

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ &
ΠΟΛΥΜΕΣΩΝ**



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Αξιολόγηση Τμήματος Μητροπολιτικού Δικτύου Οπτικών Ινών Πελοποννήσου ,
Μοντελοποίηση και Προτάσεις για Τυχόν Βελτιώσεις του**

Εισηγητές : Βλατάκης Μανώλης , Φουντουλάκης Αντώνης

Σπουδαστές : Γκότσης Σταύρος , Πουλόπουλος Γιάννης

Εκφράζουμε τις θερμές ευχαριστίες μας προς:

- Τους επιβλέποντες καθηγητές της πτυχιακής εργασίας κκ Βλατάκη Μανώλη και Φουντουλάκη Αντώνη για την βοήθεια τους και την καθοδήγηση τους
- Τον προϊστάμενο της Υπηρεσίας Δικτύων κ. Καλαντζή Σπυρίδωνα και τον Ηλεκτρονικό Μηχανικό Οπτικών Δικτύων Κ Μαγουλά Αλέξανδρο του Τηλεπικοινωνιακού Διαμερίσματος Αργολιδοκορινθίας για την εξειδικευμένη τεχνογνωσία που μας προσέφεραν.
- Τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής κ. Βλησίδη Ανδρέα και κ Μιαουδάκη Ανδρέα που μας έκαναν την τιμή να αξιολογήσουν την προσπάθεια μας.

Περίληψη

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία θα μελετήσουμε τις οπτικές ίνες ως μέσο μετάδοσης πληροφορίας στο σύγχρονο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Αρχικά θα αναφερθούμε στις βασικές αρχές της οπτικής, την δομή, τα χαρακτηριστικά και τις παραμέτρους των οπτικών ινών. Αφού γνωρίσουμε τα στοιχεία ενός οπτικού δικτύου, τα είδη των πηγών φωτός και τους ανιχνευτές φωτός θα αναφερθούμε στην τεχνική πολυπλεξίας WDM. Έπειτα θα γνωρίσουμε τους τρόπους εγκατάστασης, την κόλληση και τον τερματισμό καλωδίων οπτικών ινών.

Σε συνεργασία με το Τμήμα Δικτύων του Τηλεπικοινωνιακού Διαμερίσματος Αργολιδοκορινθίας του Οργανισμού Τηλεπικοινωνιών Ελλάδος θα παρακολουθήσουμε σχολαστικά διαδικασίες κατασκευής, έλεγχου και συντήρησης του οπτικού δικτύου πρόσβασης του Ο.Τ.Ε. όπως συγκόλληση καλωδίων οπτικών ινών με την μέθοδο fusion splicing και έλεγχο απωλειών και εξασθένισης οπτικών ινών με την χρήση οπτικού ανακλασίμετρου (OTDR). Τέλος θα πραγματοποιηθεί προσομοίωση του τμήματος του οπτικού δικτύου πρόσβασης Κόρινθος - Τρίπολη (82km) και κατόπιν μελέτης των αποτελεσμάτων θα προταθούν πιθανοί τρόποι βελτίωσης του.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. Επικοινωνία μέσω φωτεινών σημάτων.....	7
2. Ενσύρματες επικοινωνίες και ο ρόλος των οπτικών ινών.....	8
3. Εξέλιξη των οπτικών δικτύων.....	11

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΒΑΣΙΚΕΣ ΓΝΩΣΕΙΣ ΟΠΤΙΚΗΣ

1. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.....	13
2. Γεωμετρική Οπτική.....	14
2.1 Ανάκλαση.....	15
2.2 Διάθλαση.....	15
3. Διάθλαση μέσα σε φακό.....	17
4. Ολική ανάκλαση.....	17
5. Σκέδαση Rayleigh.....	18

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥΣ

1. Δομή οπτικών ινών.....	19
2. Βασική αρχή λειτουργίας.....	20
3. Απώλειες οπτικών ινών.....	23
4. Τρόποι διάδοσης (Modes).....	24
4.1 Κανονικοποιημένη συχνότητα και τρόποι διάδοσης.....	25
5. Αριθμητικό άνοιγμα.....	27
5.1 Αριθμητικό άνοιγμα για ίνα με διαβαθμισμένο προφίλ δείκτη.....	27
6. Διάμετρος του πεδίου του ρυθμού διάδοσης.....	28
7. Αποτελεσματική περιοχή.....	28
8. Διασπορά.....	28
8.1 Intermodal or modal dispersion (Διατροπική διασπορά).....	29
8.2 Intramodal dispersion - Ενδοτροπική διασπορά.....	30
8.3 Διασπορά πόλωσης του ρυθμού μετάδοσης (PMD).....	31
9. Μη γραμμικά φαινόμενα.....	32
9.1 Διεγερόμενη σκέδαση Brillouin, SBC.....	32
9.2 Διεγερόμενη σκέδαση Raman, SRS.....	33
9.3 Self phase modulation, SPM (αυτό-διαμόρφωση φάσης).....	33
9.4 Cross phase modulation, XPM (ετερο-διαμόρφωση φάσης).....	33
9.5 Μείξη τεσσάρων κυμάτων.....	34
10. Πολύτροπη ίνα με βηματικό προφίλ δείκτη.....	35
11. Πολύτροπη ίνα με διαβαθμισμένο προφίλ δείκτη.....	36
12. Μονότροπη ίνα με βηματικό προφίλ δείκτη.....	37
13. Ίνες μετατοπισμένου σημείου διασποράς.....	39
14. Συνήθης ίνα μετατοπισμένου σημείου διασποράς.....	39

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΠΗΓΕΣ ΦΩΤΟΣ ΚΑΙ ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ

1. LASER και αρχή λειτουργίας τους.....	40
1.1 Δίοδοι LASER.....	43
1.2 Σχεδιασμός διόδου LASER.....	44
1.3 Fabry - Petrol LASER.....	46
2. Φωτοεκπέμπουσες δίοδοι (LIGHT EMITTING DIODES).....	47
2.1 Διπλό LED ετεροεπαφής (dual junction led).....	48
2.2 Διαφορετικοί τύποι LED.....	49
2.3 Απόδοση LED.....	51
3. Χαρακτηριστικά των LASERS και των LEDS.....	52
3.1 Ισχύς εξόδου.....	52
3.2 Λοβός ακτινοβολίας.....	52
3.3 Φασματικό εύρος των LDs και LEDs.....	53
3.4 Διαμόρφωση.....	54
4. Οπτικοί Ανιχνευτές.....	55
4.1 Φωτοδίοδος τύπου P-N.....	56
4.2 Φωτοδίοδος τύπου PIN.....	58
5. Παράμετροι που επηρεάζουν την ανίχνευση του φωτός σε συστήματα οπτικών ινών.....	60
5.1 Ένταση του παλμού φωτός.....	61
5.2 Παραμόρφωση του παλμού φωτός.....	61
5.3 Ευαισθησία δέκτη.....	61
5.4 Σύδεση της οπτικής ίνας στον ανιχνευτή.....	63
5.5 Θόρυβος δέκτη.....	63
5.6 Ενσωματωμένος ενισχυτής σε οπτικό ανιχνευτή.....	65
5.7 Εύρος ζώνης.....	65
5.8 SNR και BER (Signal to noise ratio, Bit error rate).....	66

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΟΠΤΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

1. Πηγές Φωτός και Ανιχνευτές.....	68
2. Αναμεταδότες.....	70
3. Οπτικοί Ενισχυτές.....	71
3.1 Ινο-Οπτικός Ενισχυτής Ερβίου (EDFA).....	72
3.2 Βασικές παράμετροι.....	75
4. Οπτικοί Πολυπλέκτες-Αποπολυπλέκτες.....	76
4.1 Συσκευές Πολυπλεξίας-Αποπολυπλεξίας.....	77
5. Οπτικοί Πολυπλέκτες Προσθαφαίρεσης.....	79
6. Οπτικοί Διασταυρωτήρες.....	80
7. Δρομολόγηση Μήκους Κύματος.....	82
7.1 Μεταγωγείς Μήκους Κύματος (Wavelength Switches).....	82
7.2 Μετατροπή Μήκους Κύματος.....	83

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : Εισαγωγή στην Τεχνολογία WDM

1. Τεχνολογία SONET/SDH.....	85
1.1 Δομοστοιχεία της τεχνολογίας SONET/SDH.....	87
1.2 Αρχιτεκτονικές δικτύων SONET/SDH.....	89
2. Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου (TDM).....	90
3. Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (FDM).....	91
4. Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος (WDM).....	93
5. Διάρθρωση ενός WDM συστήματος.....	94
6. Σύγκριση TDM-WDM.....	95
7. Πυκνή Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος (DWDM).....	95
8. Χονδροειδής Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος(CWDM).....	97

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

1. Άμεσα εγκατεστημένα καλώδια.....	99
2. Εγκατάσταση σε σωλήνες καλωδίων.....	100
2.1 Διαφορετικές μέθοδοι εγκατάστασης καλωδίου μέσα σε σωλήνα.....	102
2.2 Τύποι καλωδίων για εγκατάσταση σε σωλήνες.....	102
3. Μέτρα προφύλαξης της οπτικής ίνας σε φρεάτια υπονόμων.....	103
4. Εγκατάσταση σε δίκτυα πρόσβασης (access networks).....	103
5. Κόμβος πρόσβασης.....	105
6. Εισαγωγή οπτοηλεκτρονικού εξοπλισμού στην πλευρά του χρήστη.....	106

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : ΚΟΛΛΗΣΗ ΚΑΙ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

1. Κολλήσεις και connectors.....	110
2. Απώλειες σε μια οπτική ζεύξη.....	111
2.1 Απώλειες που οφείλονται στην ίνα.....	111
2.1.1 Διαφορές στον τρόπο πεδίου.....	112
2.1.2 Διαφορετικά αριθμητικά ανοίγματα (NA).....	113
2.1.3 Διαφορετικές διαμέτροι πυρήνα.....	114
2.1.4 Διαφορετικές διαμέτροι μανδύα.....	115
2.1.5 Μη-κυκλικότητα πυρήνα ή/και μανδύα.....	115
2.1.6 Μη-ομοκεντρικότητα πυρήνα ή/μανδύα.....	116
2.2 Απώλειες που οφείλονται σε connectors/κολλήσεις.....	116
2.2.1 Μη-ομοαξονικότητα.....	117
2.2.2 Διάκενο.....	118
2.2.3 Γωνιακή απόκλιση.....	119
2.2.4 Καθαρότητα επιφάνειας κόλλησης.....	119

2.3 Άλλα αίτια απωλειών κόλλησης.....	120
2.4 Κοπή ίνας.....	120
3. Fusion κόλληση οπτικών ινών.....	121
3.1 Διαδικασία Fusion κόλλησης.....	121
3.2 Διαδικασία Fusion κόλλησης για κορδέλα ινών.....	122
3.3 Ανάλυση ηλεκτρονικής εικόνας σάρωσης.....	123
4. Μηχανικές κολλήσεις.....	124
4.1 V-block κόλληση.....	124
4.2 Σωλήνες ακριβείας.....	124
4.3 Κόλληση με τρεις ράβδους.....	125
4.4 Κολλήσεις κορδελών ινών.....	125
5. Ημι-μόνιμες κολλήσεις.....	126
6. Τύποι Connectors.....	126
6.1 Connectors με κυλινδρικό συνεκτικό δακτύλιο.....	127
6.1.1 LME connector.....	127
6.1.2 SMA connector.....	128
6.1.3 FC connector.....	128
6.1.4 FC/PC connector.....	129
6.1.5 SC connector.....	129
6.1.6 ST connector.....	130
6.2 Connectors με κωνικό συνεκτικό δακτύλιο.....	130
6.3 Connectors διαστελλόμενης δέσμης.....	131
6.4 Connectors κορδελών ινών.....	132
6.4.1 MT connector.....	132
7. Ενώσεις (joint closures – « Μούφες »).....	133
8. Τερματικά και οπτικοί καταναμητές (LT – ODF).....	136

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 : ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΤΟ ΟΠΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ

1. Διαδικασία συγκόλλησης οπτικών ινών με την μέθοδο Fusion Splicing.....	138
2. Έλεγχος για απώλειες με χρήση Οπτικού ανακλασίμετρου (OTDR).....	149
3. Προσομοίωση τμήματος οπτικού δικτύου με χρήση της εφαρμογήςLINKSIM.....	156
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	161
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	162

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Επικοινωνία μέσω φωτεινών σημάτων

Η ιδέα της χρήσης του φωτός για την επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις δεν είναι κάτι νέο, αλλά έχει τις ρίζες της στην αρχαιότητα. Οι αρχαίοι Έλληνες άναβαν φωτιές σε ψηλά σημεία, όπως κορυφές βουνών, για να ανταλλάξουν πληροφορίες μεταξύ τους άμεσα, σε αποστάσεις πολλών χιλιομέτρων. Ήταν τότε το ταχύτερο μέσο απομακρυσμένης επικοινωνίας και τελικά φαίνεται ότι ακόμη και σήμερα ισχύει το ίδιο, καθώς δεν υπάρχει τίποτα μέχρι στιγμής που να μπορεί να ξεπεράσει την ταχύτητα του φωτός.

