πρωτεύον επίστρωμα). Εκτός από τις ίνες το καλώδιο loose tube buffer περιέχει και thixotropic gel ως μονωτή υγρασίας. Καλώδια με κορδέλες ινών μπορεί να περιέχουν πάνω από 50 ίνες ανά αυλάκι. Το κενό ανάμεσα στο σωλήνα loose tube buffer και το εξωτερικό κάλυμμα του καλωδίου γεμίζεται με παχύρευστο μονωτικό υγρό για περεταίρω προστασία.

4.4. Διαστολή και συστολή καλωδίων

Εκτός από το έντονο λύγισμα οι ίνες πρέπει να προστατεύονται από τη διαστολή και συστολή που λαμβάνει χώρα κυρίως λόγω έντονων μεταβολών της θερμοκρασίας. Όπως αναφέραμε και πριν, οι ίνες τύπου loose tube buffer μπορούν να κινούνται ελεύθερα μέσα στα όρια του σωλήνα που περιέχονται. Κάτω από φυσιολογικές συνθήκες, χωρίς να ασκούνται εξωτερικές δυνάμεις, οι ίνες βρίσκονται στο κέντρο του σωλήνα και μπορούν να κινηθούν σε διάστημα που καθορίζεται από τις σταθερές R_{min} και R_{max} (φαίνονται στην παρακάτω εικόνα). Το διάστημα αυτό ονομάζεται παράθυρο διαστολής και συμβολίζεται με τον όρο ϵ_w . Το παράθυρο διαστολής για ένα καλώδιο τυλιγμένο με τη μέθοδο S μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο:

$$\epsilon_w = \pm 0.5 \left[\sqrt{\frac{S^2 + \pi^2 (D_{max})^2}{S^2 + \pi^2 (D_{min})^2}} - 1 \right]$$

Το (+) στον παραπάνω τύπο χρησιμοποιείται για τη διαστολή του καλωδίου, ενώ το (-) για τη συστολή.



Εικόνα 18. Η ίνα μπορεί να κινηθεί ελεύθερα μεταξύ R_{min} και R_{max}

Αριθμητικό παράδειγμα 1

Δίνονται οι παρακάτω παράμετροι για ένα συνηθισμένο καλώδιο με πυρήνα αυλακώσεων :

$$S = 135 \text{ mm}$$

$$D_{max} = 8.85 \text{ mm}$$

$$D_{min} = 7.15 \text{ mm}$$

Αν οι τιμές αυτές αντικατασταθούν στον παραπάνω τύπο, προκύπτει η μέγιστη επιτρεπόμενη διαστολή/συστολή του καλωδίου.

$$\varepsilon_w = \pm 0.5 \left[\sqrt{\frac{135^2 + \pi^2 (8.85)^2}{135^2 + \pi^2 (7.15)^2}} - 1 \right] \approx \pm 0.36\%$$

Το καλώδιο λοιπόν επιτρέπεται να μεγαλώσει ή να μικρύνει κατά 0.36%

4.5. Διαστολή και συστολή καλωδίων λόγω μεταβολών θερμοκρασίας

Ένα καλώδιο θα πρέπει να είναι ανθεκτικό σε μεγάλες μεταβολές θερμοκρασίας (συνήθως μεταξύ -40 μέχρι $+70^\circ \text{C}$). Πολύ χαμηλές θερμοκρασίες είναι ιδιαίτερα προβληματικές, αφού η θερμική συστολή του καλωδίου οφείλεται στο ότι το πλαστικό συστέλλεται πολύ περισσότερο από τη γυάλινη οπτική ίνα. Το γεγονός αυτό μπορεί να προκαλέσει μικρο-λυγίσματα, με αποτέλεσμα την αύξηση της εξασθένησης της ίνας. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τις σταθερές θερμικής διαστολής για τα πιο συνηθισμένα υλικά που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία οπτικών ινών.

Για να υπολογίσουμε τη μέγιστη συστολή/διαστολή ενός καλωδίου λόγω μεταβολής θερμοκρασίας χρειαζόμαστε τις εξής παραμέτρους : Cross section area A , Young's modulus E και σταθερά θερμικής διαστολής α , για όλα τα υλικά που χρησιμοποιούνται στο καλώδιο που μας ενδιαφέρει. Έχοντας όλες τις παραπάνω παραμέτρους υπολογίζουμε τη συνολική σταθερά θερμικής διαστολής του καλωδίου α_c ως εξής :

$$\alpha_c = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot E_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n E_i \cdot A_i}$$

Τα υλικά του καλωδίου που μας ενδιαφέρουν είναι ο παράγοντας αντοχής, το υλικό που αποτελεί τον πυρήνα αυλακώσεων, η τελική θήκη του καλωδίου και κάθε υλικό που χρησιμοποιείται ως ενίσχυση. Η διαστολή/συστολή του καλωδίου υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο :

$$\varepsilon_T = \Delta T \cdot \alpha_c$$

Material	Young's modulus [N/mm ²]	Density [g/cm ³]	Thermal expansion coefficient [1/K]
Glass, optical fiber	72 500	2,20	5.5×10^{-7}
PBTf	1 600	1,3	1.5×10^{-4}
Polyamide, PA	1 700	1,06	7.8×10^{-5}
Aramide yarn	100 000	1,45	-2×10^{-6}
Glassfiber reinforced plastic (FRP)	5 - 6 000	2,1	6.6×10^{-6}
Spring steel	200 000	7,8	1.3×10^{-5}
LDPE	200 - 300	0,92	$1 - 2.5 \times 10^{-4}$
MDPE	400 - 700	0,93	$1 - 2.5 \times 10^{-4}$
HDPE	1 000	0,95	$1 - 2.5 \times 10^{-4}$
PVC, soft	60	1,3	1.5×10^{-4}

Πίνακας 4. Young's modulus, πυκνότητα και σταθερά θερμικής διαστολής για τα πιο συνηθισμένα υλικά που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία οπτικών ινών

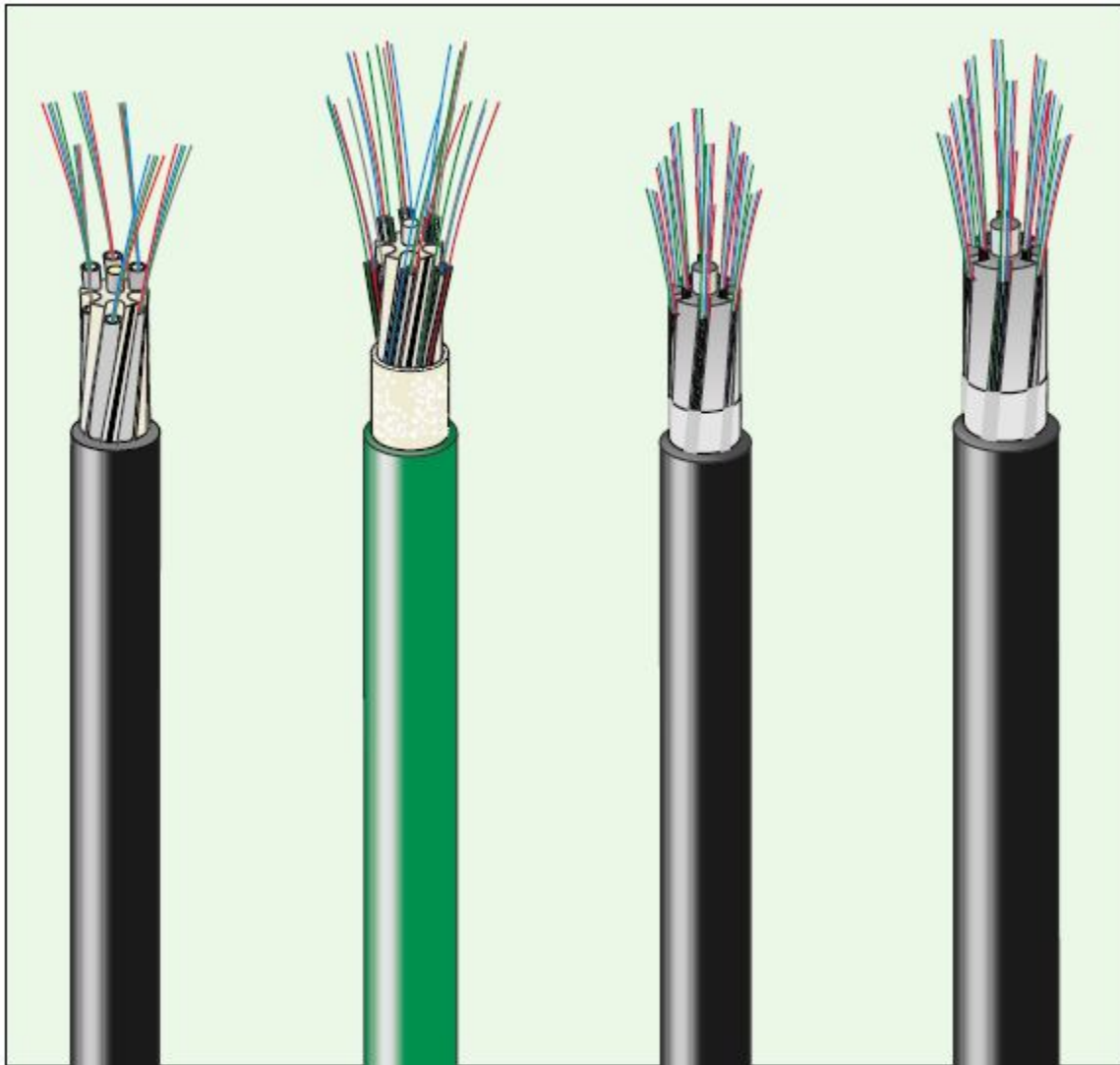
Αριθμητικό παράδειγμα 2

Για ένα συνηθισμένο καλώδιο με πυρήνα αυλακώσεων, με τις διαστάσεις του προηγούμενου παραδείγματος, δίνονται οι παρακάτω παράμετροι:

Polyethylene (PE) approx.	78 mm ²	E = 2.04 GPa	$\alpha = 126 \times 10^{-6}$
Polyamide (PA) approx.	22.6 mm ²	E = 2.43 GPa	$\alpha = 74 \times 10^{-6}$
FRP-rod Ø 4mm approx.	12.6 mm ²	E = 52.4 GPa	$\alpha = 6.6 \times 10^{-6}$

Αν αυτές οι παράμετροι αντικατασταθούν στους προηγούμενους τύπους προκύπτει η ολική σταθερά θερμικής διαστολής 3.26×10^{-6} και η μέγιστη διαστολή/συστολή του καλωδίου για μεταβολή θερμοκρασίας $\pm 65^\circ \text{C}$, $\pm 65 \times 3.25 \times 10^{-5} = \pm 0.21\%$.

Παρατηρούμε ότι η μέγιστη θερμική συστολή/διαστολή για μεταβολή $\pm 65^\circ \text{C}$ είναι μικρότερη από τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή που υπολογίσαμε στο προηγούμενο αριθμητικό παράδειγμα. Έτσι για τη συγκεκριμένη ίνα μπορούμε να πούμε ότι περνάει το τεστ ανθεκτικότητας για τη μεταβολή θερμοκρασίας που μελετάμε.

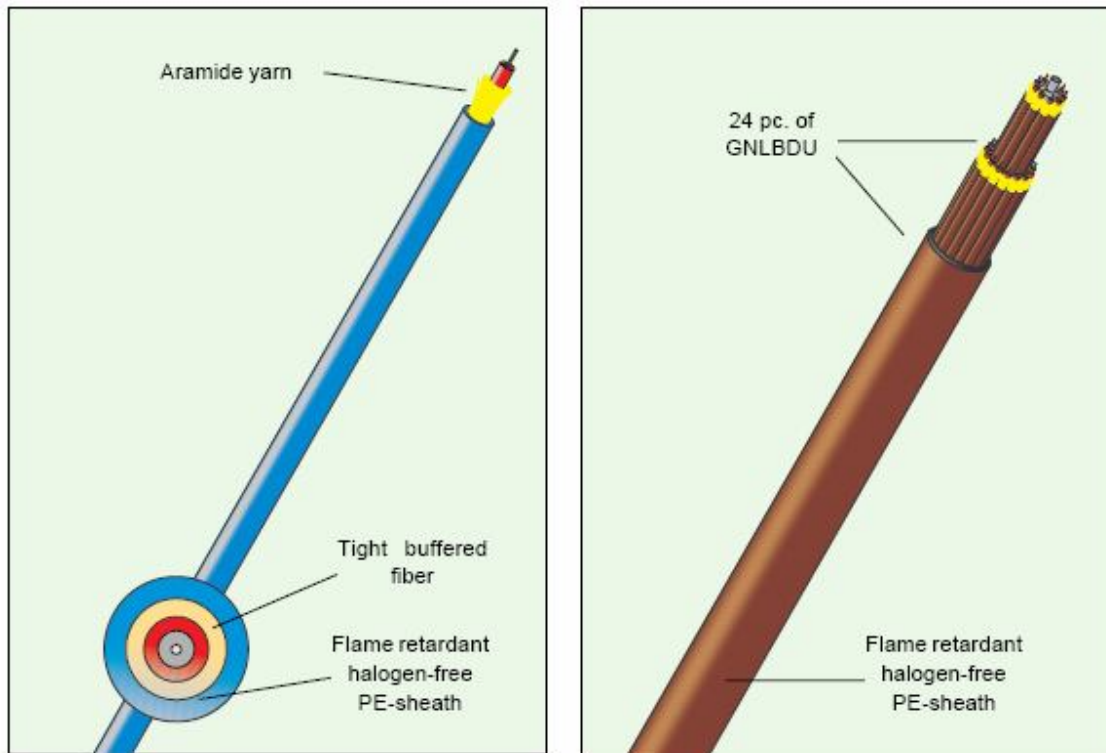


Εικόνα 19. Τέσσερα παραδείγματα ινών με πυρήνα αυλακώσεων. Από αριστερά προς τα δεξιά : GRSLDV outdoor καλώδιο με loose tube buffer, GNSLBDV indoor/outdoor καλώδιο με tight buffer ίνες, GASLDV outdoor καλώδιο με κορδέλα τεσσάρων ινών, GASLDV outdoor καλώδιο με κορδέλα οκτώ ινών

4.6. 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.



Εικόνα 20. (Πρώτο καλώδιο) Εδώ παρουσιάζεται το πιο απλό οπτικό καλώδιο το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συνδέσεις καλωδίων και για εσωτερικά δίκτυα μεταφοράς δεδομένων (GNLBDU), (Δεύτερο καλώδιο) Το καλώδιο αυτό αποτελείται από αρκετά υποκαλώδια και ένα extra κάλυμμα, με αποτέλεσμα να έχουμε ένα πακέτο με 24 GNLBD και διάμετρο μόνο 15 mm (GNHLLBDU)

5.Πέμπτη παράμετρος, προστασία από νερό και υγρασία

Πολλά καλώδια τοποθετούνται σε περιβάλλον που ενδέχεται να καταστρέψει την εξωτερική τους θήκη. Τα outdoor 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.

5.1. Υλικό γέμισης 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.

5.2. 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).

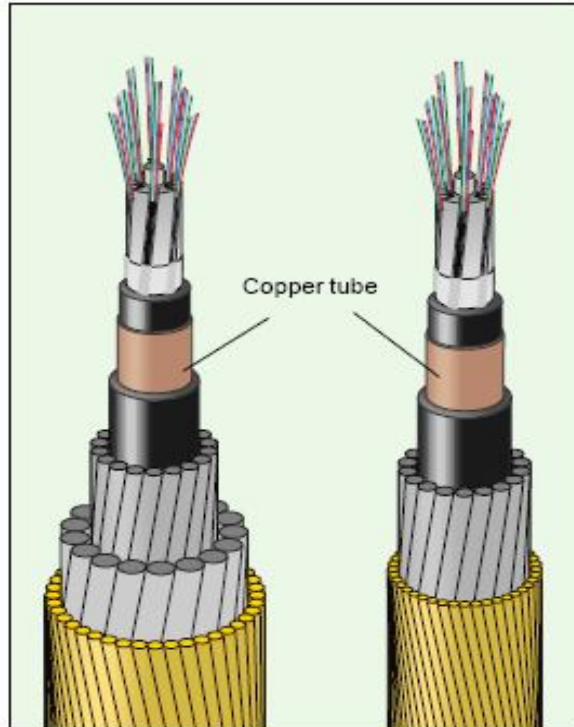
5.3. Μεταλλικό κάλυμμα (φύλλο αλουμινίου)

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.

5.4. 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.



Εικόνα 21. Καλώδια που χρησιμοποιούνται σε υποβρύχιες τοποθετήσεις. Παρατηρούμε το σωλήνα χαλκού και τα διάφορα στρώματα μεταλλικών νημάτων που χρησιμοποιούνται σαν μονωτές, όπως και το τελικό αντισκωρικό κάλυμμα

6. Έκτη παράμετρος, τελικό κάλυμμα (θήκη καλωδίου)

6.1. 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.

6.2. Polyethylene (PE)

Θερμικές ιδιότητες

Λόγω των θερμικών ιδιοτήτων του συγκεκριμένου υλικού, η υψηλότερη συνιστόμενη 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 (παρακάτω παράγραφος).

6.3. 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.

6.4. 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 $-10^{\circ}C$. Γενικά καλώδια που περιέχουν PVC χρησιμοποιούνται σε θερμοκρασίες μέχρι $70^{\circ}C$.

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 χρησιμοποιούνται 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.

6.5. Polyamide (PA, Nylon)

Το polyamide χρησιμοποιείται κυρίως σαν προστατευτικό κάλυμμα πάνω από PE και PVC καλώδια 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 Mpa 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.

6.6. 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 225° 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. 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.

6.8. 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.

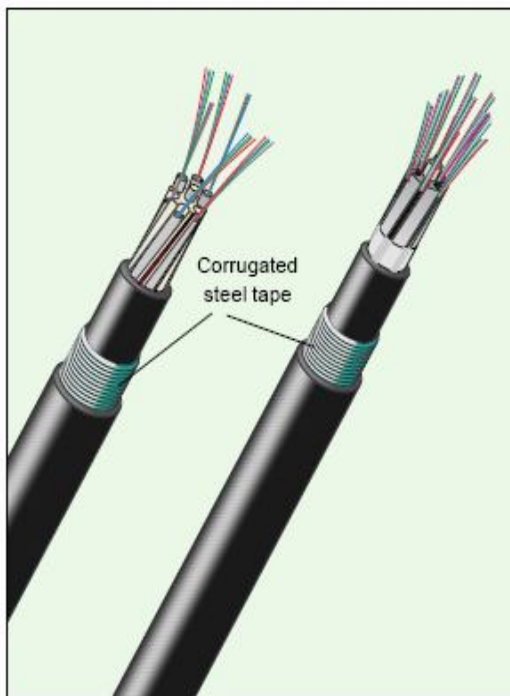
7. Έβδομη παράμετρος, ενίσχυση

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

7.1. 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.



Εικόνα 22. Οπτικά καλώδια με ενίσχυση μεταλλικής ταινίας αυλακώσεων για τοποθέτηση σε υπόγειους αγωγούς. Τα καλώδια που παρουσιάζονται έχουν κωδικές ονομασίες GRSLWLV και GASLWLV

7.2. 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.



Εικόνα 23. Οπτικό καλώδιο με ενίσχυση μεταλλικού νήματος που χρησιμοποιείται σε υπόγειες εγκαταστάσεις (GRSLTLV)

7.3. 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).

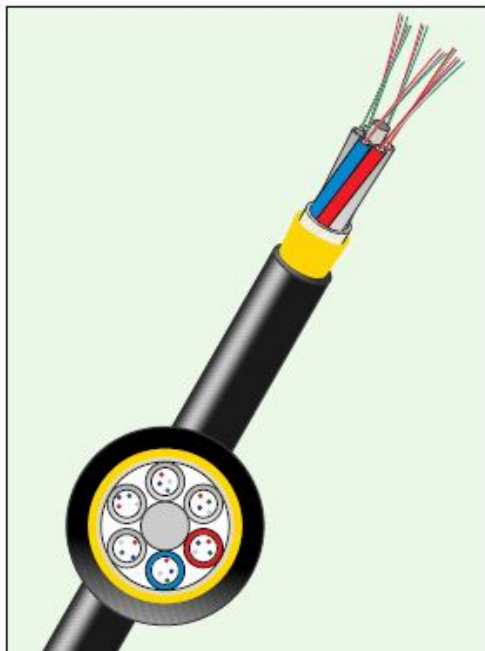
Η ταινία αποτελείται από polyester μέσα στο οποίο υπάρχουν μικροσκοπικές φυσαλίδες που περιέχουν isobutene. Για θερμοκρασίες μεταξύ των 90 και 120° C οι φυσαλίδες διαστέλλονται καθώς διαστέλλεται το αέριο που περιέχουν. Η HET μπορεί να διαστέλλεται 300 με 400%. Καλώδια τέτοιου τύπου χρησιμοποιούνται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



Εικόνα 24. Οπτικό καλώδιο με θερμο-διαστελλόμενη ταινία. Το καλώδιο που εικονίζεται περιέχει 192 οπτικές ίνες και έχει κωδική ονομασία GASLLDV

7.4. 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.



Εικόνα 25. Οπτικό καλώδιο με ενίσχυση νημάτων aramide. Το καλώδιο που εικονίζεται χρησιμοποιείται σε εναέριες εγκαταστάσεις και φέρει κωδική ονομασία GRLSDV

7.5. Διαστελλόμενο εξωτερικό σκέλος

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

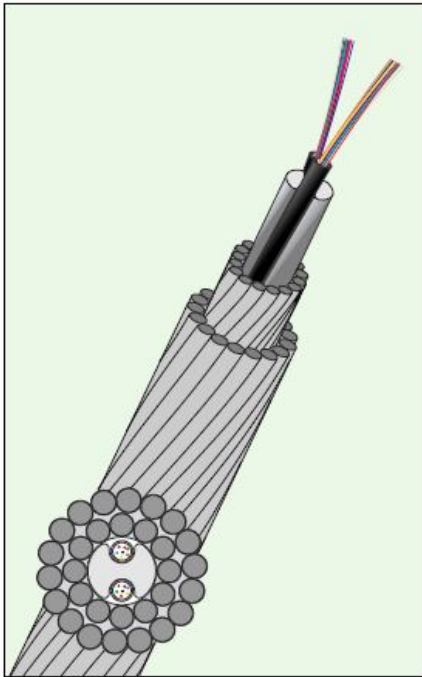


Εικόνα 26. Οπτικό καλώδιο με ενίσχυση διαστελλόμενου εξωτερικού σκέλους. Η κωδική ονομασία του είναι GASLCV

7.6. 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.

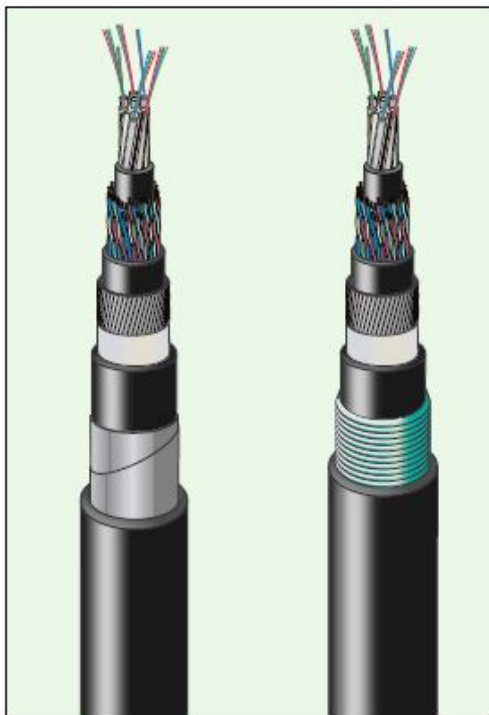
Ο κεντρικός πυρήνας κατασκευάζεται από αλουμίνιο, γύρω από το οποίο τυλίγονται ελικοειδώς σωλήνες που περιέχουν μέχρι και 12 ίνες. Γύρω από τον πυρήνα τοποθετούνται νήματα αλουμινίου, ώστε να παρέχεται αυξημένη αντοχή σε εξωτερικές δυνάμεις και μεγάλη αγωγιμότητα.



Εικόνα 27. Οπτικό καλώδιο γείωσης που αναμένεται να αντικαταστήσει τα συνηθισμένα καλώδια γείωσης

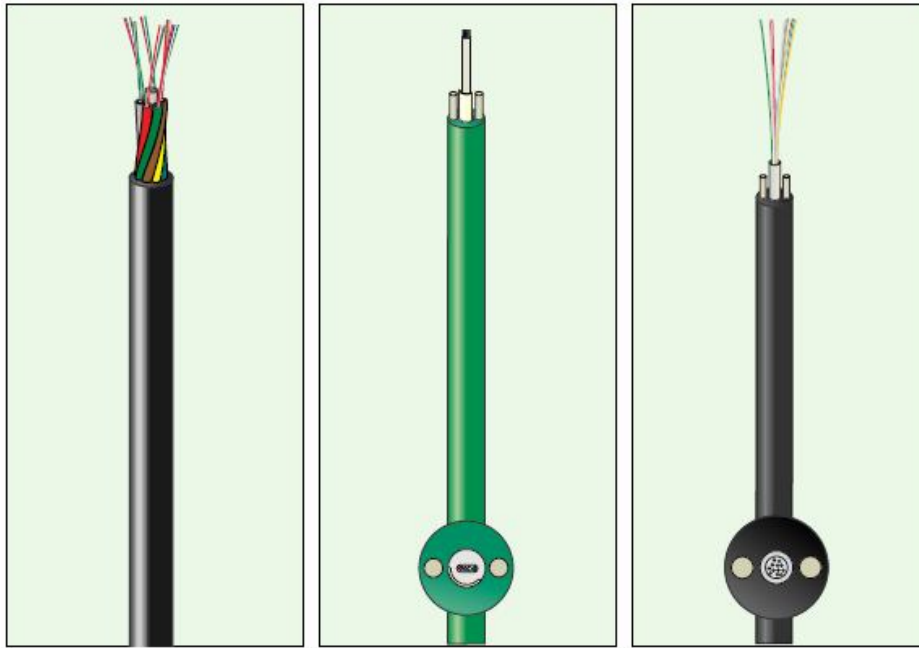
8. Υβριδικά καλώδια

Πολλές εγκαταστάσεις απαιτούν το συνδυασμό οπτικών καλωδίων και συνηθισμένων χάλκινων καλωδίων. Τα χάλκινα καλώδια υποστηρίζουν τηλεφωνικά συστήματα χαμηλών συχνοτήτων, ενώ οι οπτικές ίνες συστήματα μετάδοσης υψηλής ποιότητας. Τα υβριδικά καλώδια χρησιμοποιούνται κυρίως σε εγκαταστάσεις σιδηροδρόμων για επικοινωνία μεταξύ μεγάλων σταθμών. Τα καλώδια αυτά ενισχύονται με μεταλλικά νήματα ή μεταλλικές ταινίες.

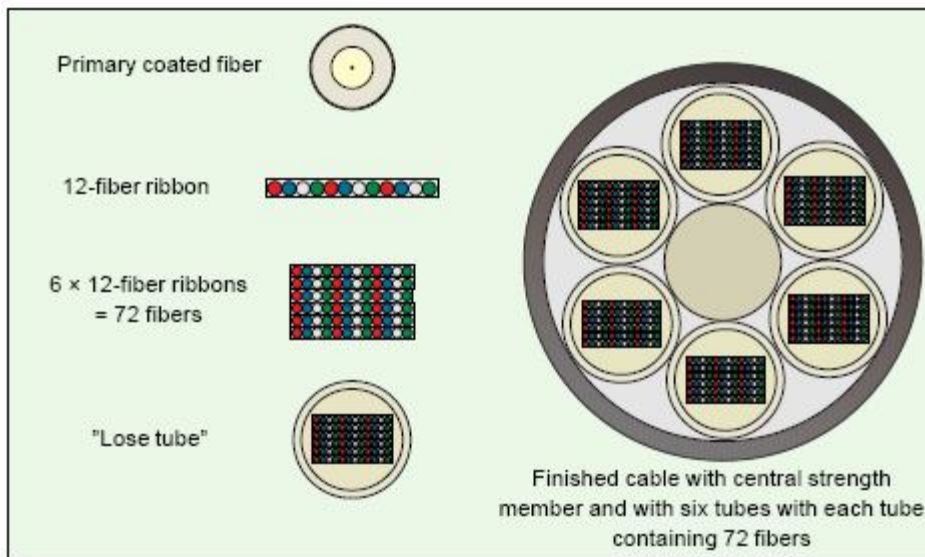


Εικόνα 28. Δυο παραδείγματα υβριδικών καλωδίων που χρησιμοποιούνται σε σιδηροδρομικές εγκαταστάσεις

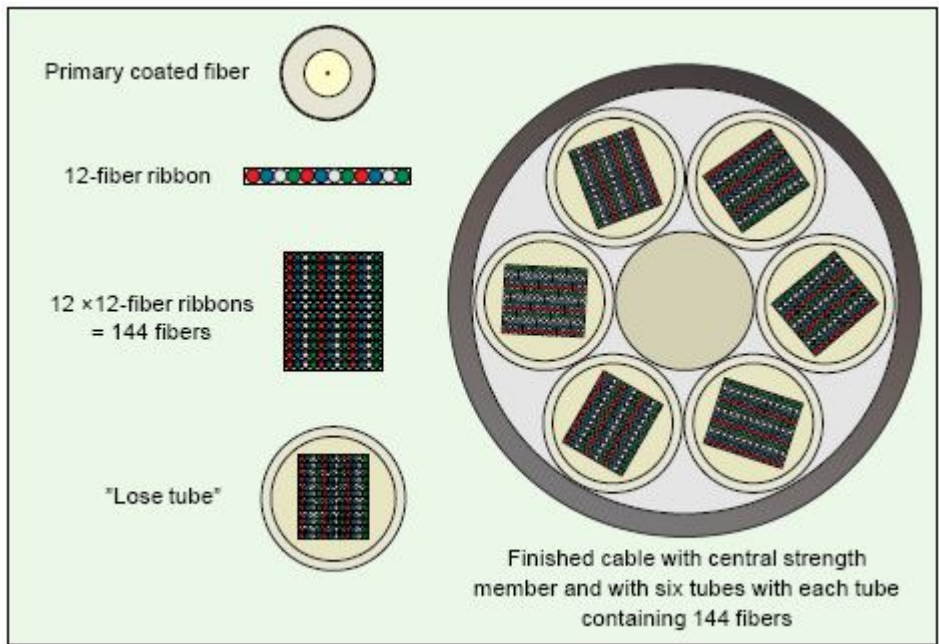
9. Παρουσίαση νέων τύπων οπτικών καλωδίων



Εικόνα 29. Νέοι τύποι καλωδίων τόσο για indoor όσο και για outdoor εφαρμογές



Εικόνα 30. Οπτικό καλώδιο με κορδέλες ινών. Περιέχει 432 ίνες



Εικόνα 31. Οπτικό καλώδιο με κορδέλες ινών. Περιέχει 864 ίνες

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

LASERS ΚΑΙ LED's ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό , θα εξετάσουμε τις πηγές οπτικής εκπομπής που χρησιμοποιούνται σε οπτικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα . Εισαγωγικά , δίνεται μία γενική παρουσίαση των δίοδων laser. Παραθέτονται επίσης ημιαγώγιμα υλικά και η λειτουργία τους . Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού περιγράφεται η ποικιλία των οπτοηλεκτρικών εξαρτημάτων (OE components) που χρησιμοποιούνται σαν πηγές φωτός σε πληροφοριακά συστήματα οπτικών ινών .

Η φωτεινή πηγή θεωρείται συχνά ως το « ενεργό στοιχείο » σε ένα οπτικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα . Η βασική του λειτουργία είναι η μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας (ρεύματος) σε «οπτική» ενέργεια (φως) με τρόπο που το φως θα μπορέσει να εισαχθεί αποτελεσματικά σε μια οπτική ίνα για την μετάδοση πληροφοριών (σε μικρές ή μεγάλες αποστάσεις). Υπάρχουν 3 τύποι φωτεινών πηγών :

- Ευρείας εκπομπής με συνεχές φάσμα (λαμπτήρες)
- Μονοχρωματικές , μη συμφασικές → δίοδοι εκπομπής φωτός (LED)
- Μονοχρωματικές , συμφασικές → δίοδοι laser (LD)



Εικόνα 1. Σύγχρονο laser He-Ne κατασκευασμένο από την Melles Griot

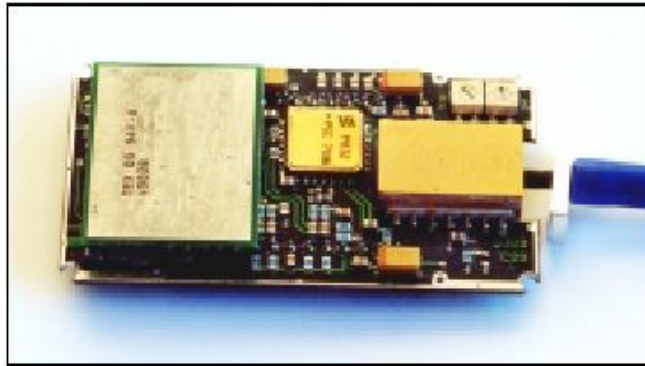
Στις αρχές της χρήσης των οπτικών ινών (1965 – 1970) χρησιμοποιήθηκαν στενής ζώνης, συμφασικές πηγές φωτός. Η κύρια πηγή φωτός ήταν ένα laser αερίου Helium – Neon (He – Ne) με υψηλή ισχύ εξόδου ώστε να αντισταθμιστεί η μεγάλη απόσβεση που παρουσίαζαν οι πρώτες οπτικές ίνες. Σήμερα, με την ελαχιστοποίηση της απόσβεσης στις οπτικές ίνες και την εξέλιξη στον τομέα των

ημιαγωγικών υλικών (γεγονός που μας προσφέρει εναλλακτικές πηγές φωτός όπως LD και LED), τα lasers αερίου έχουν αντικατασταθεί εντελώς .

Οι απαιτήσεις για πηγές φωτός στις οπτικές επικοινωνίες καλύπτονται πλήρως από τις διόδους laser και τα LEDs . Οι απαιτήσεις αυτές είναι :

- Το μέγεθος και ο φυσικός σχεδιασμός των διόδων πρέπει να είναι κατάλληλα για τη μετάδοση φωτός σε μια οπτική ίνα και το φως πρέπει, όσο είναι δυνατόν , να είναι ισχυρά κατευθυντικό
- Το οπτικό σήμα πρέπει να είναι ακριβές αντίγραφο του ηλεκτρικού σήματος για να ελαχιστοποιούνται ο θόρυβος και οι λοιπές παραμορφώσεις
- Το εκπεμπόμενο φως πρέπει να έχει μήκος κύματος που ανταποκρίνεται στα επίπεδα ελάχιστης απόσβεσης και διασποράς της ίνας . Ακόμη, το μήκος κύματος του φωτός πρέπει να ταιριάζει και με τη μέγιστη ευαισθησία του δέκτη
- Οι διόδοι πρέπει να επιτρέπουν μονή διαμόρφωση σε μια ευρεία ζώνη εκπομπής η οποία εκτείνεται από τις συχνότητες ομιλίας (μερικά Hz) έως δεκάδες GHz
- Οι διόδοι πρέπει να μεταφέρουν το κυρίως μέρος της εκπεμπόμενης ισχύος στην ίνα ώστε – ανεξάρτητα από τις απώλειες στην ίνα , τους κόνεκτορες , τις κολλήσεις κ.λπ. - να απομένει επαρκής ισχύς να «αντιληφθεί» ο δέκτης στο άλλο άκρο του συστήματος
- Οι διόδοι πρέπει να έχουν πολύ στενό φασματικό εύρος ώστε να ελαχιστοποιείται η διασπορά στις ίνες
- Οι διόδοι επιβάλλεται να έχουν σταθερή οπτική ισχύ εξόδου ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος
- Οι διόδοι πρέπει να είναι σχετικά φτηνές για να μπορούν να ανταγωνιστούν την υπάρχουσα τεχνολογία μετάδοσης
- Οι διόδοι πρέπει να παρουσιάζουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Να διευκρινιστεί εδώ, ότι ως διάρκεια ζωής εννοούμε συνήθως την διάρκεια λειτουργίας της πηγής μέσα στα απαιτούμενα όρια λειτουργίας
- Οι πηγές αυτές για λόγους σωστής λειτουργίας πρέπει να παρουσιάζουν μικρό χρονικό jitter. Δηλαδή οι παραγόμενοι παλμοί στην ακολουθία εξόδου να έχουν όσο το δυνατόν ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. Αν έχουμε σχετικά μεγάλο jitter στην πηγή μετά από την διάδοση στην οπτική ίνα και τα φαινόμενα διασποράς, είναι πολύ πιθανό να εμφανιστεί διασυμβολική παρεμβολή (μερική επικάλυψη των παλμών και απώλεια του σήματος πληροφορίας)
- Οι πηγές δεν πρέπει να παρουσιάζουν διαμόρφωση πλάτους στους παραγόμενους παλμούς. Δηλαδή οι παλμοί στην έξοδο πρέπει να έχουν ίδιο πλάτος και κατά συνέπεια ίδια ισχύ
- Αναγκαίο χαρακτηριστικό των πηγών φωτός στα οπτικά συστήματα είναι και η δυνατότητα οδήγησης των διατάξεων αυτών από ηλεκτρονικά συστήματα.

Τα πρώτα οπτικά συστήματα περιελάμβαναν πηγές φωτός σε μήκη κύματος περίπου στα 850 nm, επειδή οι συνδυασμοί των υλικών στις πρώτες διόδους laser ήταν τέτοιοι που εξέπεμπαν φως σε αυτό το μήκος κύματος . Η οπτική ίνα ήταν πολύτροπη, τύπου step index και η απόσταση εκπομπής ήταν σχετικά μικρή . Στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα χρησιμοποιούνται lasers που εκπέμπουν σε μήκη κύματος 1300 – 1550 nm και μονότροπες οπτικές ίνες τύπου step index (βηματικού δείκτη διάθλασης) . Με τη βοήθεια ειδικών τύπων οπτικών ινών και power boosters με ίνες ερβίου , η απόσταση μετάδοσης μπορεί να είναι πολύ μεγάλη ανάμεσα σε οπτικούς ενισχυτές (σήμερα φτάνει τα 300 km σε συγκεκριμένα bit rates) .



Εικόνα 2. STM-1 module με laser chip για 155 Mbit/s bit rate

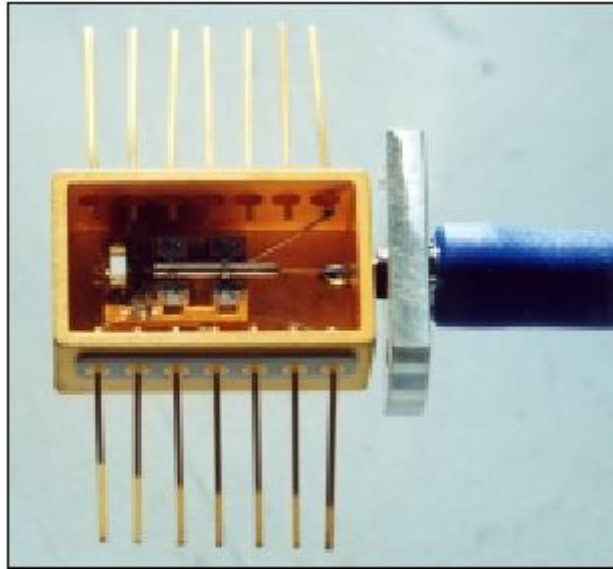
1. Δίοδοι LASER

Η πρώτη δίοδος laser βασισμένη στην τεχνολογία των ημιαγωγών παρουσιάστηκε το 1962 , όμως στη δεκαετία του 80' ο τύπος αυτός laser χρησιμοποιήθηκε μαζικά. Η αλματώδης εξέλιξη στην τεχνολογία laser στηρίχθηκε σε 2 βασικά στοιχεία : τη διαθεσιμότητα σε νέα τεχνολογία ώστε να παράγονται καλύτερα , μικρότερα και φτηνότερα ημιαγωγικά lasers και τον μεγάλο αριθμό των τομέων εφαρμογής τους τα τελευταία χρόνια .

Οι εξελίξεις στην τεχνολογία των ημιαγωγών ήταν δραματική και κατέληξε στη δημιουργία μικρότερων αλλά πιο περίπλοκων εξαρτημάτων με εμφανώς βελτιωμένη αξιοπιστία και αυξημένη διάρκεια ζωής . Έχει καταστεί δυνατή η ανάπτυξη διόδων laser για μεγαλύτερα ή μικρότερα μήκη κύματος, μεγαλύτερη ισχύ εξόδου, καλύτερα ελεγχόμενη φωτεινή εκπομπή και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Παράλληλα με αυτή την εξέλιξη, υπήρξε δραματική αύξηση στις περιοχές εφαρμογής των διόδων laser. Οι τηλεπικοινωνίες και οι συσκευές οπτικής αποθήκευσης και αναπαραγωγής (CD players) είναι πιθανώς οι γνωστότερες περιοχές εφαρμογής των διόδων laser στις οποίες έχουμε ωφεληθεί σημαντικά .

Οι δίοδοι laser έχουν πολλά πλεονεκτήματα συγκρινόμενες με τα άλλα ημιαγωγικά υλικά. Είναι μικρές , αποτελεσματικές , φθηνές και ενδείκνυνται για μαζική παραγωγή. Εξαιρώντας μερικά χαρακτηριστικά υπερέχουν σαφώς έναντι των «προκατόχων τους» (λαμπτήρες , ρελέ). Τα μικρότερα, fully mounted lasers με φωτοδίοδο, ψήκτρα και πλαίσιο προστασίας ακτινοβολίας καταλαμβάνουν χώρο 50mm³ . Ανεξάρτητα από τη μικροσκοπική δομή τους παρέχουν συνεχή

ισχύ εξόδου 100mW. Η αποτελεσματικότητα των lasers ημιαγωγού φτάνει το 20% σε σύγκριση με τα lasers αερίου τύπου He-Ne , τα οποία έχουν απόδοση όχι περισσότερο από 2%. Επάνω από το όριο εκπομπής φωτός, σχεδόν το 80% της ισχύος εισόδου μετατρέπεται σε φως .



Εικόνα 3. Εσωτερική άποψη σύγχρονου ημιαγωγικού laser για χρήση σε τυπωμένα κυκλώματα

Τα ημιαγωγικά εξαρτήματα μπορούν να ανταποκριθούν πολύ γρήγορα σε ραγδαίες αλλαγές του ρεύματος οδήγησης . Η ακτίνα του laser μπορεί λοιπόν να διαμορφωθεί με τη χρήση πολύ υψηλών συχνοτήτων . Αυτό δεν είναι δυνατό με τα lasers αερίου χωρίς τη χρήση ολοκληρωμένου , περιφερειακού εξοπλισμού .