Στα τέλη του 19ου αιώνα και στις αρχές του 20ου οι καπετάνιοι των πλοίων χρησιμοποιούσαν ειδικούς ισχυρούς φακούς τους οποίους αναβόσβηναν, σύμφωνα με τον κώδικα Μορς, επικοινωνώντας άμεσα μεταξύ τους. Αυτός ο τρόπος επικοινωνίας χρησιμοποιήθηκε εν μέρει και στην ξηρά, παρόλο που οι πρώτες συσκευές ενσύρματης επικοινωνίας είχαν κάνει την εμφάνισή τους την εποχή εκείνη.

Σε όλα τα παραπάνω παραδείγματα έχουμε τρία κοινά στοιχεία. Το πρώτο είναι ο αποστολέας του φωτεινού σήματος, το δεύτερο ήταν το μέσο μετάδοσης, δηλαδή ο αέρας και το τρίτο ήταν ο παραλήπτης που το αποκωδικοποιούσε και το μετέτρεπε σε κατανοητή μορφή. Φυσικά οι προαναφερθείσες μέθοδοι είχαν ως σημαντικότερο μειονέκτημα το πρόβλημα της ορατότητας. Το φως μιας φωτιάς ή ενός τεχνητού μέσου δεν μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την επικοινωνία κατά τη διάρκεια της ημέρας, καθώς δεν μπορούσε κανείς να το ξεχωρίσει από το πολύ ισχυρότερο ηλιακό φως. Ακόμη και τη νύχτα όμως, διάφορες συνθήκες όπως η αυξημένη υγρασία ή η ομίχλη, μπορούσαν να καταστήσουν ανέφικτη την παρατήρηση του φωτεινού σήματος σε μεγάλη απόσταση.

Σήμερα η φωτεινή ενέργεια εξακολουθεί να διαδραματίζει κυρίαρχο ρόλο στις τηλεπικοινωνίες και κατ' επέκταση στην καθημερινή μας ζωή. Αν στα προηγούμενα χρόνια το φως μεταδιδόταν μέσω της ατμόσφαιρας, σήμερα αυτό έδωσε τη θέση του στο γυαλί και σε ειδικό ανακλαστικό υλικό που το περιβάλλει. Κάπως έτσι έχουν σχηματιστεί οι οπτικές ίνες, οι οποίες είναι σε θέση να μεταφέρουν πληροφορίες σε αποστάσεις πολλών χιλιομέτρων, αποτελώντας έτσι αναπόσπαστο κομμάτι των σύγχρονων τηλεπικοινωνιών.

1.2 Ενσύρματες επικοινωνίες και ο ρόλος των οπτικών ινών

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 ευζωνικής πρόσβασης, όπως για παράδειγμα η ψηφιακή συνδρομητική γραμμή (Digital Subscriber Line 10DSL) 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 κατάρτησης 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 αναφέρουν ετήσια αύξηση στη μετάδοση δεδομένων της τάξης του 100%. 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.
- Χαμηλό κόστος. Η δημιουργία ενός καλωδίου οπτικών ινών είναι πιο συμφέρουσα οικονομικά, σε σχέση με ένα χάλκινο καλώδιο ίδιας απόστασης και δυνατοτήτων. Αυτό ωφελεί αρχικά τους πάροχους υπηρεσιών τηλεπικοινωνιών, οι οποίοι με μικρότερο κόστος παρέχουν ποιοτικές υπηρεσίες. Τελικά αυτό μειώνει και τις ανάγκες απόσβεσης εξόδων των παροχών, επομένως ωφελεί και τον καταναλωτή, που επιβαρύνεται με μικρότερες χρεώσεις για τις υπηρεσίες που χρησιμοποιεί.
- Μικρές απαιτήσεις σε ενέργεια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν παρατηρούνται σημαντικές απώλειες σήματος, καθώς και στον τρόπο μετάδοσης δεδομένων, δηλαδή με τη χρήση φωτεινής δέσμης, που απαιτεί πολύ μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, σε σχέση με το ηλεκτρικό σήμα.

- Αμιγώς ψηφιακό σήμα, που εξασφαλίζει υψηλότερη ποιότητα επικοινωνίας και αποφυγή προβλημάτων που θα προέκυπταν σε μια αναλογική μετάδοση. Στον κόσμο της ψηφιακής πληροφορίας, τα δεδομένα αναπαρίστανται από τους αριθμούς 0 και 1, οι οποίοι ονομάζονται bits. Το 0 ισοδυναμεί με την κατάσταση «κλειστό» και το 1 με την κατάσταση «ανοικτό». Μια ακολουθία 8 bits σχηματίζουν 1 ψηφιακή λέξη που λέγεται byte ή octet. Οι οπτικές ίνες μεταδίδουν τις φωτεινές αναλαμπές με υψηλή αξιοπιστία, μεταφέροντας τα bytes με πολύ μικρότερες αλλοιώσεις σε σχέση με αυτές ενός κοινού καλωδίου δικτύου, ή μιας ασύρματης σύνδεσης δεδομένων.
- Υψηλή διαθεσιμότητα, που οφείλεται κυρίως στην ανθεκτική κατασκευή των σύγχρονων οπτικών καλωδίων, που μειώνει στο ελάχιστο το ενδεχόμενο εξωτερικής ζημιάς.
- Μικρές διαστάσεις και βάρος, καθώς ένα μικρό και ελαφρύ καλώδιο οπτικών ινών, μεταφέρει πολύ περισσότερα δεδομένα από ένα μεγαλύτερο και πιο βαρύ χάλκινο καλώδιο. Έτσι, απαιτείται πολύ λιγότερος χώρος για την υλοποίηση ενός δικτύου οπτικών ινών.
- 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.

1.3 Εξέλιξη των οπτικών δικτύων

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-MEWE_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 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).