Οι δίοδοι laser έχουν πολλές ομοιότητες με τα LED's με τον ίδιο τρόπο που υπάρχουν πολλές ομοιότητες ανάμεσα στα lasers αερίου και τους λαμπτήρες . Και οι LD και τα LED's κατασκευάζονται από άτομα των ομάδων 13-15 του περιοδικού πίνακα (γάλλιο , αρσενικό , φωσφορούχο ίνδιο , αρσενιούχο ίνδιο κ.ά.) . Τα πιο σημαντικά στοιχεία είναι το αρσενιούχο γάλλιο και τα παράγωγά του , τα οποία εκπέμπουν φως στα μήκη κύματος 660-900 nm , και το φωσφορούχο ίνδιο και τα παράγωγά του που εκπέμπουν φως σε μήκη κύματος 1300 – 1550 nm. Η τελευταία περιοχή μηκών κύματος είναι και η ιδανική για lasers που χρησιμοποιούνται στις οπτικές τηλεπικοινωνίες . Το ορατό φως κυμαίνεται ανάμεσα σε 390-760 nm .

1.1. Λειτουργία LASER

Σε κάθε υλικό, τα ηλεκτρόνια μπορούν να αναγκαστούν να κινηθούν από μια χαμηλότερη σε μια υψηλότερη ενεργειακή στάθμη του ατόμου. Για τη διέγερση του ατόμου μπορεί να μεταφερθεί ενέργεια σε μορφή ακτινοβολίας, θερμότητας ή ηλεκτρικού πεδίου. Το λεγόμενο *pumping* (άντληση) μέσω ηλεκτρικών πεδίων

είναι η τεχνική που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον στις εφαρμογές οπτικών ινών .

Η λειτουργία του laser βασίζεται στην επίτευξη ενός περιβάλλοντος που καθιστά την εξαναγκασμένη εκπομπή δυνατή . Με τον όρο εξαναγκασμένη εκπομπή εννοούμε ότι ένα πεδίο οπτικής ακτινοβολίας «συνεργάζεται» με ένα ενισχυτικό μέσο έτσι ώστε επιπρόσθετη ακτινοβολία της ίδιας συχνότητας να παρουσιάζεται στο υπάρχον πεδίο. Η ενέργεια πρέπει να προστεθεί με κάποιο τρόπο. Για να έχουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα, η ενέργεια πρέπει να περιορίζεται στα όρια του οπτικού πεδίου . Με άλλα λόγια χρειαζόμαστε :

- Κατάλληλο υλικό
- Έναν μηχανισμό άντλησης
- Περιορισμό της ενέργειας άντλησης
- Περιορισμό της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας

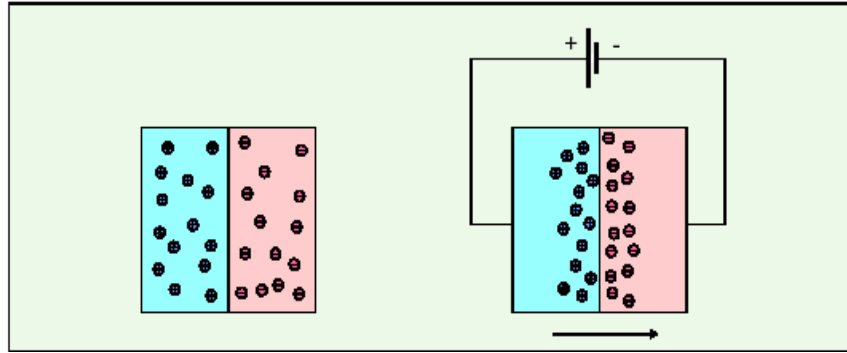
Κάτω από αυτές τις συνθήκες μπορούμε να επιτύχουμε ενίσχυση του οπτικού πεδίου που θα είναι μεγαλύτερη από τις αναπόφευκτες απώλειες που παρουσιάζονται. Κατασκευάσαμε δηλαδή ένα LASER (light amplification through stimulated emission of radiation) . Ο ηλεκτρικός και ο οπτικός περιορισμός επιτυγχάνονται με τη χρήση διάφορων συνδυασμών ημιαγωγικών υλικών και με την κοπή του κρυστάλλου ώστε να διατηρείται η απαραίτητη κοίλη μορφή του .

1.2. Σχεδιασμός διόδου LASER

Επαφή p-n

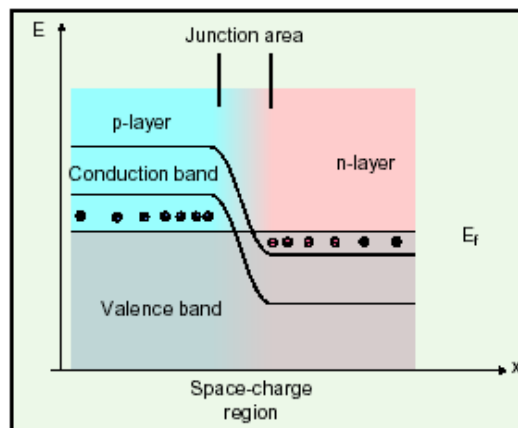
Από τη στιγμή που το ποσό της αυθόρμητης και της εξαναγκασμένης ακτινοβολίας εξαρτάται από τον αριθμό των διαθέσιμων ηλεκτρονίων και οπών σε κάθε ενεργειακή στάθμη , πρέπει να εισάγουμε κάποιο μέσο που να επηρεάζει τους πληθυσμούς αυτούς . Στη θερμική ισορροπία , υπάρχουν περισσότερα ηλεκτρόνια στις χαμηλότερες παρά στις υψηλότερες ενεργειακές στάθμες . Στην περίπτωση αυτή , ένα εισερχόμενο φωτόνιο είναι πολύ πιθανό να απορροφηθεί. Η δημιουργία περισσότερων διεγερμένων ζευγών ηλεκτρονίων/οπών σε σχέση με τον αριθμό των ηλεκτρονίων που μπορούν ακόμη να διεγερθούν, χρειάζεται μια διαδικασία που ονομάζεται αναστροφή πληθυσμών , η οποία μπορεί να επιτευχθεί με τον « εμβολιασμό » μιας ακτίνας ηλεκτρονίων ή με οπτική διέγερση .

Ένα από τα κυριότερα πλεονεκτήματα των ημιαγωγών είναι η δυνατότητα που έχουμε να προκαλέσουμε τη δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων-οπών με την εισαγωγή φορέων μειονότητας σε μια επαφή p-n . Αυτή είναι μια πολύ απλή και αποτελεσματική μέθοδος διέγερσης .



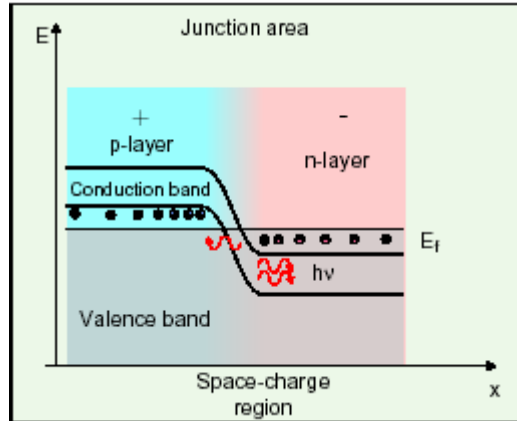
Εικόνα 4. Στην ορθή πόλωση παρατηρείται συγκέντρωση ηλεκτρονίων και οπών στην επαφή ανάμεσα στους τομείς p- και n-

Χωρίς την ύπαρξη ορθής πόλωσης, το επίπεδο Fermi (E_f) είναι το ίδιο μέσα στο υλικό σαν συνέπεια της κατάστασης ισορροπίας που βρίσκεται ο ημιαγωγός. Χάρη στην ανισορροπία που δημιουργείται από την πληθώρα ηλεκτρονίων στην περιοχή n- και την πληθώρα οπών στην περιοχή p-, εμφανίζεται ηλεκτρικό πεδίο γύρω από την επαφή p-n. Το ηλεκτρικό αυτό πεδίο δημιουργείται από τους ιονισμένους δότες και δέκτες στον κρύσταλλο όταν τα ηλεκτρόνια τους και οι οπές τους ανασυνδέονται. Η τάση που αναπτύσσεται είναι ακριβώς αυτή που χρειάζεται ώστε να αποφευχθεί η ροή ρεύματος από την περιοχή p- στην περιοχή n-.



Εικόνα 5. Το ενεργειακό διάγραμμα για μια επαφή p-n με βαριά νόθευση των περιοχών p- και n-

Εάν τώρα μια εξωτερική τάση εφαρμόζεται κατά μήκος της διόδου μπορεί είτε να προστεθεί στην ήδη υπάρχουσα εσωτερική τάση (ανάστροφη πόλωση) είτε να αφαιρεθεί από την εσωτερική αυτή τάση (ορθή πόλωση). Στην περίπτωση που η εξωτερική τάση δίνει ορθή πόλωση, το « εμπόδιο » που παρουσιάζει το εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο στον ημιαγωγό αρχίζει να υποχωρεί και εμφανίζεται ροή ρεύματος.



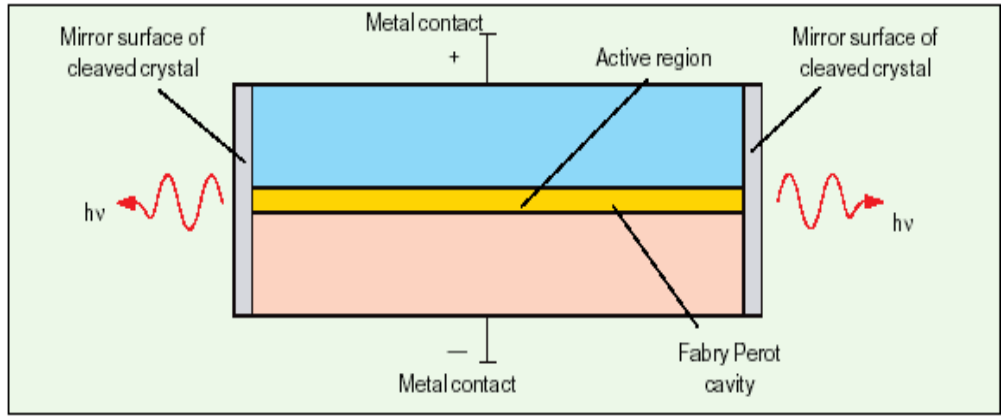
Εικόνα 6. Ορθά πολωμένη επαφή p-n . Το ρεύμα προκαλεί την επανασύνδεση μεγάλου αριθμού ηλεκτρονίων –οπών στην περιοχή επαφής . Ο πλεονασμός ενέργειας εκπέμπεται με τη μορφή κβάντων φωτός (φωτονίων)

Στην περίπτωση αυτή , ηλεκτρόνια από την περιοχή n και οπές από την περιοχή p συναντώνται σε μεγάλους αριθμούς γύρω από την επαφή p-n , όπου και ανασυνδέονται . Η επανασύνδεση δημιουργεί αυτόματα εκπομπή από την περιοχή επαφής (με την επιλογή βέβαια των κατάλληλων υλικών) . Με την βαριά νόθευση των περιοχών p και n μπορούμε επίσης να επιτύχουμε αναστροφή πληθυσμών , δηλαδή την ύπαρξη περισσότερων ασύνδετων ζευγών ηλεκτρονίων – οπών σε σχέση με τα συνδεδεμένα ζεύγη . Υπό αυτές τις συνθήκες μπορούμε να λάβουμε εξαναγκασμένη εκπομπή και , τελικά , οπτικό κέρδος . Τοποθετώντας λοιπόν αυτή την επαφή μέσα σε μια « οπτική κοιλότητα » προκαλείται φαινόμενο feedback της παραγόμενης ακτινοβολίας , δηλαδή δημιουργία ενός ταλαντωτή (laser) .

1.3. Είδη LASER

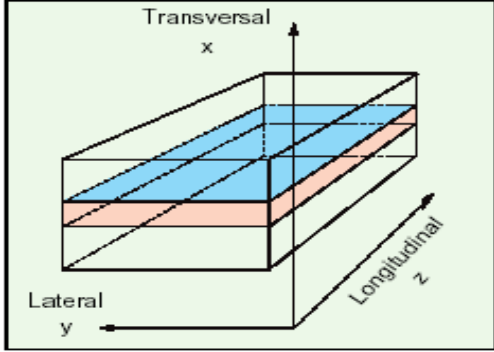
1.3.1. Απλό LASER

Για την βελτιστοποίηση της απόδοσης μιας διόδου laser για όσο το δυνατόν περισσότερες εφαρμογές, αναπτύχθηκε μια ποικιλία διαφορετικών lasers . Οι απλούστερες διόδοι laser καλούνται «broadstripe Fabry-Perot».Ο χαρακτηρισμός broadstripe προκύπτει από το σχετικά μεγάλο πλάτος (>10μm) της μεταλλικής επαφής κατά μήκος του laser . Fabry-Perot είναι το όνομα της οπτικής κοιλότητας .



Εικόνα 7. Laser απλούστερης μορφής. Αυτός ο τύπος laser (Fabry-Perot) έχει μόνο μια επαφή p-n . Για το λόγο αυτό καλείται και laser ομοεπαφής

Η διαφορά του δείκτη διάθλασης ανάμεσα στον αέρα και στον ημιαγωγό προκαλεί μερική ανάκλαση που επιτρέπει σε ένα μέρος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας να εξέρχεται του laser και σε ένα άλλο μέρος της να ανακλάται και να χρησιμεύει ως ανατροφοδότηση . Αυτά τα απλά lasers συνήθως δίνουν μη γραμμική έξοδο (όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της ισχύος), λόγω της αδυναμίας ελέγχου της οπτικής κοιλότητάς τους και ταλαντώνονται σε πολλά μήκη κύματος ταυτόχρονα .



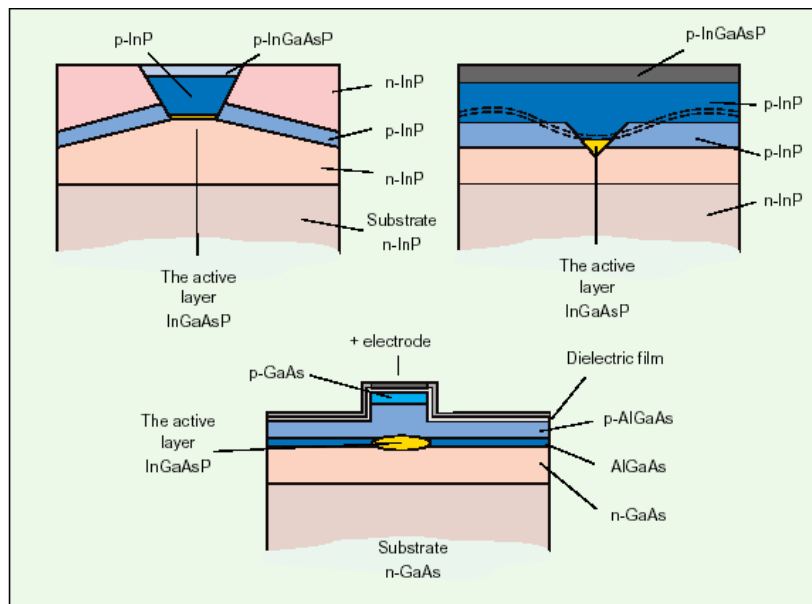
Εικόνα 8. Καθορισμός των κατευθύνσεων σε μια διάταξη laser

1.3.2. Ετεροδομημένο LASER (heterostructure laser)

Για να έχουμε μεγαλύτερη χωρική σταθερότητα αναπτύχθηκε το « buried heterostructure laser » (BH – laser) . Ο χαρακτηρισμός heterostructure σημαίνει ότι η επαφή p-n κατασκευάζεται από διαδοχικά στρώματα διαφορετικών band gaps. Η αλλαγή στα band gaps επηρεάζει τόσο το δείκτη διάθλασης όσο και την κίνηση των φορέων . Με το συγκεκριμένο σχεδιασμό της επαφής αυτής , οι φορείς και η οπτική ακτινοβολία συγκεντρώνονται περισσότερο στην εγκάρσια

διεύθυνση μετάδοσης . Το γεγονός αυτό δίνει μικρότερο ρεύμα κατωφλίου και καλύτερη σταθερότητα στη δομή του laser .

Για να έχουμε τα ίδια πλεονεκτήματα και στην πλευρική διεύθυνση πρέπει το υλικό του laser να δομηθεί σε διαδοχικά βήματα όπως και με τις συνήθεις συσκευές που χρησιμοποιούν ημιαγωγικά υλικά . Με τον τρόπο αυτό προκύπτει laser με μια « ενεργό » περιοχή που περιβάλλεται από υλικά μεγαλύτερου band gap και στην εγκάρσια και στην πλευρική κατεύθυνση . Αυτή η δομή μας δίνει τη δυνατότητα να ασκούμε έλεγχο τόσο επάνω στους φορείς όσο και στη δημιουργούμενη οπτική ακτινοβολία .



Εικόνα 9. Δίοδοι laser ετεροεπαφής . Επάνω δεξιά και αριστερά : 2 διαφορετικοί τύποι laser δίοδων BH – η μια επίπεδη και η άλλη όχι . Κάτω : μια ‘ridge’ laser δίοδος

Εάν κάποιος θέλει να βελτιώσει τα φασματικά χαρακτηριστικά του laser σχεδιάζει διαφορετικά την ανατροφοδότηση της οπτικής κοιλότητας . Όλα τα παραπάνω lasers μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με Fabry – Perot κοιλότητα , η οποία έχει πολύτροπη φασματική συμπεριφορά (το laser ταλαντώνεται σε πολλές συχνότητες ταυτόχρονα). Εάν κάποιος θέλει μονότροπο φάσμα , το οποίο είναι και χρήσιμο στις περισσότερες προηγμένες εφαρμογές , μπορεί να κατασκευάσει την οπτική κοιλότητα ως σαν ένα πλέγμα (« distributed feedback laser » / DFB laser) .

Ένα laser που σχεδιάζεται για επικοινωνιακούς σκοπούς έχει κατώφλι εκπομπής , συνήθως , τα 10 – 15 mA και ισχύ εξόδου 10 mW . Τα lasers μπορούν συνήθως να διαμορφωθούν σε data rates πάνω από 1 Gb/s , μερικά ακόμη ψηλότερα , γι’αυτό είναι ιδανικά για συστήματα μετάδοσης μεγάλων αποστάσεων και υψηλών ταχυτήτων .

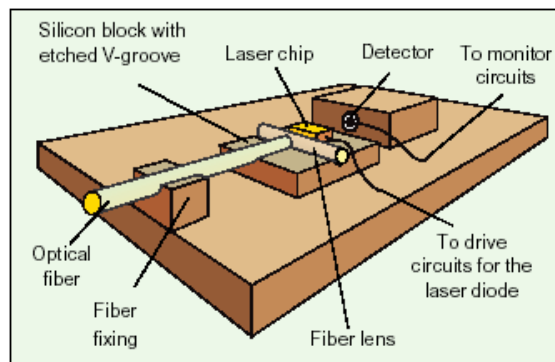
1.4. Σύνδεση διόδου LASER με ίνα

1.4.1. Η ίνα ως φακός

Το μέγεθος της περιοχής εκπομπής φωτός (συνήθως $0,2 * 1 \mu\text{m}$) του laser είναι παρόμοιο ή λίγο μικρότερο από το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου φωτός . Η ακτίνα εξόδου δεν είναι ευθεία , αλλά αποκλίνει κατά 30 έως 50 μοίρες (φαινόμενο διάθλασης). Το γεγονός αυτό μας αναγκάζει να συγκεντρώσουμε το φως με κάποιον τρόπο, εάν θέλουμε να εισαχθεί μέσα στην ίνα με τις λιγότερες απώλειες .Αν δεν τηρούνται ειδικές προδιαγραφές , ώστε η επίπεδη απόληξη της ίνας να είναι τοποθετημένη όσο πιο κοντά στο laser γίνεται (μερικά μm), μπορεί να επιτευχθεί μια απόδοση σύνδεσης της τάξης του 10% . Για τον λόγο αυτό , ένας φακός ή ένα σύστημα φακών παρεμβάλλεται ανάμεσα στο laser και στην άκρη της ίνας ώστε να συλλέγεται το φως στο αριθμητικό άνοιγμα της ίνας (για να έχουμε την καλύτερη δυνατή εισαγωγή του φωτός μέσα στην ίνα) . Ένας τέτοιος φακός τοποθετείται σε διάταξη V ακριβώς εμπρός από τη laser δίοδο . Αυτή η διάταξη σε σχήμα V σχηματίζει γωνία 90 μοιρών με την ακτίνα laser και με την ίνα μέσα στην οποία θα οδεύσει το φως . Η απόδοση αυτού του setup είναι περίπου 30% .

Όλα τα εξαρτήματα είναι σφραγισμένα σε ένα μικρό πλαστικό ή μεταλλικό δοχείο για αυξημένη στεγανότητα . Μέσα στο δοχείο αυτό υπάρχει συνήθως μια φωτοδίοδος που χρησιμεύει ως ανιχνευτής που παρέχει ανατροφοδότηση και βοηθά στον έλεγχο και την οδήγηση των κυκλωμάτων . Η οπτική ακτινοβολία μεταφέρεται στη συνέχεια μέσα στην ίνα . Συνήθως , λιγότερο από ένα μέτρο ίνας είναι συνδεδεμένο εξ αρχής με το δοχείο της φωτοδίοδου .

Μια δίοδος ανίχνευσης , η οποία τοποθετείται πριν από τη δίοδο laser , ανιχνεύει την ακτινοβολία που διαπερνά τον πίσω « ανακλαστήρα » εντός της δίοδου laser . Εναλλακτικά , χρησιμοποιείται ένας διαχωριστής ακτινών (beam splitter) . Η laser δίοδος, το συνολικό μέγεθος της οποίας δεν είναι μεγαλύτερο από ένα συνηθισμένο ολοκληρωμένο κύκλωμα, έχει στις περισσότερες περιπτώσεις ένα ενσωματωμένο σύστημα ψύξης (cooling body) .

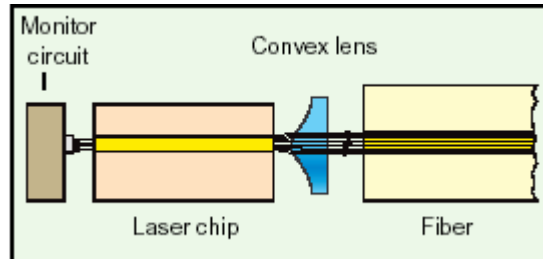


Εικόνα 10. Ολοκληρωμένο laser chip με ενσωματωμένη ίνα , σύστημα φακών και ανιχνευτή

1.4.2. Μικρό-φακοί (microlenses)

Ο φακός που έχει τη μορφή ίνας στις laser διόδους αντικαταστάθηκε από έναν μικροφακό (εικόνα). Με αυτόν τον τύπο φακού μπορεί να επιτευχθεί απόδοση σύνδεσης (coupling efficiency) μεγαλύτερη του 50% .

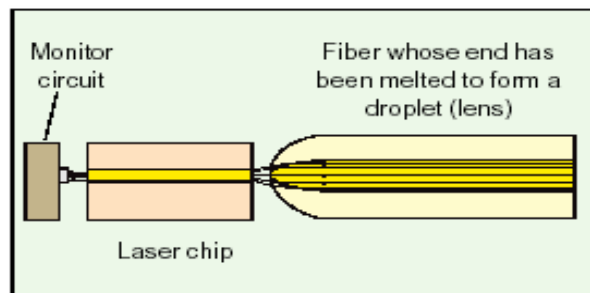
Η διάμετρος του μικροφακού είναι μόλις 8 – 15 μm .



Εικόνα 11. Με τη βοήθεια ενός μικροσκοπικού φακού το φως κατευθύνεται από τη δίοδο laser στην ίνα

1.4.3. Tapering

Μια τρίτη μέθοδος , που ονομάζεται tapering , έχει αναπτυχθεί τον τελευταίο καιρό . Η ίνα θερμαίνεται και εξάγεται με τρόπο ώστε η άκρη της (στο σημείο όπου εισέρχεται το φως της δίοδου) να εξυπηρετεί ως φακός . Για την κατασκευή αυτού του τύπου ίνας χρησιμοποιείται προγραμματιζόμενος εξοπλισμός συγκόλλησης (όπως το μοντέλο FSU της εταιρίας Ericsson) .



Εικόνα 12. Σχηματικό διάγραμμα που αναπαριστά την επεξεργασμένη είσοδο της ίνας (tapering)

1.4.4. Ψύξη και προστασία δίοδου LASER

Για διόδους laser που προορίζονται για χρήση σε προηγμένα συστήματα κατασκευάζεται συνήθως μια ενεργή συσκευή ψύξης σε μορφή heat rump (στοιχείο Peltier) μαζί με έναν οπτικό απομονωτή . Ο οπτικός απομονωτής , ο οποίος λειτουργεί ως δίοδος και αφήνει μόνο το φως που παράγεται από τη δίοδο laser να τον διαπερνά , εμποδίζει την επιστροφή του παραγόμενου φωτός στη δίοδο laser (φαινόμενο backscattering) . Αυτό το ανακλώμενο φως μπορεί

να έχει αρνητικές επιδράσεις στη λειτουργία των προηγμένων οπτικών συστημάτων .

2. Φωτοεκπέμπουσες δίοδοι (LIGHT EMITTING DIODES)

Το άλλο πολύ σημαντικό εξάρτημα στις οπτικές επικοινωνίες είναι η φωτοεκπέμπουσα δίοδος (LED) . Το LED διαφέρει από τη laser δίοδο κυρίως στο ότι μέσα σε ένα led δεν παρουσιάζεται εξαναγκασμένη εκπομπή φωτός . Το LED λειτουργεί με βάση την αρχή της αυθόρμητης εκπομπής . Για το λόγο αυτό , το LED παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα σε σύγκριση με τη δίοδο laser :

- Λιγότερη ισχύς εισέρχεται στην ίνα
- Σχετικά μικρό , ικανό να διαμορφωθεί εύρος ζώνης (< 50 MHz) , αν και ορισμένα LEDs μπορούν να φτάσουν τα 150 MHz
- Ευρύτερο φασματικό πλάτος

Αυτά τα μειονεκτήματα μπορεί να παρουσιάζουν το LED ως μια χειρότερη λύση από τη δίοδο laser . Ωστόσο , το LED έχει ορισμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με τη δίοδο laser και σε πολλές περιπτώσεις , προτιμάται στα οπτικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα . Τα πλεονεκτήματα είναι :

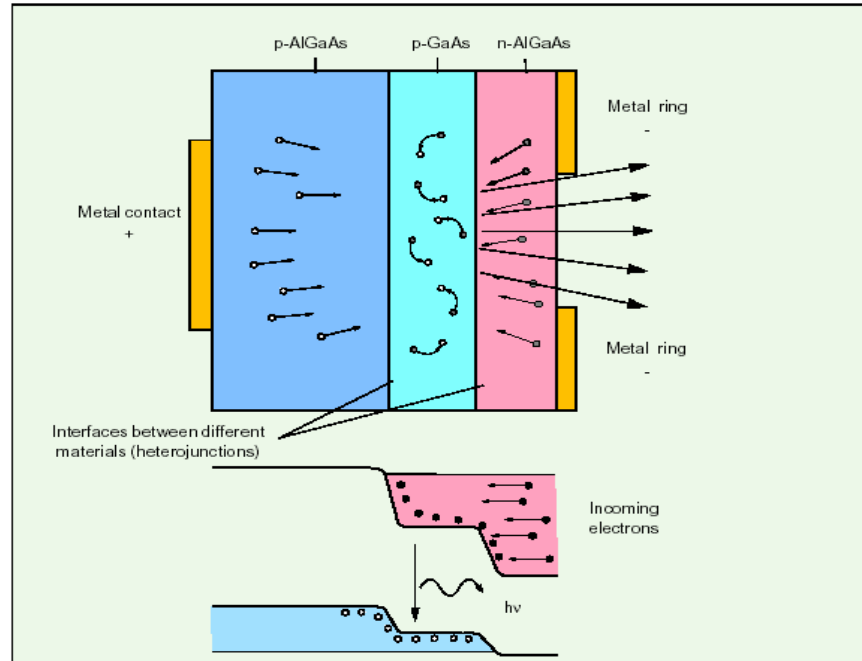
- Απλούστερη κατασκευή (δεν χρειάζονται επιφάνειες ανάκλασης , γραμμική γεωμετρική σχεδίαση)
- Φτηνότερα . Παρατηρείται μεγάλη μείωση του κόστους παραγωγής με τη χρήση του led και των αντίστοιχων κυκλωμάτων οδήγησης
- Αξιόπιστα . Ένα LED δεν « γερνά » τόσο γρήγορα όσο η δίοδος laser
- Μικρότερη ευαισθησία στη θερμοκρασία . Η ένταση του φωτός σχετικά με τα κυκλώματα οδήγησης επηρεάζεται λιγότερο από τις μεταβολές της θερμοκρασίας σε σύγκριση με την ένταση του φωτός μιας δίοδου laser
- Γραμμικότητα . Ένα laser μπορεί να κατασκευαστεί γραμμικό αρκετά εύκολα , γεγονός που καθιστά τα LEDs καταλληλότερα για αναλογική διαμόρφωση .

Τα παραπάνω πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα εξηγούν και τη χρήση των LEDs κυρίως σε τοπικά δίκτυα (LANs) , σε εφαρμογές υπολογιστών και στους τηλεοπτικούς δέκτες . Το σύστημα FDDI (fiber distributed data interface) αποτελεί ρυθμιστικό σύστημα που έχει αναπτυχθεί αποκλειστικά για τις οπτικές ίνες και είναι ένα κλασικό παράδειγμα χρήσης των LEDs για οπτική εκπομπή .

Τα LEDs κατασκευάζονται από τον ίδιο συνδυασμό υλικών με τις δίοδους laser . Ένα LED που κατασκευάζεται από GaAs / AlGaAs είναι ιδανικό για μικρότερα μήκη κύματος μέχρι 870 nm . Για μήκη κύματος από 1310 έως 1550 nm χρησιμοποιείται συνδυασμός InGaAs και InP .

2.1. Διπλό LED ετεροεπαφής (dual junction led)

Η λειτουργία του DH LED και η δομή του περιγράφονται στη εικόνα που ακολουθεί :



Εικόνα 13. DH LED. Επάνω : διαφορετικά στρώματα , κάτω : ενεργειακό διάγραμμα led

Τα LEDs με δομή DH είναι κοινά όταν απαιτείται μεγάλη απόδοση, περισσότερη από συμφασικό φως . Το μειονέκτημα είναι ότι το ποσοστό του φωτός που εισέρχεται στην ίνα είναι σχετικά μικρό .

2.2. Διαφορετικοί τύποι LED

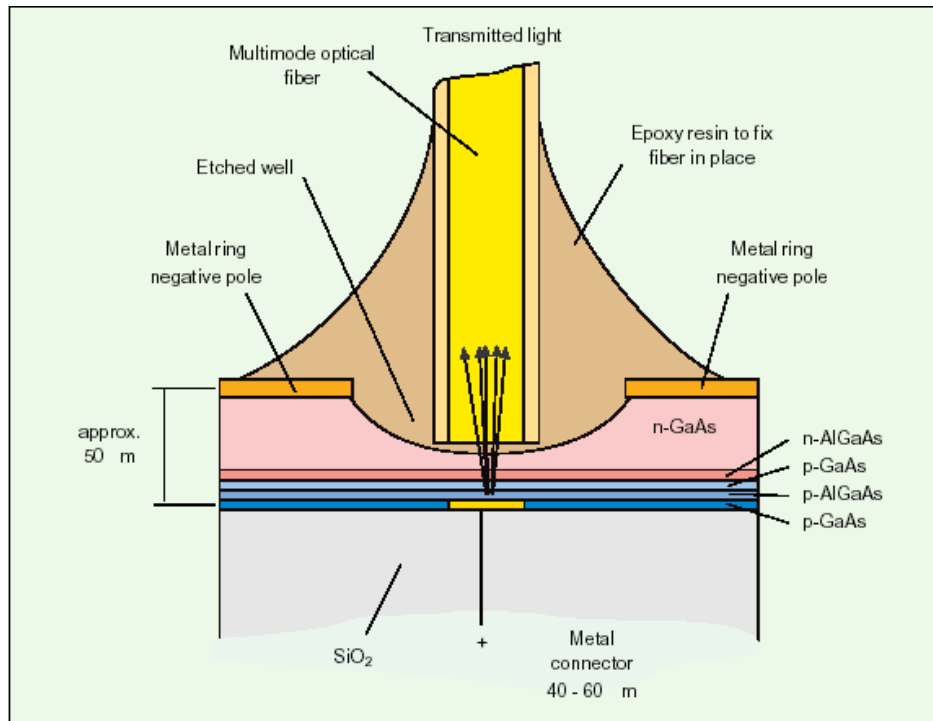
Υπάρχουν 4 κύριοι τύποι LED από τους οποίους οι πρώτοι 2 χρησιμοποιούνται σε συστήματα οπτικών επικοινωνιών και οι επόμενοι 2 σε συσκευές συναγερμών , σε remote-controls τηλεοράσεων , αριθμομηχανές κλπ.

- LED τύπου Burrus
- Ακμοπυροδότη LED (edge emitting)
- Επίπεδο LED (planar)
- Θολωτό LED (dome)

LED τύπου Burrus

Το LED της παρακάτω εικόνας έχει κατασκευαστεί για μήκη κύματος 800-900 nm . Η εσωτερική απορρόφηση ελαχιστοποιείται χάρη στο μεγάλο ενεργειακό διάκενο που υπάρχει στα γειονικά στρώματα της ενεργού περιοχής . Το πλάτος

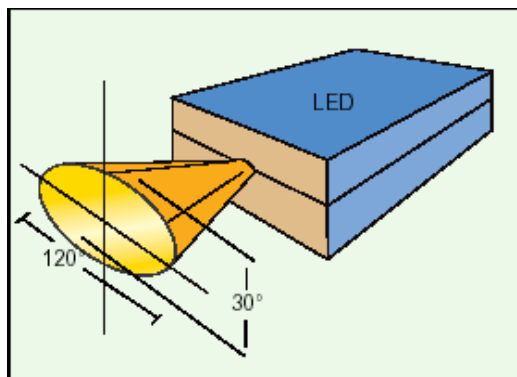
του « αυλακιού » είναι σύμφωνο με τη διάμετρο της ίνας ώστε να διασφαλίζεται καλύτερη εισαγωγή του φωτός στην ίνα . Η ιδανική εισαγωγή φωτός επιτυγχάνεται όταν η ακτινοβολούσα επιφάνεια ανταποκρίνεται στην επιφάνεια κυματοδότησης του πυρήνα της ίνας .



Εικόνα 14. LED τύπου Burrus με κατάλληλο σχήμα αύλακος για το περιορισμό της απορρόφησης στο στρώμα τύπου n του GaAs

Ακμοπυροδοτίο LED (edge emitting)

Τα LEDs αυτού του τύπου κατασκευάζονται με παρόμοιο τρόπο με τα κοινά stripe lasers . Σε αυτά τα LED χρησιμοποιείται ο συνδυασμός διάφανων , κυματοδηγούντων στρωμάτων και ενός πολύ λεπτού ενεργού στρώματος (50-100 nm) . Το διάφανο στρώμα λειτουργεί ως κυματοδηγός έτσι ώστε ο φωτεινός « κώνος » να εκπέμπεται με γωνία περίπου 30 μοιρών στο κάθετο επίπεδο και περίπου 120 μοιρών στο οριζόντιο επίπεδο .



Εικόνα 15. Ο λοβός εκπομπής είναι μια έλλειψη με οριζόντιο άνοιγμα 115-125 μοίρες και κάθετο άνοιγμα 25-35 μοίρες

Η μια επιφάνεια εξόδου καλύπτεται από ανακλαστικό στρώμα που σημαίνει ότι σχεδόν όλη η ακτινοβολία οδηγείται προς μια κατεύθυνση . Με τη χρήση των διάφανων κυματοδηγών 4 με 7 φορές περισσότερο φως μπορεί να εισαχθεί σε μια οπτική ίνα με μικρό αριθμητικό άνοιγμα σε σύγκριση με τα surface emitting leds .

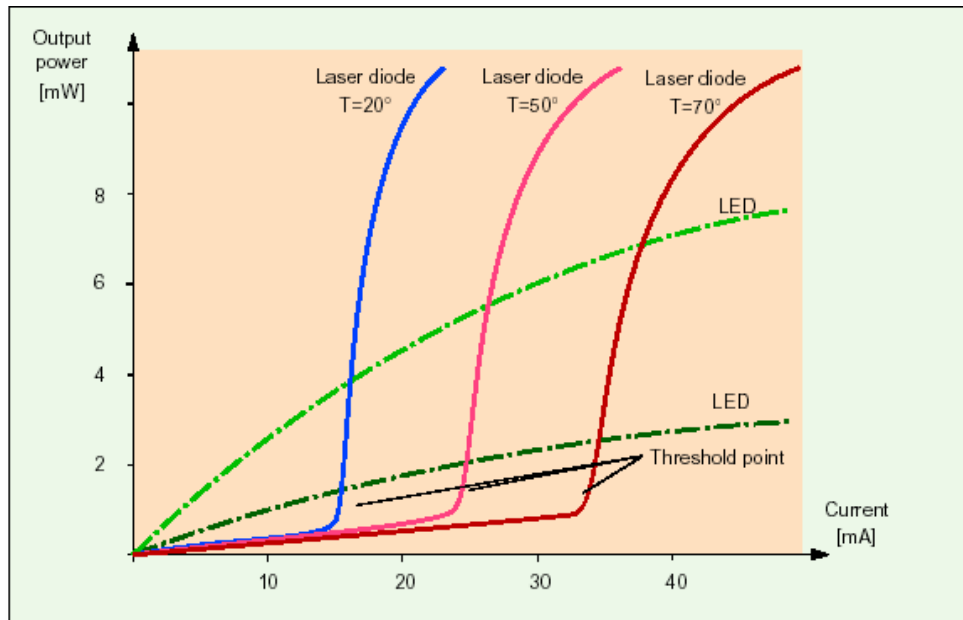
2.3. Απόδοση LED

Η απόδοση ενός LED εξαρτάται πλήρως από το πόσα φωτόνια δημιουργούνται από τα διεγερμένα ηλεκτρόνια . Εάν λάβουμε υπ όψη τις μη ακτινοβολούσες επαφές σε σημεία που ο κρύσταλλος παρουσιάζει ατέλειες παρατηρείται κβαντική απόδοση περίπου στο 50% στα LEDs ομοεπαφής . Σε LEDs ετεροεπαφής , η αναμενόμενη απόδοση είναι 60-80% .

3. Χαρακτηριστικά των LASERS και των LEDs

3.1. Ισχύς εξόδου

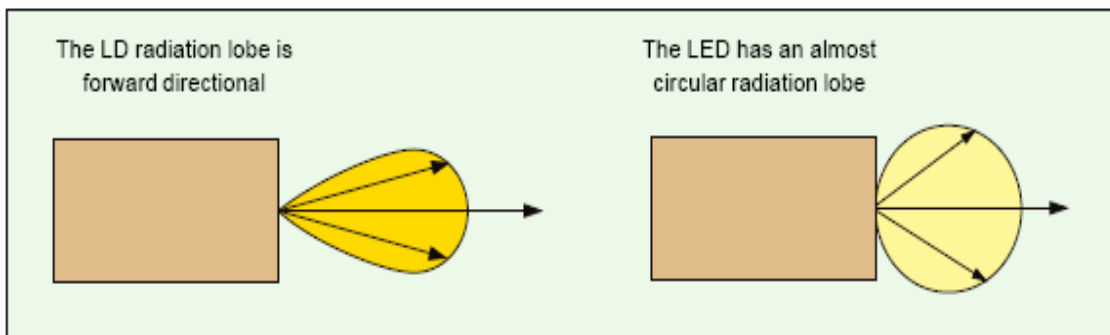
Η τεράστια διαφορά ανάμεσα σε μια δίοδο laser και ένα LED μπορεί να γίνει φανερό από το I-P διάγραμμά τους . Η γραφική παράσταση για τη δίοδο Laser ακολουθεί παρόμοια καμπύλη με τη γραφική παράσταση για το LED μέχρι ενός σημείου (threshold) όπου το ρεύμα I αναγκάζει τη δίοδο να εκπέμψει φως. Μετά από το σημείο αυτό , η ισχύς εξόδου της δίοδου laser αυξάνεται ραγδαία και σχεδόν γραμμικά. Από την άλλη μεριά , το LED , που βασίζεται στην αυθόρμητη εκπομπή , δεν έχει σημείο κατωφλίου αλλά συνεχίζει να αυξάνει την ισχύ εξόδου του ανάλογα με την αύξηση του ρεύματος . Αυτό συμβαίνει μέχρι τη στιγμή που η ισχύς εξόδου φτάνει σε ένα σημείο που αρχίζει να ελαττώνεται (όταν ο ημιαγωγός ζεσταίνεται $\theta > 70^{\circ} \text{C}$) .



Εικόνα 16. Το διάγραμμα δείχνει τη σχέση μεταξύ του ρεύματος οδήγησης και της ισχύος εξόδου . Η δίοδος laser λειτουργεί ως κοινό LED μέχρι το σημείο κατωφλίου

3.2. Λοβός ακτινοβολίας

Οι λοβοί ακτινοβολίας των LDs και των LEDs είναι πολύ διαφορετικοί μεταξύ τους. Ο λοβός ακτινοβολίας του LD παρουσιάζει έντονη κατευθυντικότητα ενώ ο λοβός του LED είναι περίπου κυκλικός.



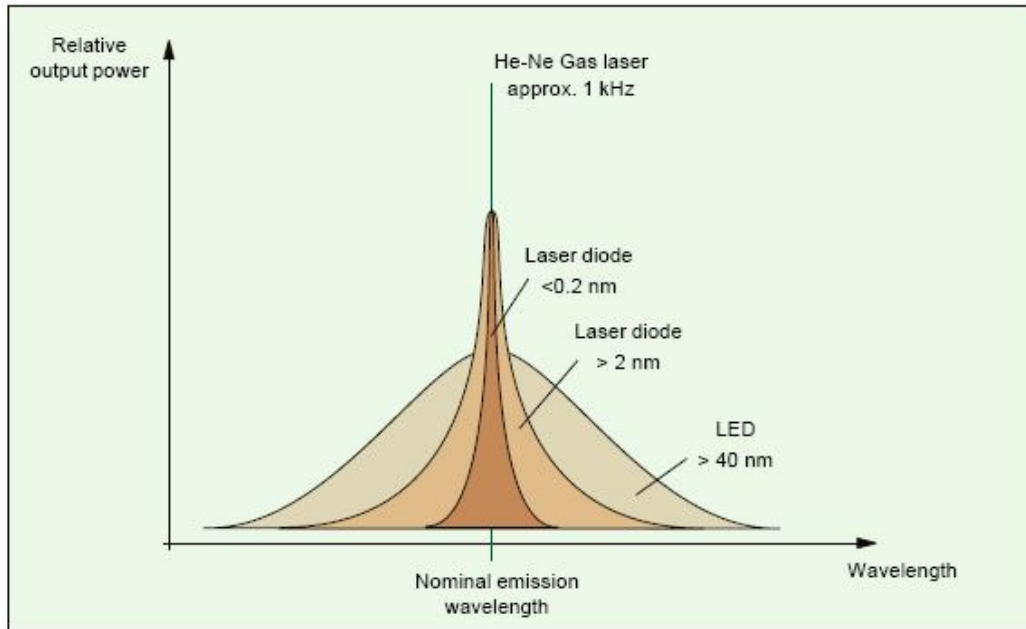
Εικόνα 17. Οι διαφορές μεταξύ των λοβών ακτινοβολίας ενός LD και ενός LED

3.3. Φασματικό εύρος των LDs και LEDs

Φασματικό εύρος των LDs/LEDs ονομάζουμε το εύρος του οπτικού φάσματός τους. Το οπτικό φάσμα περιέχει τον φορέα που στην περίπτωση μας έχει συχνότητα 10^{14} Hz. Αν το LD/LED είναι διαμορφωμένο, θα εμφανιστούν πλευρικές ζώνες και στις δυο μεριές του φορέα (περιέχονται επίσης στο οπτικό φάσμα),

όπως συμβαίνει σε κάθε πομπό. Αυτές οι πλευρικές ζώνες είναι συμβατές με το ηλεκτρικά διαμορφωμένο εύρος ζώνης.