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.

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 κερηκτικότητας 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.

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'απαιτήση 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, ταυτοσημος με τον όρο οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων (All-Optical Packet Switched Networks – OPS).

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.

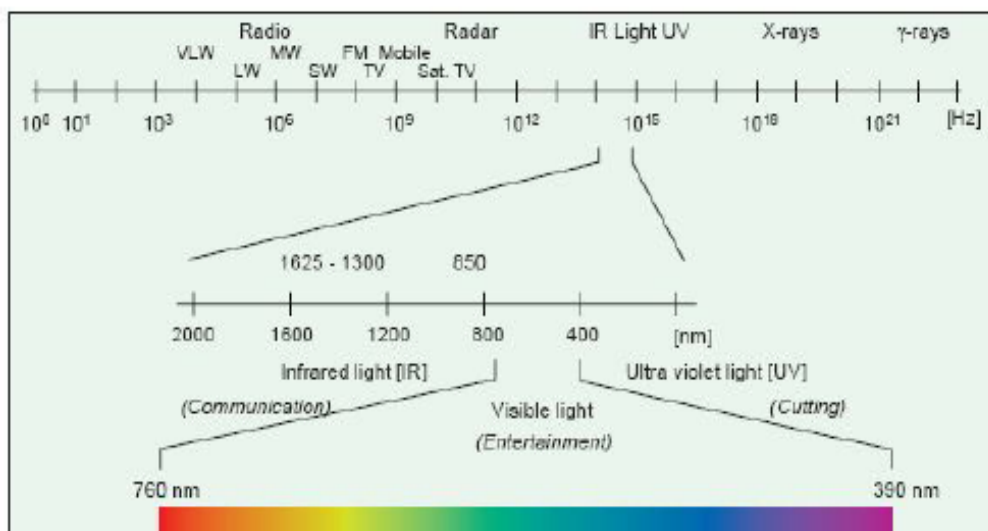
2.1 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

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 X και η ακτινοβολία γ. Γενικά σήμερα έχει γίνει αποδεκτή η ταχύτητα του φωτός στο κενό ίση με 300.000 Km/sec και δίνεται από τον τύπο $c = \lambda \cdot f$. (λ = μήκος κυματος, f = συχνοτητα) 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).

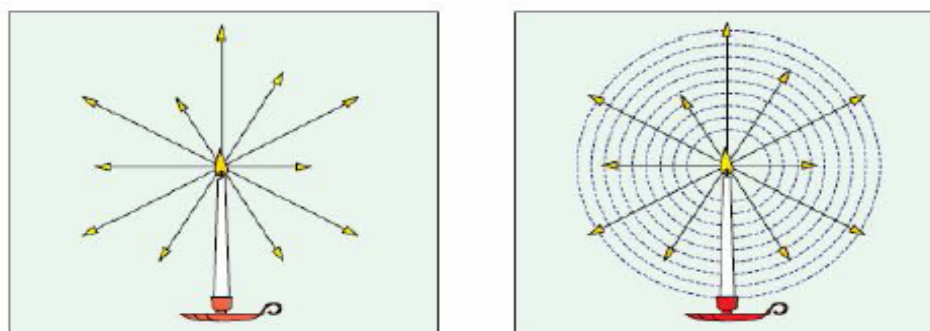
Εικόνα 2.1 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

2.2 Γεωμετρική Οπτική

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

Η Γεωμετρική Οπτική έχει ιστορία χιλιάδων χρόνων και μελετά το φως ως αποτέλεσμα πολλών ακτινών που διασκορπίζονται από την πηγή σε ευθείες γραμμές μέσα σε ένα ομογενές περιβάλλον όπως το γυαλί, το νερό, τον αέρα ή το κενό.

Ασχολείται κυρίως με την περιγραφή των περισσότερων φαινομένων που έχουν σχέση με το φως και με τις ποσοτικές σχέσεις αυτών χωρίς να υπεισέρχεται στην ερμηνεία της φύσεως αυτών των φαινομένων. Δηλαδή θεωρεί το φως ως ένα σύνολο από φωτεινές ακτίνες που διαδίδονται σύμφωνα με την αρχή του ελαχίστου χρόνου, όπως την διατύπωσε το 1650 ο Γάλλος μαθηματικός Πιέρ ντε Φερμά. Σύμφωνα με αυτή την αρχή όταν το φως διαδίδεται από ένα σημείο του χώρου σε ένα άλλο, ακολουθεί τη διαδρομή για την οποία απαιτείται ο ελάχιστος χρόνος. Συνέπεια της παραπάνω αρχής αποτελεί η διαπίστωση ότι μέσα σε κάθε ομοιογενές υλικό το φως ακολουθεί ευθύγραμμη πορεία διάδοσης που όμως είχε διατυπώσει πρώτος στην αρχαιότητα ο Ήρων. Φαινόμενα που ερμηνεύονται στα πλαίσια της Γεωμετρικής Οπτικής είναι η ανάκλαση και η διάθλαση του



φωτός.

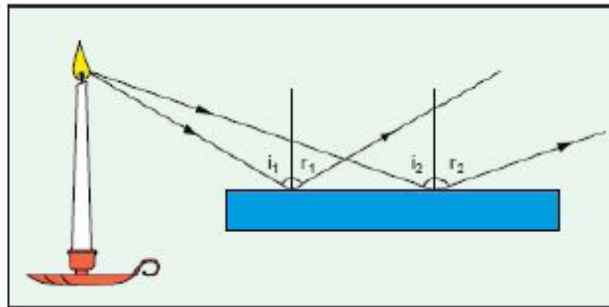
Εικόνα 2.2 Το φως διασκορπίζεται σε ευθείες γραμμές από την πηγή και ελαττώνεται ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης.

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.