Η καθαρότητα της συχνότητας του σήματος των LDs/LEDs δεν είναι τόσο μεγάλη. Έτσι οι πλευρικές ζώνες είναι συχνά «κρυμμένες» σε ένα ευρύ και περίπλοκο οπτικό φάσμα, του οποίου οι παράγοντες σήματος είναι αδύνατο να διακριθούν.



Εικόνα 18. Οπτικά φάσματα ενός gas laser, ενός LD και ενός LED

Χρησιμοποιώντας τη σχέση που συνδέει το μήκος κύματος με τη συχνότητα $f = c/\lambda$, προκύπτει ένας τύπος που συνδέει το εύρος του οπτικού φάσματος με το μήκος κύματος ή τη συχνότητα :

$$\Delta f = \frac{c}{\lambda^2} \cdot \Delta \lambda$$

Αριθμητικό παράδειγμα 1

Το οπτικό εύρος δυο διαφορετικών LD και ενός LED είναι αντίστοιχα : 0.2 nm, 2 nm και 50 nm. Σκοπός μας είναι να μετατρέψουμε τις τιμές αυτές σε αντίστοιχες τιμές GHz στα 1550 nm :

$$\Delta f = \frac{3 \cdot 10^8}{(1550 \text{ nm})^2} \cdot 0.2 \text{ nm} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 2 \cdot 10^{-8}}{1.55 \cdot 10^{-6} \cdot 1.55 \cdot 10^{-6}} \approx 25 \text{ GHz}$$

$$\Delta f = \frac{3 \cdot 10^8}{(1550 \text{ nm})^2} \cdot 2 \text{ nm} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 2 \cdot 10^{-8}}{1.55 \cdot 10^{-6} \cdot 1.55 \cdot 10^{-6}} \approx 250 \text{ GHz}$$

$$\Delta f = \frac{3 \cdot 10^8}{(1550 \text{ nm})^2} \cdot 50 \text{ nm} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 2 \cdot 10^{-8}}{1.55 \cdot 10^{-6} \cdot 1.55 \cdot 10^{-6}} \approx 6250 \text{ GHz}$$

Παρατηρούμε ότι το εύρος φάσματος του laser είναι αρκετά πιο ευρύ από το ηλεκτρικά διαμορφωμένο εύρος ζώνης. Το γεγονός αυτό εξηγεί γιατί οι πλευρικές ζώνες δεν είναι ορατές στο οπτικό φάσμα.

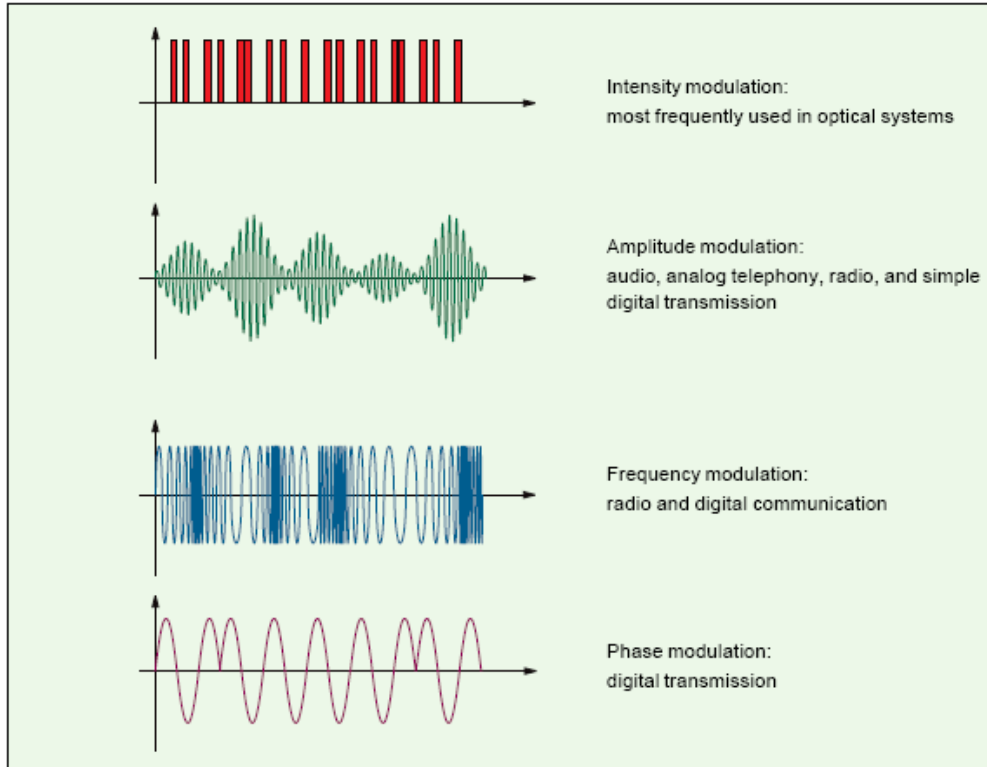
3.4. Διαμόρφωση

Όπως συμβαίνει και με τους ράδιο-πομπούς, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλοί τύποι διαμόρφωσης για να μεταδοθεί μια πληροφορία με ένα οπτικό φορέα. Ο πιο απλός τύπος οπτικής διαμόρφωσης είναι αυτός που μοιάζει με την ψηφιακή διαμόρφωση των bits (switch light on – off). Ο τύπος αυτός ονομάζεται (pulse) intensity modulation (IM).

Όλες οι τεχνικές διαμόρφωσης που έχουν χρησιμοποιηθεί σε ράδιο-επικοινωνίες μπορούν να εφαρμοστούν επιτυχώς και στις οπτικές επικοινωνίες. Μια νέα τεχνική διαμόρφωσης είναι η εξής : γίνεται μείξη δύο ακτινών φωτός σε μια φωτο-δίοδο και τελικά παράγεται μια μεσαία συχνότητα ανάλογη με τη διαφορά των οπτικών συχνοτήτων των δύο ακτινών φωτός. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας είναι οι εξής :

- Intensity modulation (IM)
- Amplitude modulation (AM)
- Frequency modulation (FM)
- Phase modulation (PM)

Στα οπτικά δίκτυα, η διαμόρφωση intensity modulation (IM) χρησιμοποιείται συνήθως για τη μεταφορά πληροφοριών ανάμεσα σε δυο σημεία.



Εικόνα 19. Διάφοροι τύποι διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση πληροφοριών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΟΠΤΙΚΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ

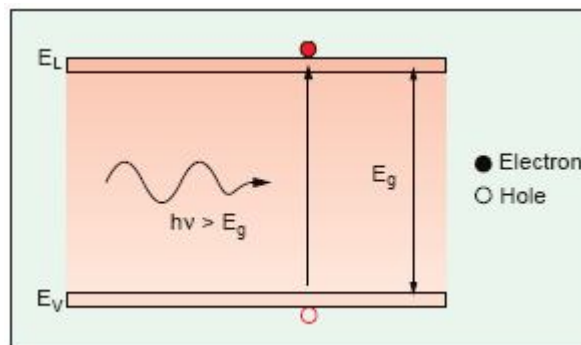
Εισαγωγή

Οι οπτικοί ανιχνευτές (φωτοδίοδοι) επιτελούν αντίστροφη λειτουργία από εκείνη των LEDs και των LDs. Ο οπτικός ανιχνευτής μετατρέπει την οπτική ενέργεια σε ηλεκτρική. Το ηλεκτρικό σήμα στη συνέχεια μπορεί να ενισχυθεί χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικά κυκλώματα. Οι ανιχνευτές που κατασκευάζονται από ημιαγωγούς χρησιμοποιούνται κατά κόρον στα οπτικά συστήματα. Οι τρεις τύποι φωτοδίοδων που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο είναι οι εξής :

- P-N photodiode
- PIN photodiode
- Avalanche photodiode (APD)

Γίνεται συνεχής προσπάθεια στον τομέα των οπτικών τηλεπικοινωνιών, να λειτουργήσουν τα δίκτυα σε όλο και μεγαλύτερα μήκη κύματος. Το γεγονός αυτό έχει αντίκτυπο και στους οπτικούς ανιχνευτές. Έχουν αρχίσει και χρησιμοποιούνται νέα υλικά ημιαγωγών : σιλίκι για τα 850 nm και γερμάνιο (Ge) και InGaAs για μήκη κύματος 1300 – 1600 nm.

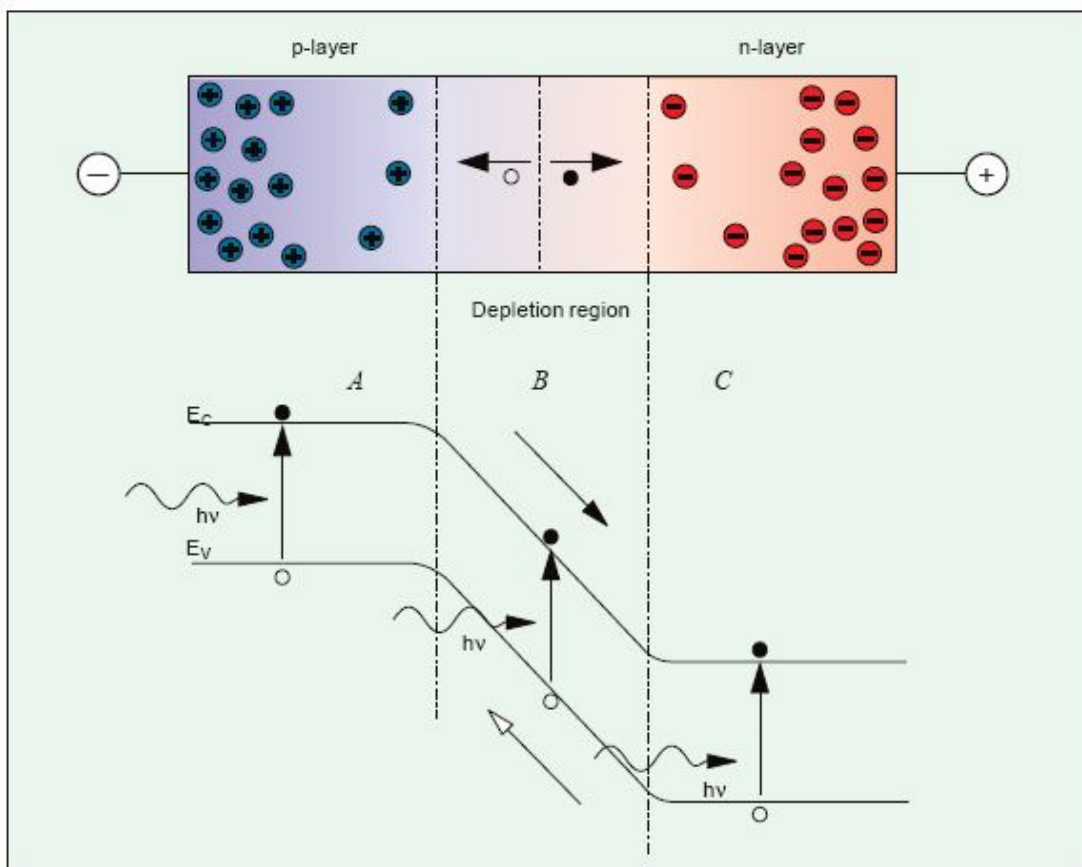
Η φωτοδίοδος λειτουργεί με βάση το γεγονός ότι ένα φωτόνιο με οπτική ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό κενό δύο καταστάσεων του ημιαγωγού, μπορεί να ωθήσει ένα ηλεκτρόνιο να μεταπηδήσει από την κατάσταση ισορροπίας σε μια άλλη διεγερμένη κατάσταση. Αν εφαρμόσουμε μια εξωτερική τάση στη φωτοδίοδο τότε τα ζευγάρια ηλεκτρονίων-οπών θα ρέουν μέσα στον ημιαγωγό, δημιουργώντας ηλεκτρική ένταση που θα είναι ανάλογη με την ένταση του φωτός που απορροφάται.



Εικόνα 1. Φως διεγείρει ένα ηλεκτρόνιο κάνοντάς το να μεταπηδήσει από μια χαμηλότερη σε μια υψηλότερη ενεργειακή στάθμη. Δημιουργείται λοιπόν ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής

1. Φωτοδίοδος τύπου P-N

Η πιο απλή φωτοδίοδος είναι εκείνη που αποτελείται από μια επαφή p-n. Αυτός ο τύπος δίοδου χρησιμοποιείται σπάνια στα οπτικά συστήματα αλλά κρίνεται απαραίτητη η παρουσίασή του, για να κατανοήσουμε τις βασικές αρχές λειτουργίας μιας φωτοδίοδου. Στην εικόνα 2 παρουσιάζεται μια φωτοδίοδος τύπου p-n. Παρατηρούμε ότι η δίοδος αποτελείται από ένα p και ένα n στρώμα. Αν εφαρμοστεί αρνητική τάση στη δίοδο (αρνητικός πόλος στο p-στρώμα), το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί μια περιοχή αραίωσης μεταξύ των δύο στρωμάτων. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές θα αρχίσουν να απομακρύνονται από την περιοχή επαφής και η ίδια περιοχή θα παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση.

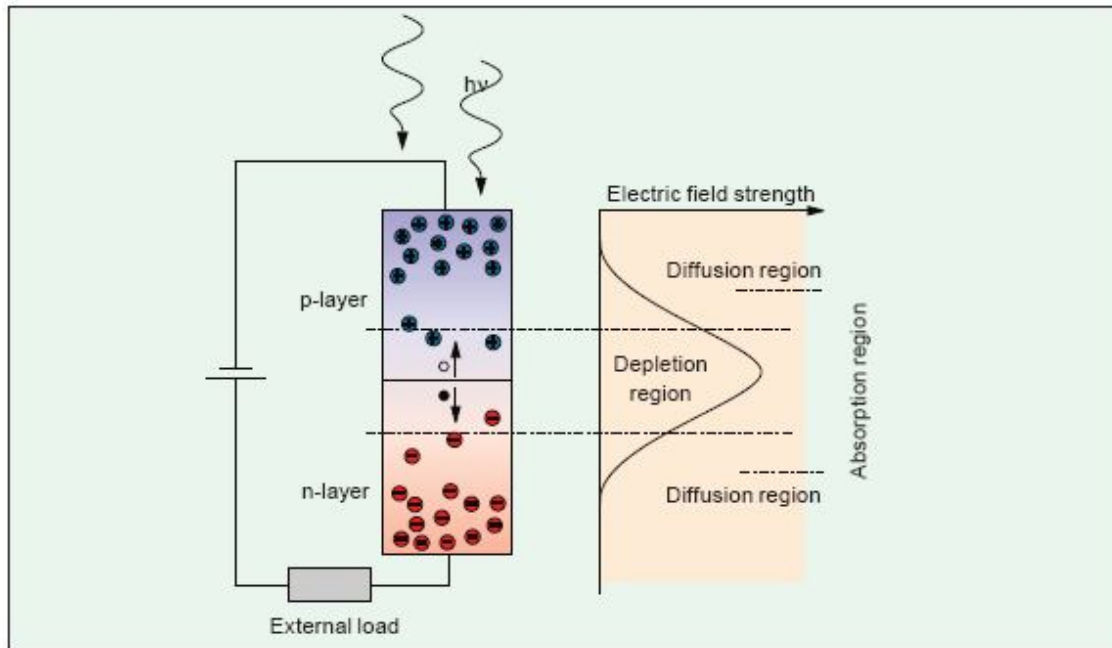


Εικόνα 2. Ένα φωτόνιο μπορεί να δημιουργήσει ζεύγη e-h σε τρεις διαφορετικές περιοχές της δίοδου (A,B και C). Μόνο στην περιοχή αραίωσης (B) παρατηρείται άμεση ανίχνευση αυτών των ζευγών

Στην περιοχή A, ένα προσπίπτον φωτόνιο δημιουργεί μια οπή και ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο. Λόγω του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται από την ανάστροφη πόλωση της δίοδου, το ηλεκτρόνιο θα αρχίσει σιγά-σιγά να απομακρύνεται από την περιοχή αραίωσης (δημιουργία ηλεκτρικής έντασης). Η ροή των ζευγών στις περιοχές A και C είναι τόσο αργή που οι κατασκευαστές δίοδων πασχίζουν για

να σχεδιάσουν μια p-n φωτοδίοδο με ελάχιστη ανίχνευση στις παραπάνω περιοχές.

Αν βέβαια ένα φωτόνιο δημιουργήσει ένα ζεύγος οπής-ηλεκτρονίου στην περιοχή B (περιοχή αραίωσης), τότε το ηλεκτρόνιο θα κινηθεί ακαριαία προς το n-στρώμα ενώ η οπή θα κινηθεί ακαριαία προς το p-στρώμα. Αυτή η ακαριαία κίνηση οφείλεται στο ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο που εμφανίζεται στην περιοχή.



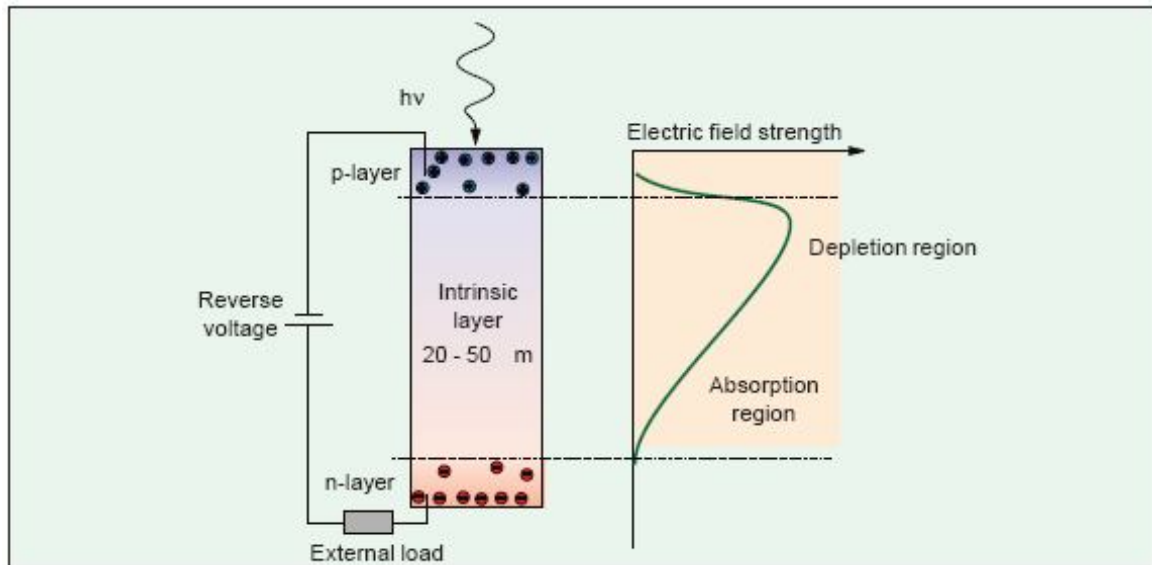
Εικόνα 3. Σχηματικό διάγραμμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε μια p-n δίοδο

Όπως φαίνεται και παραπάνω, η διαδικασία διάχυσης στις περιοχές A και C είναι πολύ πιο αργή συγκριτικά με εκείνη στην περιοχή B και μπορεί να συνεχιστεί ακόμα και μετά το τέλος της πρόσπτωσης φωτονίων. Τοποθετώντας μια ελαφρά νοθευμένη περιοχή μεταξύ των στρωμάτων p και n, η οποία ονομάζεται intrinsic περιοχή και κάνοντας το p-στρώμα πιο λεπτό, η παραγωγή ζευγών e-h μπορεί να περιοριστεί αποκλειστικά στην περιοχή αραίωσης (B). Ο παραπάνω τρόπος σχεδιασμού δίοδου (PIN diode) είναι πολύ πιο αποτελεσματικός.

2. Φωτοδίοδος τύπου PIN

Η δίοδος p-n μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση του ορατού φωτός. Για την ανίχνευση της υπέρυθρης ακτινοβολίας (μεγαλύτερα μήκη κύματος) έχει αναπτυχθεί ένας άλλος τύπος δίοδου. Το φως μεγάλου μήκους κύματος διαπερνά περισσότερο το p-στρώμα απ' ό,τι το φως μικρού μήκους κύματος. Μια λύση θα ήταν να κάνουμε το p-στρώμα πιο λεπτό. Στην περίπτωση αυτή όμως πολλά ζεύγη e-h θα συνδυάζονταν μεταξύ τους εντός του στρώματος p χωρίς να δημιουργούν ηλεκτρική ένταση. Καταλήγουμε λοιπόν στην τοποθέτηση ενός

σχετικά λεπτού στρώματος ημιαγωγού νοθευμένου με p παράγοντες, ανάμεσα στα στρώματα p - n (δίοδος τύπου PIN).

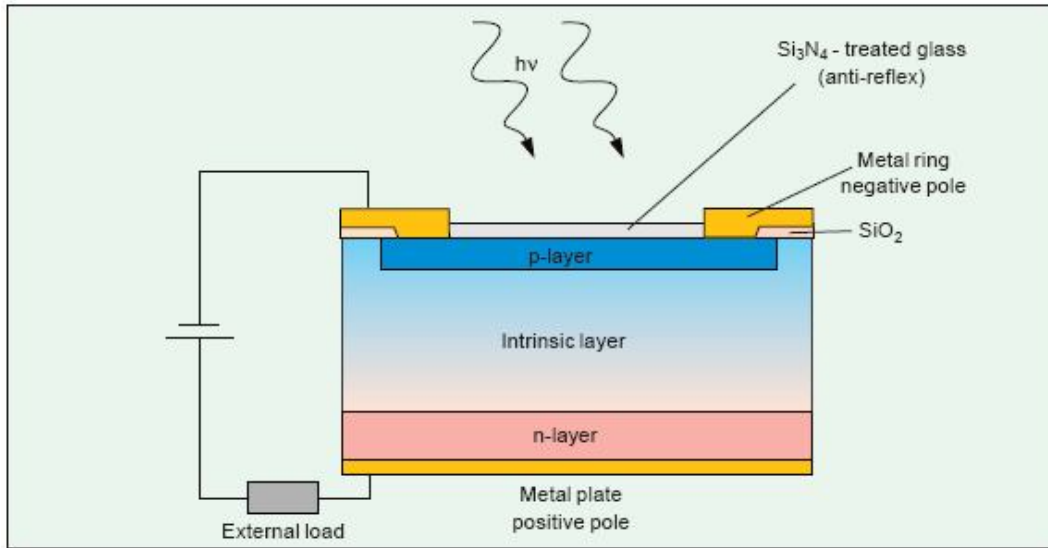


Εικόνα 4. Τοποθετώντας ένα intrinsic στρώμα μεταξύ των στρωμάτων p - n πετυχαίνουμε μεγαλύτερη περιοχή απορρόφησης από εκείνη που παρουσιάζει η απλή δίοδος p - n

Το intrinsic στρώμα ή αλλιώς i -στρώμα, παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση και το ηλεκτρικό πεδίο που εμφανίζει είναι πολύ ισχυρό. Τα χαρακτηριστικά του i -στρώματος διευρύνουν αρκετά την περιοχή αραίωσης της φωτοδίοδου. Έτσι τα περισσότερα ζεύγη e - h παράγονται στην περιοχή αραίωσης με αποτέλεσμα να έχουμε μεγαλύτερη ηλεκτρική ένταση και αμεσότερη ανίχνευση του φωτός.

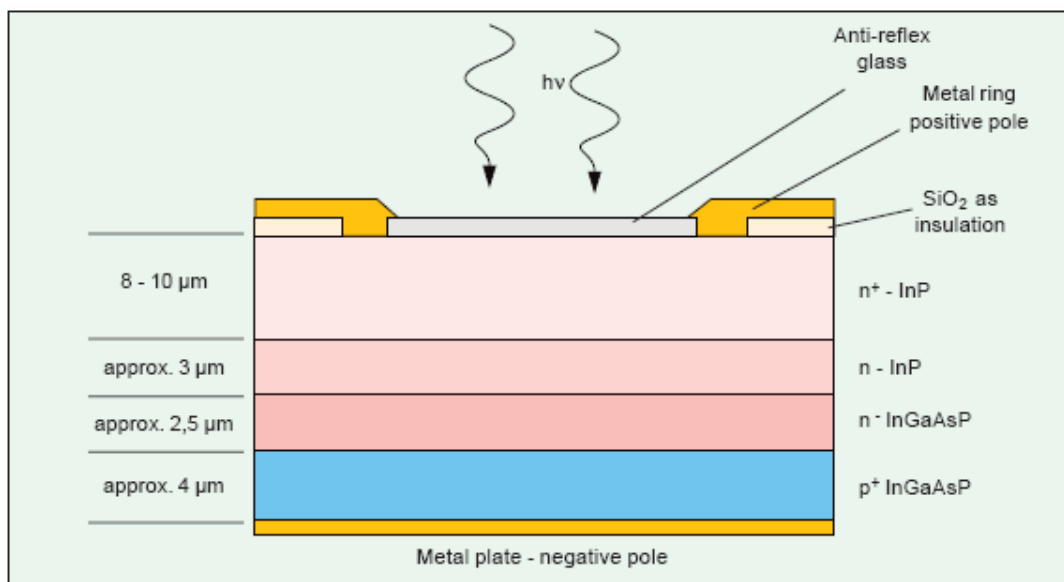
Η εικόνα 5 παρουσιάζει μια silicon PIN δίοδο. Αυτός ο τύπος δίοδου χρησιμοποιείται για μήκη κύματος 0.8 μέχρι 0.9 μm . Ένα μεταλλικό δακτυλίδι λειτουργεί σαν αρνητικός πόλος. Κάτω απ' αυτό το δακτυλίδι βρίσκεται ένα λεπτό p -στρώμα και κάτω από αυτό ένα λεπτό i -στρώμα (20-50 μm). Το i -στρώμα είναι όσο πιο λεπτό γίνεται (μετά από κάποιο σημείο ο χρόνος αντίδρασης αρχίζει και αυξάνεται). Με το πάχος που δίνεται στο παράδειγμα, ο χρόνος αντίδρασης είναι 1 ns και το dark current* (αναλύεται παρακάτω) είναι μικρότερο από 1 nA.

* Το dark current είναι ηλεκτρική ένταση που δημιουργείται από ζεύγη e - h που εμφανίζονται χωρίς να έχει προηγηθεί πρόσπτωση φωτός στη δίοδο



Εικόνα 5. Τα τρία στρώματα της silicon PIN δίοδου

Τελευταία έχουν αρχίσει και χρησιμοποιούνται συνδυασμοί υλικών που δεν περιέχουν σιλίκονη και γερμάνιο. Για ακόμα μεγαλύτερα μήκη κύματος οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν συνδυασμούς InGaAsP με InP ή GaAlAsSb με GaSb. Η εικόνα 6 παρουσιάζει τον τρόπο κατασκευής μιας φωτοδίοδου σύμφωνα με τον πρώτο συνδυασμό. Μια τέτοια δίοδος παρουσιάζει dark current μικρότερο από 0.2 nA και χρόνο αντίδρασης μικρότερο από 100 ps.



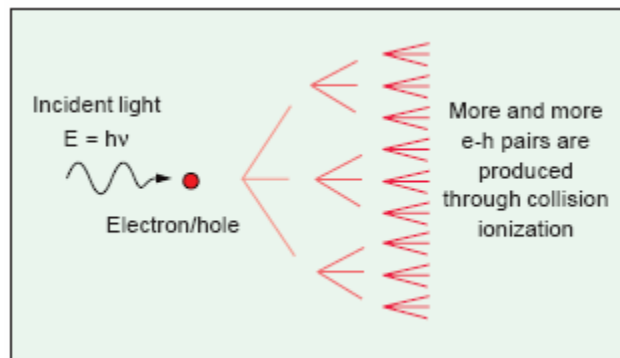
Εικόνα 6. PIN δίοδος για μεγάλα μήκη κύματος. Ημιαγωγοί : InP και InGaAsP

3. Avalanche φωτοδίοδος (APD)

Σε μια ιδανική PIN φωτοδίοδο, κάθε προσπίπτον φωτόνιο δημιουργεί ένα ζεύγος e-h, γεγονός που σημαίνει ότι το ηλεκτρόνιο θα κινηθεί από το θετικό προς τον αρνητικό πόλο. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι η PIN δίοδος είναι το αντίστροφο του LED (σχεδόν κάθε ηλεκτρόνιο αντιδρά σε προσπίπτον φωτόνιο). Κατά παρόμοιο τρόπο η avalanche δίοδος αντιστοιχίζεται στο LD (κάθε προσπίπτον φωτόνιο δημιουργεί πολλά ζεύγη e-h με αποτέλεσμα να έχουμε μεγαλύτερη ροή ηλεκτρικής έντασης).

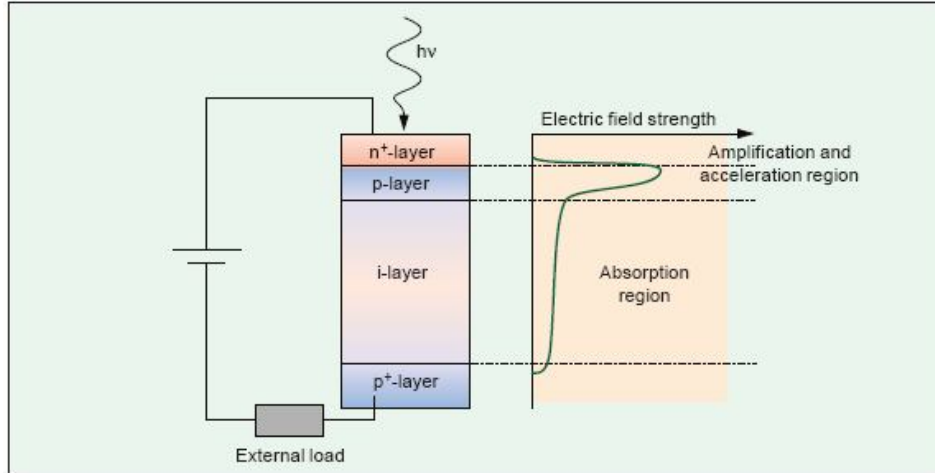
Αυξάνοντας αρκετά την ανάστροφη πόλωση μιας p-n επαφής πετυχαίνουμε δραματική αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Έτσι τα ηλεκτρόνια που επιταχύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο αποκτούν αρκετή κινητική ενέργεια ώστε να διεγείρουν με τη σειρά τους άλλα ηλεκτρόνια. Τα ζεύγη e-h που δημιουργούνται λοιπόν, μπορούν να δημιουργήσουν με τη σειρά τους άλλα ζεύγη. Με τον παραπάνω τρόπο πετυχαίνουμε τον πολλαπλασιασμό της έντασης, που δημιουργείται από τα κινούμενα ηλεκτρόνια.

Λόγω αυτού του φαινομένου «χιονοστιβάδας» η δίοδος ονομάστηκε avalanche. Ο συντελεστής πολλαπλασιασμού εξαρτάται κατά μεγάλο βαθμό από την ανάστροφη πόλωση. Συνηθίζεται ο συντελεστής πολλαπλασιασμού να έχει τιμές μέσα στο διάστημα (70-100). Αυτό σημαίνει ότι ένα φωτόνιο δημιουργεί ροή 70 με 100 ηλεκτρονίων στο εξωτερικό κύκλωμα. Ο SNR (αναλύεται παρακάτω) βελτιώνεται αρκετά λόγω του φωτο-πολλαπλασιασμού.



Εικόνα 7. Υψηλή ανάστροφη πόλωση της τάξης των 100-300 V δίνει στα ηλεκτρόνια αρκετή κινητική ενέργεια ώστε να λάβει χώρα το φαινόμενο «χιονοστιβάδας»

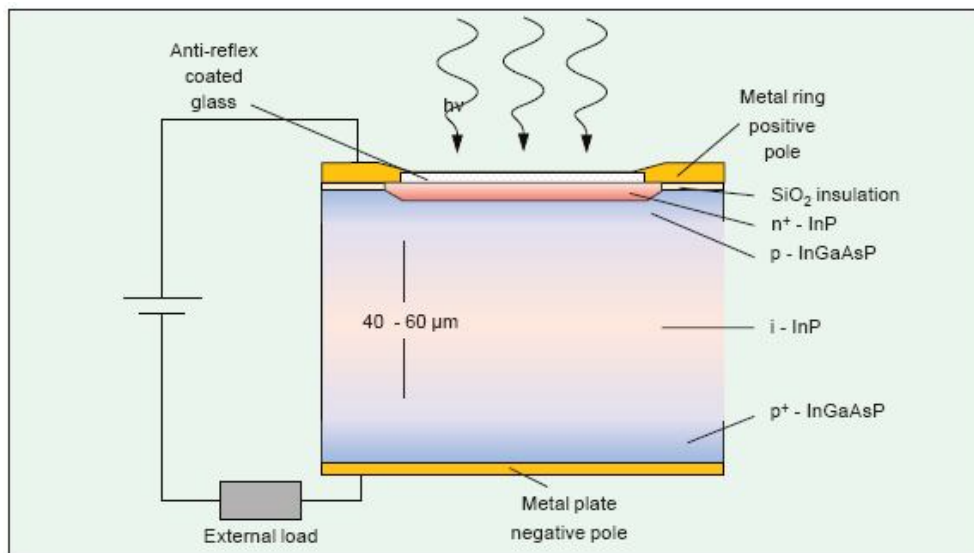
Η ανάστροφη πόλωση καθορίζει το συντελεστή πολλαπλασιασμού, διότι πρέπει να δημιουργηθεί αρκετά ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο ώστε να εμφανιστεί το φαινόμενο «χιονοστιβάδας». Για μια τιμή αρκετών εκατοντάδων Volts (threshold) τα ζεύγη e-h θα δημιουργούνται χωρίς να είναι απαραίτητη η πρόσπτωση φωτός. Για κυκλώματα με APD λοιπόν, πρέπει η τιμή της ανάστροφης πόλωσης να είναι λίγο μικρότερη από το threshold, ώστε να επιτυγχάνεται ανίχνευση και της πιο αδύναμης φωτεινής ακτινοβολίας.



Εικόνα 8. Παρουσίαση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τα διάφορα στρώματα μιας APD διόδου

Το μειονέκτημα ενός κυκλώματος με APD σε σύγκριση με ένα κύκλωμα που περιέχει μια συνηθισμένη PIN διόδο, είναι ότι απαιτεί ανάστροφη πόλωση μεγαλύτερη από 100V. Μια τυπική τιμή ανάστροφης πόλωσης για μια APD διόδο σιλικόνης είναι τα 200V, ενώ για μια InGaAsP PIN διόδο απαιτούνται μόλις 10 με 50V.

Η εικόνα 9 παρουσιάζει μια reach-through avalanche διόδο (RAPD). Στην κορυφή βρίσκεται ένα μεταλλικό δακτυλίδι που αποτελεί τον θετικό πόλο. Κάτω από το μεταλλικό δακτύλιο βρίσκεται ένα δακτυλίδι SiO₂ που χρησιμεύει σαν μονωτής μεταξύ των νοθευμένων υλικών. Τα υπόλοιπα στρώματα φαίνονται στην εικόνα.



Εικόνα 9. Σχεδιασμός μια RAPD διόδου

4. Παράμετροι που επηρεάζουν την ανίχνευση του φωτός σε συστήματα οπτικών ινών

Ο τρόπος ανίχνευσης ενός παλμού φωτός από ένα οπτικό δέκτη εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους :

- Την ένταση του παλμού
- Την παραμόρφωση του παλμού
- Την ευαισθησία του δέκτη

Η ένταση του σήματος σε συνδυασμό με τις πηγές θορύβου μας δίνουν το SNR (signal to noise ratio) του ψηφιακού σήματος. Σε αντίθεση με ένα αναλογικό δέκτη, ένα κύκλωμα αποφασίζει αν το σήμα που έχει ληφθεί είναι «1» ή «0». Το τελικό μέτρο ποιότητας του ψηφιακού σήματος είναι το BER (bit error rate).

4.1. Ένταση του παλμού φωτός

Κατά τη μετάδοση του παλμού φωτός μέσα στην οπτική ίνα, η έντασή του μειώνεται λόγω των εξής παραγόντων :

- Απώλειες εντός της ίνας [dB/km]
- Απώλειες λόγω κολλήσεων [dB]
- Απώλειες λόγω συνδέσεων [dB]

Η ισχύς εξόδου ισούται με την ισχύ εισόδου μειωμένη κατά το άθροισμα όλων των απωλειών που οφείλονται στους παραπάνω παράγοντες. Η ένταση του παλμού θα δίνεται σε W , mW ή μW . Άλλη μια συνηθισμένη μονάδα μέτρησης της έντασης είναι τα dBm.

4.2. Παραμόρφωση του παλμού φωτός

Ο παλμός δεν αλλοιώνεται μόνο εξ' αιτίας της εξασθένησης εντός της ίνας. Κατά τη μετάδοση λαμβάνουν χώρα φαινόμενα όπως η διασπορά που διευρύνει τον παλμό στο πεδίο του χρόνου (διαφορετικά μήκη κύματος που διαδίδονται με διαφορετικές ταχύτητες μέσα στην ίνα). Η διασπορά λοιπόν αποτελεί ακόμα μια πηγή απωλειών.

4.3. Ευαισθησία δέκτη

Η ευαισθησία του δέκτη εξαρτάται από τις εξής παραμέτρους :

- Την κβαντική απόδοση και την απόκριση του δέκτη
- Το θόρυβο που εισάγει ο δέκτης
- Το εύρος ζώνης του δέκτη (bandwidth)

Κβαντική απόδοση (h)

Ένα σημαντικό μέρος της διαδικασίας ανίχνευσης είναι το πόσα φωτόνια δημιουργούν ζεύγη e-h. Αν το πλήθος των ζευγών e-h που δημιουργούνται διαιρεθεί με το πλήθος των φωτονίων που προσπίπτουν στο δέκτη, προκύπτει το μέτρο που ονομάζουμε κβαντική απόδοση. Αν η κβαντική απόδοση ισούται με 0.8, συμπεραίνουμε ότι ανά 10 φωτόνια που προσπίπτουν δημιουργούνται 8 ζεύγη e-h. Κατά τον υπολογισμό του παραπάνω μέτρου, προφανώς δε λαμβάνονται υπόψη τα ζεύγη που προκύπτουν λόγω του φωτοπολλαπλασιασμού που λαμβάνει χώρα σε διόδους τύπου APD.

Απόκριση δέκτη (R)

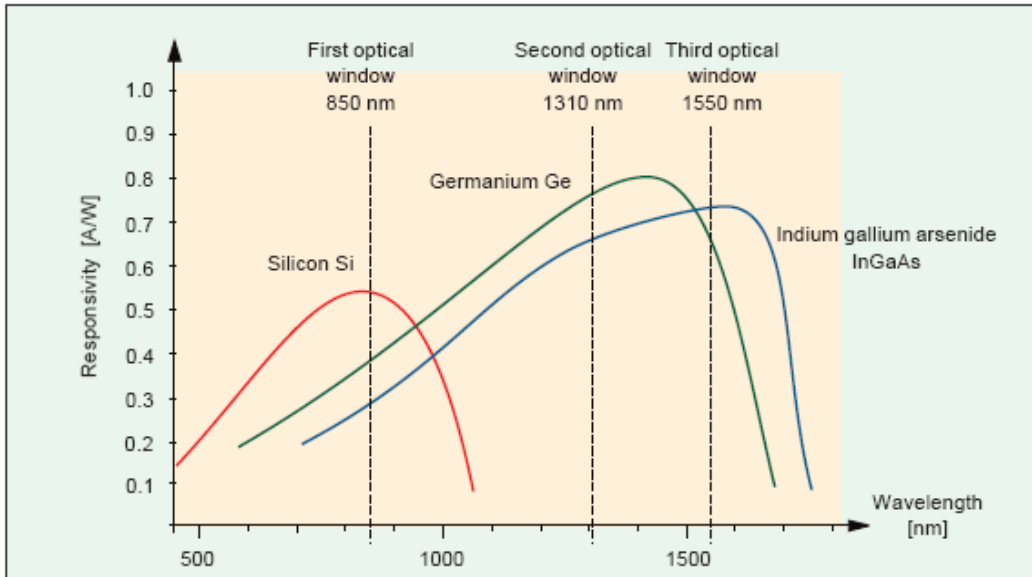
Μετρώντας την ισχύ εξόδου της διόδου και διαιρώντας τη με τη συνολική ισχύ των φωτονίων που προσπίπτουν στην ίδια, προκύπτει το μέτρο που ονομάζουμε απόκριση δέκτη (R). Η απόκριση μετριέται σε amperes/watt (μια PIN δίοδος καλής ποιότητας παρουσιάζει $R=0.7$ A/W). Προσπίπτον φως με ισχύ 20mW προκαλεί ένταση 14mA εντός της διόδου. Μια APD δίοδος παρουσιάζει $R=80$ A/W, σχεδόν 100 φορές μεγαλύτερο από το R της PIN διόδου.

Η απόκριση μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την τιμή της κβαντικής απόδοσης ως εξής :

$$R = \frac{\eta \cdot e \cdot \lambda}{h \cdot c}$$

όπου e είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου, h η σταθερά του Planck και c η ταχύτητα του φωτός. Από τον τύπο φαίνεται ότι η απόκριση είναι συνάρτηση της κβαντικής απόδοσης και του μήκους κύματος.

Η απόκριση εξαρτάται από το μήκος κύματος και το υλικό. Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της απόκρισης, σε συνάρτηση με το μήκος κύματος μετάδοσης για τα τρία πιο συνηθισμένα υλικά κατασκευής διόδων. Η σιλικόνη χρησιμοποιείται για μετάδοση στο πρώτο οπτικό «παράθυρο» (850nm) ενώ το γερμάνιο και το InGaAs χρησιμοποιούνται για μετάδοση στο δεύτερο και τρίτο οπτικό «παράθυρο» (1310 και 1550nm αντίστοιχα).



Εικόνα 10. Η απόκριση μιας φωτοδιόδου εξαρτάται από το μήκος κύματος του φωτός και από το υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή της

4.4. Σύνδεση της οπτικής ίνας στον ανιχνευτή

Όταν μια οπτική ίνα συνδέεται σε ένα ανιχνευτή, θα υπάρξουν απώλειες λόγω μικρής ασυμβατότητας όσον αφορά το αριθμητικό άνοιγμα και τη διάμετρο. Συνήθως επειδή η επιφάνεια του ανιχνευτή είναι αρκετά μεγαλύτερη από την ακτινοβολούσα επιφάνεια της ίνας, αμελούμε τις απώλειες σύνδεσης. Αν όμως η διάμετρος του ανιχνευτή είναι μικρότερη από τη διάμετρο της ίνας, οι απώλειες σε dB δίνονται από τον τύπο :

$$\text{loss}_{\text{diam}} = 10 \log_{10} \left(\frac{\varnothing_{\text{det}}}{\varnothing_{\text{fiber}}} \right)^2$$

επίσης αν το αριθμητικό άνοιγμα του ανιχνευτή είναι μικρότερο από εκείνο της ίνας, οι απώλειες σε dB δίνονται από τον τύπο :

$$\text{loss}_{\text{NA}} = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{NA}_{\text{det}}}{\text{NA}_{\text{fiber}}} \right)^2$$

4.5. Θόρυβος δέκτη

Ο όρος θόρυβος χρησιμοποιείται για να περιγράψουμε το σύνολο των ανεπιθύμητων σημάτων που δυσκολεύουν την ανίχνευση του πραγματικού σήματος σε ένα οπτικό σύστημα επικοινωνιών. Στα οπτικά δίκτυα ο θόρυβος

δημιουργείται λόγω μεταβολών σε ατομικό επίπεδο ενώ στα ηλεκτρικά συστήματα έχει ηλεκτρομαγνητική προέλευση. Στα οπτικά συστήματα υπάρχουν δύο τύποι θορύβου : ο θερμικός και ο κβαντικός.

Θερμικός θόρυβος

Ο θερμικός θόρυβος δημιουργείται από την αλληλεπίδραση των ελεύθερων ηλεκτρονίων και των ιόντων των αγώγιμων υλικών. Σε θερμοκρασία δωματίου, ο θερμικός θόρυβος αποτελεί την κύρια πηγή απωλειών των αντιστάσεων των ηλεκτρικών κυκλωμάτων.

Ο θερμικός θόρυβος, ο οποίος δημιουργεί ηλεκτρική ένταση εντός μιας φωτοδίοδου μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο :

$$i_{\text{tn}}^2 = \frac{4 \cdot k \cdot T \cdot B}{R_L}$$

όπου k είναι η σταθερά του Boltzman, T η απόλυτη τιμή της θερμοκρασίας σε Kelvin, B το εύρος ζώνης του δέκτη και R η αντίσταση του φορτίου.

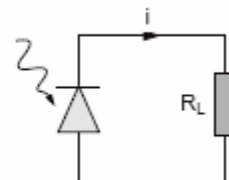
Αριθμητικό παράδειγμα 1

Ας θεωρήσουμε μια φωτοδίοδο με φορτίο 400 Ohm, το εύρος ζώνης είναι 15 MHz και η θερμοκρασία περιβάλλοντος 320 K.

$$i_{\text{tn}}^2 = \frac{4 \cdot k \cdot T \cdot B}{R_L} \Rightarrow$$

$$i_{\text{tn}}^2 = \frac{4 \cdot (1.38 \cdot 10^{-23}) \cdot 320 \cdot (1.5 \cdot 10^7)}{400} = 6.624 \cdot 10^{-16} \text{ [A}^2\text{]}$$

$$i_{\text{tn}} = 25.7 \cdot 10^{-9} \approx 26 \text{ nA}$$



Κβαντικός θόρυβος

Το μεταδιδόμενο φως ακολουθεί τους κανόνες της κβαντικής μηχανικής και η ενέργειά του, δίνεται από τον τύπο $E=hn$. Η ανίχνευση ενός φωτονίου από μια δίοδο εξαρτάται από τα ζεύγη $e-h$ που θα δημιουργηθούν. Το γεγονός αυτό φανερώνει ότι το ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα δε θα αποτελείται από μια συνεχή ροή ηλεκτρονίων. Ο κβαντικός θόρυβος υπολογίζεται από τον εξής τύπο :

$$i_{\text{sn}}^2 = 2 \cdot q \cdot i \cdot B$$

όπου q είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου, i είναι η μέση τιμή της ηλεκτρικής έντασης που δημιουργείται και B είναι το εύρος ζώνης του δέκτη.

Αριθμητικό παράδειγμα 2

Τυπικές τιμές για μια φωτοδίοδο είναι οι ακόλουθες: dark current $i=3nA$ και εύρος ζώνης $B=15MHz$

$$i_{sn}^2 = 2 \cdot q \cdot i \cdot B \Rightarrow$$

$$i_{sn}^2 = 2 \cdot (1.6 \cdot 10^{-19}) (3 \cdot 10^{-9}) (1.5 \cdot 10^7)$$

$$i_{sn}^2 = 14.4 \cdot 10^{-21}$$

$$i_{sn} = 12 \cdot 10^{-11} = 120 \text{ pA}$$

Dark current

Το dark current είναι ηλεκτρική ένταση που δημιουργείται από ζεύγη e-h που εμφανίζονται χωρίς να έχει προηγηθεί πρόσπτωση φωτός στη δίοδο. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο ότι τα μόρια και τα άτομα βρίσκονται σε μια διαρκή κίνηση, η οποία σε αρκετές περιπτώσεις μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την ελευθέρωση ενός αριθμού ηλεκτρονίων. Το dark current εξαρτάται από τη θερμοκρασία και αυξάνεται κατά 10% για αύξηση θερμοκρασίας κατά 1° C.

4.6. Ενσωματωμένος ενισχυτής σε οπτικό ανιχνευτή

Μια μέθοδος για τη μείωση του θορύβου και των άλλων παραγόντων που ελαττώνουν την απόδοση μιας φωτοδίοδου, είναι να της ενσωματώσουμε ένα ειδικά σχεδιασμένο ενισχυτή. Ο παράγοντας ενίσχυσης τέτοιων ενισχυτών κυμαίνεται από 40 μέχρι 50 V/W.

4.7. Εύρος ζώνης

Το εύρος ζώνης μιας δίοδου εξαρτάται εξ' ολοκλήρου από το πόσο γρήγορα ένα προσπίπτον φωτόνιο δημιουργεί ηλεκτρική ένταση εντός της δίοδου. Το μέγεθος αυτό ονομάζεται rise time και υπολογίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να περάσουμε από το 10% στο 90% του amplitude. Το εύρος ζώνης περιορίζεται κυρίως από τρεις παράγοντες :

- Το χρόνο διάχυσης για τα κύματα έντασης που δημιουργούνται στις p-n περιοχές
- Το χρόνο που χρειάζονται τα κύματα έντασης για να διαπεράσουν την περιοχή αραίωσης
- Τη χωρητικότητα της p-n σύνδεσης σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά της δίοδου και την αντίσταση του φορτίου

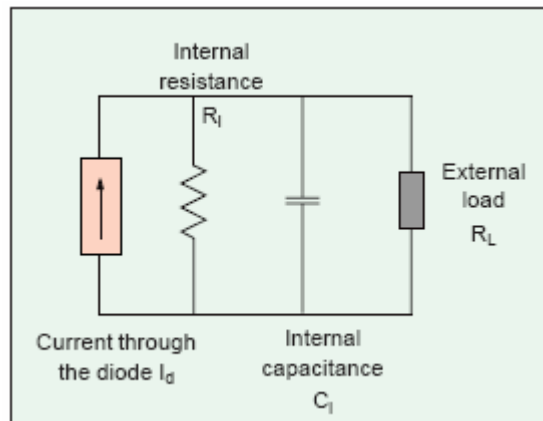
Το εύρος ζώνης για ένα φίλτρο πρώτης τάξης μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την παράμετρο rise time, από τον παρακάτω τύπο :

$$B = \frac{0.35}{t_{rt}}$$

Το εύρος ζώνης και η παράμετρος rise time μπορούν να υπολογιστούν επίσης χρησιμοποιώντας τους επόμενους τύπους, όπου το R_i είναι η εσωτερική αντίσταση της διόδου, C_i η εσωτερική χωρητικότητα της διόδου και R_L η αντίσταση του φορτίου.

$$B = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_L \cdot C_i}$$

$$t_{rt} = 2.19 \cdot R_L \cdot C_i$$



Εικόνα 11. Μοντελοποίηση μιας PIN διόδου με χρήση της εσωτερικής αντίστασης και χωρητικότητας της

Ανάστροφη πόλωση

Για να ανιχνεύσουν φως οι διόδου απαιτείται να εφαρμοστεί στα άκρα τους ανάστροφη πόλωση. Μια PIN διόδος χρειάζεται πόλωση της τάξης των 5V ενώ μια APD χρειάζεται αρκετές εκατοντάδες Volts. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι για APD διόδους απαιτείται εξωτερικό τροφοδοτικό υψηλής τάσης.

4.8. SNR και BER (Signal to noise ratio, Bit error rate)

Στα περισσότερα συστήματα, η ποιότητα του σήματος μετριέται με την παράμετρο SNR. Το SNR ισούται με τη μέση τιμή του σήματος διαιρεμένη με τη μέση τιμή του θορύβου.

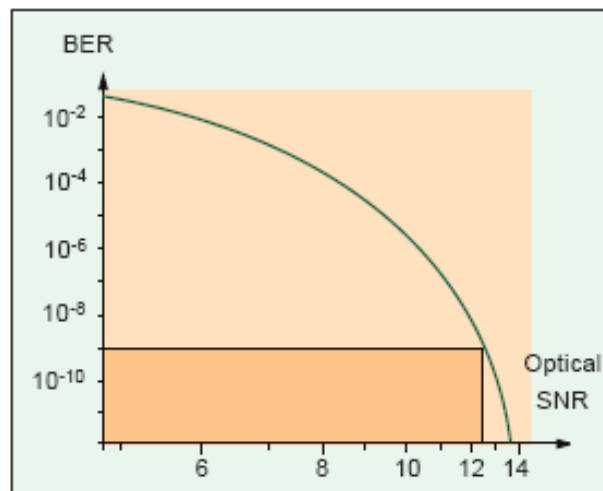
$$\text{SNR} = \frac{S_{\text{eff}}}{N_{\text{eff}}}$$

$$\text{SNR} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S_{\text{eff}}}{N_{\text{eff}}} \right)$$

Υψηλή τιμή SNR σημαίνει ότι το σήμα δεν επηρεάζεται πολύ από το θόρυβο. Διαφορετικές εφαρμογές απαιτούν και διαφορετική τιμή SNR. Ένα κανάλι για μετάδοση φωνής δεν απαιτεί τόσο υψηλό SNR όσο αυτό που απαιτείται για ένα κανάλι μετάδοσης τηλεοπτικού σήματος. Σε μια οπτική ζεύξη, όσο πιο μακριά βρίσκεται ο δέκτης από τον πομπό τόσο μικρότερο είναι το SNR. Η ένταση του σήματος μικραίνει αλλά ο θόρυβος που υπεισέρχεται από την ίδια την ίνα, τις κολλήσεις και τις συνδέσεις παραμένει σταθερός.

BER

Σε ψηφιακά συστήματα, το SNR αντικαθίσταται από μια άλλη παράμετρο, το BER. Το BER είναι ο αριθμός των λανθασμένων bits ανά ένα αριθμό σταλμένων bits. Για συστήματα καλής ποιότητας απαιτείται τιμή BER 10^{-9} μέχρι 10^{-12} . Όπως συμβαίνει και με το SNR για διαφορετικούς τύπους μετάδοσης απαιτούνται διαφορετικές τιμές BER. Γενικά όταν η τιμή του SNR είναι αρκετά μεγάλη, η τιμή του BER είναι αρκετά μικρή. Για ψηφιακές μεταδόσεις, όπως δίκτυα υπολογιστών, χρησιμοποιούνται ειδικοί αλγόριθμοι για τη διόρθωση των λαθών.



Εικόνα 12. Σχέση μεταξύ BER και οπτικού SNR

Περίληψη

- Οι πιο συνηθισμένοι τύποι διόδων για τις οπτικές επικοινωνίες είναι οι PIN και APD δίοδοι
- Η χρήση PIN διόδων είναι πιο οικονομική από τη χρήση διόδων APD, αφού στη δεύτερη περίπτωση απαιτείται εξωτερικό κύκλωμα τροφοδότησης υψηλής τάσης

- Η APD δίοδος μπορεί να πετύχει 100 φορές περισσότερη ενίσχυση από την PIN δίοδο, λόγω του φαινομένου του φωτο-πολλαπλασιασμού που λαμβάνει χώρα. Το γεγονός αυτό μπορεί να αυξήσει τη δυναμικότητα της ζεύξης κατά 20 dB
- Ο θερμικός και κβαντικός θόρυβος μειώνουν τη δυναμική και την ευαισθησία του κυκλώματος
- Οι παράμετροι SNR και BER αποτελούν δείκτες της ποιότητας του συστήματος
- Το εύρος ζώνης μιας διόδου πολλές φορές καθορίζεται από το RC φίλτρο που δημιουργείται από την αντίσταση του φορτίου και την εσωτερική χωρητικότητα της διόδου
- Μπορούμε να ενσωματώσουμε ενισχυτές σε κυκλώματα διόδων για να αυξήσουμε την απόδοση του δέκτη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΚΟΛΛΗΣΗ ΚΑΙ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ (OPTICAL FIBER SPLICING)

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.

1. Κολλήσεις και connectors

Όπως και στα συνηθισμένα δίκτυα χάλκινων καλωδίων, έτσι και στα οπτικά δίκτυα χρησιμοποιούνται κολλήσεις και 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

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.

Απαιτήσεις όσον αφορά τις κολλήσεις και τους connectors

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 κόλλησης 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.

2. Απώλειες σε μια οπτική ζεύξη

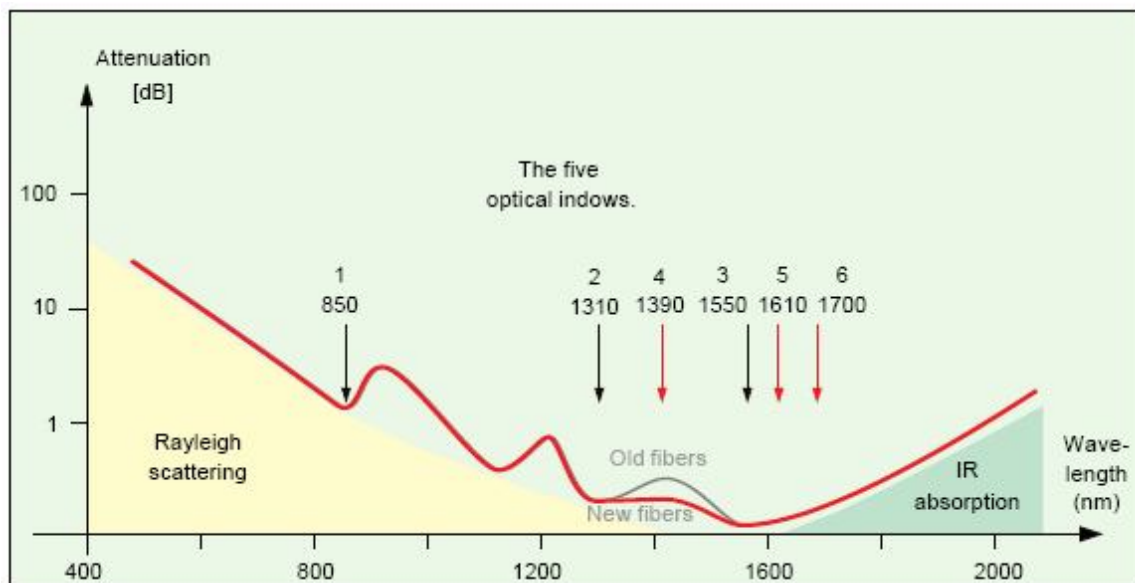
Το κεφάλαιο αυτό ασχολείται μόνο με τις απώλειες που παρουσιάζονται στις κολλήσεις. Οι απώλειες αυτές χωρίζονται σε δυο κατηγορίες :

- Απώλειες που οφείλονται στην ίνα
- Απώλειες που οφείλονται στα υλικά των κολλήσεων/connectors

2.1. Απώλειες που οφείλονται στην ίνα

Κατά την κατασκευή οπτικών ινών, επιτρέπονται μικρές αποκλίσεις στις τιμές των παραμέτρων τους, αφού είναι σχεδόν αδύνατο να φτιαχτούν δυο πανομοιότυπες ίνες. Οι αποκλίσεις αυτές είναι της τάξης των 10^{-3} mm, ακόμα όμως και τόσο μικρές αποκλίσεις συμβάλουν στη δημιουργία απωλειών κατά την (fusion) κόλληση των ινών. Μια ιδανική ίνα θα παρουσιάζει εξασθένηση κοντά στα 0.16 dB/km θεωρητικά (1550 nm). Στην πραγματικότητα η εξασθένηση μιας ίνας πολύ καλής ποιότητας πλησιάζει τα 0.20 dB/km στα 1550 nm (λόγω της σκέδασης Rayleigh και της IR απορρόφησης). Οι απώλειες που οφείλονται στην ίνα προκαλούνται από τους παρακάτω παράγοντες :

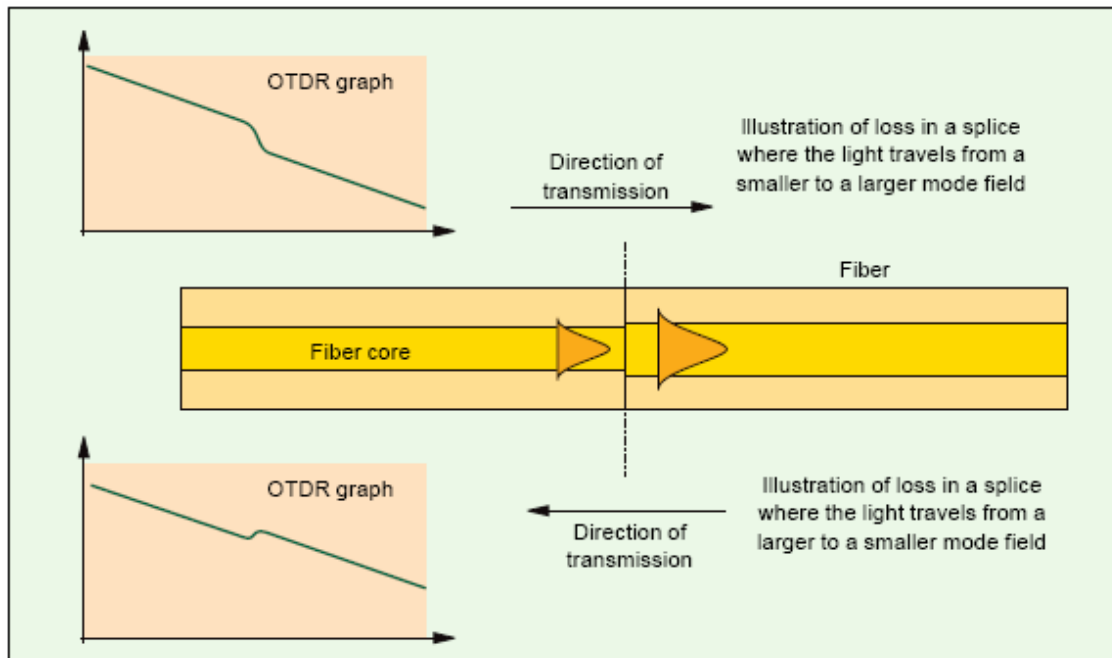
- Διαφορές στον τρόπο πεδίου
- Διαφορετικά αριθμητικά ανοίγματα (NA)
- Διαφορετικές διαμέτροι πυρήνα
- Διαφορετικές διαμέτροι μανδύα
- Μη-κυκλικότητα πυρήνα ή/και μανδύα
- Μη-ομοκεντρικότητα πυρήνα/μανδύα



Εικόνα 1. Γραφική παράσταση της εξασθένησης μιας ίνας από σιλικόνη, σε συνάρτηση με το μήκος κύματος μετάδοσης

2.1.1. Διαφορές στον τρόπο πεδίου

Αν η διάμετρος του πυρήνα της ίνας μετάδοσης είναι διαφορετική από εκείνη της ίνας του δέκτη, ο τρόπος πεδίου θα γίνει πιο ευρύς ή πιο στενός. Το γεγονός αυτό θα προκαλέσει εξασθένηση του φωτός [πολλές φορές διακρίνεται σαν ενίσχυση του σήματος κατά τη μια κατεύθυνση, όταν παίρνουμε μετρήσεις με ένα OTDR (Optical Time Domain Reflectometer)].

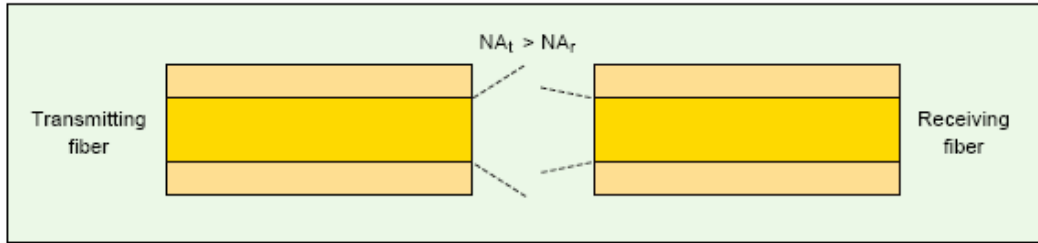


Εικόνα 2. Οι μετρήσεις των απωλειών σε ένα οπτικό δίκτυο – σε κολλήσεις μεταξύ ινών με διαφορετικούς τρόπους πεδίου – μπορεί να έχουν απροσδόκητες τιμές

2.1.2. Διαφορετικά αριθμητικά ανοίγματα (NA)

Παρουσιάζονται απώλειες όταν το αριθμητικό άνοιγμα της ίνας μετάδοσης είναι μεγαλύτερο από εκείνο της ίνας του δέκτη. Μέρος του φωτός που διαδίδεται θα χαθεί στο μανδύα της ίνας του δέκτη. Για την παραπάνω περίπτωση ($NA_t > NA_r$), οι απώλειες δίνονται από τον επόμενο τύπο :

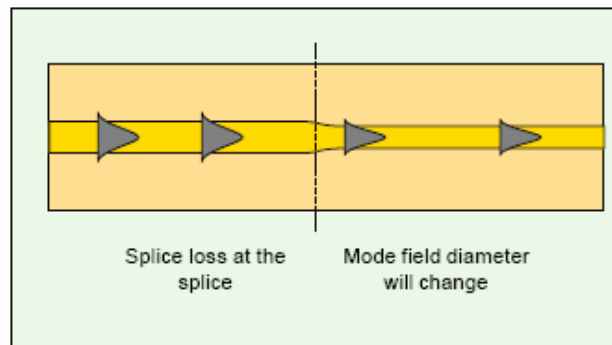
$$\text{Attenuation}_{NA} = 10 \log_{10} \left(\frac{NA_r}{NA_t} \right)^2$$



Εικόνα 3. Παρουσιάζονται απώλειες όταν $NA_t > NA_r$

2.1.3. Διαφορετικές διαμέτροι πυρήνα

Όταν η διάμετρος της ίνας μετάδοσης είναι μεγαλύτερη από εκείνη της ίνας του δέκτη, παρουσιάζονται απώλειες, αφού μέρος του φωτός μεταφέρεται στο μανδύα της ίνας του δέκτη. Οι διαφορετικές διαμέτροι πυρήνα επηρεάζουν και τη διάμετρο του τρόπου πεδίου.



Εικόνα 4. Όταν συνδέονται ίνες με διαφορετικές διαμέτρους πυρήνα, παρουσιάζονται απώλειες και αλλάζει η διάμετρος του τρόπου πεδίου του παλμού φωτός

Οι απώλειες λόγω της συνάντησης σε μια κόλληση δυο ιών με διαφορετικές διαμέτρους πυρήνα δίνονται από τον παρακάτω τύπο :

$$\text{Attenuation}_{\circ} (\text{multimode}) = -10 \log_{10} \left(\frac{\varnothing_r}{\varnothing_t} \right)^2$$

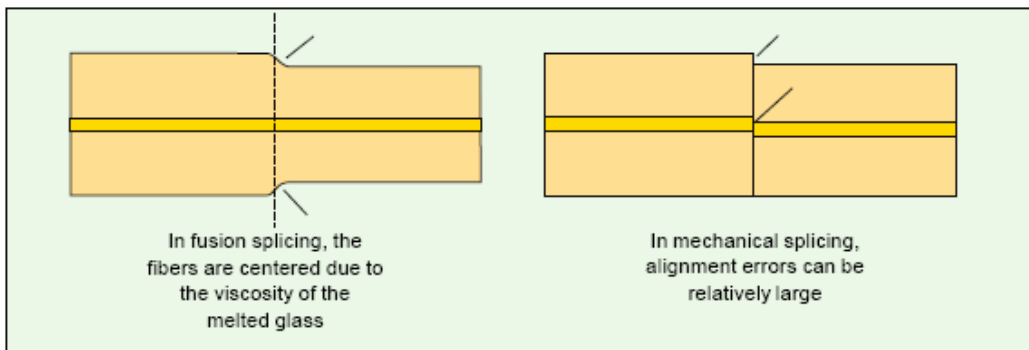
Όπου \varnothing_r και \varnothing_t είναι οι διαμέτροι πυρήνα των ιών που συνδέονται

$$\text{Attenuation}_{\circ} (\text{single-mode}) = -20 \log \left(\frac{2 w_1 w_2}{w_1^2 + w_2^2} \right)$$

Όπου w_1 και w_2 είναι οι διαμέτροι των τρόπων πεδίου των ιών που συνδέονται

2.1.4. Διαφορετικές διαμέτροι μανδύα

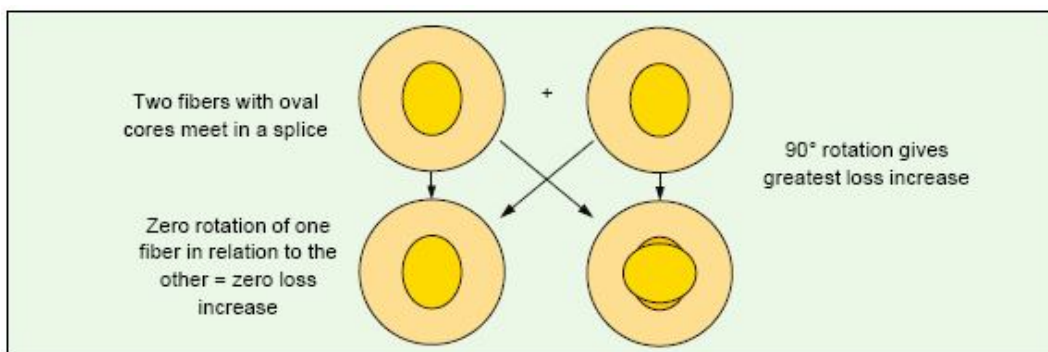
Στη βιομηχανία παραγωγής ινών, η ανοχή (σύμφωνα με την ITU) για τη διάμετρο του μανδύα μιας ίνας είναι $\pm 2\mu\text{m}$. Αυτό σημαίνει ότι μια ίνα με διάμετρο 125 μm μπορεί να κολληθεί με μια άλλη διαμέτρου 127 μm . Με τη μέθοδο κόλλησης fusion οι ίνες ευθυγραμμίζονται αρκετά καλά. Για μηχανικές και για ημι-μόνιμες κολλήσεις, διαφορά διαμέτρων όπως η παραπάνω μπορεί να προκαλέσει δραματική αύξηση των απωλειών (ειδικά στις μονότροπες ίνες). Όσο μεγαλώνει η διαφορά μεταξύ των διαμέτρων τόσο αυξάνονται και οι απώλειες. Με ανοχή $125\pm 2\mu\text{m}$ οι μέγιστη απώλεια είναι 1.4 dB. Αν η ανοχή μειωθεί στα $125\pm 1\mu\text{m}$ η μέγιστη απώλεια είναι περίπου 0.7 dB. Όταν συνδέονται καλώδια που περιέχουν μονότροπες ίνες με connectors, πραγματοποιούνται αρκετά τεστ ευθυγράμμισης ώστε να μειωθούν όσο το δυνατόν γίνεται οι απώλειες.



Εικόνα 5. Η διαφοράς στις διαμέτρους μανδύα προκαλούν μεγαλύτερες απώλειες στις μηχανικές κολλήσεις παρά στις fusion

2.1.5. Μη-κυκλικότητα πυρήνα ή/και μανδύα

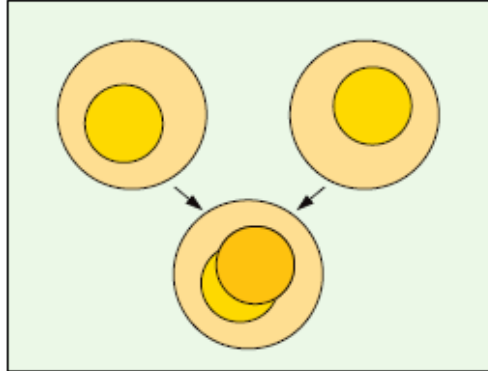
Η μη κυκλικότητα του πυρήνα και του μανδύα έχουν σχεδόν την ίδια επίδραση με τις διαφορές στις διαμέτρους πυρήνα. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές σε ημι-μόνιμες κολλήσεις. Η παρακάτω εικόνα είναι άκρως κατατοπιστική.



Εικόνα 6. Η μη κυκλικότητα του πυρήνα επηρεάζει τις απώλειες σε μια κόλληση

2.1.6. Μη-ομοκεντρικότητα πυρήνα/μανδύα

Ο πυρήνας μιας ίνας πρέπει να βρίσκεται ακριβώς στο κέντρο της. Η μη ομοκεντρικότητα αυξάνει τις απώλειες σε μια κόλληση.



Εικόνα 7. Παρουσίαση της κόλλησης δυο ινών, των οποίων οι πυρήνες δεν είναι ομόκεντροι

Αριθμητικό παράδειγμα 1

Ας θεωρήσουμε δυο πολύτροπες ίνες με διαμέτρους $62.5 \mu\text{m}$ (ίνα μετάδοσης) και $50 \mu\text{m}$ (ίνα δέκτη). Τα αριθμητικά τους ανοίγματα NA είναι αντίστοιχα 0.25 και 0.15 .

Οι απώλειες λόγω της διαφοράς στα αριθμητικά ανοίγματα υπολογίζονται :

$$\begin{aligned} \text{Attenuation}_{NA} &= 10 \log_{10} \left(\frac{NA_r}{NA_t} \right)^2 = 10 \log_{10} \left(\frac{0.15}{0.25} \right)^2 = \\ &= 10 \log_{10} (0.6)^2 = 10 \log_{10} (0.36) = -4.43 \text{ dB} \end{aligned}$$

Οι απώλειες λόγω της διαφοράς στις διαμέτρους υπολογίζονται :

$$\begin{aligned} \text{Attenuation}_{\varnothing} &= 10 \log_{10} \left(\frac{\varnothing_r}{\varnothing_t} \right)^2 = 10 \log_{10} \left(\frac{50}{62.5} \right)^2 = \\ &= 10 \log_{10} (0.8)^2 = 10 \log_{10} (0.64) = -1.93 \text{ dB} \end{aligned}$$

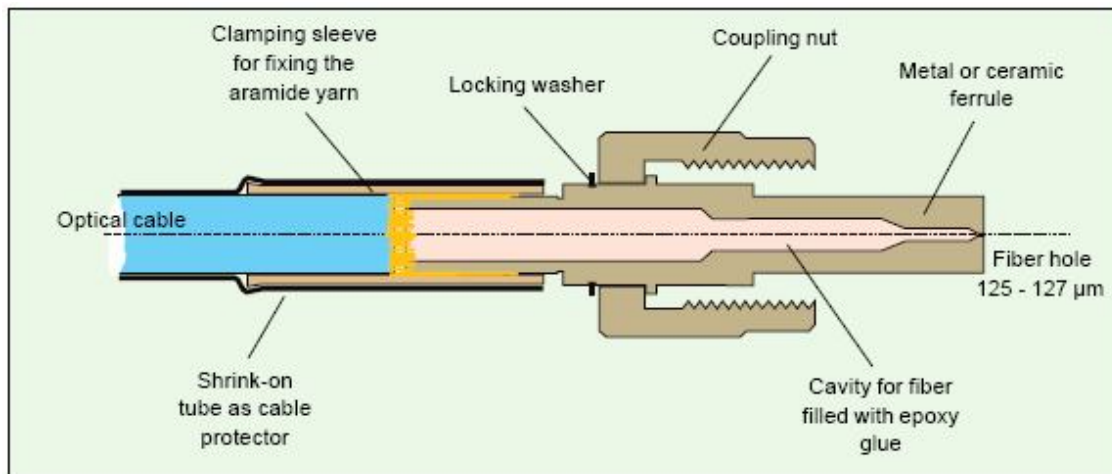
Οι συνολικές απώλειες στην κόλληση των δυο ινών, όταν μεταδίδουμε από την πρώτη προς τη δεύτερη ίνα είναι περίπου 6.4 dB

2.2. Απώλειες που οφείλονται σε connectors/κολλήσεις

Όταν δυο ίνες συνδέονται, η κόλληση θα συνεισφέρει κατά κάποιο τρόπο στην αύξηση της εξασθένισης. Η αύξηση της εξασθένισης λόγω κολλήσεων μειώνεται στο ελάχιστο, όταν οι κολλήσεις πραγματοποιούνται με τη μέθοδο fusion, καθαρίζονται προσεκτικά και κόβονται με ακρίβεια. Σύγχρονα κολλητήρια όπως το Ericsson FSU 975, πετυχαίνουν γωνία κοπής 90° και εξαιρετικό καθαρισμό της ίνας πριν την κόλληση. Αν όλες οι παραπάνω παράμετροι είναι τέλειες τότε μια κόλληση fusion δεν εισάγει περαιτέρω εξασθένιση στο σύστημα. Οι παρακάτω παράγοντες απωλειών που οφείλονται σε connectors/κολλήσεις αναφέρονται κυρίως σε ημι-μόνιμες και μηχανικές κολλήσεις (και λιγότερο σε fusion κολλήσεις) :

- Μη-ομοαξονικότητα
- Διάκενο
- Γωνιακή απόκλιση
- Καθαρότητα επιφάνειας κόλλησης (μόνο σε ημι-μόνιμες κολλήσεις)

Για να διευκολύνουμε την κατανόηση των παραπάνω παραγόντων απωλειών παρουσιάζονται στην επόμενη εικόνα τα βασικά μέρη ενός connector.



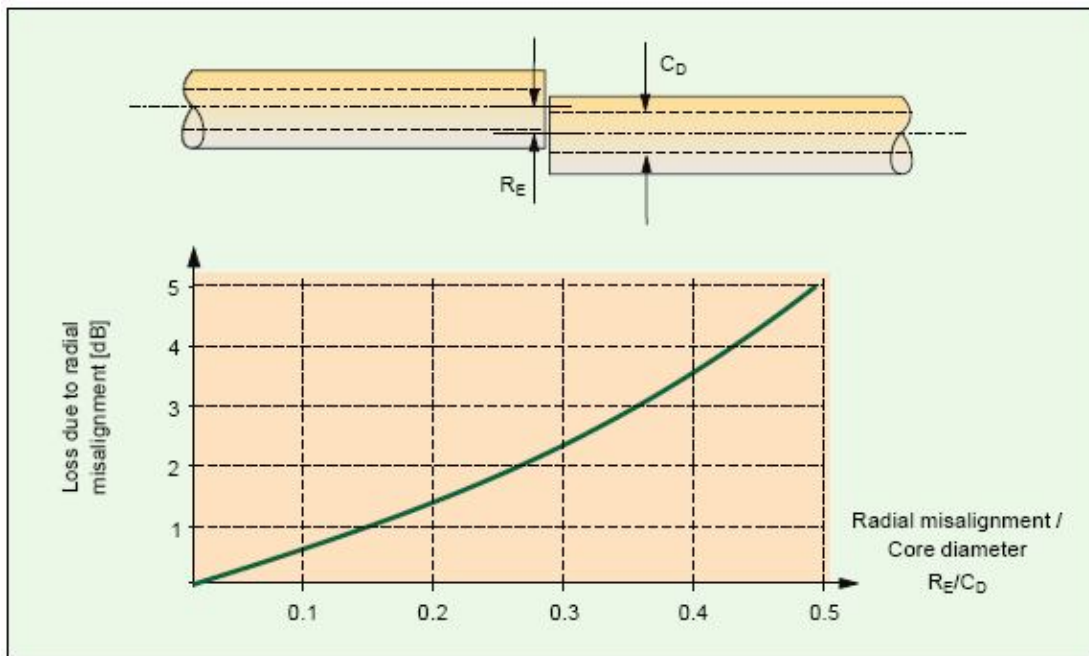
Εικόνα 8. Βασικά μέρη ενός SMA connector

2.2.1. Μη-ομοαξονικότητα

Ένας connector πρέπει να κατασκευάζεται με μεγάλη ακρίβεια : η οπή από την οποία θα περάσει η ίνα πρέπει να βρίσκεται ακριβώς στο κέντρο του συνεκτικού δακτυλίου (ferrule). Η οπή αυτή θα πρέπει να έχει την ίδια ακριβώς διάμετρο με την ίνα και ο συνεκτικός δακτύλιος θα πρέπει να έχει την ίδια διάμετρο με την υποδοχή που θα τοποθετηθεί. Η ακρίβεια πρέπει να είναι της τάξης των 1-2 μm . Για να μην υπάρχουν διαφορές μεταξύ της ίνας και της παραπάνω οπής, κάθε connector θα πρέπει να ελέγχεται σε σχέση με την ίνα που θα χρησιμοποιηθεί. Ο

έλεγχος αυτός είναι αρκετά χρονοβόρος αλλά άκρως απαραίτητος. Η ακτινική απόκλιση R_E εκφράζεται σε συνάρτηση με τη διάμετρο του πυρήνα της ίνας C_D .

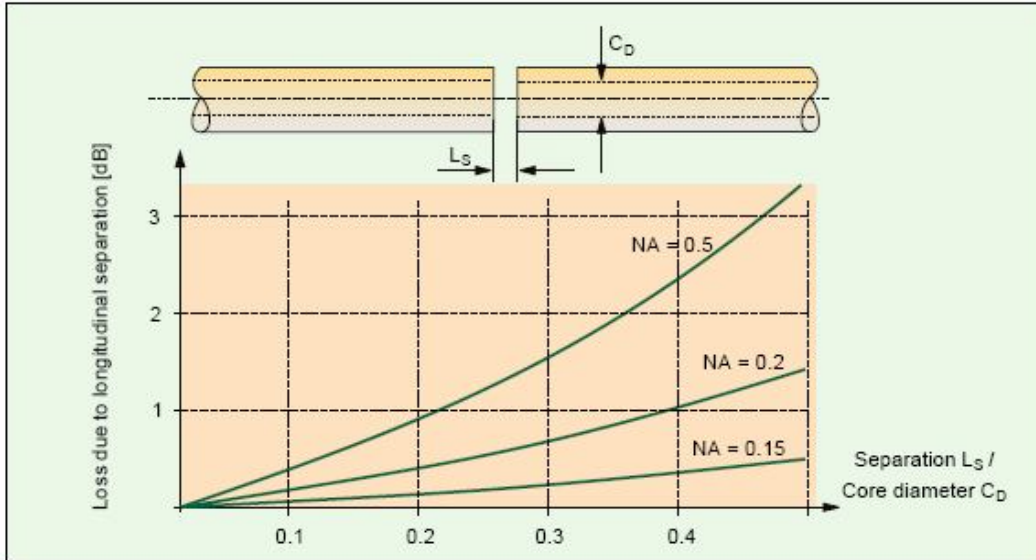
Από την επόμενη εικόνα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι 10% μη-ομοκεντρικότητα προκαλεί σχεδόν 0.5 dB απώλεια. Για μια μονότροπη ίνα 10% μη-ομοκεντρικότητα αντιστοιχεί σε 1 μm γεγονός που σημαίνει ότι απαιτείται ακρίβεια 0.5 μm για κάθε connector. Μια κόλληση μεταξύ πολύτροπων ινών 62.5/125 μm πρέπει να έχει ακρίβεια $\pm 3 \mu\text{m}$ για να μην υπερβαίνουν οι απώλειες τα 0.5 dB.



Εικόνα 9. Γραφική παράσταση των απωλειών σε έναν connector με μη-ομοκεντρικότητα μεταξύ των δυο ινών

2.2.2. Διάκενο

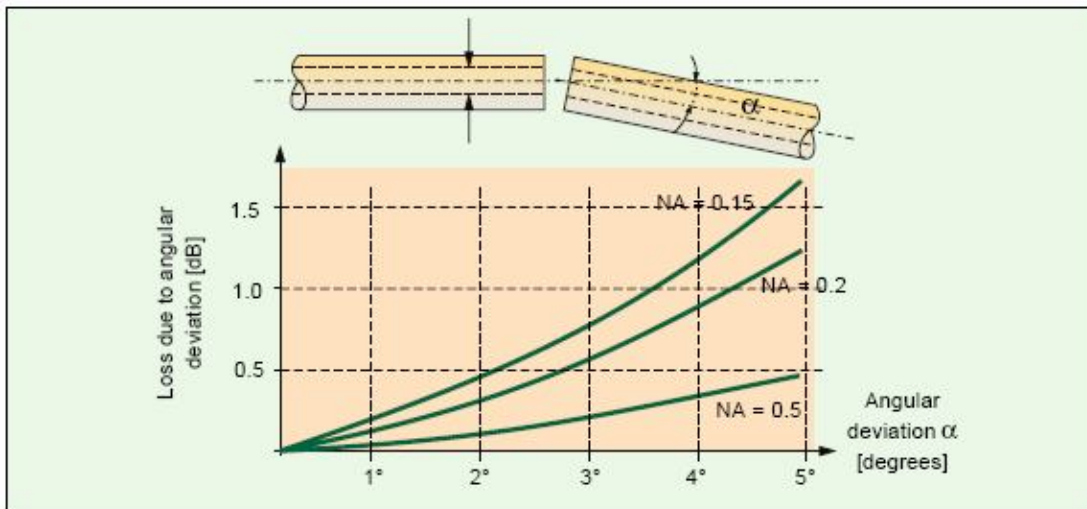
Συνήθως, το διάκενο μεταξύ των δυο τελειωμάτων των ινών είναι περίπου 1 με 2 μm . Η αύξηση των απωλειών σχετίζεται άμεσα με το κλάσμα του διακένου L_s προς τη διάμετρο του πυρήνα C_D και με το αριθμητικό άνοιγμα της ίνας. Αύξηση του NA για σταθερό διάκενο έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών. Οι σύγχρονοι connectors περιέχουν κάποια μορφή ελατηρίου στον συνεκτικό δακτύλιο, έτσι ώστε οι ίνες να συνταιριάζονται άψογα μεταξύ τους, χωρίς να υπάρχει κίνδυνος να υποστούν ζημιές. Το διάκενο επίσης αυξάνει την ανάκλαση Fresnel στην επιφάνεια διασύνδεσης. Η ανάκλαση αυτή είναι της τάξης των -14 dB αν υπάρχει διάκενο αέρα μεταξύ των δυο τελειωμάτων. Χρησιμοποιώντας έλαια με δείκτη διάθλασης πολύ κοντά σε εκείνο των τελειωμάτων των ινών, για να γεμίσουμε το διάκενο, η ανάκλαση Fresnel μειώνεται δραματικά.