2.2.1 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)

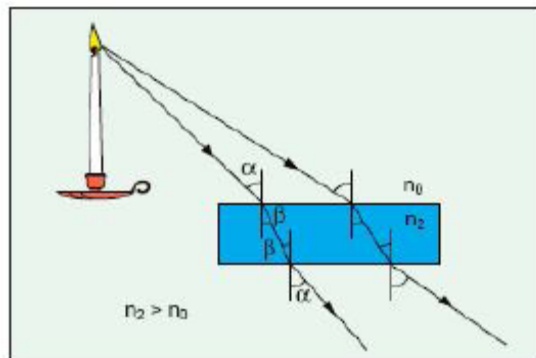
Νόμος Ανάκλασης : Γωνία πρόσπτωσης (i) = Γωνία ανάκλασης (r)



Εικόνα 2.3
Ανάκλαση σε λεία επιφάνεια

2.2.2 Διάθλαση

Μια ακτίνα φωτός διαθλάται υπό διαφορετική γωνία από αυτή της γωνίας πρόσπτωσης (οι γωνίες σχηματίζονται από τις ακτίνες και τον κάθετο άξονα στο σημείο πρόσπτωσης της



επιφάνειας). Η διάθλαση ακολουθεί το νόμο του Snell ή αλλιώς νόμο διάθλασης.

Νόμος Snell : $n_0 \sin a = n_2 \sin b$

Εικόνα 2.4

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
- Σύνθετες γυαλί = 1.52

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

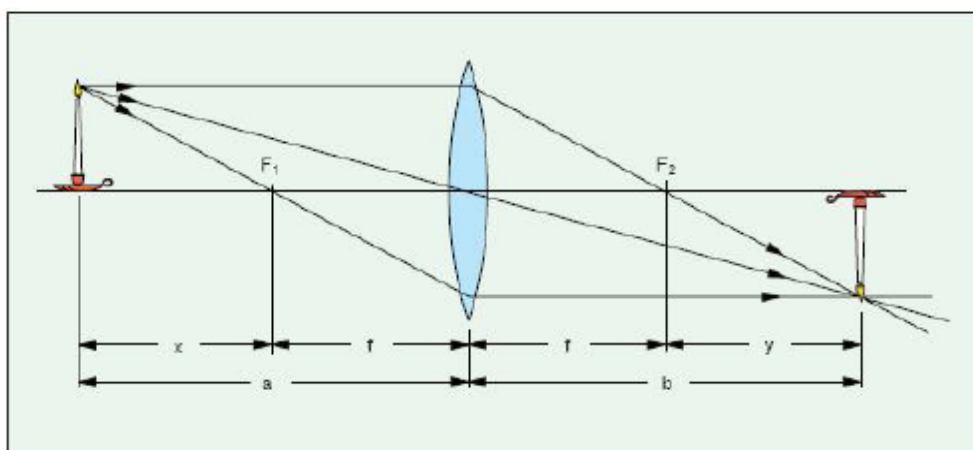
$$v = \frac{c}{n_g} \Rightarrow n_g = \frac{c}{v} \Rightarrow n_g \geq 1$$

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 :

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

2.3 Διάθλαση μέσα σε φακό

Η πιο σημαντική εφαρμογή της Γεωμετρικής οπτικής είναι στον τομέα της τεχνολογίας οπτικών ειδώλων (κιάλια, κάμερες κτλ.) και πιο ειδικά στη διαδικασία σχεδιασμού οπτικών φακών. Οι φακοί και οι κοίλοι καθρέπτες χρησιμοποιούνται πάνω από 300 χρόνια ως βασικά στοιχεία απεικόνισης. Όταν ακτίνες φωτός από μια πηγή προσπίπτουν στην επιφάνεια ενός φακού ή ενός κοίλου καθρέπτη, θα ανακλαστούν ή θα διαθλαστούν διαφορετικά, ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης τους. Κάτω από τις πιο ιδανικές συνθήκες, οι περισσότερες ακτίνες μπορούν να 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 :

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad x \cdot y = f^2$$

Εικόνα 2.5 Το μονοπάτι, η ανάκλαση και η διάθλαση του φωτός που προσπίπτει σε οπτικό φακό

2.4 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 :

$$n_2 \sin \beta = n_1 \sin 90^\circ \Rightarrow \sin \beta = \frac{n_1}{n_2}$$

Βασική ιδιότητα της Γεωμετρικής Οπτικής είναι η ολική εσωτερική ανάκλαση στην οποία στηρίζεται η αρχική λειτουργία των οπτικών ινών και θα αναφερθούμε εκτενέστερα στο επόμενο κεφάλαιο.

2.5 Σκέδαση Rayleigh

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.

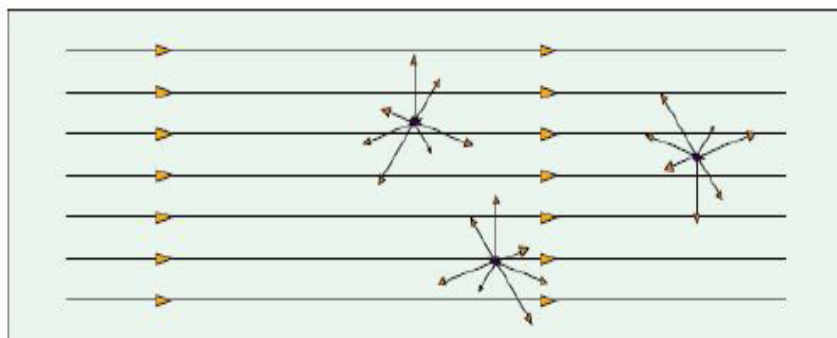
Στη σκέδαση Rayleigh οφείλει ο ουρανός το μπλε χρώμα του ή το κόκκινο κατά την

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

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 :

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 2.6 Σκέδαση Rayleigh λόγω “ακαθαρσιών” κατά τη διεύθυνση μετάδοσης του φωτός