Εικόνα 10. Γραφική παράσταση των απωλειών που οφείλονται στο διάκενο

2.2.3. Γωνιακή απόκλιση

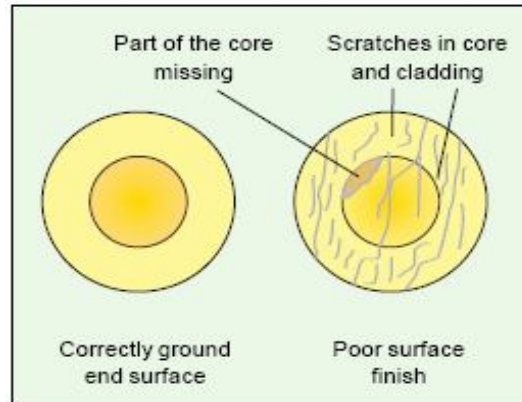
Η γωνιακή απόκλιση μεταξύ των δυο ινών που πρόκειται να συνδεθούν, αποτελεί μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους της διαδικασίας κόλλησης. Μετά την κοπή και τον καθαρισμό του τελειώματος της ίνας, πρέπει να σχηματίζεται γωνία 90° ως προς τον κεντρικό άξονά της. Όσο αυξάνεται η γωνιακή απόκλιση από τις 90° αυξάνονται και οι απώλειες. Είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε ότι σχετικά μικρό NA αυξάνει τις απώλειες που οφείλονται στη γωνιακή απόκλιση.



Εικόνα 11. Γραφική παράσταση των απωλειών που οφείλονται στη γωνιακή απόκλιση μεταξύ των τελειωμάτων των ινών

2.2.4. Καθαρότητα επιφάνειας κόλλησης

Το πρώτο βήμα στη διαδικασία καθαρισμού της επιφάνειας κόλλησης είναι να απομακρυνθούν όλα τα υπολείμματα κόλλας και να δοθεί στο το τελικό του σχήμα. Στη συνέχεια η επιφάνεια γυαλίζεται ώστε να μην υπάρχουν μικρές γρατσουνιές. Αν παραμείνουν μικρές ατέλειες στην επιφάνεια μέρος του διαδιδόμενου φωτός θα διασκορπίζεται, με αποτέλεσμα να μη φτάνει στο συνεκτικό δακτύλιο και να αυξάνονται οι απώλειες.



Εικόνα 12. Όταν η επιφάνεια δεν έχει καθαριστεί άριστα παρουσιάζονται απώλειες στην κόλληση

2.3. Άλλα αίτια απωλειών κόλλησης

Αν και συνιστάται να χρησιμοποιούνται πανομοιότυπες ίνες για τις κολλήσεις, πολλές φορές είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν ίνες από διαφορετικό κατασκευαστή, διαφορετικού τύπου ακόμα και διαφορετικού μεγέθους. Συνήθως αλλαγές τέτοιου τύπου έχουν καταστρεπτικές συνέπειες για το τελικό αποτέλεσμα. Σε περίπτωση τέτοιων αλλαγών θα πρέπει να προσέχουμε παράγοντες όπως το NA και η διάμετρος πυρήνα/μανδύα να διαφέρουν το λιγότερο δυνατό.

2.4. Κοπή ίνας

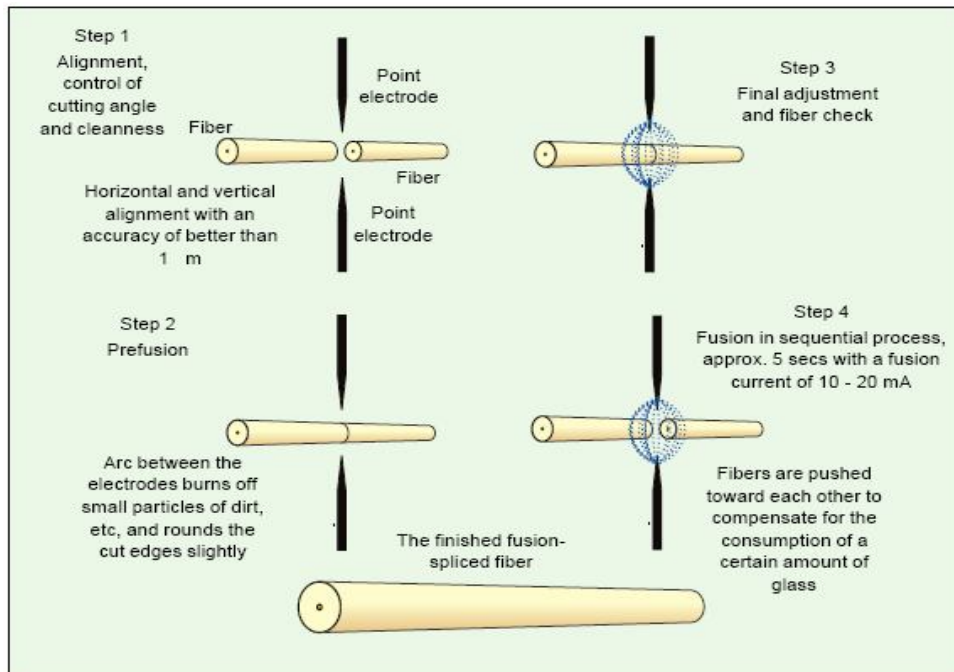
Μια ίνα για να κολληθεί πρέπει πρώτα να προετοιμαστεί κατάλληλα. Αρχικά αφαιρείται κάθε πρωτεύον επίστρωμα με ειδικά εργαλεία γύμνωσης. Στη συνέχεια η ίνα «πλένεται» με καθαρή αλκοόλη ή ισοπροπανόλη και τελικά κόβεται. Το τελείωμα της ίνας όπως αναφέραμε και παραπάνω, πρέπει να σχηματίζει γωνία 90° με τον κεντρικό άξονα. Τα σύγχρονα κολλητήρια έχουν ενσωματωμένο σύστημα για τη μέτρηση της γωνίας κοπής. Αποκλίσεις που ξεπερνούν την τιμή 1° δεν επιτρέπονται.



Εικόνα 13. Η ποιότητα του κόφτη που χρησιμοποιείται μπορεί συχνά να προσδιορίσει την ποιότητα μιας κόλλησης. Ένας κόφτης οπτικών ινών καλής ποιότητας, κόβει την οπτική ίνα υπό γωνία 90° χωρίς να δημιουργεί μικρο-ατέλειες. Οι παραπάνω κόφτες κατασκευάζονται από τις εταιρίες Sumitomo (αριστερά) και Ericsson (δεξιά). Ο πρώτος κόφτης χρησιμοποιείται και για κοπή κορδελών ινών

3. 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 τες τη μια προς την άλλη, συνδέονται δημιουργώντας μια κόλληση με πολύ μικρή απώλεια (< 0.08dB).



Εικόνα 14. Απλοποιημένη αναπαράσταση των βασικότερων βημάτων της μεθόδου Fusion

3.1. Διαδικασία Fusion κόλλησης

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 συγκόλλησης των δύο ινών το σημείο κόλλησης ασφαρίζεται με τη χρήση θερμο-συστελλόμενων σωλήνων (περιέχουν ενσωματωμένο κεραμικό ή μεταλλικό μέρος).



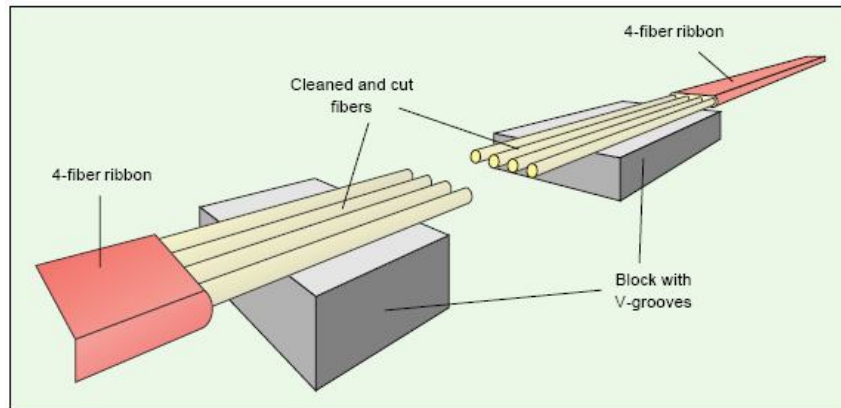
Εικόνα 15. Δυο εικόνες ηλεκτρονικής σάρωσης. Η εικόνα στα αριστερά έχει ληφθεί κατά τη διάρκεια της fusion κόλλησης μιας ίνας, ενώ η εικόνα στα δεξιά έχει ληφθεί κατά την αντίστοιχη διαδικασία για μια κορδέλα 12 ινών. Ο πυρήνας παρουσιάζεται ως μια φωτεινή περιοχή στο μέσο της ίνας.

3.2. 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 μικρο-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. Είναι σημαντικό να

παρατηρήσουμε ότι κατά το λιώσιμο των ινών, η θερμοκρασία πρέπει να είναι ίδια παντού ώστε να έχουμε ομοιόμορφες κολλήσεις.

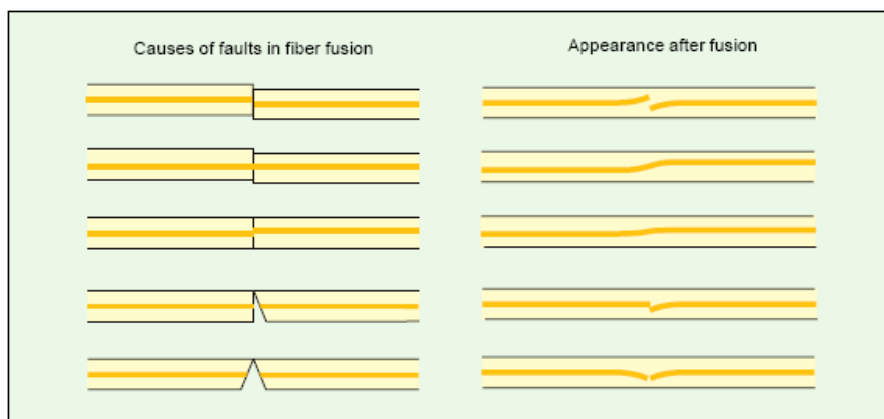
Κατά τη διάρκεια των κολλήσεων λαμβάνονται εικόνες ηλεκτρονικής σάρωσης, ώστε να είναι ορατή η ποιότητα των κολλήσεων (όπως συμβαίνει και κατά την κόλληση μιας μόνο ίνας). Τέλος οι κολλήσεις ασφαλιζονται με ειδικά θερμοσυστελλόμενα μέλη.



Εικόνα 16. Για την ευθυγράμμιση των ινών μιας κορδέλας χρησιμοποιείται «πίνακας» V-groove

3.3. Ανάλυση ηλεκτρονικής εικόνας σάρωσης

Οι ηλεκτρονικές εικόνες που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια της fusion κόλλησης αναλύονται με μαθηματικά μοντέλα. Όταν η ίνα θερμαίνεται ο πυρήνας γίνεται ορατός (παρακάτω εικόνα), γεγονός που μας επιτρέπει να διακρίνουμε την ποιότητα της κόλλησης με απλή παρατήρηση. Η ανάλυση με μαθηματικά μοντέλα δίνει μια καλύτερη εικόνα όσον αφορά την ποιότητα της κόλλησης. Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει διάφορα προβλήματα που μπορεί να δημιουργηθούν κατά τη διαδικασία Fusion splicing. Όλα τα παρακάτω προβλήματα αυξάνουν δραματικά τις απώλειες στην κόλληση.

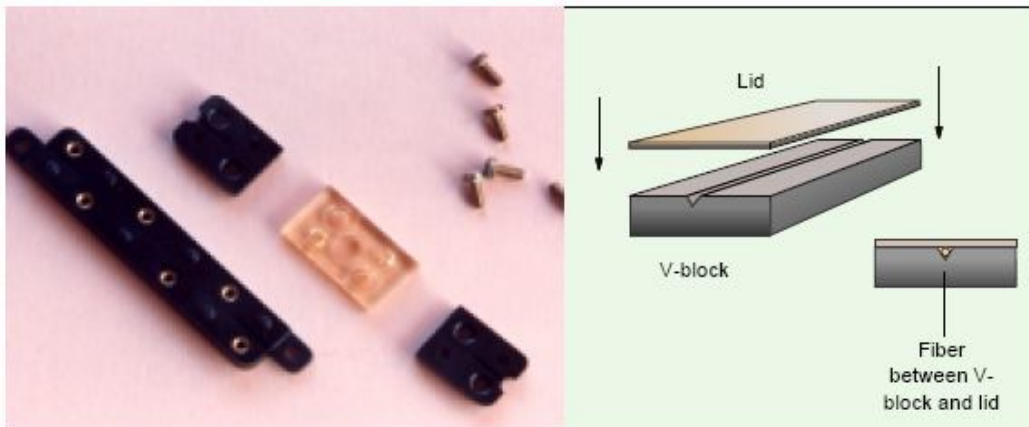


Εικόνα 17. Προβλήματα που παρουσιάζονται κατά τη διαδικασία Fusion splicing

4. Μηχανικές κολλήσεις

4.1. V-block κόλληση

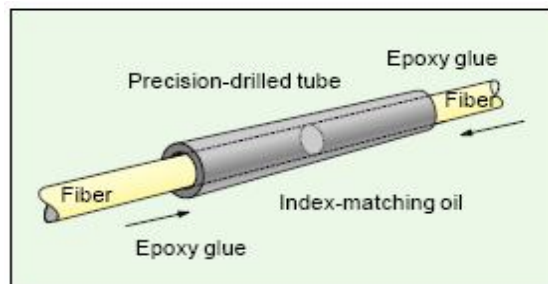
Η μέθοδος V-block αποτελεί την πιο απλή μέθοδο για μηχανική κόλληση οπτικών ινών. Σε ένα πλαστικό block υπάρχει ένα αυλάκι σχήματος V, μέσα στο οποίο τοποθετείται η ίνα. Όταν τοποθετηθεί ένα πλαστικό καπάκι πάνω από το block οι ίνες δέχονται πίεση από τρεις διαφορετικές μεριές με αποτέλεσμα τα δύο άκρα να πλησιάζουν μεταξύ τους. Χρησιμοποιώντας ειδικό έλαιο με δείκτη διάθλασης που δε διαφέρει αρκετά από αυτό των ινών, πετυχαίνουμε μια κόλληση με απώλειες < 0.2 dB. Τέτοιου τύπου κολλήσεις χρησιμοποιούνται μόνο σε εσωτερικού χώρου εφαρμογές και ελάχιστες φορές σε δίκτυα μεγάλων αποστάσεων (ως κολλήσεις έκτακτης ανάγκης).



Εικόνα 18. Παρουσίαση της μεθόδου V-block για μηχανικές κολλήσεις ινών

4.2. 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.



Εικόνα 19. Οι ίνες πιέζονται από δυο πλευρές και πλησιάζουν μέσα στο σωλήνα

4.3. Κόλληση με τρεις ράβδους

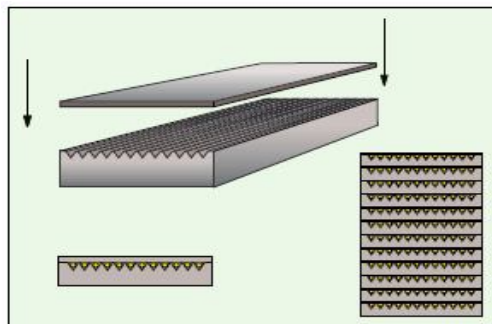
Κατά τη μέθοδο κόλλησης με τρεις ράβδους, χρησιμοποιούνται μεταλλικοί ράβδοι με διάμετρο τέτοια ώστε όταν οι ίδιες τοποθετούνται όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, το κανάλι που δημιουργείται να έχει ακριβώς την ίδια διάμετρο με εκείνη της ίνας που πρόκειται να κολληθεί. Για να παραμένουν οι ράβδοι 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.



Εικόνα 20. Τρεις τύποι μηχανικών κολλήσεων. Από αριστερά προς τα δεξιά: Κόλληση με τρεις ράβδους, Fiberlock (3M), Fingersplice (AMP)

4.4. 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).



Εικόνα 21. Μέθοδος μηχανικής κόλλησης κορδελών ινών

5. 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

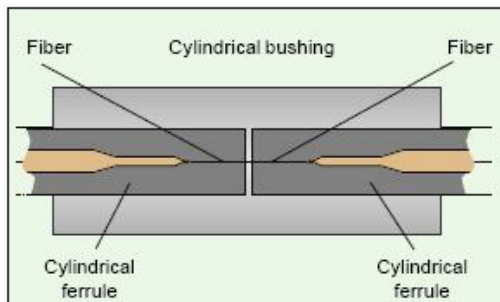
6. Τύποι Connectors

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

6.1. 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.



Εικόνα 22. Μηχανική κόλληση με συνεκτικό δακτύλιο κυλινδρικού τύπου

6.1.1. LME connector

Ο LME connector χρησιμοποιείται κατά βάση για πολύτροπες ίνες (MM) και κατασκευάστηκε αρχικά από την LM Ericsson. Αυτού του τύπου ο connector αποτέλεσε τη βάση για το σχεδιασμό του SMA connector.



Εικόνα 23. LME connector, ένας από τους πρώτους connector για οπτικές ίνες

6.1.2. SMA connector

Ο SMA connector χρησιμοποιείται κυρίως για MM ίνες. Ο SMA είναι κυλινδρικός με συνεκτικό δακτύλιο διαμέτρου 3.174 mm. Επειδή ο συνεκτικός δακτύλιος αυτού του τύπου connector δεν περιέχει κάποια μορφή ελατηρίου, πρέπει να υπάρχει κάποιο κενό αέρος μεταξύ των συνεκτικών δακτυλίων των ινών που συνδέονται, αλλιώς ενδέχεται να καταστραφούν τα δύο μέρη.



Εικόνα 24. Ο SMA connector αποτελεί διεθνές standard. Η εικόνα παρουσιάζει δυο connector, ο ένας έχει κεραμικό ενώ ο άλλος μεταλλικό συνεκτικό δακτύλιο

6.1.3. FC connector

Αυτός ο connector αρχικά σχεδιάστηκε από την Ιαπωνική NTT. Ο συνεκτικός δακτύλιος του περιέχει ελατήριο και έχει διάμετρο 2.499 mm (μικρότερη από τη διάμετρο του SMA). Ο FC χρησιμοποιείται κυρίως όταν ο οπτικός πομπός του

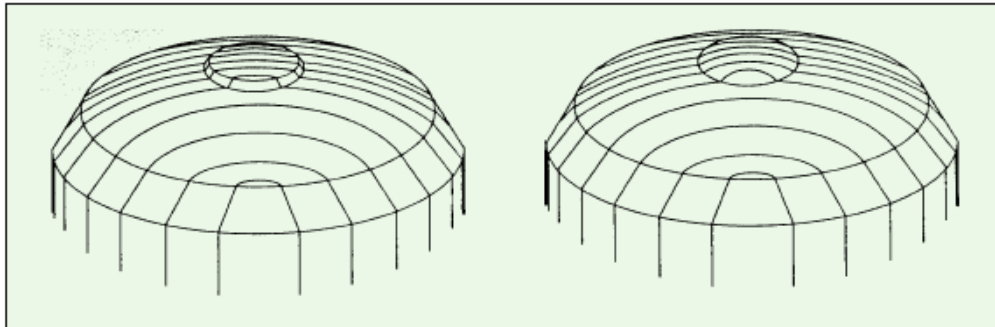
συστήματος περιέχει LED (λόγω της κατασκευής του, παρατηρείται ανάκλαση προς τον πομπό).



Εικόνα 25. Διάφορα μέρη ενός FC connector

6.1.4. FC/PC connector

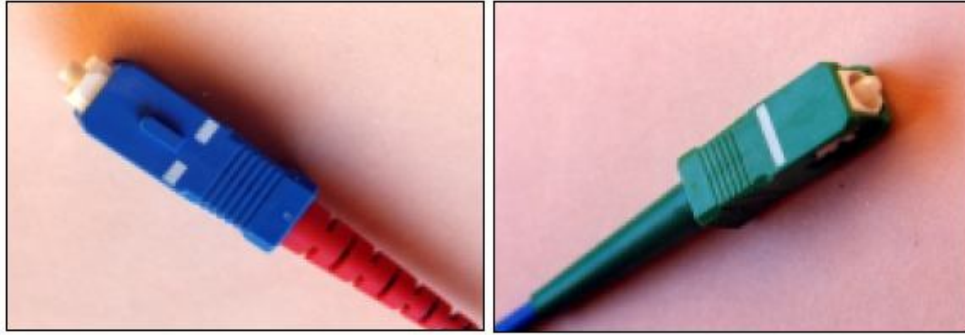
Για να μειωθεί η ανάκλαση που αναφέρθηκε παραπάνω, ο FC connector εξελίχθηκε περαιτέρω. Το τελείωμα του συνεκτικού δακτυλίου του άλλαξε σχήμα, από επίπεδο σε ημισφαιρικό. Ο PC connector συνιστάται για συστήματα με οπτικό πομπό LASER. Ο FC/PC connector χρησιμοποιείται σε δίκτυα υψηλού bit rate.



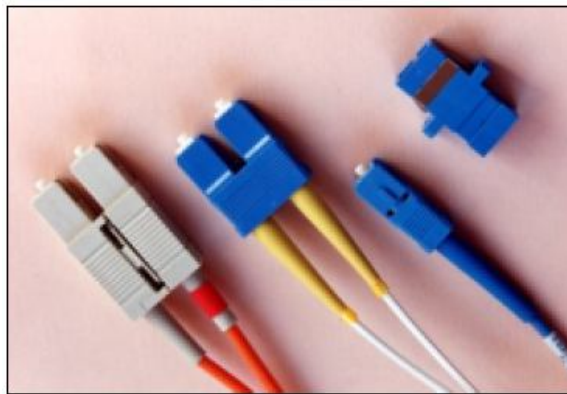
Εικόνα 26. Αριστερά παρουσιάζεται ένας FC connector με επίπεδο συνεκτικό δακτύλιο ενώ δεξιά ένας με ημισφαιρικό (FC/PC)

6.1.5. SC connector

Ο SC connector σχεδιάστηκε αρχικά από την Ιαπωνική NTT. Ο συνεκτικός δακτύλιος του περιέχει ελατήριο και είναι κεραμικό. Η διάμετρος του συνεκτικού δακτυλίου είναι ίδια με εκείνη του FC connector. Το σχήμα του είναι τετραγωνικό, ενώ τα βασικά οπτικά χαρακτηριστικά του είναι όμοια με εκείνα του PC connector. Κάθε μη οπτικό μέρος του κατασκευάζεται από πλαστικό.



Εικόνα 27. Στα αριστερά παρουσιάζεται ένας συνηθισμένος SC connector ενώ δεξιά παρουσιάζεται ένας SC connector για αναλογικές μεταδόσεις



Εικόνα 28. Διαφορετικοί SC connector που κυκλοφορούν στην αγορά

6.1.6. ST connector

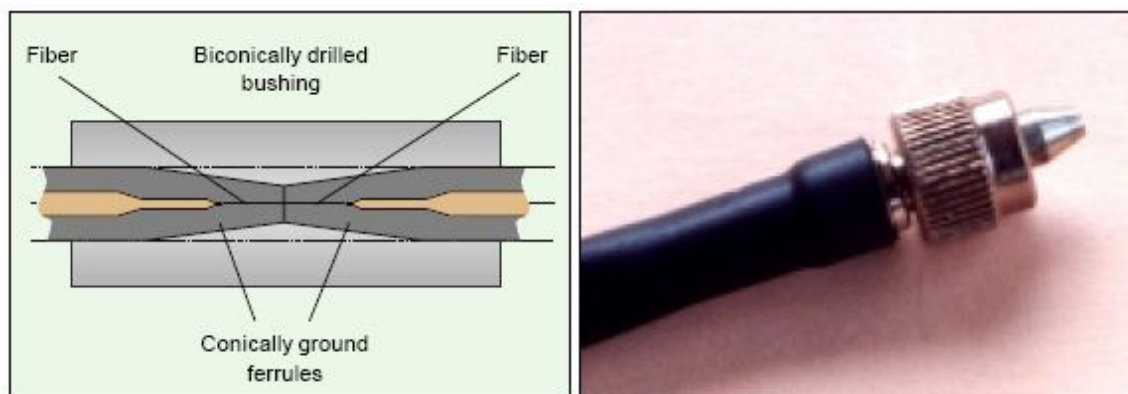
Οι ST connector κατασκευάζονται και για μονότροπες και για πολύτροπες ίνες. Αυτός ο τύπος connector παρέχει μεγάλη ευκολία στη χρήση του, αφού περιέχει ένα bayonet μέλος (σύνδεση και αποσύνδεση). Ο συνεκτικός δακτύλιος του είναι κεραμικό ή μεταλλικό/κεραμικό.



Εικόνα 29. ST connector με bayonet μέλος και κεραμικό συνεκτικό δακτύλιο

6.2. Connectors με κωνικό συνεκτικό δακτύλιο

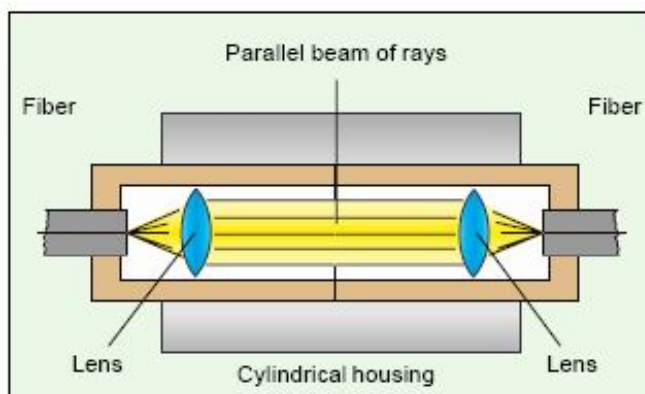
Οι μηχανικές κολλήσεις που είναι πιο περίπλοκες (από πλευράς κατασκευής) περιέχουν connectors με κωνικό συνεκτικό δακτύλιο. Τα τελειώματα των ινών που συνδέονται παρουσιάζουν κωνικό σχήμα, ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη ευθυγράμμιση. Η συνηθισμένη τιμή των απωλειών αυτών των κολλήσεων είναι 0.3 dB/connector.



Εικόνα 30. (Αριστερά) Σχηματικό διάγραμμα μιας κόλλησης στην οποία χρησιμοποιείται connector με κωνικό συνεκτικό δακτύλιο. (Δεξιά) Connector με κωνικό δακτύλιο

6.3. 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.



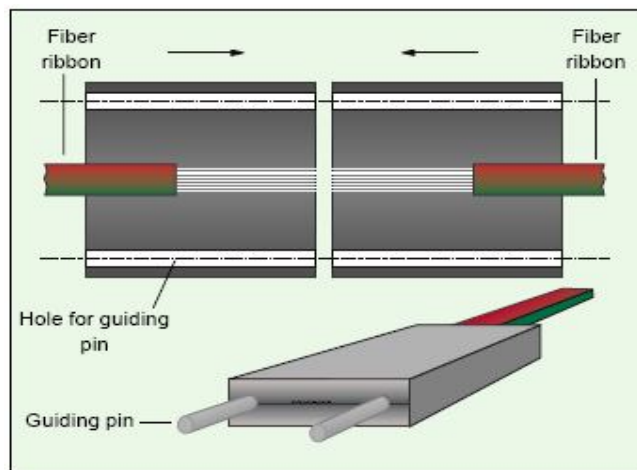
Εικόνα 31. Κόλληση με χρήση connector διαστελλόμενης δέσμης



Εικόνα 32. Connector διαστελλόμενης δέσμης που χρησιμοποιείται κυρίως σε στρατιωτικές εφαρμογές

6.4. 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.



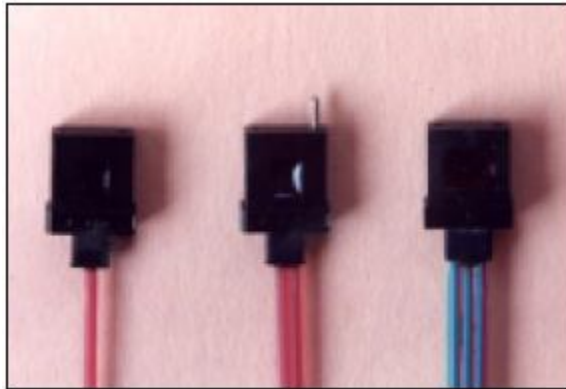
Εικόνα 33. Σχηματικό διάγραμμα κόλλησης κορδέλας ινών

6.4.1. MT connector

Ο MT connector χρησιμοποιείται για τη σύνδεση κορδελών με 2,4,8 ή 12 ίνες. Οι διαστάσεις του συγκεκριμένου connector είναι πολύ μικρές 3x7x10 mm. Οι απώλειες ανά connector είναι μικρότερες από 1 dB και η τιμή του είναι λίγο μεγαλύτερη από εκείνη ενός μονού FC/PC ή SC connector.



Εικόνα 34. MT connector κορδέλας 12 ινών



Εικόνα 35. MT connectors για κορδέλες με 4,8 και 12 ίνες

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΟΠΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΙΝΑΣ ΕΡΒΙΟΥ

Εισαγωγή

Μέχρι πρότινος, η πιο συνηθισμένη μέθοδος για αντιστάθμιση των απωλειών κατά μήκος μιας οπτικής γραμμής μεταφοράς δεδομένων, ήταν η χρήση επαναληπτών. Ο επαναλήπτης είναι μια συσκευή βασισμένη σε υβριδική τεχνολογία (ηλεκτρονική και φωτονική), που ανιχνεύει το οπτικό σήμα, διαμορφώνει τον παλμό ηλεκτρονικά και τέλος αναπαράγει ένα οπτικά διαμορφωμένο σήμα που εισέρχεται ξανά στην ίνα. Η χρήση των παραπάνω συσκευών όμως, περιορίζει τις δυνατότητες των δικτύων μεγάλων αποστάσεων λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων να εκτελέσουν την παραπάνω διαδικασία σε ρυθμούς αντίστοιχους των ρυθμών διάδοσης μέσα στην οπτική ίνα. Αυτό έχει ως τελικό αποτέλεσμα το μεταδιδόμενο σήμα να υπόκειται σε υψηλές καθυστερήσεις. Έτσι οι περισσότερες έρευνες στον τομέα των οπτικών ενισχυτών στράφηκαν στη δημιουργία μιας συσκευής που βασίζεται αποκλειστικά στη φωτονική τεχνολογία. Το 1973 άρχισαν να χρησιμοποιούνται οπτικοί ενισχυτές ημιαγωγού Laser (GaAs Laser Diode). Μέχρι το 1980 όλοι οι ερευνητές προσπαθούσαν να βελτιώσουν την τεχνολογία οπτικών ενισχυτών Laser.

Στα μέσα της δεκαετίας του 80', άρχισε να χρησιμοποιείται αποκλειστικά μονότροπη ίνα για μετάδοση σημάτων με μήκος κύματος 1.3 και 1.5 μm . Την ίδια περίοδο άρχισε να μεγαλώνει το ενδιαφέρον των ερευνητών για τον πιθανό ρόλο της οπτικής ίνας ως ενεργή συσκευή των οπτικών συστημάτων. Το 1987 λοιπόν, μετά από εκτεταμένη έρευνα στις ίνες με προσμίξεις, ανακαλύφθηκαν οι οπτικοί ενισχυτές ίνας ερβίου. Οι ενισχυτές αυτοί αρχικά χρησιμοποιήθηκαν για μετάδοση στα 1.5 μm . Έγιναν αρκετές προσπάθειες για τη χρήση τους σε συστήματα μετάδοσης με μήκος κύματος 1.3 μm όμως η σιλικόνη με προσμίξεις ερβίου, για το συγκεκριμένο μήκος κύματος δε μπορούσε να διατηρήσει τις επιθυμητές ιδιότητες. Η έρευνα λοιπόν για το οπτικό «παραθύρο» των 1.3 μm στράφηκε στη χρήση άλλου υλικού (π.χ. φθόριο). Το κεφάλαιο αυτό θα εστιάσει στις ίνες σιλικόνης με προσμίξεις ερβίου (κάποια στοιχεία βέβαια αναφέρονται γενικά στους ενισχυτές με ίνες προσμίξεων).

Σημαντικό ρόλο στη ραγδαία εξέλιξη των οπτικών ενισχυτών ίνας ερβίου έπαιξε, η ανακάλυψη του Laser ημιαγωγού υψηλής ισχύος που λειτουργεί στα 1.48 μm . Έτσι το 1992 πολλοί κατασκευαστές άρχισαν να παράγουν ολοκληρωμένα οπτικά πρότυπα (modules) με EDFA. Μερικά από τα πλεονεκτήματα των EDFA είναι τα παρακάτω :

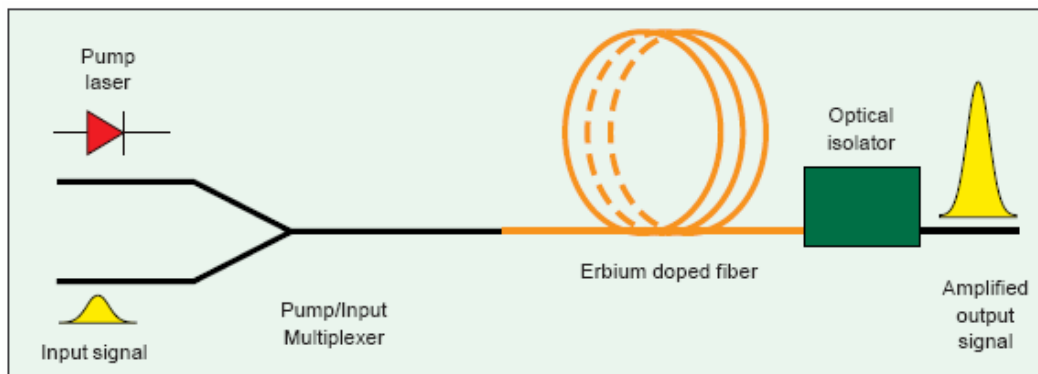
- Τοποθετούνται εύκολα σε οπτικά συστήματα μετάδοσης
- Παρέχουν μεγάλο κέρδος : >50 dB
- Παρέχουν κέρδος 30 dB για ισχύ 20 mW

- Παρουσιάζουν μεγάλη ισχύ εξόδου > 15 dBm
- Παρουσιάζουν μικρές τιμές θορύβου, συνήθως 4 dB
- Δεν εξαρτώνται από τη μορφή του δικτύου και το bit-rate του (μπορούν λοιπόν να χρησιμοποιηθούν για την αναβάθμιση σχεδόν οποιουδήποτε συστήματος)

Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά, η θεωρία λειτουργίας των EDFA, οι διάφοροι τύποι των παραπάνω ενισχυτών και οι εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται.

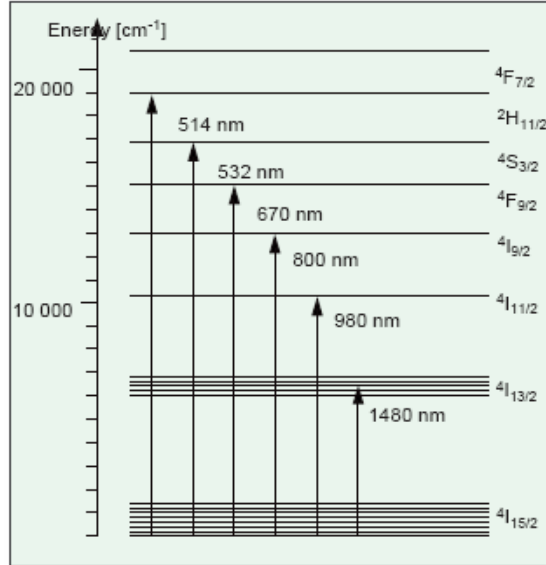
1. Θεωρία λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας των ενισχυτών με προσμίξεις είναι ουσιαστικά παρόμοια με αυτή των Laser. Μια οπτική ίνα νοθεύεται με ιόντα Er (μια από τις σπάνιες γαίες που έχει χάσει τρία από τα εξωτερικά ηλεκτρόνια του), τα οποία διεγείρονται σε υψηλές ενεργειακές στάθμες με τη βοήθεια ακτινοβολίας Laser. Η διαδικασία αυτή αντιστοιχεί στην άντληση των φορέων, όπως στα Laser ημιαγωγών με έκχυση ρεύματος. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται αναστροφή πληθυσμών. Το σήμα ενισχύεται χάρη στο φαινόμενο της εξαναγκασμένης εκπομπής : καθώς τα φωτόνια του σήματος εισέρχονται στην ίνα, αποδιεγείρουν τα ιόντα ερβίου στη βασική τους στάθμη, εκπέμποντας έτσι φωτόνια ίδιων χαρακτηριστικών με αυτά του σήματος , το οποίο κατά αυτόν τον τρόπο ενισχύεται. Τα φωτόνια άντλησης οδηγούνται στην ίνα Ερβίου με τη βοήθεια ενός πολυπλέκτη.



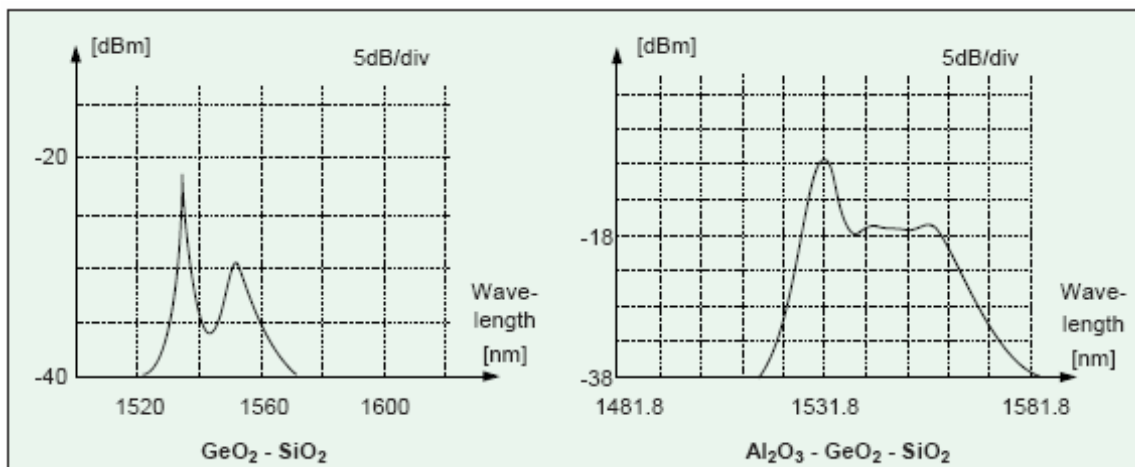
Εικόνα 1. Ένας τυπικός ενισχυτής με ίνα Ερβίου

Οι ενεργειακές στάθμες χαρακτηρίζονται με τα αρχικά GSA (Ground State Absorption). Πρόσπτωση φωτός σε αυτά τα μήκη κύματος μπορεί να προκαλέσει άντληση των ηλεκτρονίων, δηλαδή την ανύψωση της ενεργειακής τους κατάστασης. Δύο είναι οι πιθανοί τρόποι διέγερσης ή αποδιέγερσης του ιόντος Ερβίου σε μήκη κύματος κοντά στα 1530 nm. Στην πρώτη περίπτωση η άντληση γίνεται στα 980 nm ενώ στη δεύτερη περίπτωση στα 1480 nm. Υπάρχουν σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις δυο αυτές καταστάσεις, που προκύπτουν από τα διαφορετικά μήκη κύματος άντλησης.



Εικόνα 2. Ενεργειακές στάθμες ιόντων Ερβίου για νοθευμένο γυαλί

Επιπλέον των παραπάνω μηκών κύματος άντλησης που συνήθως χρησιμοποιούνται, υπάρχουν και άλλα δυνατά μήκη, τα οποία βρίσκονται σε περιοχές απορρόφησης του Ερβίου, όπως τα 820 nm και σπανιότερα τα 665 nm, 532nm και 514 nm. Ιδιαίτερη σημασία για τις επιδόσεις και τον χαρακτηρισμό μιας ίνας Ερβίου έχει το υλικό νόθευσης του γυαλιού που φιλοξενεί τα ιόντα Ερβίου, καθώς και η ακτινική του κατανομή. Ως υλικά νόθευσης αναφέρονται τα υλικά που προστίθενται στο SiO_2 για βελτίωση των ιδιοτήτων του. Τέτοια υλικά είναι το GeO_2 , Al_2O_3 και το P_2O_5 . Το υλικό νόθευσης καθορίζει ένα μεγάλο πλήθος κβαντομηχανικών παραμέτρων και φαινομένων που επηρεάζουν τη λειτουργία του ενισχυτή.



Εικόνα 3. Ενισχυμένη εκπομπή φωτονίων από ιόντα Ερβίου για διαφορετικά υλικά ξενιστές : $\text{GeO}_2 - \text{SiO}_2$ και $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{GeO}_2 - \text{SiO}_2$

Βασικές παράμετροι

Υπάρχουν αρκετές οπτικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν ένα συγκεκριμένο οπτικό ενισχυτή. Για τον πρακτικό σχεδιασμό ενός οπτικού συστήματος είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη οι παρακάτω παράμετροι:

- Κέρδος
- Κέρδος εύρους ζώνης
- Ισχύς σήματος εξόδου
- Συντελεστής θορύβου

Κέρδος

Το κέρδος ενός οπτικού ενισχυτή αναφέρεται από τον κατασκευαστή και δηλώνει τη διαφορά σε dB της ισχύος του σήματος εισόδου με τη ισχύ του σήματος εξόδου. Στον υπολογισμό του κέρδους συμπεριλαμβάνονται οι απώλειες από τον απομονωτή αλλά όχι οι απώλειες από την κόλληση του ενισχυτή στη γραμμή μετάδοσης του συστήματος. Σε εργαστηριακό περιβάλλον έχει επιτευχθεί κέρδος κοντά στα 50 dB. Οι συνηθισμένοι ενισχυτές που κυκλοφορούν στην αγορά παρέχουν κέρδος κοντά στα 30 dB.

Κέρδος εύρους ζώνης

Το κέρδος εύρους ζώνης μπορεί να οριστεί με διάφορους τρόπους. Η πιο σημαντική πληροφορία που μας παρέχει είναι η μέγιστη απόκλιση από το καθορισμένο κέρδος του ενισχυτή μέσα σε ένα συγκεκριμένο διάστημα μηκών κύματος. Τις περισσότερες φορές παρέχεται από τον κατασκευαστή ένα διάγραμμα του κέρδους του ενισχυτή σε συνάρτηση με το μεταδιδόμενο μήκος κύματος για συγκεκριμένη τιμή ισχύος εισόδου. Το διάγραμμα αυτό μας βοηθά να επιλέξουμε το κεντρικό μήκος κύματος στο οποίο θα μεταδίδει ο πομπός.

Ισχύς σήματος εξόδου

Λόγω φαινομένων κορεσμού, το κέρδος μειώνεται όταν η ισχύς εισόδου ξεπερνά κάποια συγκεκριμένη τιμή. Στην περίπτωση αυτή ο ενισχυτής δεν είναι πια ενεργός και λέμε ότι βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού. Είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε το ποσό της ισχύος σήματος που μπορούμε να πάρουμε από κάποιον ενισχυτή για συγκεκριμένο επίπεδο άντλησης. Στα περισσότερα βιβλία η ισχύς εξόδου κορεσμού, ορίζεται ως η ισχύς σήματος εξόδου για την οποία το κέρδος μειώνεται κατά 3 dB από την τιμή που έχει καθορίσει ο κατασκευαστής. Οι κατασκευαστές συνήθως καθορίζουν το ποσό της ισχύος εξόδου που μπορεί να αποδώσει ένας ενισχυτής σε συνάρτηση της ισχύος σήματος εισόδου. Με χρήση μεγαλύτερων επιπέδων άντλησης μπορούμε να αυξήσουμε την ισχύ του σήματος εξόδου.

Συντελεστής θορύβου

Κυριότερη συνιστώσα θορύβου είναι η ενισχυμένη αυθόρμητη εκπομπή, ASE. Κατά το φαινόμενο αυτό ένα διεγερμένο ιόν αποδιεγείρεται εξαναγκασμένα χωρίς την πρόσπτωση φωτονίου σήματος. Το ασύμφωνο φωτόνιο που παράγεται ενισχύεται κινούμενο και προς τα δυο τερματικά άκρα, με αποτέλεσμα στην έξοδο να έχουμε σήμα, άσχετο με το πραγματικό σήμα, που μπορεί να μην υπάρχει.

Το σημαντικότερο μέγεθος που χρησιμοποιείται στην πράξη για το θορυβικό χαρακτηρισμό ενός οπτικού ενισχυτή είναι ο συντελεστής θορύβου N_f που δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$N_f = \frac{S / N_{\text{without amplifier}}}{S / N_{\text{with amplifier}}}$$

Ο συντελεστής θορύβου δίνει τη μεταβολή του σηματοθορυβικού λόγου κατά μήκος της ίνας. Καθώς ο ενισχυτής εισάγει πάντα πρόσθετο θόρυβο, είναι λογικό να αναμένουμε ότι ο N_f θα είναι πάντα μεγαλύτερος της μονάδας, δηλαδή η ίνα δε μπορεί να βελτιώσει τον SNR του σήματος. Μπορεί να δειχτεί ότι για υψηλό σήμα εισόδου, η μεγαλύτερη πηγή θορύβου είναι ο όρος που προκύπτει από την αυθόρμητη εκπομπή ακτινοβολίας του ενισχυτή. Τότε $N_f = 2n_{sp}$, όπου n_{sp} είναι ο συντελεστής αυθόρμητης εκπομπής.

Είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε, ότι για ένα συγκεκριμένο σήμα εισόδου, υπάρχει ένα βέλτιστο ζεύγος (μήκος ίνας, ισχύς άντλησης) για το οποίο ο συντελεστής θορύβου παίρνει την ελάχιστη τιμή του. Αυξάνοντας το μήκος της ίνας και την ισχύ άντλησης θα έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ASE προς την αντίθετη κατεύθυνση και τον κορεσμό του κέρδους στο μπροστινό μέρος όπου το σήμα είναι χαμηλό.

2. Διάφοροι τύποι σχεδιασμού ενισχυτή

2.1. Συστήματα με μοναδικό μήκος κύματος

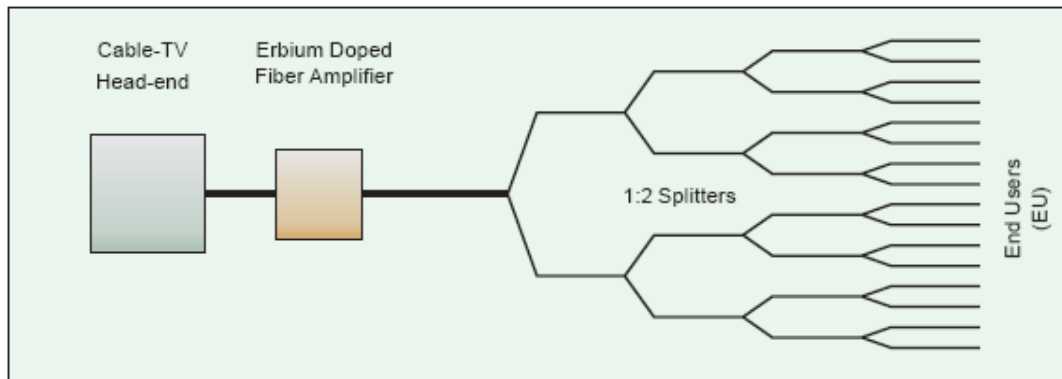
Οι EDFA μπορούν να τοποθετηθούν σε τρεις διαφορετικές θέσεις κατά μήκος ενός point-to-point συστήματος :

- Ως ενισχυτής ισχύος στην κεφαλή του συστήματος
- Ως ενισχυτής κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς
- Ως προενισχυτής στο άκρο του δέκτη

2.1.1. Ενισχυτής ισχύος στην κεφαλή του συστήματος

Το χαρακτηριστικό ενός ενισχυτή ισχύος είναι να παράγει έξοδο υψηλής ισχύος. Για να επιτύχουμε κάτι τέτοιο χρησιμοποιούμε ένα σύστημα διπλής άντλησης, ώστε η ίνα Erbium να «αντλείται» και προς την αντίθετη κατεύθυνση μετάδοσης.

Η ίνα λειτουργεί σε ένα υψηλά κορεσμένο επίπεδο, αφού το σήμα εισόδου είναι της τάξης των $-5 - 0$ dB.

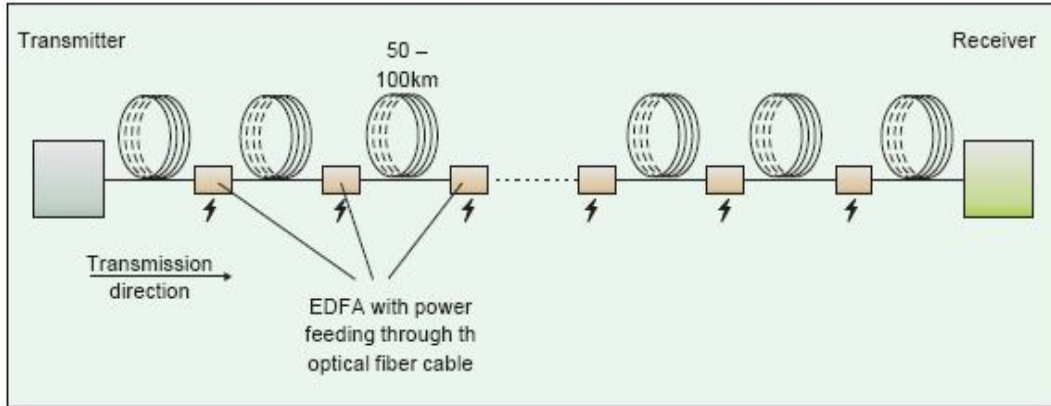


Εικόνα 4. Ο EDFA σαν ενισχυτής ισχύος σε ένα σύστημα καλωδιακής τηλεόρασης

2.1.2. Ενισχυτής κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς

Οι οπτικοί ενισχυτές μπορούν να αντικαταστήσουν άμεσα τους οπτο-ηλεκτρονικούς επαναλήπτες, σε συστήματα όπου η αναγέννηση του σήματος δεν είναι απαραίτητη. Αυτό σημαίνει ότι το σήμα δεν έχει υποστεί σημαντική παραμόρφωση λόγω του φαινομένου της διασποράς αλλά και των μη γραμμικών φαινομένων της ίνας οπότε και δεν είναι αναγκαία η αναγέννησή του. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι σε ερευνητικό και εργαστηριακό επίπεδο υπάρχουν διατάξεις που αναγεννούν το σήμα χωρίς να είναι αναγκαία η μετατροπή του σε ηλεκτρικό πρώτα σήμα και είναι συμβατές με του ενισχυτές ίνας Ερβίου. Παρόλα αυτά τέτοιες οπτικές διατάξεις δεν είναι ακόμα διαθέσιμες στο εμπόριο.

Δεν υπάρχει κάποιος συγκεκριμένος τρόπος σχεδιασμού ενός ενισχυτή που τοποθετείται κατά μήκος της γραμμής, αφού πρέπει να ληφθούν υπόψη όλα τα χαρακτηριστικά του συστήματος. Γενικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι για ζεύξεις μεσαίου μεγέθους απαιτούνται ενισχυτές μεγάλου κέρδους που τοποθετούνται σε απόσταση 50 km μεταξύ τους, ενώ για ζεύξεις μεγάλου μήκους απαιτούνται ενισχυτές μικρότερου κέρδους που απέχουν μικρή απόσταση ο ένας από τον άλλο (λόγω ύπαρξης φαινομένων μη γραμμικότητας).

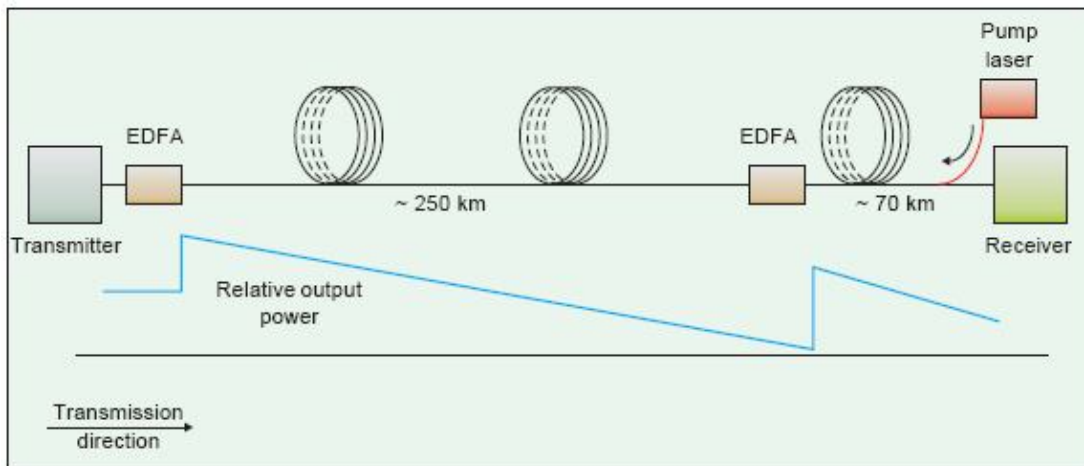


Εικόνα 5. Σύστημα με ενισχυτές EDFA κατά μήκος της γραμμής. Οι ενισχυτές τροφοδοτούνται με αγωγούς ρεύματος που βρίσκονται εντός των οπτικών καλωδίων

2.1.3. Ενισχυτής κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς χωρίς τροφοδότηση

Μια διαφορετική προσέγγιση χρησιμοποιείται σε οπτικές ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων όπου δεν είναι δυνατή η τροφοδότηση. Το πλεονέκτημα ενός τέτοιου συστήματος είναι ότι τα καλώδιά του θα είναι πολύ πιο απλά στο σχεδιασμό. Το σύστημα που θα περιγραφεί χρησιμοποιείται σε υποβρύχιες εγκαταστάσεις.

Η απόσταση που πρέπει να καλυφθεί είναι μεγαλύτερη από εκείνη που μπορεί να καλυφθεί με ένα ενισχυτή στην πλευρά μετάδοσης.



Εικόνα 6. Σύστημα με ενισχυτές κατά μήκος της γραμμής χωρίς τροφοδότηση

Το σήμα ενισχύεται από ένα EDFA στην πλευρά μετάδοσης. Σε μια απόσταση 250 km τοποθετείται ένα splice-box που περιέχει 30 m μήκος ίνας Ερβίου. Σε κάθε ίνα μετάδοσης αντιστοιχεί και μια ίνα Ερβίου. Στην πλευρά του δέκτη, 70 km πιο μακριά, τοποθετούνται τα Laser άντλησης (μεταδίδουν ενέργεια στα 1490 nm). Η ενέργεια αυτή θα διεγείρει την ίνα Ερβίου, η οποία θα μεταφέρει την

ενέργεια στο μεταδιδόμενο σήμα. Κατά αυτόν τον τρόπο μπορούμε να καλύψουμε απόσταση μεγαλύτερη από 320 km. Τέτοιου τύπου συστήματα χρησιμοποιούνται και σε δίκτυα με πολυπλεγμένα μήκη κύματος.

2.1.4. Προενισχυτής στο άκρο του δέκτη

Σε τέτοιου τύπου εφαρμογές ο ενισχυτής λειτουργεί σε «καθεστώς» χαμηλού σήματος. Το πρωταρχικό μας ενδιαφέρον είναι η τιμή του συντελεστή θορύβου, για το λόγο αυτό το μήκος κύματος άντλησης που επιλέγουμε είναι 980 nm και όχι 1480 nm. Επειδή η βασική πηγή θορύβου είναι η ASE αμέσως μετά τον EDFA τοποθετείται ένα βαθυπερατό φίλτρο.

2.2. Συστήματα με πολλαπλά μήκη κύματος

Οι παραπάνω περιπτώσεις έχουν εφαρμογή και σε συστήματα με πολλαπλά μήκη κύματος. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δώσουμε στο σχεδιασμό των φίλτρων και των ινών Ερβίου ώστε να επιτύχουμε το ίδιο κέρδος σε όλο το εύρος ζώνης. Ακόμα και διαφορά κέρδους της τάξης των 0.5 dB ανάμεσα στα κανάλια είναι υπολογίσιμη λόγω της ενίσχυσης που θα λάβει. Τέτοιου τύπου προβλήματα σχεδιασμού για συστήματα πολλαπλών μηκών κύματος ερευνώνται ακόμα.



Εικόνα 7. EDFA κατασκευασμένος από την Ericsson, με μέγεθος που μπορεί να συγκριθεί με ένα σπύρτο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΖΕΥΞΕΙΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Εισαγωγή

Τα περισσότερα μέρη που αποτελούν μια οπτική ζεύξη έχουν αναλυθεί στα προηγούμενα κεφάλαια : Οπτικά καλώδια, δίοδοι Laser και LEDs, οπτικοί ανιχνευτές και διάφοροι τύποι κολλήσεων και συνδέσεων. Το κεφάλαιο αυτό περιγράφει το πώς αυτά τα μέρη «συνεργάζονται» για να τεθεί σε λειτουργία ένα οπτικό δίκτυο. Αρχικά θα αναλύσουμε τις διάφορες τοπολογίες δικτύων και στη συνέχεια θα ασχοληθούμε με τους διάφορους υπολογισμούς που πρέπει να γίνουν για το σχεδιασμό μιας οπτικής ζεύξης.

1. Μέσο μετάδοσης

Μια από τις σημαντικότερες αποφάσεις που πρέπει να πάρουμε όταν σχεδιάζουμε ένα νέο δίκτυο ή αναβαθμίζουμε ένα ήδη υπάρχον, είναι η επιλογή του μέσου μετάδοσης. Υπάρχουν τέσσερις διαφορετικοί τύποι μέσων μετάδοσης:

- Χάλκινα καλώδια
- Οπτικά καλώδια (οπτικοί κυματοδηγοί)
- Μικροκυματικοί Κυματοδηγοί
- Ασύρματες μεταδόσεις (επίγειες συνδέσεις/δορυφορικές συνδέσεις)

Η απόφαση μας, πρέπει να βασίζεται κατά κύριο λόγο στους παρακάτω παράγοντες :

- Κόστος : όταν υπάρχουν εναλλακτικές λύσεις που προσφέρουν τα ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά με χαμηλότερη τιμή πρέπει να επιλέγονται.
- Τεχνικές δυνατότητες εξοπλισμού : ένα νέο μέσο όπως η οπτική ίνα, παρέχει πολλοί περισσότερες τεχνικές δυνατότητες απ' ότι παλαιότερα μέσα.
- Δυνατότητα αναβάθμισης, βελτίωσης και περαιτέρω ανάπτυξης του συστήματος στο μέλλον χωρίς ιδιαίτερα υψηλό κόστος και προβλήματα συμβατότητας με μεταγενέστερες τεχνολογίες.
- Συμβατότητα με υπάρχοντα συστήματα και υπηρεσίες.

Τα πλεονεκτήματα ενός οπτικού συστήματος σε σχέση με ένα σύστημα βασισμένο σε χάλκινα καλώδια είναι τα εξής :

- Το τεράστιο εύρος ζώνης. Η οπτική ίνα παρέχει εύρος συχνοτήτων για μετάδοση περίπου ίσο με 25THz ή 25000GHz στην φασματική περιοχή του 1.5μm. Το εύρος αυτό είναι 1000 φορές μεγαλύτερο από ολόκληρο το διαθέσιμο φάσμα ραδιοσυχνοτήτων.

- Οι μικρές απώλειες κατά την διάδοση του σήματος. Η οπτική ίνα σε σχέση με το χάλκινο καλώδιο παρουσιάζει περιορισμένες απώλειες γεγονός που επιτρέπει την μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς να είναι αναγκαία η ενδιάμεση ενίσχυση του σήματος. Αλλά ακόμα και στην περίπτωση που απαιτείται ενίσχυση και αναγέννηση του σήματος δεδομένων η διαδικασία λαμβάνει χώρα σπανιότερα.
- Η οπτική ίνα είναι πιο «ανθεκτική» όσον αφορά τον θόρυβο σε σύγκριση με το χάλκινο καλώδιο καθώς ο μανδύας της οπτικής ίνας λειτουργεί ταυτόχρονα και ως προστατευτικό ενώ το κυματοδηγούμενο οπτικό σήμα δεν επηρεάζεται (λόγω της φύσης του) από τις ποικίλες πηγές θορύβου.
- Ένα σύστημα οπτικών ινών δε δημιουργεί παρεμβολές σε άλλα συστήματα μετάδοσης
- Τέλος στα πλεονεκτήματα συγκαταλέγονται και οι τεχνικές πολυπλεξίας που μπορούν να αυξήσουν σημαντικά την αποδοτικότητα της οπτικής ίνας επιτρέποντας την ταυτόχρονη μετάδοση πληροφορίας μέσω πολλών διαφορετικών καναλιών. Οι δύο τεχνικές πολυπλεξίας είναι η WDM (πολυπλεξία κατά μήκος κύματος) και OTDM (πολυπλεξία στο χρόνο).

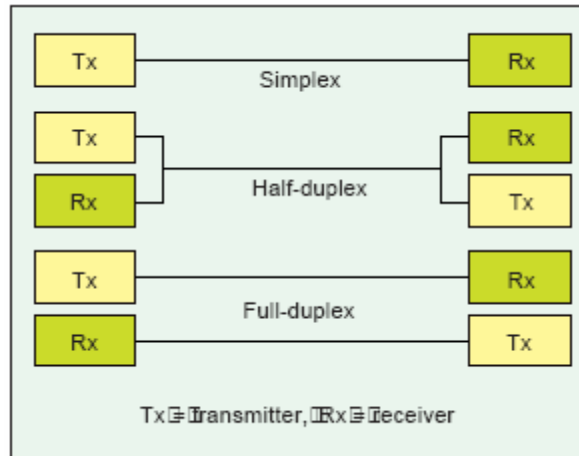
Λόγω των παραπάνω πλεονεκτημάτων οι οπτικές ζεύξεις δε χρησιμοποιούνται μόνο για δίκτυα μεγάλων αποστάσεων αλλά και για :

- Μεγάλα δίκτυα πόλεων
- Μεγάλα και μικρά δίκτυα μεταφοράς δεδομένων
- Δίκτυα καλωδιακής τηλεόρασης
- Δίκτυα ασφαλείας

2. Τοπολογίες δικτύων

Ένα οπτικό δίκτυο συνδέει δύο ή περισσότερες μονάδες επικοινωνίας (τερματικά, ράδιο-σταθμοί κ.τ.λ.). Υπάρχουν τρία είδη μετάδοσης :

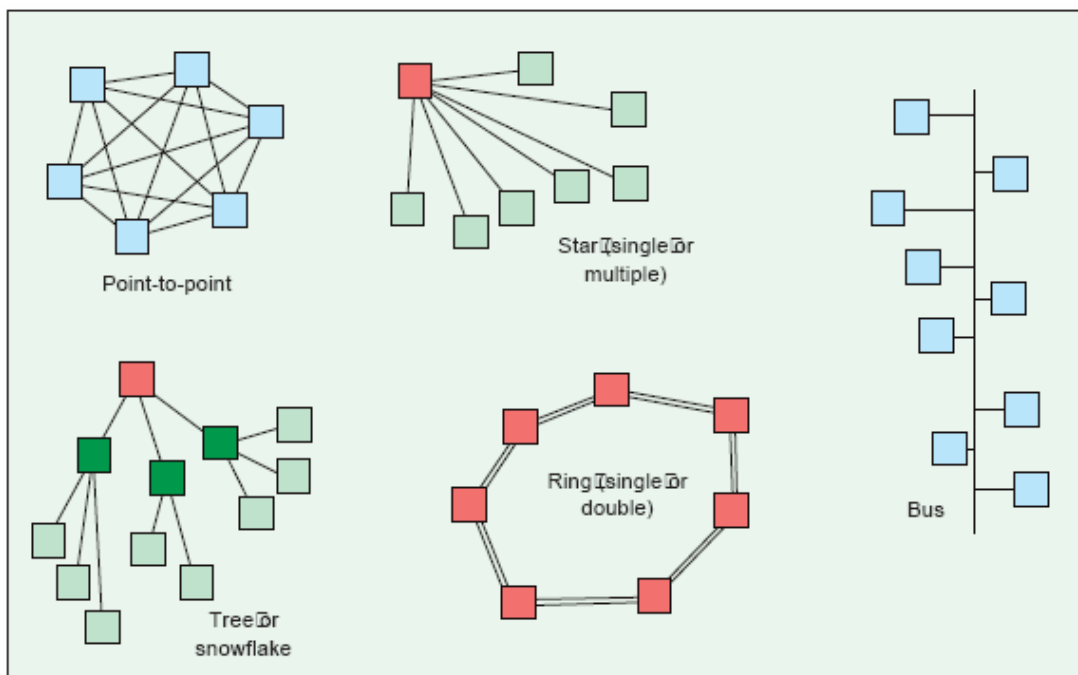
- Απλή (μετάδοση μόνο προς μία κατεύθυνση)
- Half-duplex (μετάδοση προς δυο κατευθύνσεις αλλά όχι ταυτόχρονα)
- Full-duplex (ταυτόχρονη μετάδοση προς δυο κατευθύνσεις)



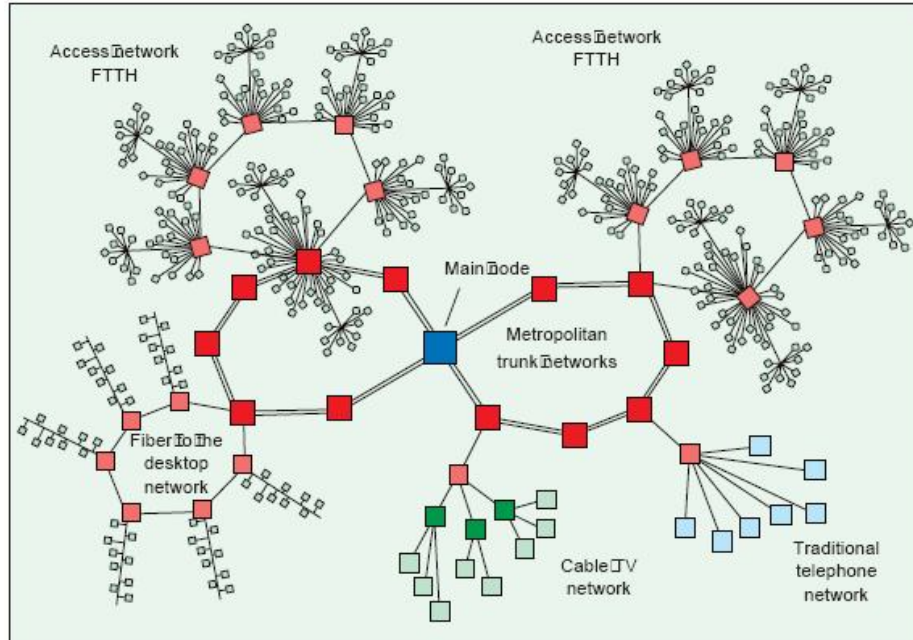
Εικόνα 1. Οι τρεις διαφορετικές μέθοδοι μετάδοσης

Η φυσική κατασκευή ενός δικτύου μπορεί να έχει μια από τις παρακάτω μορφές :

- Point to point (σημείο προς σημείο)
- Star (αστέρας)
- Tree (δέντρο)
- Ring (δακτύλιος)
- Bus (δίαυλος)



Εικόνα 2. Διαφορετικές τοπολογίες δικτύων



Εικόνα 3. Τα συνηθισμένα οπτικά δίκτυα μπορούν να απαρτίζονται από πολλά μικρότερα υπο-δίκτυα διαφόρων τοπολογιών

3. Προκαθορισμένες απαιτήσεις οπτικών δικτύων

Διάφοροι βασικοί όροι πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός οπτικού δικτύου : η προκαθορισμένη χωρητικότητα μετάδοσης (bits per second), η απόσταση μετάδοσης (km) και οι δυνατότητες επέκτασης. Γενικά οι εφαρμογές που χρησιμοποιούνται σε ένα δίκτυο παρουσιάζουν ένα μέγιστο επιτρεπόμενο BER.

Για να ικανοποιηθούν οι παραπάνω βασικοί όροι, αξιολογούνται οι παρακάτω παράμετροι :

- Επιλογή ίνας (πολύτροπη ή μονότροπη, βηματικού ή βαθμιαίου δείκτη)
- Το μήκος κύματος στο οποίο λειτουργεί το σύστημα (850, 1310 ή 1550 nm)
- Τύπος πομπού (δίοδος Laser ή LED)
- Ισχύς εξόδου του πομπού
- Τύπος δέκτη
- Κώδικας μετάδοσης
- BER
- Τύπος Interface (token ring, Ethernet, FDDI κτλ)
- Αριθμός κολλήσεων
- Αριθμός συνδέσεων
- Θέματα ασφάλειας
- Θέματα προστασίας περιβάλλοντος
- Λοιπά μηχανικά θέματα

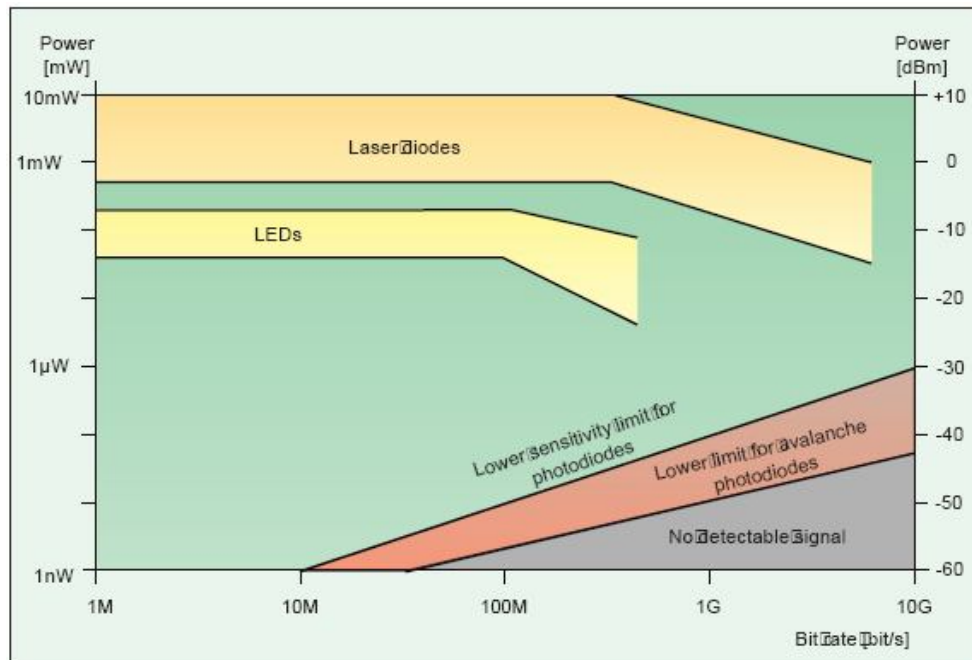
Για προφανείς λόγους, είναι απαραίτητο να σπαταλήσουμε πολύ χρόνο για το σχεδιασμό ενός συστήματος πριν ξεκινήσει κάθε είδους εργασία εγκατάστασης και λειτουργίας.

4. Σχεδιασμός ενός οπτικού συστήματος

Όταν σχεδιάζουμε ένα ηλεκτρικό δίκτυο πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλοί διαφορετικοί παράγοντες μεταξύ του πομπού και του δέκτη : αντίσταση, χωρητικότητα, ηλεκτρικές παρεμβολές κτλ. Κατά το σχεδιασμό ενός οπτικού δικτύου όλοι οι παραπάνω παράγοντες εξαλείφονται. Οι μόνοι παράγοντες που πρέπει να υπολογιστούν και να αξιολογηθούν είναι : η απαιτούμενη ισχύς, οι απώλειες, το εύρος ζώνης και η διασπορά.

Πομπός

Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενα κεφάλαια, η μέση οπτική ισχύς που εισάγεται σε μια οπτική ίνα εξαρτάται από τον τύπο του πομπού και το ρυθμό μετάδοσης. Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται ο ρυθμός μετάδοσης (bit-rate) για πομπό Laser και LED. Από το γράφημα διακρίνουμε ότι με πομπό Laser μπορούμε να πάρουμε ισχύ κάπου στα 2 mW ενώ με LED μπορούμε να πετύχουμε ισχύ 100 – 200 μ W. Παρατηρούμε επίσης ότι και οι δύο τύποι πομπών αποδίδουν λιγότερη ισχύ αν αυξηθεί ο ρυθμός μετάδοσης. Γενικά η ισχύς εισόδου που αποδίδει ένα LED είναι κατά 10 με 15 dB μικρότερη από αυτή που αποδίδει μια δίοδος Laser. Η ισχύς εισόδου μετριέται σε dBm.



Εικόνα 4. Όρια πομπών και δεκτών για οπτικά συστήματα

Δέκτης

Η ευαισθησία ενός οπτικού δέκτη καθορίζεται από το συνδυασμό των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων στο άκρο του. Η ελάχιστη ανιχνεύσιμη οπτική ισχύς για μια συγκεκριμένη τιμή BER έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο με τους οπτικούς δέκτες. Γενικά η ελάχιστη ανιχνεύσιμη ισχύς εισόδου δίνεται σε dBm για τιμή BER 10^{-9} .

4.1. Σχεδιασμός συστήματος : Προϋπολογισμός ισχύος

Ο καθορισμός του προϋπολογισμού ισχύος ενός οπτικού συστήματος προϋποθέτει την ανάλυση και περιγραφή όλων των απωλειών μέσα στο δίκτυο. Ο προϋπολογισμός ισχύος παρέχει μια αριθμητική επιβεβαίωση για το αν ένα οπτικό σύστημα θα λειτουργήσει ή όχι. Ο προϋπολογισμός ισχύος ορίζεται ως η ισχύς εισόδου της ίνας μειωμένη κατά την ευαισθησία του δέκτη. Αν το σύνολο των απωλειών του συστήματος είναι μικρότερο από την τιμή του προϋπολογισμού, τότε θα φτάσει επαρκές φως στο δέκτη ώστε να επιτευχθεί επικοινωνία. Οι απώλειες στο δίκτυο οφείλονται στους παρακάτω παράγοντες :

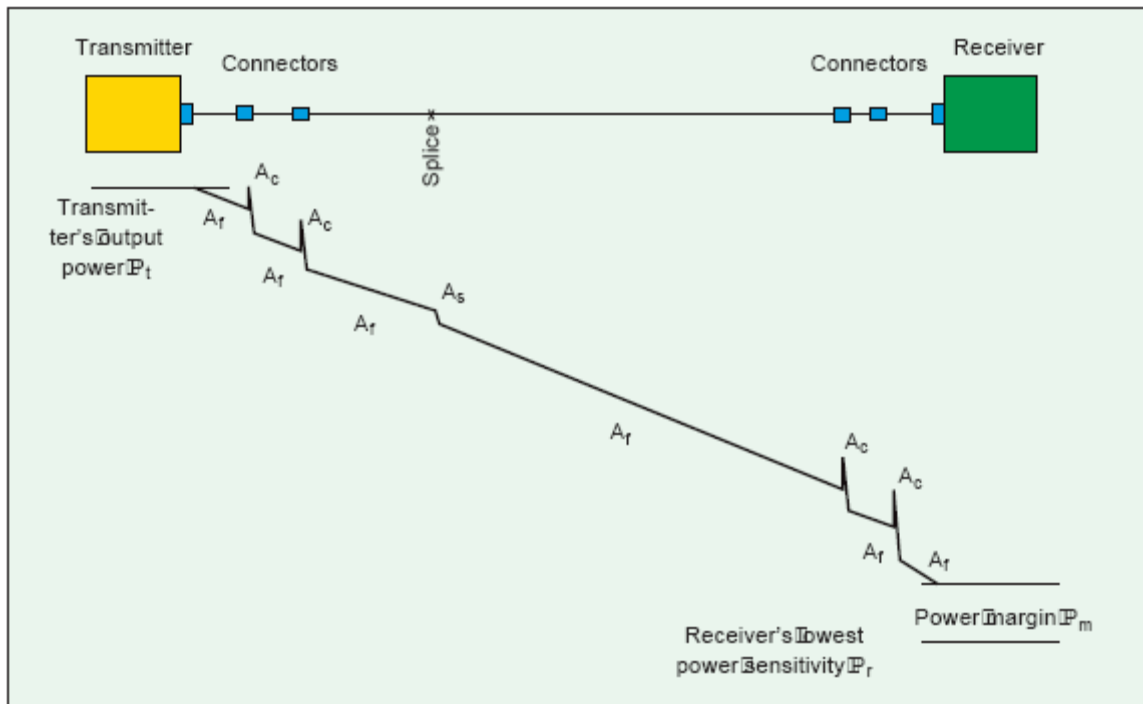
- Εξασθένηση της ίνας [dB/km]
- Πέρασμα του φωτός από τον πομπό στην ίνα [dB]
- Μετάβαση σε ίνα διαφορετικής διαμέτρου [dB]
- Μετάβαση σε ίνα διαφορετικού NA [dB]
- Απώλειες συνδέσεων [dB]
- Απώλειες κολλήσεων [dB]
- Πέρασμα του φωτός από την ίνα στο δέκτη [dB]

Στις παρακάτω δύο υποενότητες παρουσιάζονται δύο παραδείγματα υπολογισμού του προϋπολογισμού ισχύος χρησιμοποιώντας ως δεδομένα τιμές από πραγματικά συστήματα οπτικών ινών.

4.1.1. Καθορισμός προϋπολογισμού ισχύος – παράδειγμα 1 (απλή περίπτωση)

Η οπτική ζεύξη αποτελείται από τα παρακάτω :

- Ένα πομπό με ισχύ εξόδου που περνάει στην ίνα $P_t = 125 \mu\text{W}$
- Ένα δέκτη με ευαισθησία $P_r = -33 \text{ dBm}$
- Ίνα μήκους 3.5 km με εξασθένηση $A_f = 3.2 \text{ dB/km}$
- Μία κόλληση με απώλεια $A_s = 0.25 \text{ dB}$
- Τέσσερις συνδετήρες με απώλεια $A_c = 1 \text{ dB}$
- Απαιτούμενο όριο ισχύος $P_m = 5 \text{ dB}$.
- Πομπό με ισχύ εξόδου $P_t = 125 \mu\text{W}$
 $= -9.03 \text{ dBm}$



Εικόνα 5. Γράφημα που παρουσιάζει τις απώλειες από τον πομπό στο δέκτη του συστήματος

Απόσβεση ίνας

$$A_f = 3.5 \times 3.2 = 11.2 \text{ dB}$$

Απόσβεση σύνδεσης

$$A_c = 4 \times 1 = 4 \text{ dB}$$

Απόσβεση κόλλησης

$$A_s = 1 \times 0.25 = 0.25 \text{ dB}$$

Απαιτούμενο όριο ισχύος

$$P_m = 5 \text{ dB}$$

$$P_t - P_r > A_f + A_c + A_s + P_m$$

$$23.97 > 11.2 + 4 + 0.25 + 5$$

$$23.97 > 20.45;$$

Ο όρος όριο ισχύος είναι η διαφορά του προϋπολογισμού ισχύος από τις ολικές απώλειες της ζεύξης. Σε αυτό το παράδειγμα παρατηρούμε ότι υπάρχει απαιτούμενο όριο ισχύος (στο παρακάτω παράδειγμα το όριο ισχύος υπολογίζεται και μας φανερώνει τις περεταίρω απώλειες που μπορεί να υποστεί η ζεύξη χωρίς να επηρεαστεί η ορθή λειτουργία της).

Το σύστημα μπορεί να υποστεί περισσότερες απώλειες χωρίς να υπάρχει πρόβλημα επικοινωνίας.

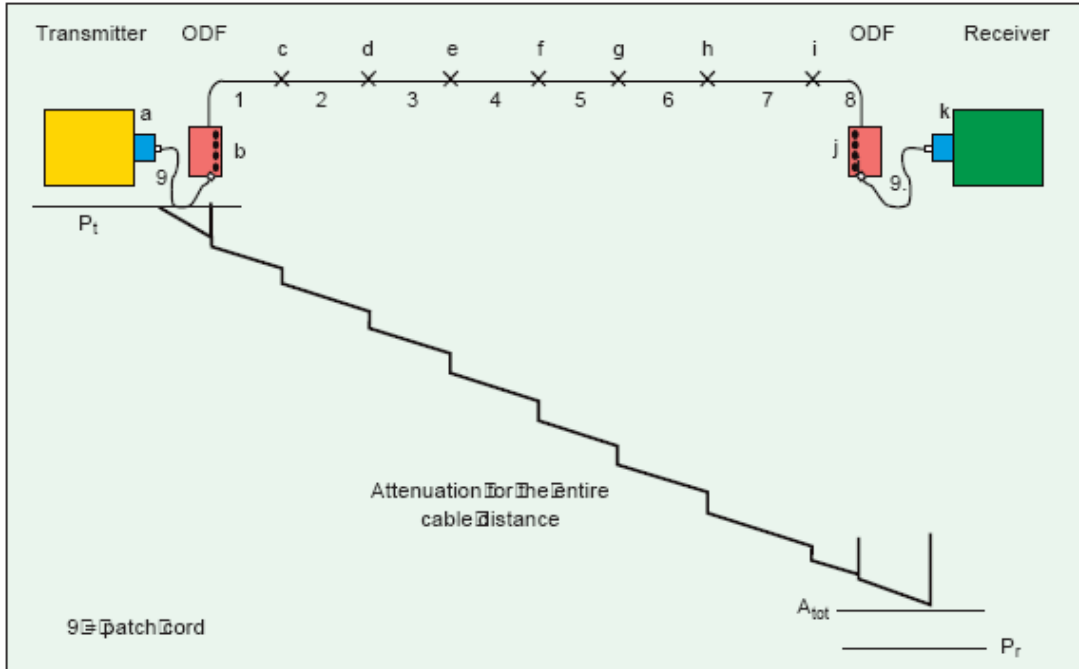
Συμπέρασμα : το σύστημα θα λειτουργήσει με τη δοσμένη ισχύ εξόδου

4.1.2. Καθορισμός προϋπολογισμού ισχύος – παράδειγμα 2 (σύνθετη περίπτωση)

Σε αυτό το παράδειγμα καθορίζεται ο προϋπολογισμός ισχύος μιας ζεύξης μεγάλης απόστασης. Το δίκτυο αποτελείται από καλώδια μονότροπων ινών εσωτερικής και εξωτερικής εγκατάστασης. Συνολικά 8 καλώδια μήκους 6 km το καθένα. Είναι γνωστά τα παρακάτω :

- Οπτικό πομπό με ισχύ εξόδου 250 μW , $\text{NA}=0.14$ και διάμετρο 14 μm
- Ο πομπός συνδέεται μέσω ενός μικρού μήκους καλωδίου (διάμετρος 11 μm $\text{NA}=0.12$ και απώλεια σύνδεσης 0.5 dB) σε ένα ODF (οπτικός καταναμητής κεφ.10) κουτί και στη συνέχεια σε οπτικό καλώδιο εξωτερικού χώρου
- Το οπτικό καλώδιο για τους τομείς 1,2,4,5,6 και 8 παρουσιάζει 0.22 dB/km απόσβεση, έχει διάμετρο πυρήνα 9.5 μm και $\text{NA}=0.11$
- Το οπτικό καλώδιο για τους τομείς 3 και 7 παρουσιάζει 0.35 dB/km απόσβεση, έχει διάμετρο πυρήνα 10.5 μm και $\text{NA}=0.12$
- Όλες οι κολλήσεις είναι τύπου Fusion με απώλειες μικρότερες από 0.15 dB η κάθε μια
- Η εισαγωγή του φωτός στο δέκτη είναι πανομοιότυπη με εκείνη από τον πομπό στην ίνα
- Ο δέκτης έχει ευαισθησία 200 nW, διάμετρο 25 μm και $\text{NA}=0.4$

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει ένα απλό σχηματικό διάγραμμα των παραγόντων που αποτελούν το δίκτυο του παραδείγματος 2 και σημειώνονται τα μέρη στα οποία απαιτούνται υπολογισμοί.



Εικόνα 6. Σχηματικό διάγραμμα του δικτύου του παραδείγματος 2. Τα σημεία στα οποία απαιτείται υπολογισμός μαρκάρονται με κάποιο γράμμα

Υπολογισμοί

- Απώλειες από την εισαγωγή του φωτός από τον πομπό στην ίνα
Στον πομπό οι απώλειες παρουσιάζονται λόγω των διαφορετικών NA, των διαφορετικών διαμέτρων των ινών και της απώλειας του συνδετήρα (0.5 dB ο καθένας)

$$Loss_{NA} = -1.4 \text{ dB}$$

$$Loss_{\emptyset} = -2.1 \text{ dB}$$

$$\text{Connector loss} = -0.5 \text{ dB}$$

$$\text{Transmitter attenuation } (A_t) = 4.0 \text{ dB}$$

- ODF κουτί (b) στο τέλος του πομπού
Σε αυτό το σημείο παρουσιάζεται διαφορά στα NA, στις διαμέτρους των ινών και απώλεια συνδετήρα.

$$Loss_{NA} = -0.8 \text{ dB}$$

$$Loss_{\emptyset} = -1.3 \text{ dB}$$

$$\text{Connector loss} = -1 \text{ dB}$$

$$\text{ODF box attenuation } (A_{ODF}) = 3.1 \text{ dB}$$

- Απώλειες ίνας για ολόκληρη τη ζεύξη
 6 μέρη ίνας με απώλεια 0.22 dB/km
 $6 \times 6 \times 0.22 = -7.9 \text{ dB}$
 2 μέρη ίνας με απώλεια 0.35 dB/km
 $2 \times 6 \times 0.35 = -4.2 \text{ dB}$
 Οπότε έχουμε ολική απώλεια ίνας :
 $(A_f) \quad 12.1 \text{ dB}$
- Απώλεια ισχύος στις κολλήσεις (Fusion)
 Παρουσιάζονται συνολικά επτά κολλήσεις
 $7 \times 0.15 = -1.1 \text{ dB}$
 Οπότε έχουμε ολικές απώλειες κολλήσεων της τάξης των 1.1 dB. Στα σημεία c, f και g δεν υπάρχουν άλλες απώλειες.
- Απώλειες από τις κολλήσεις των καλωδίων στους τομείς 3 και 7
 Οι κολλήσεις των καλωδίων στους τομείς 3 και 7 παρουσιάζουν απώλειες ισχύος λόγω των διαφορετικών NA και διαμέτρων.
 $Loss_{NA} = -0.8 \text{ dB}$
 $Loss_{\emptyset} = -0.9 \text{ dB}$
 Οπότε παρουσιάζεται ολική απώλεια της τάξης των 3.4 dB
- Απώλεια ισχύος στο ODF κουτί στο μέρος του δέκτη (j)
 Στο σημείο αυτό έχουμε απώλειες μόνο λόγω του συνδετήρα, οπότε οι ολικές απώλειες είναι της τάξης του 1 dB.
- Απώλεια ισχύος στο δέκτη (k)
 Λόγω του ότι το NA και η διάμετρος του δέκτη είναι μεγαλύτερα από εκείνα της ίνας σύνδεσης, παρουσιάζονται απώλειες μόνο στο συνδετήρα. Οπότε έχουμε συνολικές απώλειες της τάξης του 1 dB.