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥΣ

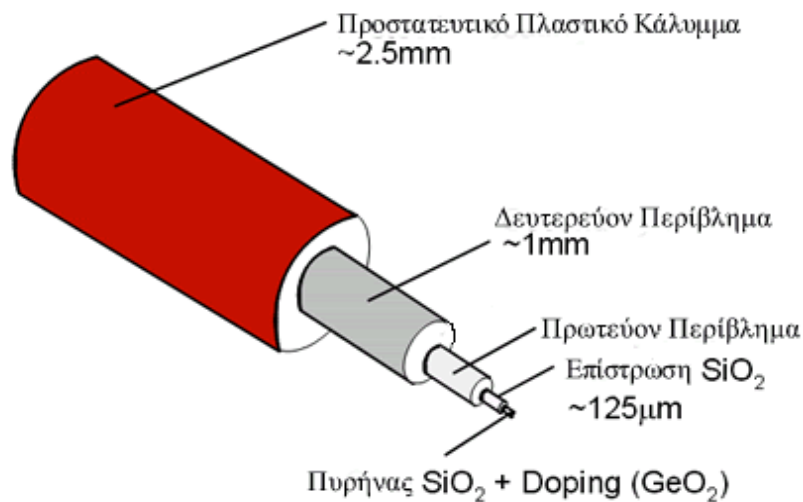
Εισαγωγή

Η καλύτερη λύση σήμερα, όπως αναφέρθηκε, στα ενσύρματα μέσα μετάδοσης είναι η οπτική ίνα. Σαν μέσο, η οπτική ίνα, εξαναγκάζει την τεχνολογία των τηλεπικοινωνιών να μεταπηδήσει από τον κόσμο των ηλεκτρονίων στον κόσμο των φωτονίων. Γεγονός είναι, ότι οι οπτικές ίνες, ενώ πριν είκοσι χρόνια ήταν γνωστές μόνο σε ειδικούς, σήμερα είναι ένα εν χρήσει μέσο μετάδοσης πληροφορίας το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα και από ιδιώτες. Η εισβολή των οπτικών ινών στις ενσύρματες επικοινωνίες, αλλά και στην καθημερινή μας ζωή είναι κάτι που γίνεται με άλματα και η ετήσια αύξηση είναι της τάξης του 40%.

3.1 Δομή οπτικών ινών

Οι οπτικές ίνες αποτελούνται από πολύ λεπτές υαλώδεις ίνες, και διαθέτουν ικανότητα εκπομπής ίση με τα 2/3 της ταχύτητας του φωτός στο κενό. Το σήμα μεταφέρεται μέσα από τον πυρήνα-κεντρική ίνα (core), υπό τη μορφή παλμών φωτός. Ο πυρήνας περιβάλλεται από την επίστρωση (cladding). Την επίστρωση περιβάλλει πλαστικός μανδύας γνωστός ως περίβλημα και δέσμη συνθετικών ινών, οι οποίες έχουν στόχο την προστασία της ίνας κατά την εγκατάσταση, όπου είναι επικίνδυνο να σπάσει το γυαλί. Όλα τα παραπάνω περικλείονται σε εξωτερικό πλαστικό μανδύα όμοιο με αυτό των καλωδίων συνεστραμμένων ζευγών. (Σχήμα 3.1)

Το φως συγκρατείται στον πυρήνα λόγω του φαινομένου της ολικής ανάκλασης στη διεπιφάνεια πυρήνα-μανδύα. Το κύμα (φως) κυματοδηγείται με συγκεκριμένες εγκάρσιες κατανομές (ρυθμοί). Ο αριθμός τους εξαρτάται από τη συχνότητα του κύματος και τις φυσικές παραμέτρους της ίνας



Σχήμα 3.1
Δομή Οπτικής Ίνας

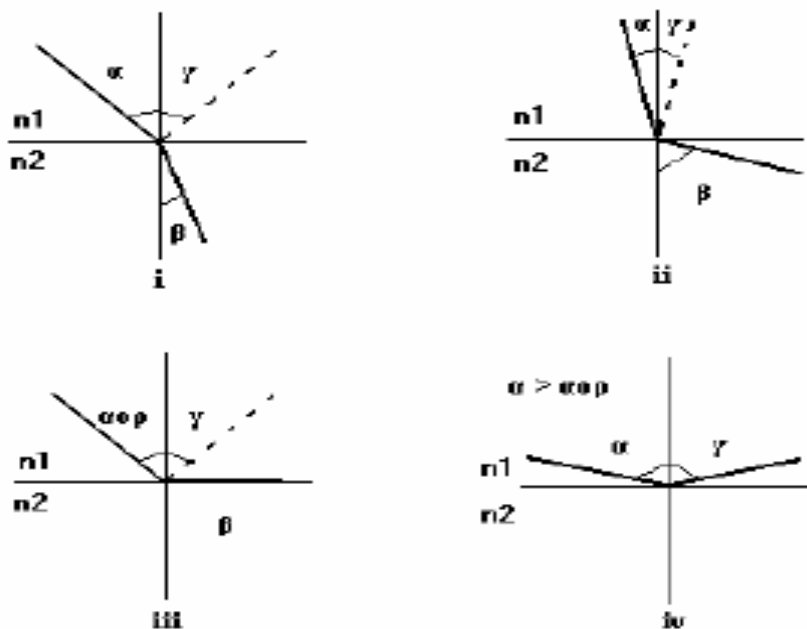
Σημείωση

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

$\text{SiCl}_4 (\text{gas}) + \text{O}_2 (\text{SiO}_2 (\text{solid})) + 2\text{Cl}_2$ (Υψηλή θερμοκρασία)
 $\text{GeCl}_4 (\text{gas}) + \text{O}_2 (\text{GeO}_2 (\text{solid})) + 2\text{Cl}_2$ (Υψηλή θερμοκρασία) στον πυρήνα
 Υπάρχουν οπτικές ίνες, οι οποίες κατασκευάζονται από πλαστικό. Προς το παρόν δεν είναι μέσα στις προδιαγραφές, που καθορίζονται από τα διεθνή πρότυπα. Οφείλουμε, όμως, να σημειώσουμε, ότι καταβάλλονται προσπάθειες για να βελτιωθούν τα χαρακτηριστικά τους και ειδικά η πολύτροπη, graded index πλαστική ίνα ενδέχεται να αποτελέσει αξιόπιστο μέσο μετάδοσης εφάμιλλο της γυάλινης ίνας. Μεγάλη εξασθένιση και ευαισθησία σε θερμοκρασιακές μεταβολές.