Προϋπολογισμός ισχύος

Προσθέτοντας όλες τις απώλειες καταλήγουμε στον τελικό προϋπολογισμό ισχύος.

$$(A_t) + (A_{ODF}) + (A_f) + (A_s) + (A_{df}) + (A_{ODF}) + (A_r) + (P_m)$$

$$\text{Transmitter output power } 250 \mu\text{W } (P_t) = -6 \text{ dB}$$

$$\text{Receiver sensitivity } 200 \text{ nW } (P_r) = -37 \text{ dB}$$

$$\text{Power budget } (P_t - P_r) = 31 \text{ dB}$$

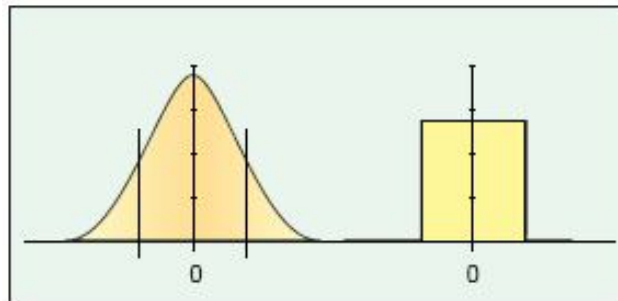
Αν τώρα προσθέσουμε όλες τις απώλειες κατά μήκος της ζεύξης λαμβάνουμε
τελική τιμή συνολικών απωλειών **25.2 dB**
Το όριο ισχύος λοιπόν του συστήματος είναι **5.8 dB**

Όπως διαφαίνεται από τα δύο παραδείγματα ο αριθμητικός καθορισμός του προϋπολογισμού ισχύος είναι αρκετά απλός. Ο προϋπολογισμός ισχύος αποδεικνύει μαθηματικά ότι θα φτάσει αρκετή ισχύς στο δέκτη παρ' όλες τις απώλειες κατά μήκος της ζεύξης.

4.2. Σχεδιασμός συστήματος : Εύρος ζώνης (Bandwidth)

Για να είμαστε σίγουροι ότι θα έχουμε τη μικρότερη δυνατή παραμόρφωση του σήματος (αναλογικού ή ψηφιακού) που μεταδίδεται σε μια ζεύξη, πρέπει το εύρος ζώνης να είναι ικανοποιητικά ευρύ. Ένας εμπειρικός κανόνας είναι ο εξής : Η διάρκεια του ελάχιστου μεταδιδόμενου παλμού πρέπει να είναι 1.5 φορές μεγαλύτερη από το χρόνο ανόδου της ζεύξης.

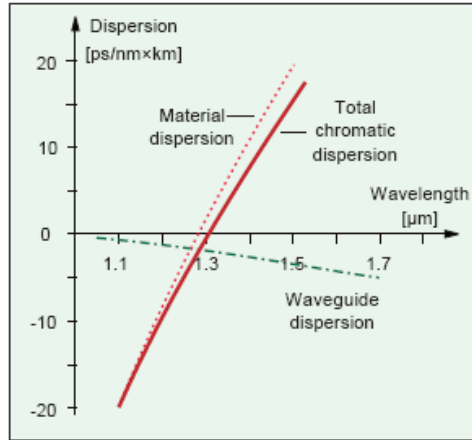
Η διασπορά, ο χρόνος ανόδου και το εύρος ζώνης, σχετίζονται μεταξύ τους σύμφωνα με κάποιες σταθερές, των οποίων οι τιμές διαφέρουν σύμφωνα με το σχήμα του οπτικού παλμού που χρησιμοποιείται. Υπολογισμοί για τους οποίους χρησιμοποιείται ο γκαουσιανός παλμός δίνουν τα πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα.



Εικόνα 7. Σύγκριση ενός γκαουσιανού παλμού με ένα ψηφιακό παλμό. Σε συστήματα μεγάλης ταχύτητας ο πρώτος παλμός είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα

4.2.1. Χρωματική διασπορά

Η χρωματική διασπορά στην πραγματικότητα είναι ο συνδυασμός της διασποράς του υλικού και της διασποράς του κυματοδηγού. Γενικά, ο όρος χρωματική διασπορά, σημαίνει το άθροισμα των δύο τύπων διασποράς που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Η χρωματική διασπορά εξαρτάται από τον τύπο του υλικού και του κυματοδηγού που χρησιμοποιούνται και δε λαμβάνεται υπόψη για συστήματα με χαμηλή ταχύτητα μετάδοσης (<100 MHz) και μικρή απόσταση μετάδοσης (< 5 km). Η χρωματική διασπορά περιορίζεται αρκετά για ζεύξεις ευρείας ζώνης που χρησιμοποιούν ως πομπούς LEDs.



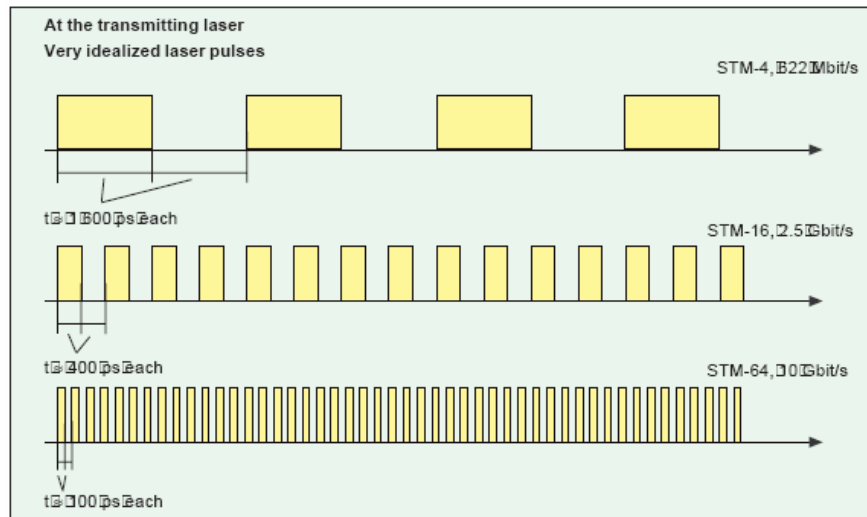
Εικόνα 8. Η χρωματική διασπορά είναι το άθροισμα της διασποράς του υλικού συν τη διασπορά του κυματοδηγού

4.2.2. Διεύρυνση παλμού λόγω της χρωματικής διασποράς σ_{chrome}

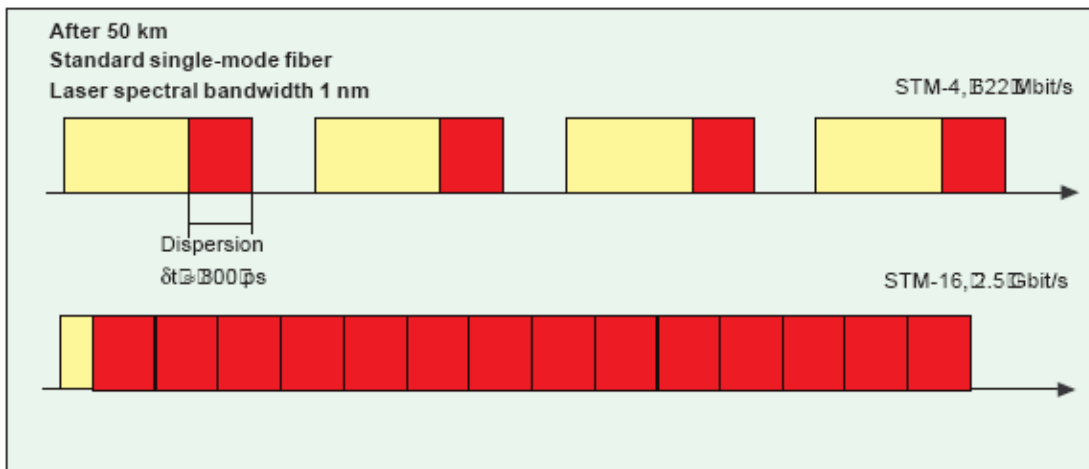
Η διεύρυνση του παλμού λόγω της χρωματικής διασποράς υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον τύπο που αναφέρεται παρακάτω. Η σταθερά $D(\lambda)$ δίνεται στο data sheet κάθε ίνας.

$$\sigma_{\text{chrome}} = D(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot L [\text{ps}]$$

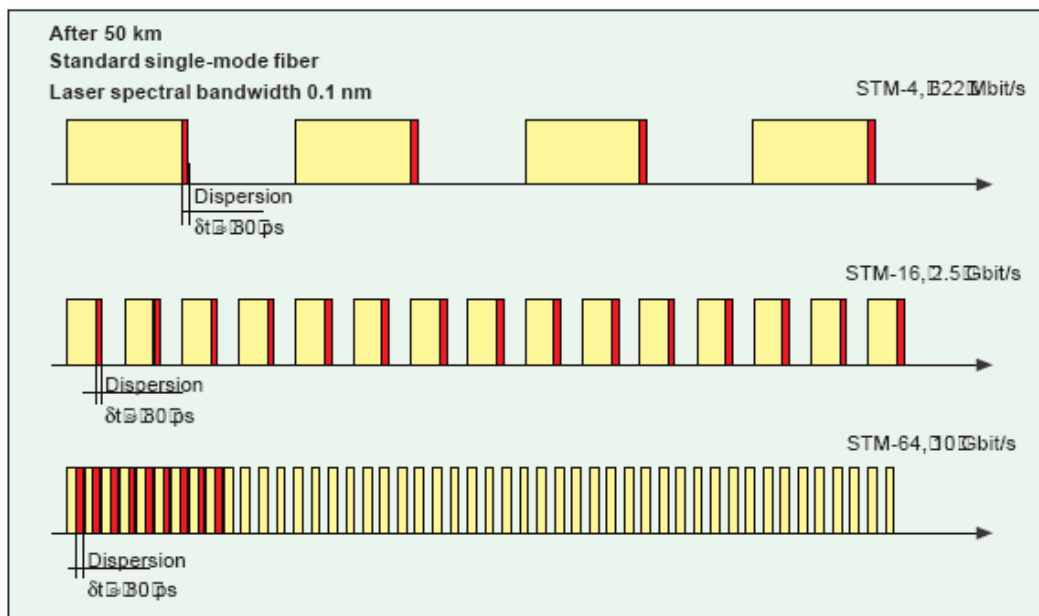
- Η σταθερά $D(\lambda)$ παριστά τη χρωματική διασπορά
- Ο παράγοντας $\Delta\lambda$ είναι το φασματικό εύρος ζώνης του πομπού
- Ο παράγοντας L είναι το μήκος της οπτικής ζεύξης (km)



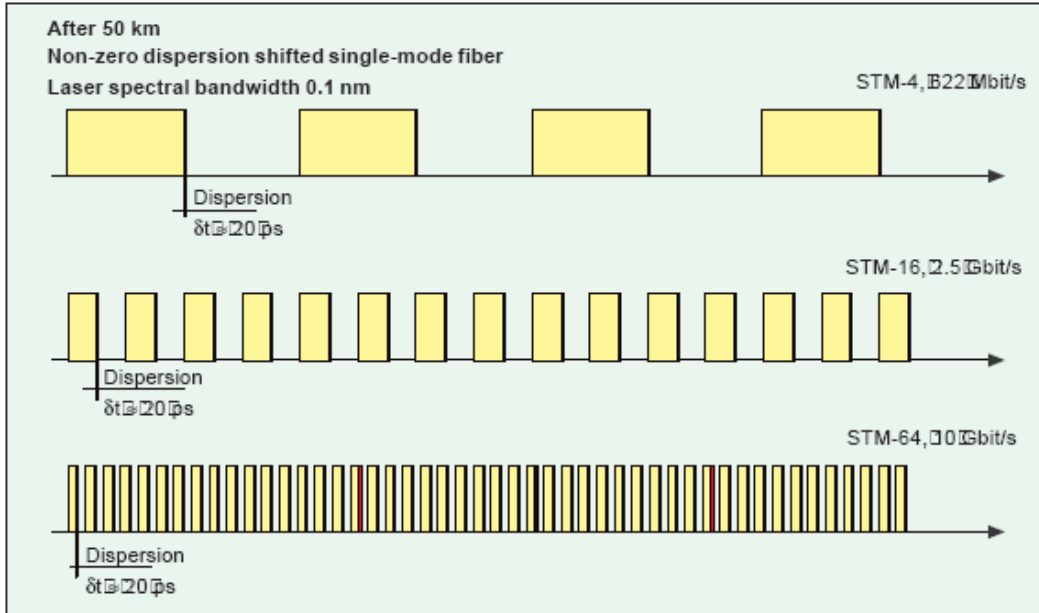
Εικόνα 9. Αναπαράσταση παλμών φωτός που σηματοδοτούν το ψηφιακό '1' και το ψηφιακό '0'



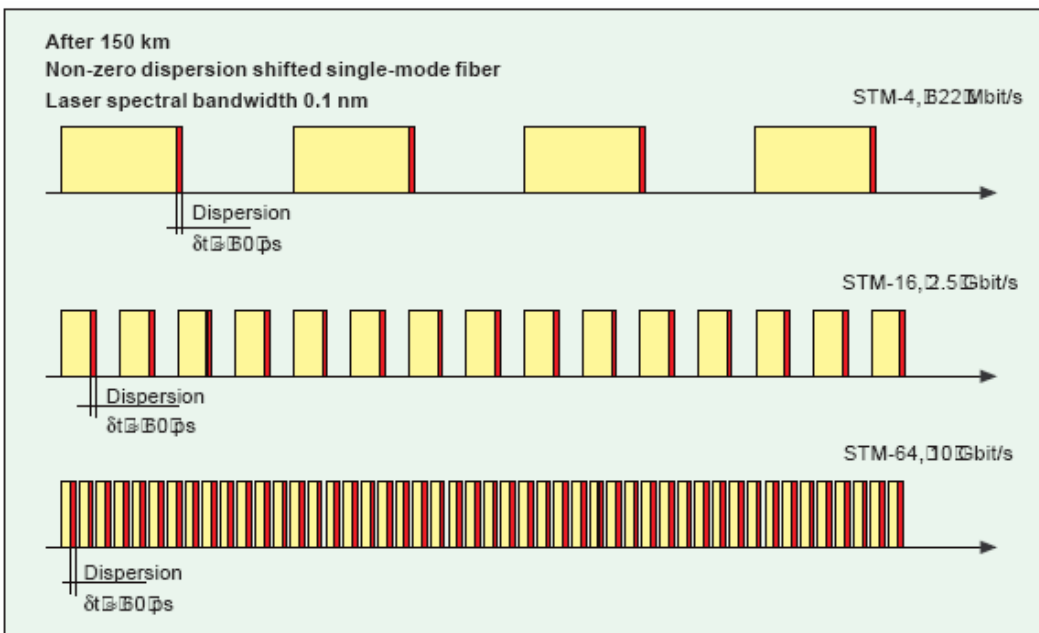
Εικόνα 10. Χρωματική διασπορά μιας συνηθισμένης μονότροπης οπτικής ίνας μετά από 50 km. Η χρωματική διασπορά είναι 16 ps/nm*km. Το φασματικό εύρος ζώνης του πομπού Laser είναι 1nm. Και τα δύο συστήματα STM-16 και STM-64 θα αποτύχουν



Εικόνα 11. Χρωματική διασπορά μιας συνηθισμένης μονότροπης οπτικής ίνας μετά από 50 km. Η χρωματική διασπορά είναι 16 ps/nm*km. Το φασματικό εύρος ζώνης του πομπού Laser είναι 0.1nm. Μόνο το σύστημα STM-64 θα αποτύχει



Εικόνα 12. Χρωματική διασπορά μιας μονότροπης ίνας μετατοπισμένης μη μηδενικής διασποράς μετά από 50 km. Η χρωματική διασπορά είναι $4 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$. Το φασματικό εύρος ζώνης του πομπού Laser είναι 0.1 nm . Και τα τρία συστήματα θα λειτουργούν κανονικά



Εικόνα 13. Χρωματική διασπορά μιας μονότροπης ίνας μετατοπισμένης μη μηδενικής διασποράς μετά από 150 km. Η χρωματική διασπορά είναι $4 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$. Το φασματικό εύρος ζώνης του πομπού Laser είναι 0.1 nm . Και τα τρία συστήματα θα λειτουργούν κανονικά

Οι εικόνες των προηγούμενων σελίδων παρουσιάζουν το τι συμβαίνει σε ένα ιδανικό παλμό φωτός, όταν οδηγείται μέσα σε διαφορετικούς τύπους μονότροπης ίνας για μήκος κύματος 1550 nm. Για 1330 nm η χρωματική διασπορά παίρνει τιμές κοντά στο μηδέν, γεγονός που μας επιτρέπει να μην τη λαμβάνουμε υπόψη για ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Από τις εικόνες επίσης διαφαίνεται η ανάγκη χρήσης Laser με στενό φασματικό εύρος ζώνης, ειδικά για ζεύξεις πολύ μεγάλων αποστάσεων μεταξύ των επαναληπτών. Προσαρμόζοντας στο τέλος κάθε οπτικής ζεύξης οπτική ίνα που παρουσιάζει αρνητική χρωματική διασπορά μπορεί να αντισταθμιστεί το πρόβλημα της χρωματικής διασποράς στην είσοδο του δέκτη. Παρότι η μέθοδος αυτή φαίνεται ιδιαίτερα απλή αποτελεί την πιο συνηθισμένη και αποδοτική μέθοδο για την αντιμετώπιση της χρωματικής διασποράς. Βέβαια αν το φαινόμενο της χρωματικής διασποράς δεν δημιουργεί πρόβλημα στην ζεύξη δεν συντρέχει λόγος για να υλοποιηθεί κάτι τέτοιο. Τέλος με μείωση του ρυθμού μετάδοσης δεν εξαλείφεται η χρωματική διασπορά (παραμένει η ίδια) αλλά αποφεύγεται η διασυμβολική παρεμβολή που αυτή δημιουργεί με αποτέλεσμα να λειτουργεί κανονικά το σύστημα.

4.2.3. Χρονική καθυστέρηση (δT_{modal}) και διεύρυνση παλμού (σ_{modal}) λόγω της διασποράς τρόπου μετάδοσης

Η χρονική καθυστέρηση και η διεύρυνση παλμού λόγω της διασποράς τρόπου μετάδοσης (λαμβάνει χώρα μόνο σε πολύτροπες ίνες) οφείλεται στους διαφορετικούς τρόπους που μεταδίδονται στον πυρήνα της ίνας. Η μέγιστη διασπορά τρόπου μετάδοσης που εμφανίζεται σε πολύτροπες ίνες βηματικού δείκτη, μπορεί να περιοριστεί αρκετά αυξάνοντας το δείκτη διάθλασης του κέντρου. Σε μετάδοση με μονότροπες ίνες δεν παρουσιάζεται διασπορά τρόπου μετάδοσης. Η χρονική καθυστέρηση και η διεύρυνση παλμού δίνονται από τους παρακάτω τύπους :

Διαφορά χρόνου καθυστέρησης σε πολύτροπες ίνες βηματικού δείκτη :

$$\delta T_{\text{step}} = \frac{L \cdot n_2^2}{c \cdot n_1} \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2} \right) \approx \frac{L \cdot (\text{NA})^2}{2 \cdot c \cdot n_2} \quad \text{when } \Delta = \frac{n_2 - n_1}{n_1} \ll 1$$

RMS τιμή της διεύρυνσης παλμού:

$$\sigma_{\text{step}}^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{\delta T_{\text{step}}}{2} \right)^2$$

Αντικαθιστώντας από τον παραπάνω τύπο λαμβάνουμε την παρακάτω σχέση:

$$\sigma_{\text{step}} \cong \frac{L \cdot n_2 \cdot \Delta}{2\sqrt{3} \cdot c} \cong \frac{L (NA)^2}{4\sqrt{3} \cdot n_2 \cdot c}$$

Διαφορά χρόνου καθυστέρησης σε πολύτροπες ίνες βαθμιαίου δείκτη :

$$\delta T_{\text{graded}} \cong \frac{L \cdot n_2 \cdot \Delta^2}{2 \cdot c} \cong \frac{(NA)^4}{8 \cdot n_2^3 \cdot c}$$

RMS τιμή της διεύρυνσης παλμού:

$$\sigma_{\text{graded}} = \frac{L \cdot n_2 \cdot \Delta^2}{20\sqrt{3} \cdot c}; \text{ where } \Delta \approx \frac{n_2 - n_1}{n_1}$$

4.2.4. Συνολική διεύρυνση παλμού λόγω διασποράς σε πολύτροπες ίνες

Η συνολική διεύρυνση παλμού (RMS τιμή) λόγω διασποράς σε πολύτροπες ίνες υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\sigma_{\text{tot}} = \sqrt{\sigma_{\text{chrome}}^2 + \sigma_{\text{modal}}^2}$$

4.2.5. Εύρος ζώνης σε πολύτροπες ίνες

Τα ενεργά στοιχεία ενός οπτικού δικτύου παρουσιάζουν ένα χρόνο ανόδου σε σχέση με το σήμα που λαμβάνουν, δηλ. υπάρχει καθυστέρηση μεταξύ του σήματος που λαμβάνεται και του σήματος που στέλνεται. Έτσι τα στοιχεία αυτά παρουσιάζουν ένα εύρος συχνοτήτων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, το εύρος ζώνης. Κατά τον ίδιο τρόπο στις ίνες, η διασπορά περιορίζει το εύρος ζώνης συχνοτήτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν (εύρος ζώνης ίνας).

Ο παρακάτω τύπος ισχύει μόνο για γκαουσιανό παλμό. Το εύρος ζώνης υπολογίζεται για τη διάρκεια ενός παλμού που είναι 3dB μικρότερη από τη μέγιστη τιμή :

$$\text{Optically, } B_{3\text{dB,optical}} = \frac{0.44}{\sigma_{\text{tot}}} \quad \sigma \text{ in (ns) gives B (GHz)}$$

$$B_{3\text{dB,optical}} = \sqrt{2} \cdot B_{3\text{dB,electrical}}$$

$$\text{Electrically, } B_{3\text{dB,electrical}} = \frac{0.33}{\sigma_{\text{tot}}} \quad \sigma \text{ in (ns) gives B (GHz)}$$

Το οπτικό εύρος ζώνης όπως διαφαίνεται παραπάνω δεν είναι ίδιο με το ηλεκτρικό εύρος ζώνης. Έτσι για το οπτικό πεδίο χρησιμοποιούμε τον τύπο $10\log(A)$ ενώ για το ηλεκτρικό πεδίο τον τύπο $20\log(A)$.

Στα data sheets των πολύτροπων οπτικών ινών το εύρος ζώνης εκφράζεται σε MHz x km. Για δοσμένο μήκος ίνας είναι εύκολο να υπολογίσουμε αν το εύρος ζώνης είναι κατάλληλο και επαρκές για την εφαρμογή μας. [εύρος ζώνης που απαιτείται (MHz) x μήκος ίνας (km) < καθορισμένο εύρος ζώνης].

4.2.6. Εύρος ζώνης σε μονότροπες ίνες

Στις μονότροπες οπτικές ίνες τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα είναι αρκετά πιο πολύπλοκα από εκείνα στις πολύτροπες ίνες με αποτέλεσμα να απαιτούνται υπολογισμοί που ξεφεύγουν από τους στόχους αυτής της εργασίας. Μια αρκετά χοντρική προσέγγιση του εύρους ζώνης δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$\text{Bandwidth}_{(\text{single-mode})} \approx \frac{0.44}{\Delta\lambda \cdot D(\lambda) \cdot L}$$

- Η σταθερά $D(\lambda)$ παριστά τη χρωματική διασπορά
- Ο παράγοντας $\Delta\lambda$ είναι το φασματικό εύρος ζώνης του πομπού
- Ο παράγοντας L είναι το μήκος της οπτικής ζεύξης (km)

Παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερο είναι το φασματικό εύρος πομπού και η διασπορά, τόσο μικρότερο είναι το εύρος ζώνης.

4.2.7. Χρόνος ανόδου οπτικής ίνας

Στις μονότροπες ίνες μόνο η χρωματική διασπορά λειτουργεί σαν περιοριστικός παράγοντας για το εύρος ζώνης ενώ στις πολύτροπες υπεισέρχεται και ο παράγοντας της διασποράς τρόπου μετάδοσης. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το εύρος ζώνης κατ' επέκταση επηρεάζουν και το χρόνο ανόδου. Ο χρόνος ανόδου υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο :

$$t(\text{ns}) = \frac{0.35}{\text{bandwidth}(\text{GHz})}$$

Ο χρόνος ανόδου εξαρτάται από το μήκος της ίνας, γεγονός που σημαίνει ότι πρέπει να υπολογίζεται ξεχωριστά για κάθε μέρος του δικτύου. Ο συνολικός χρόνος ανόδου της ζεύξης υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο :

$$T = \sqrt{t_1^2 + t_2^2 + \dots + t_{n-1}^2 + t_n^2}$$

Ο χρόνος ανόδου του πομπού και του δέκτη λαμβάνεται από τα data sheets τους.

4.2.8. Χρόνος ανόδου της οπτικής ζεύξης (σύστημα με πολύτροπες ίνες)

Η διαδικασία που ακολουθείται για να καθορίσουμε το χρόνο ανόδου της ζεύξης συνοψίζεται παρακάτω:

- Καθορίζουμε το χρόνο ανόδου του πομπού από το data sheet
- Καθορίζουμε το χρόνο ανόδου του δέκτη από το data sheet
- Καθορίζουμε το χρόνο ανόδου της οπτικής ίνας από τη χρωματική διασπορά και τη διασπορά τρόπου μετάδοσης
- Υπολογίζουμε το συνολικό χρόνο ανόδου της ζεύξης σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$T(10-90\%) = \sqrt{t_{\text{transmitter}}^2 + t_{\text{fiber}}^2 + t_{\text{receiver}}^2}$$

- Υπολογίζουμε το εύρος ζώνης της ζεύξης από τον παρακάτω τύπο :

$$B_{3\text{dB,electrical}}(\text{GHz}) = \frac{0.35}{T(\text{ns})}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

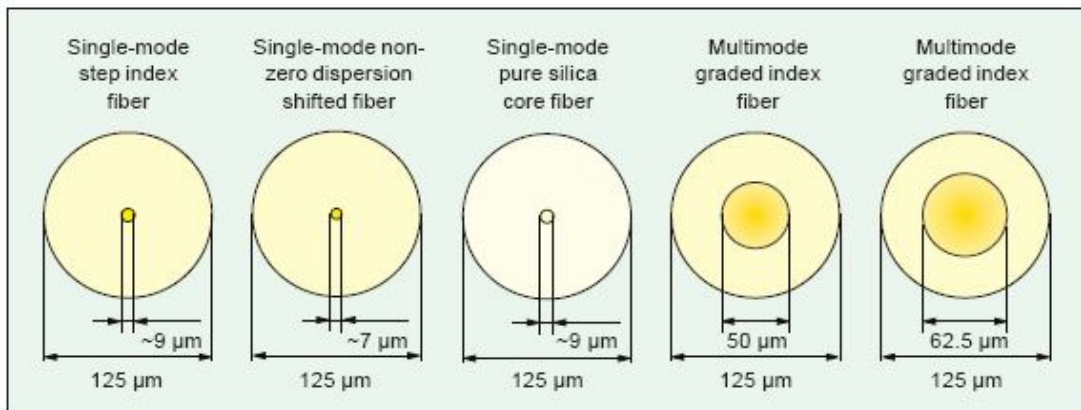
ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΛΩΔΙΟΥ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

Εισαγωγή

Ανάμεσα στις μεγαλύτερες εφευρέσεις του 20^{ου} αιώνα μπορεί να συμπεριληφθεί η μέθοδος μετατροπής των τηλεφωνικών συνδιαλέξεων και άλλων τύπων αναλογικών και ψηφιακών τηλεπικοινωνιών σε σύντομους φωτεινούς παλμούς, οι οποίοι στη συνέχεια μεταδίδονται μέσα από οπτικές ίνες. Με την εισαγωγή των οπτικών ινών στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, ο χρήστης έχει στη διάθεσή του πλήθος υπηρεσιών, όπως telex, telefax, videophone, high definition TV κλπ. Ακόμη, η επιτυχημένη σχεδίαση ενός κινητού τηλεπικοινωνιακού συστήματος βασίζεται στην ύπαρξη ενός ολοκληρωμένου δικτύου οπτικών ινών.

Πιθανώς το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό των οπτικών ινών είναι η σχεδόν απεριόριστη χωρητικότητά τους για τη μετάδοση πληροφοριών σε μεγάλες αποστάσεις (> 100 km) χωρίς την ανάγκη ενίσχυσης του σήματος. Λόγω της «αναισθησίας» τους σε ισχυρά ηλεκτρικά πεδία, φωτεινούς και ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς, τα καλώδια οπτικών ινών μπορούν να εισαχθούν σε περιβάλλοντα που είναι αδύνατη η εγκατάσταση συμβατικών χάλκινων καλωδίων. Οι οπτικές ίνες είναι, επίσης, ιδανικές για τη μετάδοση κρυπτογραφημένων σημάτων, όπως για στρατιωτικούς σκοπούς ή σε δίκτυα τραπεζών και νοσοκομείων.

Η τάση στις οπτικές τηλεπικοινωνίες είναι η ολοένα και εντονότερη χρήση των μονότροπων οπτικών ινών, ειδικά σε περιπτώσεις όπου είναι αναγκαία η μεγάλη χωρητικότητα ή σε περιπτώσεις που είναι μεγάλη η απόσταση μεταξύ 2 σημείων ενίσχυσης.



Εικόνα 1. Εδώ παρουσιάζονται πέντε τύποι ινών που χρησιμοποιούνται κατά κόρων στις μέρες μας

Οι πολύτροπες οπτικές ίνες βαθμιαίου δείκτη διάθλασης χρησιμοποιούνται σε δίκτυα περιορισμένης γεωγραφικής έκτασης με το εύρος ζώνης και τη χωρητικότητα των καναλιών να κυμαίνονται μεταξύ 500 – 2000 MHz*km .

Τα καλώδια οπτικών ινών είναι σημαντικά πιο ελαφριά και πιο ευλύγιστα από τα χάλκινα καλώδια . Αυτό σημαίνει ότι η εγκατάσταση καλωδίων οπτικών ινών είναι λιγότερο απαιτητική και περισσότερο γρήγορη . Το μικρό τους βάρος καθιστά δυνατή τη διαχείριση μεγαλύτερων μηκών ίνας (μέχρι 8 km για εξωτερικές εγκαταστάσεις) .

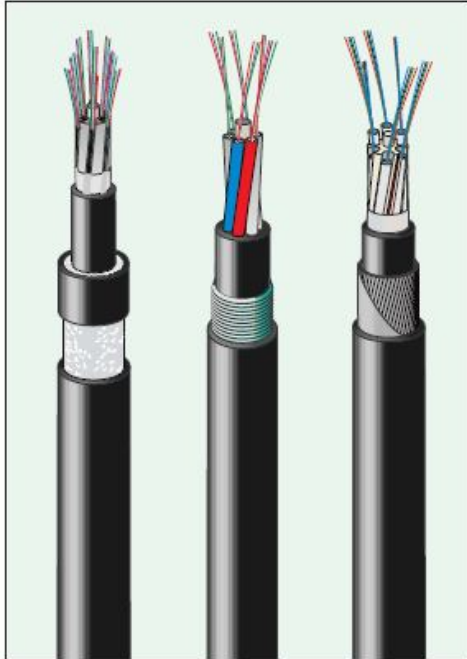
Οι μέθοδοι και ο εξοπλισμός για την εγκατάσταση χάλκινων καλωδίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλο βαθμό και στην εγκατάσταση καλωδίων οπτικών ινών . Ωστόσο , υπάρχουν μερικές πολύ σημαντικές διαφορές όπως για παράδειγμα η προσοχή που πρέπει να επιδείξουμε ώστε να μην λυγίσει ή να μην τανυστεί το καλώδιο που περιέχει την οπτική ίνα . Κάθε φορά που σύρεται ένα καλώδιο οπτικής ίνας πρέπει να χρησιμοποιείται ένας μικροεπεξεργαστής ένα δυναμόμετρο για τον έλεγχο της διαδικασίας .

Το καλώδιο οπτικής ίνας πρέπει να τοποθετείται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην πιέζεται από το υπερκείμενο έδαφος ή να υπόκειται σε οποιαδήποτε άλλη ελκτική δύναμη . Το γεγονός αυτό αναφέρεται και σε εσωτερικά δίκτυα οπτικών ινών που χρειάζονται ανακαίνιση και επέκταση (π.χ.LANs).

1. Άμεσα εγκατεστημένα καλώδια

Στην περίπτωση αυτή το καλώδιο βρίσκεται σε άμεση επαφή με το γήινο υπόστρωμα (χώμα , πέτρες , λάσπη) . Όταν όλα τα τυπικά ζητήματα που έχουν σχέση με τη διαδρομή που θα ακολουθήσει το καλώδιο καθοριστούν πλήρως (ιδιοκτησία γης , χάραξη διαδρομής από μηχανικούς κ.ά.) , πρέπει να ληφθούν υπόψη θαμμένα καλώδια παροχής ρεύματος , αερίου , σωληνώσεις ύδρευσης όπως και άλλα τηλεπικοινωνιακά καλώδια . Τα σημεία στα οποία έχουν γίνει κολλήσεις πρέπει επίσης να σημειωθούν εμφανώς . Επιπλέον , πρέπει να καθοριστεί η σύσταση του εδάφους σε όλο το μήκος της διαδρομής ώστε να επιλεγούν κατάλληλα υλικά ενίσχυσης του καλωδίου .

Κατά την παραγγελία ενός καλωδίου , πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη και το παραπάνω μήκος καλωδίου οπτικής ίνας που θα χρειαστούμε για « μπόσικο » . Επίσης , το καλώδιο πρέπει να είναι αρκετά μακρύ ώστε να είναι δυνατή η πραγματοποίηση κολλήσεων στην επιφάνεια του εδάφους .



Εικόνα 2. Εδώ παρουσιάζονται τρεις από τους πιο βασικούς τύπους άμεσα εγκατεστημένων οπτικών καλωδίων. Από αριστερά προς τα δεξιά έχουμε : GASLLDV, GRHLWLV, και GRSLTLV



Εικόνα 3. Δύο καλώδια αγωγών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άμεση εγκατάσταση στο υπέδαφος. Από αριστερά προς τα δεξιά : GASLDV και GRSLDV

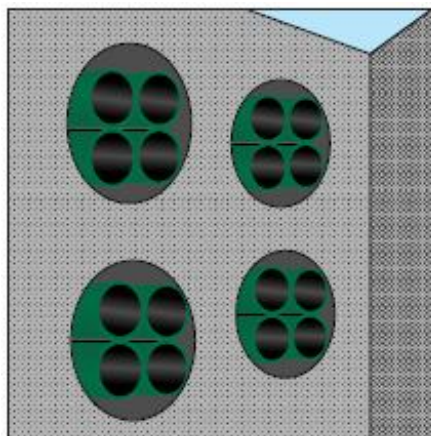
2. Εγκατάσταση σε σωλήνες καλωδίων

Σε αστικές περιοχές είναι πρακτικό να χρησιμοποιούμε τις ήδη υπάρχουσες σωληνώσεις (σωλήνες και τούνελ) . Συνήθως , τα καλώδια οπτικών ινών τοποθετούνται σε ξεχωριστούς αγωγούς . Εάν αυτό δεν είναι δυνατόν , το καλώδιο οπτικών ινών μπορεί να τοποθετηθεί μαζί με άλλα καλώδια που χρησιμοποιούνται για τηλεπικοινωνίες ή παροχή ηλεκτρικού ρεύματος δίχως να επηρεάσει τη λειτουργία τους .

Η χωρητικότητα ενός σωλήνα μπορεί να αυξηθεί με τη χρήση υποσωλήνων PVC . Οι υποσωλήνες αυτοί καθιστούν ευκολότερη τη μελλοντική επέκταση της οπτικής καλωδίωσης μιας και τα ήδη υπάρχοντα καλώδια δεν θα χρειαστεί να απεγκατασταθούν .

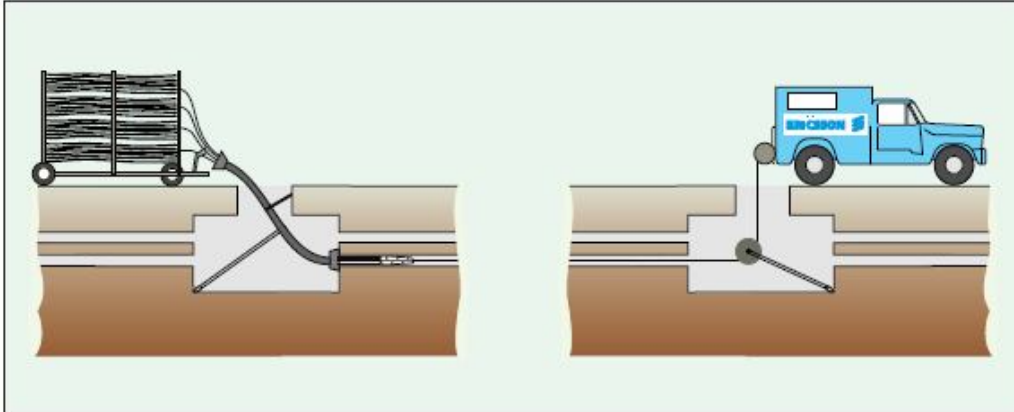
Υποσωλήνες

Όπως αναφέρθηκε ήδη , η χωρητικότητα των σωλήνων μπορεί να αυξηθεί με τη χρήση υποσωλήνων PVC . Μέχρι και τέσσερις υποσωλήνες PVC μπορούν να εισαχθούν σε έναν συνηθισμένο σωλήνα 100 mm .



Εικόνα 4. Παράδειγμα σωλήνων που περιέχουν υποσωλήνες

Με τη χρήση υποσωλήνων ο μέγιστος αριθμός PVC σωληνώσεων που μπορούν να μπουν στον μεγάλο αγωγό πρέπει να τοποθετηθούν ταυτόχρονα και να ασφαλιστούν και στα 2 άκρα .



Εικόνα 5. Μέθοδος εισαγωγής υποσωλήνων μέσα στον κεντρικό αγωγό

2.1. Διαφορετικές μέθοδοι εγκατάστασης καλωδίου μέσα σε σωλήνα

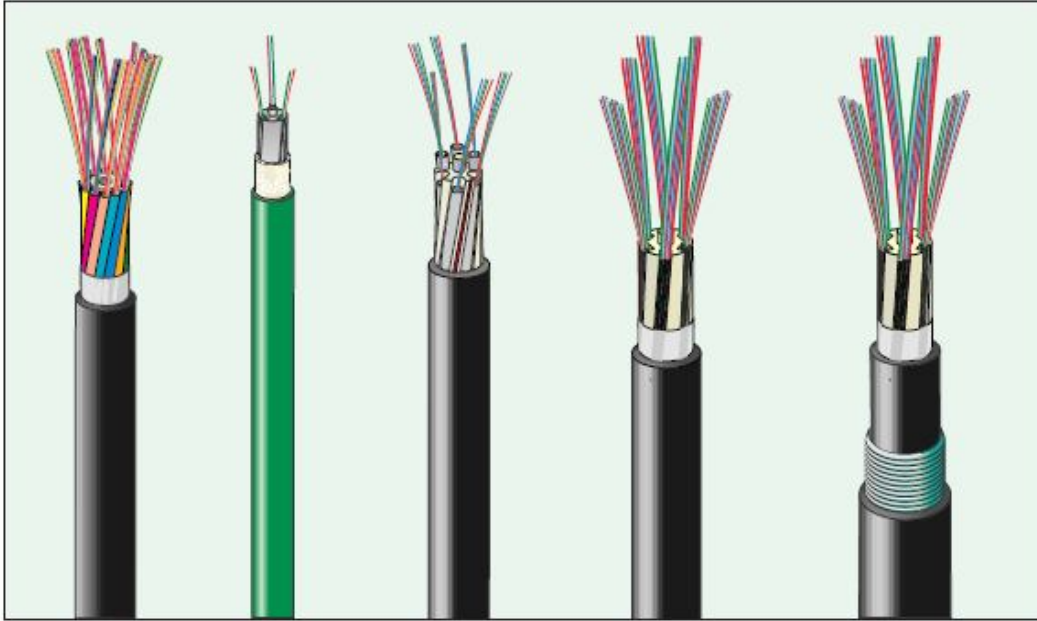
Η ακόλουθες μέθοδοι συνίστανται για την εγκατάσταση του καλωδίου στον σωλήνα :

- παραδοσιακό τράβηγμα με τη χρήση σχοινοιού
- « φύσημα » με χρήση πεπιεσμένου αέρα
- χρήση νερού για να επιπλεύσει το καλώδιο

Σε όλες τις περιπτώσεις πρέπει οι σωλήνες να τοποθετούνται σε όσο πιο λείο υπόστρωμα γίνεται . Όλες οι ενώσεις των σωλήνων πρέπει να γίνονται προσεκτικά για να αποφευχθούν οι απότομες άκρες μεταξύ των σωλήνων . Αποστάσεις μέχρι και 6 km είναι δυνατό να επιτευχθούν χωρίς να γίνουν κολλήσεις στο καλώδιο , με αποτέλεσμα να γλιτώνουμε πολύτιμο χρόνο .

2.2. Τύποι καλωδίων για εγκατάσταση σε σωλήνες

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία τύπων καλωδίων που χρησιμοποιούνται μέσα σε σωληνώσεις . Υπάρχει το ομοαξονικό καλώδιο GRHLDV που χρειάζεται την πλήρη προστασία από το σωλήνα όπως και το καλώδιο τύπου GASLWLV το οποίο χρησιμοποιεί το σωλήνα μόνο για να διευκολυνθεί η τοποθέτησή του μέσα στο έδαφος .



Εικόνα 6. Κλασικά παραδείγματα καλωδίων για εγκατάσταση μέσα σε αγωγούς

Η εικόνα 6 απεικονίζει διαφορετικούς τύπους καλωδίων που χρησιμοποιούνται μέσα σε σωληνώσεις :

- το ομοαξονικό καλώδιο , GRHLDV , το οποίο περιέχει μέχρι και 144 ίνες σε 12 σωλήνες
- το καλώδιο με οπές στον πυρήνα του , GASLBDV-S , με 24 ίνες σε μορφή κορδέλας για εσωτερική και εξωτερική χρήση
- το καλώδιο με οπές στον πυρήνα του , GRSLDV , με 48 ίνες σε 6 σωλήνες
- το καλώδιο με οπές στον πυρήνα του , GASLBDV , με 192 ίνες σε μορφή κορδέλας για εσωτερική και εξωτερική χρήση
- το καλώδιο με οπές στον πυρήνα του , GASLWLV , με 192 ίνες σε μορφή κορδέλας για εσωτερική και εξωτερική χρήση (αυτό το καλώδιο περιβάλλεται και από μια ασάλινη ταινία ως επιπλέον προστασία ενάντια στα τρωκτικά κλπ)

3. Μέτρα προφύλαξης της οπτικής ίνας σε φρεάτια υπονόμων

Συνήθως , το καλώδιο οπτικών ινών δε χρειάζεται επιπλέον προστασία σε φρεάτια υπονόμων ανάμεσα στα σημεία όπου έχουν γίνει συγκολλήσεις . Ωστόσο , για περισσότερη προστασία , χρησιμοποιούνται σωλήνες PVC ή PE επάνω από τα καλώδια . Τα εγκατεστημένα καλώδια οπτικών ινών σημειώνονται με ενδεικτική ταινία που προειδοποιεί ότι είναι σε λειτουργία και πρέπει να χειριστούν με πολλή προσοχή .

4. Εγκατάσταση σε δίκτυα πρόσβασης (access networks)

Δίκτυο πρόσβασης

Σήμερα το δίκτυο πρόσβασης αποτελείται κυρίως από παλιές χάλκινες καλωδιώσεις . Ωστόσο , οι νέες πολυμεσικές εφαρμογές χρειάζονται ολοένα και περισσότερη χωρητικότητα . Η ανάγκη για περισσότερη χωρητικότητα φαίνεται να διπλασιάζεται κάθε 12 μήνες ! Για το λόγο αυτό , το δίκτυο των παλιών χάλκινων καλωδιώσεων έχει αρχίσει να αντικαθίσταται από δίκτυα οπτικών ινών .

Το ιδεατό δίκτυο πρόσβασης περιλαμβάνει 2 ή περισσότερες μονότροπες ίνες σε όλη τη διαδρομή από τον ένα χρήστη στον άλλο . Μέχρι την επίτευξη όμως αυτού του τύπου δικτύου θα δούμε πιο πολλές υβριδικές λύσεις .

Τύποι δικτύων πρόσβασης

Ίνα στο σπίτι (FTTH) , το οπτικό δίκτυο πρόσβασης

Η ανανέωση του τηλεπικοινωνιακού δικτύου με τη χρήση αποκλειστικά οπτικών ινών θα είναι μια από τις μεγαλύτερες σύγχρονες τεχνολογικές προκλήσεις . Η αλλαγή αυτή θα προκαλέσει και μια αναπόφευκτη τεχνολογική εξέλιξη των πομπών και των δεκτών σε επίπεδο hardware και software . Εάν χρησιμοποιηθεί ένα ζεύγος μονότροπων ινών , ο τύπος αυτός του δικτύου πρόσβασης θα δώσει σχεδόν απεριόριστη χωρητικότητα . Ο περιορισμός σε τέτοιου είδους δίκτυα τίθεται από τις οπτοηλεκτρονικές διατάξεις .

Ίνα στο γραφείο (FTTD)

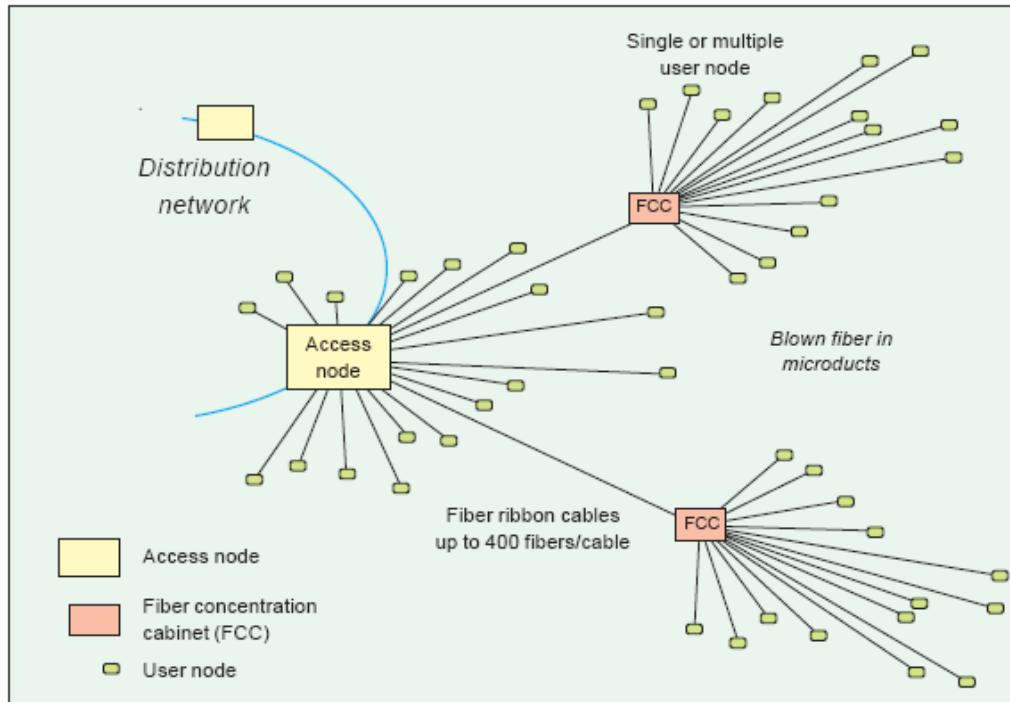
Το δίκτυο αυτό είναι πανομοιότυπο με το FTTD αλλά χρησιμοποιείται σε γραφεία

Ίνα ευρύτερης χρήσης (FTTC)

Αποτελεί τύπο δικτύου πρόσβασης που χρησιμοποιεί χάλκινα καλώδια για τα τελευταία 100 μέτρα . Το οπτικό καλώδιο χρησιμοποιείται μέχρι τον router ή τον οπτικό διακόπτη μέχρι ένα κεντρικό σημείο και τερματίζεται σε μια συσκευή οπτικού δικτύου (ONU) .

Εξ ολοκλήρου οπτικό δίκτυο πρόσβασης

Ένα οπτικό δίκτυο τέτοιου είδους χρησιμοποιεί μία ίνα ή ζεύγος ινών για τη σύνδεση ενός κόμβου πρόσβασης μέχρι τον κόμβο του χρήστη (σπίτι , γραφείο κλπ) . Η εικόνα 7 περιγράφει μια πολύ πρακτική λύση όπου δε χρησιμοποιούνται « ενεργά » εξαρτήματα ανάμεσα στον κόμβο πρόσβασης και στον κόμβο του χρήστη .

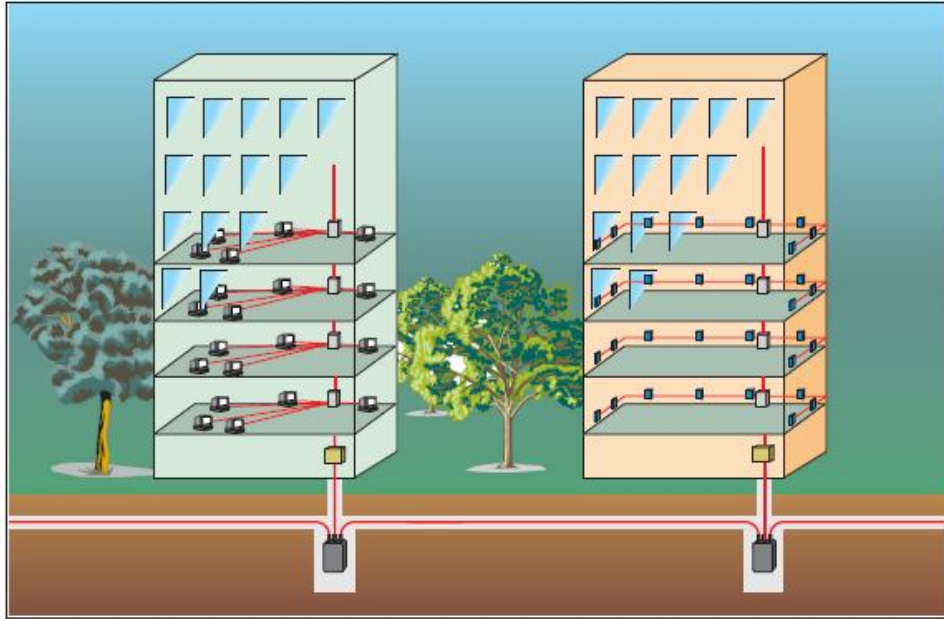


Εικόνα 7. Απεικόνιση ενός πιθανού FTTH δικτύου

Εάν όλοι οι τερματικοί χρήστες συνδέονται στο οπτικό δίκτυο διανομής στον κόμβο προσπέλασης με μια μόνο ίνα ή ένα ζεύγος ινών από την πρώτη φάση εγκατάστασης μπορεί να εξοικονομηθεί αρκετά μεγάλο ποσό χρημάτων αφού το « παθητικό » δίκτυο μπορεί να τοποθετηθεί σταδιακά .

Παραδοσιακή εσωτερική εγκατάσταση ενός δικτύου πρόσβασης

Μεγάλα , πολυώροφα κτήρια συνήθως περιέχουν σημαντικό αριθμό καλωδίων για μεταφορά ρεύματος και για τηλεπικοινωνίες . Αυτά τα καλώδια τοποθετούνται σε ράφια (racks) ή σε ειδικούς σωλήνες σε κάθε όροφο του κτηρίου . Είναι πολύ σημαντικό το γεγονός ότι τα οπτικά καλώδια θα πρέπει πάντα να βρίσκονται πάνω από τα υπόλοιπα , βαρύτερα καλώδια .

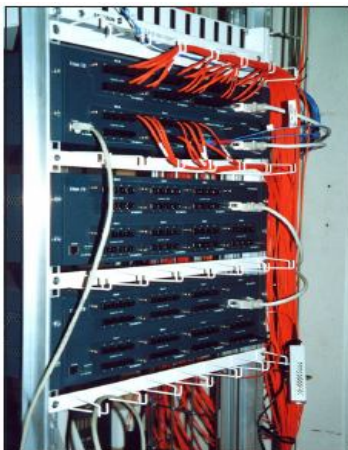


Εικόνα 8. Μια παραδοσιακή εγκατάσταση εσωτερικού χώρου. Στα αριστερά παρουσιάζεται ένα star-δίκτυο και στα δεξιά ένα bus

5. Κόμβος πρόσβασης

Σε έναν κόμβο πρόσβασης οι ίνες στο δίκτυο διανομής (στον αστικό δακτύλιο) συνδέονται με διακοπτικό εξοπλισμό ή εξοπλισμό δρομολόγησης. Το γεγονός αυτό καθιστά δυνατή τη σύνδεση πολλών service providers στο δίκτυο πρόσβασης .

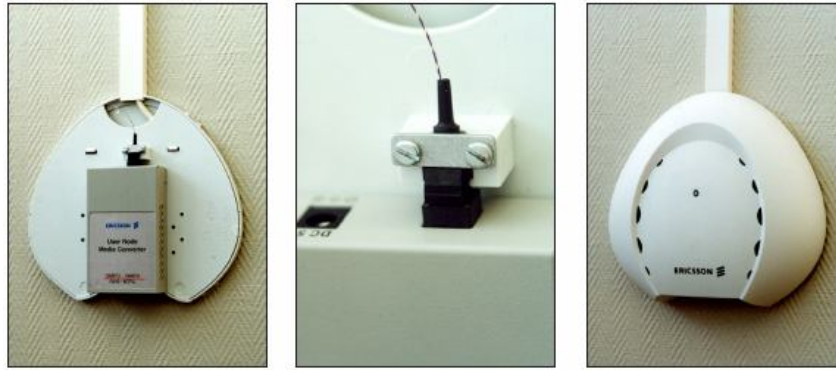
Σε ευρεία πεδία διανομής ινών (FDF) , οι ίνες από κάθε χρήστη συνδέονται με τον « ενεργό » εξοπλισμό .



Εικόνα 9. Κόμβος πρόσβασης για πάνω από 150 χρήστες

6. Εισαγωγή οπτοηλεκτρονικού εξοπλισμού στην πλευρά του χρήστη

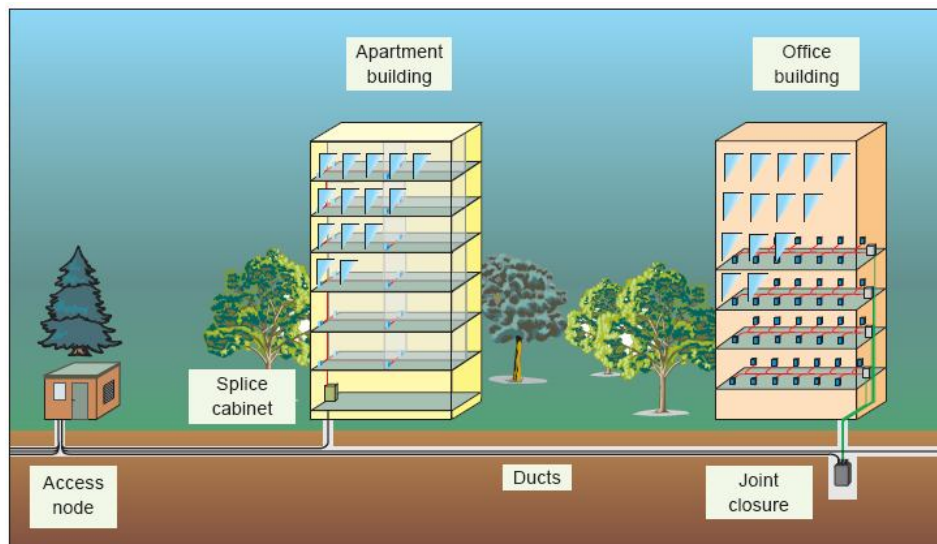
Στην πλευρά του χρήστη η ίνα τερματίζει σε μια συσκευή τοίχου . Η συσκευή αυτή περιλαμβάνει και όλα τα απαραίτητα οπτοηλεκτρικά κυκλώματα που χρειάζονται για την επίτευξη της ζεύξης .



Εικόνα 10. Τερματικό τοίχου και το οπτοηλεκτρονικό switch του

Η εικόνα 11 απεικονίζει ένα κτήριο διαμερισμάτων και ένα κτήριο γραφείων (αριστερά και δεξιά) . Στην καμπύλη που έχουν γίνει οι κολλήσεις οι ίνες έχουν συγκολληθεί στο εξωτερικό καλώδιο που συνδέεται με το πεδίο διανομής στον κόμβο πρόσβασης .

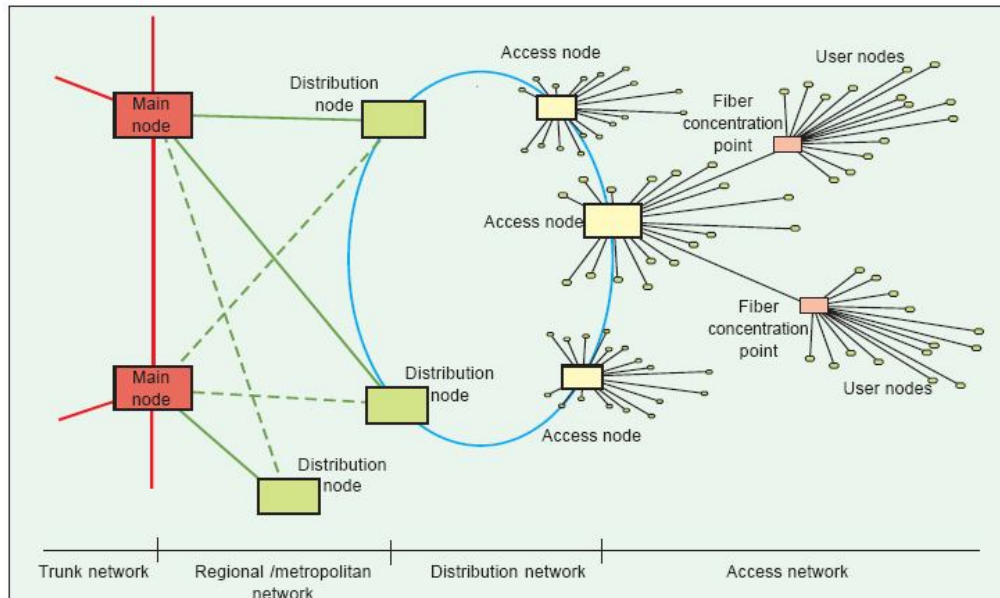
Για το κτήριο με τα γραφεία , τα ζεύγη οπτικών ινών από κάθε εργασιακό χώρο συγκολλώνται σε ένα καλώδιο πολλών ινών που διατρέχει όλη την απόσταση μέχρι τον κόμβο πρόσβασης . Το κόστος του κόμβου πρόσβασης μπορεί να διαμοιραστεί ανάμεσα στις 2 εταιρίες μέσα στο κτήριο με τα γραφεία .



Εικόνα 11. Αναπαράσταση ενός κτηρίου με διαμερίσματα και ενός κτηρίου με γραφεία τα οποία συνδέονται στο ίδιο οπτικό δίκτυο σύμφωνα με τη μέθοδο που αναφέρθηκε παραπάνω

Τελικά στα δίκτυα πρόσβασης

Όλος ο σχεδιασμός ενός δικτύου πρόσβασης πρέπει να γίνει έχοντας ως βάση τη μέθοδο «ένα στο σπίτι». Το τοπικό δίκτυο και η γενική διανομή θα μπορούν να προσπελαθούν από κόμβους πρόσβασης. Ποτέ δεν πρέπει να υποβαθμίζουμε τον αριθμό των ινών που θα χρειαστούν τελικά!



Εικόνα 12. Σχηματικό διάγραμμα ενός ολοκληρωμένου οπτικού δικτύου. Παρατηρούμε τα διάφορα μέρη που αποτελούν το δίκτυο

7. Ενώσεις (joint closures – « Μούφες »)

Μια προστατευτική ένωση για εξωτερικά καλώδια οπτικών ινών πρέπει :

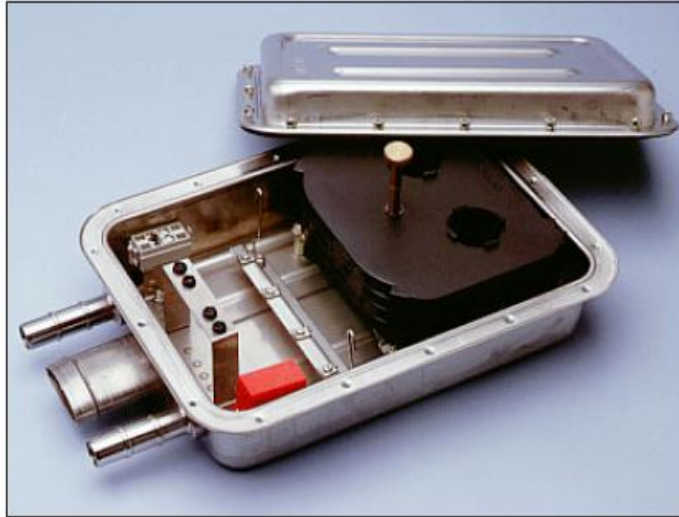
- να είναι εύκολη στην εγκατάστασή της
- να είναι εύκολη στο άνοιγμα και στο κλείσιμό της
- να παρέχει πολύ καλό επίπεδο μηχανικής προστασίας
- να παρέχει την ίδια προστασία για ενισχυμένα και μη καλώδια
- να παρέχει την ίδια προστασία για καλώδια διαφορετικών μεγεθών
- να προστατεύει καλώδια σε σωλήνες , θαμμένα καλώδια και εναέρια καλώδια

Τύποι ενώσεων

Παρακάτω παρουσιάζονται μερικοί από τους τύπους ενώσεων που κυκλοφορούν στο εμπόριο :

NCD 503

Η ένωση αυτή κατασκευάζεται από ανοξείδωτο ατσάλι και προστατεύει έναντι των οξέων . Σε τέτοιες ενώσεις μπορούν να χωρέσουν τυπικά έως 6 οδηγοί οπτικών ινών των 12 ινών ο καθένας .



Εικόνα 13. Ένωση τύπου NCD 503

NCD 504

Η ένωση αυτή είναι παρόμοια με την παραπάνω με μόνη διαφορά το γεγονός ότι κατασκευάζεται από πλαστικό υλικό (Noryl) .



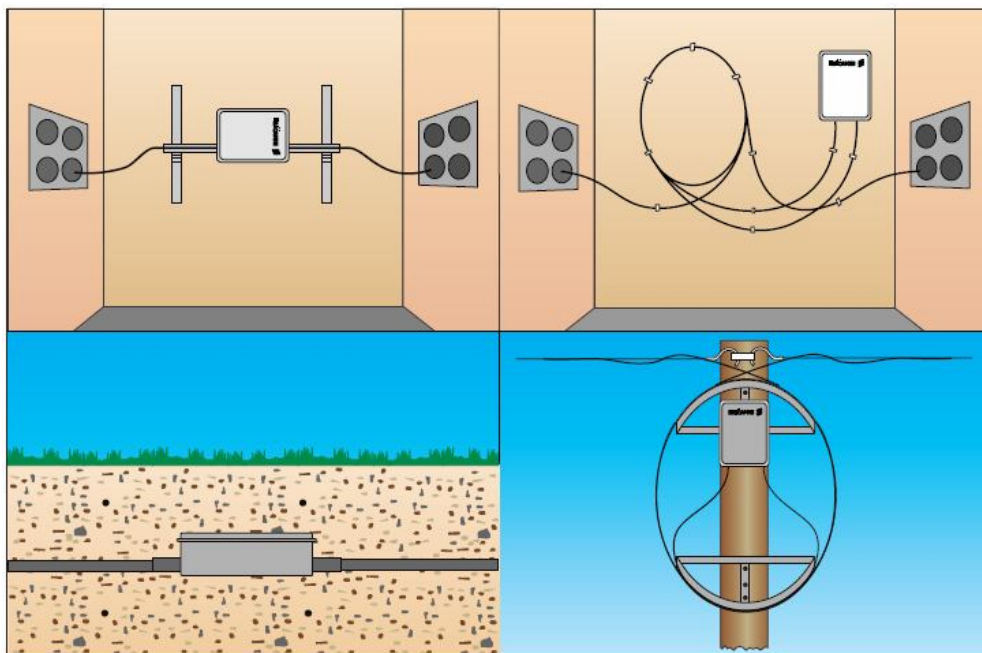
Εικόνα 14. Ένωση τύπου NCD 504

NCD 505 1004

Η ένωση αυτή είναι μια μικρή οπτοηλεκτρονική ένωση που μπορεί να χειριστεί έως και 4 καλώδια και 48 κολλήσεις οπτικών ινών . Η ένωση περιλαμβάνει ένα εξωτερικό πλαστικό κέλυφος και 2 κλείστρα στα άκρα της . Καθένα από τα 2 κλείστρα έχει εισόδους για 2 καλώδια .



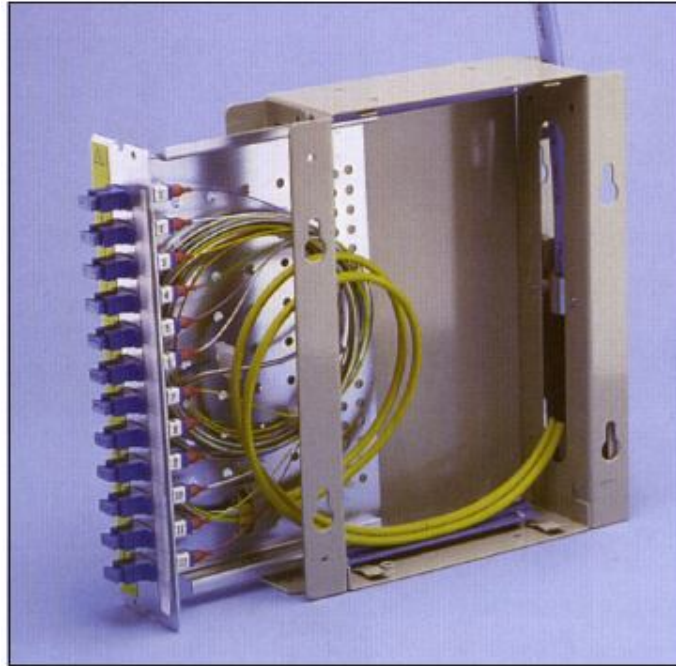
Εικόνα 15. Ένωση τύπου NCD 505 1004



Εικόνα 16. Διαφορετικοί τρόποι εγκατάστασης οπτικών ενώσεων

8. Τερματικά και οπτικοί κατανεμητές (LT – ODF)

Τα εξαρτήματα αυτά αποτελούν το interface (διεπαφή) μεταξύ του εξοπλισμού μετάδοσης και του δικτύου οπτικών ινών . Η κύρια λειτουργία τους είναι η οργάνωση και ο τερματισμός της ίνας στο σημείο όπου η ίνα από τον εξοπλισμό μετάδοσης συναντά την ίνα από το δίκτυο πρόσβασης .



Εικόνα 17. Οπτική τερματική μονάδα (παρατηρούμε τις τερματισμένες οπτικές ίνες)

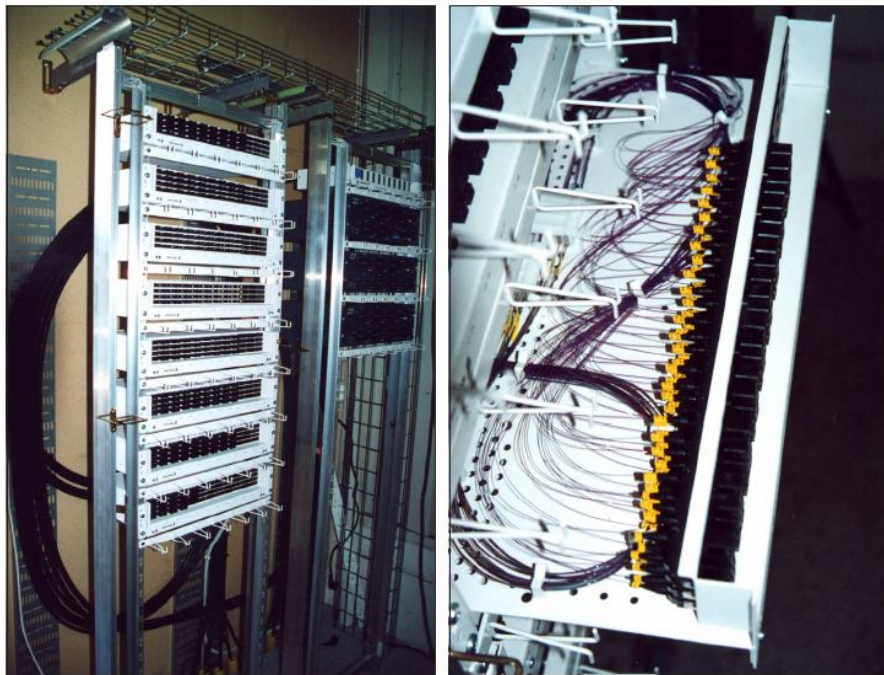
LT, ODF και FDF

Τα εξαρτήματα αυτά τοποθετούνται κυρίως όταν έχουμε 2 εισερχόμενα καλώδια πολλών ινών με ένα σύνολο 48 ινών . Σε περίπτωση μονότροπων οπτικών ινών , τα εξαρτήματα αυτά παραδίδονται τερματισμένα από πριν με ένα συγκεκριμένο μήκος ελεύθερου καλωδίου (καθορίζεται από τον αγοραστή) και είναι έτοιμα προς τοποθέτηση μαζί με τον εξοπλισμό για τη μετάδοση . Οι ίνες τερματίζονται με διάφορους τύπους συνδετήρων (FC/PC ή FC) ή με συνδετήρες πολλών ινών MT ή MTRJ .



Εικόνα 18. Προ-τερματισμένο ODF

Τα εξαρτήματα αυτά μπορούν να εισαχθούν σε racks των 19 ιντσών . Με τον τρόπο αυτό μπορούν να τραβηχτούν προς τα έξω σε περίπτωση που θέλουμε να εργαστούμε πάνω στον ίδιο κατανομητή .



Εικόνα 19. Παράδειγμα rack κατανομητών που μπορεί να εξυπηρετήσει τον τερματισμό ακόμα και 2000 οπτικών ινών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11

ΠΙΝΑΚΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Πίνακες

Τιμές φυσικών σταθερών

Atomic mass unit [1u]	1.6603×10^{-27} kg
Velocity of light in vacuum [c]	2.997925×10^8 m/s
Gravitational acceleration, mean value [g]	9.80665 m/s
Boltzmann constant [$k = R/N_A$]	1.38054×10^{-23} J/K
Elementary charge [e]	1.60210×10^{-19} C
Planck's constant [h]	6.6256×10^{-34} Js
Rydberg constant [R _∞]	1.0973711×10^7 m ⁻¹
Rydberg constant for hydrogen [R _H]	1.0967758×10^7 m ⁻¹
Electron volt [1 eV]	1.60210×10^{-19} J

Σταθερά του Young για κάποια συνηθισμένα υλικά κατασκευής καλωδίων [N/mm²]

Steel (spring)	200 000
Glass (optical fiber)	72 500
Aramide yarn	100 000
Polyamide PA	1 700
PBTP	1 600
High Density PE (HDPE)	1 000
Medium Density PE (MDPE)	400 - 700
Low Density PE (LDPE)	200 - 300
PVC (soft)	60

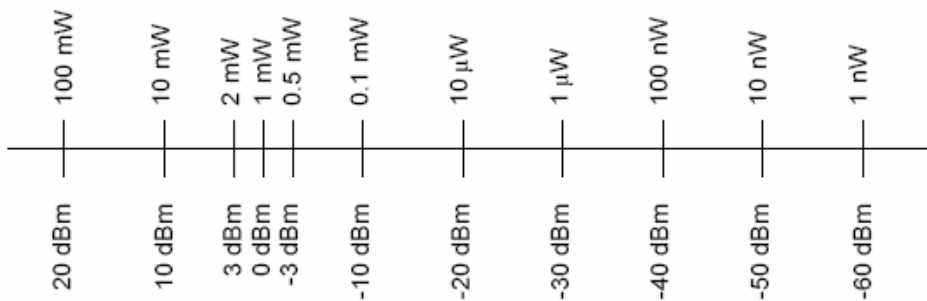
Παράγοντας θερμικής διαστολής για κάποια συνηθισμένα υλικά κατασκευής καλωδίων [1/K]

Steel (spring)	1.3×10^{-5}
Glass (optical fiber)	5.5×10^{-7}
Aramide yarn	-2×10^{-6}
Polyamide PA	5.8×10^{-5}
PBTP	1.5×10^{-4}
High Density PE (HDPE)	1 - 2.5×10^{-4}
Medium Density PE (MDPE)	1 - 2.5×10^{-4}
Low Density PE (LDPE)	1 - 2.5×10^{-4}
PVC (soft)	1.5×10^{-4}

Συντελεστής διάθλασης (20° C)

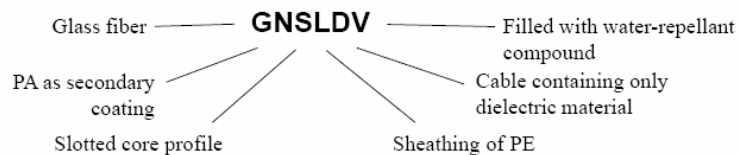
Water	1.33299
Ethanol C ₂ H ₅ OH	1.36048
Glass (common)	1.45886
Diamond	2.41730
Gallium arsenide [GaAs]	3.56
Gallium phosphide [GaP]	3.31
Gallium indium arsenide phosphide [GaInAsP] (1300 nm)	3.21 - 3.52
Gallium indium arsenide phosphide [GaInAsP] (1550 nm)	3.17 - 3.55
Aluminium gallium arsenide [AlGaAs]	2.8 - 4.2

Αντιστοιχία ισχύος και decibel



Κωδικοποίηση οπτικών ινών

Structure of the letter code



Letter	First letter Conductor	Second letter Insulation or secondary coating	Third letter Sheath or characteristic feature	Fourth letter Characteristic feature or application	Fifth letter Characteristic feature or application	Sixth letter Characteristic feature or application
A	Aluminium without surface coating	Acrylate	Screen of aluminium tape			
B	Aluminium alloy		Lead sheath	Connecting wire	Flame-retardant, halogen-free	
C	Bronze	Foam skin		Cable with suspension strand		
D	Glass/Plastic fiber		Cable containing only dielectric material			
E	Copper, solid		Individually screened cores of units	Nominal capacitance level less than 46 nF/km		
F	Copper, stranded		Braided metallic screen or metallic reinforcement			
G	Glass/Glass fiber	Thermoplastic polyester elastomer	Non-metallic reinforcement			
H	Fiber bundle		Coated fibers, stranded around a strength member			

I		Thermoplastic polyurethane elastomer		
J	Copper clad steel wire	Fiber without secondary coating	Steel tape armoring	
K	Coaxial pair	Polyvinyl-chloride (PVC)		
L	Conductive plastic	Polyethylene (PE)		
M	Copper, flexible	Polypropylene	Metal sheath	
N		Polyamide (PA)		
O		Thermoplastic elastomer		
P	Plastic/ Plastic fiber	Paper, unimpregnated	Galvanized steel tape armoring	
R	Copper, extra flexible	Polyester		Signalling cable
S	Copper, fine strands	Slotted core		Self-supporting cable
T	Copper, extra fine strands (<0.1 mm)	Fluorethene plastic	Galvanized steel wire armoring	
U		Cellular polyethylene	Without sheath	
V		Rubber	Rubber	Water-repellent compound (jelly)
W		Corrugated metal sheath or corrugated steel tape armoring		
X		Polyethylene cross-linked	Oval cross section	Cable without requirement of weather resistance
Y				Cable with requirement of weather resistance
Z	Tinsel conductor		Screened with copper stripes	

Τεχνικά χαρακτηριστικά ινών

Μη μετατοπισμένη μονότροπη ίνα

Transmission	Unit	Typical values*
Attenuation at 1 285–1 330 nm	dB/km	0.36 max
Attenuation at 1 310 nm	dB/km	0.33 max
Attenuation at 1 530–1 570 nm	dB/km	0.25 max
Attenuation at 1 550 nm	dB/km	0.20 max
Attenuation at 1 625 nm	dB/km	0.22 max
Max chromatic dispersion at 1 550 nm	ps/nm×km	18
Zero dispersion wavelength range	nm	1 302–1 322
Zero dispersion slope	ps/nm ² ×km	0.092 max
Cut-off wavelength range	nm	1 150–1 330
Cable cut-off wavelength	nm	1 260 max
Mode field diameter range at 1 310 nm	μm	8.8–9.6
PMD	ps / √ km	0.2 max
Geometry		
Cladding, diameter	μm	125 ± 1
Cladding, non-circularity	%	2 max
Primary coating, diameter	μm	245 ± 5
Mode field concentricity error	μm	0.5 max
Curl	m	> 4

Mechanical

Proof test: Min 1.0 % strain

Μη μηδενικής μετατοπισμένης διασποράς μονότροπη ίνα

Transmission	Unit	Typical values*
Attenuation window 1525–1 575 nm	dB/km	0.25 max
Maximum chromatic dispersion over the range 1 530–1 560	ps/nm×km	3.5
Zero dispersion wavelength	nm	≥1 530
Zero dispersion slope	ps/nm ² ×km	0.08 max
Polarization mode dispersion	ps / $\sqrt{\text{km}}$	0.2 max
Cable cut-off wavelength	nm	1 360 max
Mode field diameter range at 1 550 nm	μm	9.2–10.0

Συνηθισμένη πολύτροπη ίνα

Geometry	Unit	<u>50 μm</u>	<u>62.5 μm</u>
		Typical value*	Typical value*
Core, diameter	μm	50 ± 2.5	62.5 ± 3
Cladding diameter	μm	125 ± 2	125 ± 2
Core, non-circularity	%	6 max	6 max
Cladding, non-circularity	%	1 max	2 max
Core/cladding, concentricity error	μm	1.5 max	3 max
Primary coating, diameter	μm	245 ± 5	245 ± 5

Mechanical

Proof test: strain	%	1.0 % min	1.0 % min
--------------------------	---------	-----------	-----------

Transmission

Numeric aperture (NA)		0.200 ± 0.015	0.275 ± 0.015
Attenuation at 850 nm	dB/km	2.4 max	3.0 max
Attenuation at 1 300 nm	dB/km	0.7 max	0.7 max
Bandwidth at 850 nm	MHz×km	400 min	200 min
Bandwidth at 1 300 nm	MHz×km	1 000 min	600 min

Πολύτροπη ίνα “Gigabit”

Geometry	Unit	<u>50 μm</u>	<u>62.5 μm</u>
		Typical value*	Typical value*
Core, diameter	μm	50 ± 2.5	62.5 ± 3
Cladding diameter	μm	125 ± 2	125 ± 2
Core, non-circularity	%	6 max	6 max
Cladding, non-circularity	%	1 max	2 max
Core/cladding, concentricity error	μm	1.5 max	3 max
Primary coating, diameter	μm	245 ± 5	245 ± 5

Mechanical

Proof test: strain	%	1.0 % min	1.0 % min
--------------------------	---	-----------	-----------

Transmission

Numeric aperture (NA)		0.200 ± 0.015	0.275 ± 0.015
Attenuation at 850 nm	dB/km	2.4 max	3.0 max
Attenuation at 1 300 nm	dB/km	0.7 max	0.7 max
Transmission distance			
for 1 Gbit/s at 850 nm	m	750 max	300 max
for 1 Gbit/s at 1 300 nm	m	2 000 max	1 000 max

Αναφορές

- *Θεωρία τεχνολογίας οπτικών ινών*
- 1. Djafar K. Mynbaev and Lowell L. Scheiner, *Fiber-Optic Communications Technology*, PrenticeHall, 2001.
- 2. Rajiv Ramaswami and Kumar N. Sivarajan, *Optical Networks, A Practical Perspective*, 2nd Ed., Morgan Kaufmann, 2002.
- 3. Jeff Hecht, *Understanding Fiber Optics*, 4th Ed., Prentice Hall, 2002.
- 4. David R. Goff, *Fiber Optic Reference Guide, A practical Guide to Communications Technology*, 3rd Ed., Focal Press, 2002.
- 5. Ajoy Chatak, K. Thyagarajan, *Introduction to Fiber Optics*, Cambridge, 1998.
- 6. Gunther Mahlke and Peter Gossing, *Fiber Optic Cables*, 4th Ed., Publicis MCD, 2001.
- 7. Govind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 3rd Ed., Wiley, 2002.

8. Michael Bass and Eric Van Stryland, *Fiber Optics Handbook—Fiber, Devices, and Systems for Optical Communications*, McGraw-Hill, 2002.
9. Leo Setian, *Applications in Electro-Optics*, Prentice Hall, 2002.

- *Τεχνολογία οπτικών δικτύων και εφαρμογές*

1. Debra Cameron, *Optical Networking, A Wiley Tech Brief*, Wiley, 2002.
2. Steven Shepard, *Optical Networking Crash Course*, McGraw-Hill, 2001.
3. Robert C. Elsenpeter and Toby J. Velte, *Optical Networking: A Beginner's Guide*, McGraw-Hill/Osborne, 2002.
4. David Greenfield, *The Essential Guide to Optical Networks*, Prentice Hall PTR, 2002.
5. Daniel Minoli, Peter Johnson, and Emma Minoli, *Ethernet-Based Metro Area Networks*, McGraw-Hill, 2002.
6. Daniel Minoli, Peter Johnson, and Emma Minoli, *SONET-Based Metro Area Networks*, McGraw-Hill, 2002.
7. Heinz Willebrand and Baksheesh S. Ghuman, *Free-Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks*, SAMs, 2002.
8. Edited by Casimer DeCusatis, *Handbook of Fiber Optic Data Communication*, 2nd Ed., Academic Press, 2002.
9. Ray Tricker, *Optoelectronics and Fiber Optic Technology*, Newnes, 2002.
10. Uyles Black, *Optical Networks, Third Generation Transport Systems*, Prentice Hall, 2002.

- *Σχεδιασμός συστημάτων οπτικών ινών*

1. *Customer-Owned Outside Plant Design Manual*, 2nd Ed., BICSI, 2001.
2. *Telecommunications Distribution Methods Manual*, 9th Ed., BICSI, 2000.
3. BICSI *Telecommunications Cabling Installation*, 2nd Ed., McGraw-Hill, 2002.
4. *Recommended Practices for Optical Fiber Construction and Testing*, 2nd Ed., SCTE (Society of Cable Telecommunications Engineers), 2001.
5. Barry Elliott and Mike Gilmore, *Fiber Optic Cabling*, 2nd Ed., Newnes, 2002.
6. Roger L. Freeman, *Fiber Optic Systems for Telecommunications*, John Wiley and Sons, New York, 2002.
7. Bob Chomycz, *Fiber Optic Installer's Field Manual*, McGraw-Hill, 2000.
8. Corning Cable Systems, *Access Solutions Guide*, 2002.
9. Corning Cable Systems, *Design Guide, Release 4*, 2002.
10. Jim Hayes, *Fiber Optics Technician's Manual*, 2nd Ed., DELMAR, 2001.

11. Dennis Derickson, *Fiber-Optic Test and Measurement*, Prentice Hall, 1998.
12. Thomas M. Shoemaker and James E. Mack, *The Lineman's and Cableman's Handbook*, McGraw-Hill, 2002.
13. Jerry C. Whitaker, *AC Power Systems Handbook*, CRC Press, 1997.
14. USDA Rural Utilities Service telecommunication publications from 7 CFR (Code of Federal Regulations), parts 1751, 1753 and 1755, (see <http://www.usda.gov/rus/telecom/publications/publications.htm>).
15. ANSI/TIA/EIA-758, *Customer-Owned Outside Plant Telecommunications Cabling Standard*, Telecommunications Industry Association, 1999.
16. Other telecommunications standards from Telcordia, ITU, IEEE, ANSI, EIA, and TIA (see <http://global.ihs.com/>)

- *Οργανισμοί τυποποίησης*

1. American National Standards Institute (ANSI)
2. Building Industry Consulting Service International (BICSI)
3. Electronic Industries Alliance (EIA)
4. Telecommunications Industry Association (TIA)
5. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
6. Insulated Cable Engineers Association (ICEA)
7. International Standards Organization (ISO)
8. International Telecommunications Union (ITU)
9. National Electric Code (NEC)
10. National Electric Safety Code (NESC)
11. National Fire Protection Association (NFPA)
12. Occupational Safety and Health Administration (OSHA)
13. Society of Cable Telecommunications Engineers (SCTE)
14. Telcordia
15. USDA Rural Utilities Service (RUS)

- *Κατασκευαστές οπτικών καλωδίων*

1. Alcatel
2. AFL Telecommunications (Alcoa Fujikura Limited)
3. Belden Wire & Cable
4. Chromatic Technologies
5. CommScope
6. Corning Cable Systems
7. General Cable (BICCGeneral)
8. Hitachi Cable Manchester
9. Nexans/Berk-Tek

10. OFS (Fitel/Furakawa Electric)
11. Optical Cable Corporation
12. Pirelli
13. Reme Products
14. Sumitomo Electric
15. Superior Essex

- *Κατασκευαστές προϊόντων σχετικά με οπτικά δίκτυα*

1. 3M
2. ADC Telecommunications
3. AFL Telecommunications
4. Corning Cable Systems
5. Leviton
6. Nexans/Berk-Tek
7. Ortronics
8. Pirelli
9. Tyco Electronics/AMP

- *Περιοδικά και έντυπα σχετικά με οπτικά δίκτυα*

1. Light Reading
2. LightWave
3. The Fiber Optic Association Links Page
4. Fiber Optic Product News links page
5. Cabling Business Magazine