3.2 Βασική αρχή λειτουργίας

Το φως είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η διεύθυνση μετάδοσης της ενέργειας του φωτός, με άλλα λόγια των φωτονίων, είναι πάντα ευθύγραμμη, εφόσον δεν παρεμβάλλονται εμπόδια και αποτελεί μία ακτίνα φωτός. Πολλές ακτίνες συγκροτούν μια δέσμη φωτός. Για τα κύματα του φωτός, ισχύουν τα φαινόμενα της ανάκλασης και της διάθλασης, όταν αυτά προσπίπτουν στη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων. Το σχήμα 3.2i δείχνει τρεις ακτίνες φωτός: προσπίπτουσα, ανακλώμενη, διαθλώμενη. Οι τρεις αυτές ακτίνες βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο και ισχύουν τα εξής:



Σχήμα 3.2

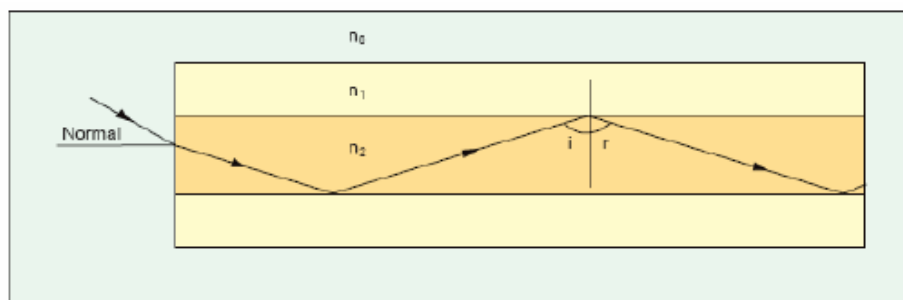
- i. Η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης: $\alpha = \gamma$. (Νόμος Ανάκλασης)
- ii. $n_2 \sin \beta = n_1 \sin \alpha$, (3.1) όπου n_1, n_2 οι δείκτες διάθλασης των δύο φωτοδιαπερατών μέσων 1 και 2. (Νόμος Διάθλασης)
- iii. $n_2 / n_1 = c_1 / c_2$, (3.2) όπου c_1, c_2 οι ταχύτητες του φωτός στο 1 και 2

Συνήθως, έχουμε και τα δύο φαινόμενα μαζί, με αποτέλεσμα η προσπίπτουσα δέσμη φωτός μερικά να ανακλάται και μερικά να διαθλάται. Από το νόμο του Snell, που εκφράζεται από τη σχέση (3.1), μπορούμε να δούμε ότι για $n_1 > n_2 \rightarrow \beta > \alpha$. Αυξάνοντας κατάλληλα τη γωνία πρόσπτωσης (α), μπορούμε να πετύχουμε ώστε $\beta = 90^\circ$, και το διαθλωμένο τμήμα της δέσμης να είναι παράλληλο με την διαχωριστική επιφάνεια των δύο μέσων. Για γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες από την προηγούμενη, έχουμε το φαινόμενο της ολικής ανάκλασης, όπου η φωτεινή δέσμη ανακλάται εξ ολοκλήρου και δεν υπάρχει διαθλωμένη ακτίνα.

Τα παραπάνω φαίνονται στα σχήματα 3.2.ii,iii,iv. Η «κρίσιμη γωνία» (α_{op}) που σημειώνεται στο σχήμα 3.2.iii βρίσκεται από το νόμο του Snell ότι είναι:

$$\alpha_{op} = \arcsin(n_2 / n_1) \quad (3.3)$$

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 $i = 83.8^\circ$. 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 3.1 Διάθλαση του φωτός καθώς εισέρχεται στην ίνα και ολική ανάκλασή του μέσα στην ίνα

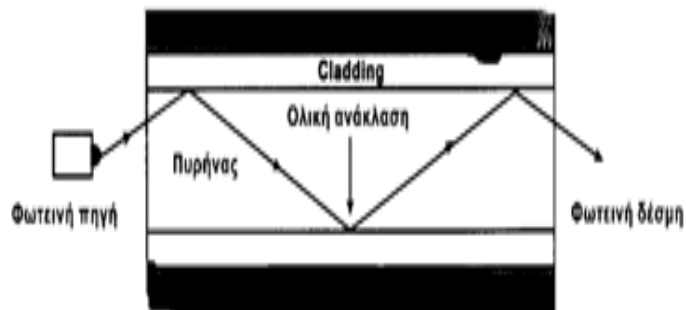
Η φωτεινή δέσμη που μεταφέρει την πληροφορία, μεταδίδεται μέσω του πυρήνα της οπτικής ίνας (core). Η φωτεινή δέσμη οδεύει με διαδοχικές ανακλάσεις στα τοιχώματα της ίνας προς το άλλο άκρο. Η επιτυχία της μετάδοσης αυτής οφείλεται στο γεγονός ότι το σήμα υφίσταται ολικές ανακλάσεις με αποτέλεσμα η ενέργεια της φωτεινής δέσμης να

παραμένει εγκλωβισμένη στην οπτική ίνα. Βασική προϋπόθεση για να συμβεί η ολική ανάκλαση (όπως αναφέραμε και πιο πάνω) είναι αφ' ενός ο δείκτης διάθλασης του εξωτερικού υλικού να είναι μικρότερος του εσωτερικού, αφ' ετέρου η γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας να είναι μεγαλύτερη από την «κρίσιμη γωνία».

Ο δείκτης διάθλασης στο εσωτερικό του πυρήνα μπορεί να έχει μία σταθερή τιμή ή να μεταβάλλεται. Αυτό περιγράφεται μέσω της λεγόμενης κατανομής (ή προφίλ) του δείκτη διάθλασης. Αυτό το χαρακτηριστικό της ίνας είναι πολύ κρίσιμο μια και καθορίζει την τιμή της διασποράς που εμφανίζει η οπτική ίνα.

Αν ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα έχει παντού την ίδια τιμή τότε η ίνα λέγεται βηματικού δείκτη διάθλασης (step index). Αντίστοιχα στην ίνα διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης (graded index) ο δείκτης διάθλασης έχει μέγιστη τιμή στο κέντρο του πυρήνα και μειώνεται σταδιακά μέχρι την διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα περιβλήματος όπου έχει την ελάχιστη τιμή.

Στο σχήμα 3.3 φαίνεται η βασική λειτουργία της μεθόδου διάδοσης σε οπτικές ίνες. Στην περίπτωση των οπτικών ινών η επίστρωση (cladding) είναι με υλικό που έχει μικρότερο δείκτη διάθλασης από αυτόν του πυρήνα. Ο άλλος στόχος που είναι η πρόσπτωση των ακτίνων με γωνία μεγαλύτερη της οριζικής επιτυγχάνεται με τη χρήση ινών πολύ μικρού αριθμητικού ανοίγματος (Numerical Aperture). Το αριθμητικό άνοιγμα δίνεται από τη σχέση $NA = \sin \theta A$ και παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1. Καθορίζει την ισχύ του φωτός που συλλέγεται



στην οπτική ίνα.

Σχήμα 3.3 Μετάδοση σε Πολύτροπη Οπτική Ίνα

3.3 Απώλειες οπτικών ινών

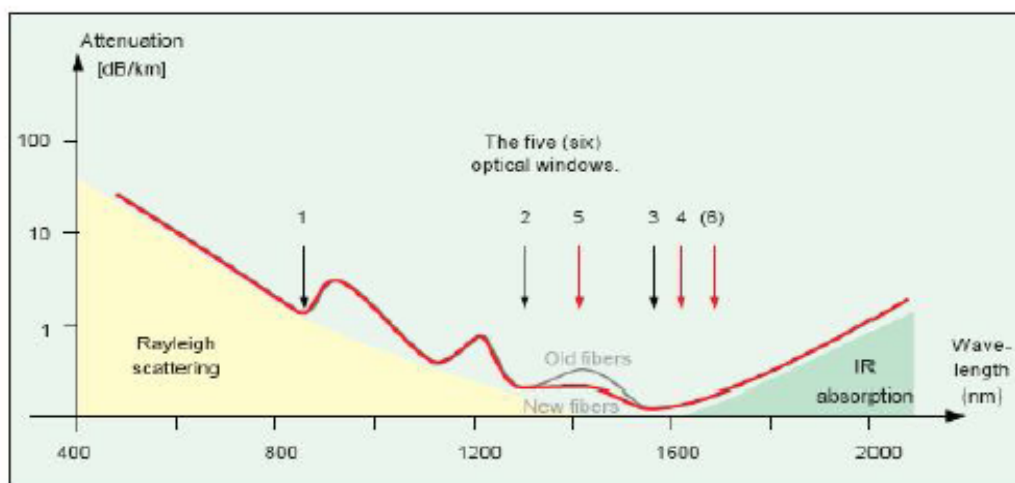
Η κατασκευή των οπτικών ινών στην δεκαετία του 1970 με χαμηλές απώλειες στην περιοχή του 1μm (μαζί με την επίδειξη laser ημιαγωγών που λειτουργούν σε θερμοκρασία δωματίου) έκαναν πρακτικά δυνατές τις οπτικές επικοινωνίες. Οι απώλειες που παρουσιάζουν οι οπτικές ίνες είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας μια και καθορίζει την μέγιστη απόσταση διάδοσης του σήματος χωρίς παραμόρφωση (ή την απόσταση μεταξύ των αναμεταδοτών). Συγκριτικά με τις πλαστικές οι γυάλινες οπτικές ίνες παρουσιάζουν

πολύ χαμηλότερες απώλειες.

Επιγραμματικά οι παράγοντες που συμβάλουν στις απώλειες στις γυάλινες ίνες είναι:

- **Απορρόφηση υλικού** : Όλα τα υλικά παρουσιάζουν απορρόφηση σε συγκεκριμένα μήκη κύματος. Στην γυάλινη οπτική ίνα που κατασκευάζεται από πυρίτιο εμφανίζεται η φυσική απορρόφηση του πυριτίου (στην υπεριώδη περιοχή και στην υπέρυρθη) και η απορρόφηση λόγω προσμίξεων π.χ. Fe, Cu αλλά κυρίως λόγω της παρουσίας υδρατμών που προκαλούν τις κορυφές απορρόφησης OH σε μήκη κύματος 1.39 μm, 1.24 μm και 0.95 μm.
- **Σκέδαση Rayleigh** : Προκαλείται από τις κατά τόπους μικροσκοπικές διακυμάνσεις της πυκνότητας του υλικού που οδηγούν σε διακυμάνσεις του δείκτη διάθλασης και δρουν ως εστίες σκέδασης στο “ομογενές” υλικό της οπτικής ίνας. Η σκέδαση Rayleigh της ακτινοβολίας εξαρτάται έντονα από το μήκος κύματος της και συγκεκριμένα είναι ανάλογη του $1/\lambda^4$.
- **Ατέλειες κυματοδηγού** : Απώλειες προκαλούν οι ατέλειες στην περιοχή ένωσης του πυρήνα με το περίβλημα καθώς και με τα λυγίσματα της οπτικής ίνας: μικροκάμψεις (παραμορφώσεις μικρής ακτίνας κατά την κατασκευή της ίνας) και μακροκάμψεις (καμπυλότητα της ίνας κατά τη χρήση της).

Οι απώλειες των γυάλινων οπτικών ινών (σε συνδυασμό με άλλους παράγοντες όπως διαθέσιμες οπτικές πηγές) υπαγορεύουν τα μήκη κύματος λειτουργίας των συστημάτων οπτικών επικοινωνιών που αποκαλούνται και παράθυρα μετάδοσης. 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 3.2 Η εξασθένηση του φωτός για γυαλί οπτικής ίνας. Παρατηρούμε τα “παράθυρα” στα διάφορα

3.4 Τρόποι διάδοσης (Modes)

Οι «τρόποι διάδοσης» αποτελούν μαθηματικές και φυσικές μεθόδους περιγραφής της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε ένα αυθαίρετο μέσο. Στη μαθηματική τους μορφή, η θεωρία των ηλεκτρομαγνητικών ρυθμών διάδοσης προέρχεται από τις εξισώσεις Maxwell. Ο James Clark Maxwell ήταν ένας μεγάλος Σκοτσέζος μαθηματικός και φυσικός που έζησε στα τέλη του 19ου 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 τρόπος διάδοσης τελικά είναι μια δεκτή λύση των εξισώσεων Maxwell. Για λόγους ευκολίας, ένας τρόπος διάδοσης μπορεί να περιγραφεί σαν μια δυνατή κατεύθυνση που μπορεί να ακολουθήσει ένα κύμα φωτός, όπως μέσα σε μια ίνα. Ο αριθμός των δυνατών τρόπων 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 τρόπων διάδοσης που μπορεί να υποστηρίξει μια ίνα, μπορεί να καθοριστεί από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ίνας και από τις οπτικές παραμέτρους της.

Ένας συγκεκριμένος τρόπος διάδοσης θα μεταφέρει και ένα χαρακτηριστικό ποσό ενέργειας. Οπτικές ίνες που υποστηρίζουν μονάχα ένα οπτικό τρόπο μετάδοσης λέγονται μονότροπες (single mode) και οι τυπικές διαστάσεις του πυρήνα τους (διάμετρος) είναι 8-10μm. Αντίστοιχα οπτικές ίνες με περισσότερους από ένα οπτικούς τρόπους μετάδοσης λέγονται πολύτροπες (multi mode) και έχουν τυπικές διαστάσεις πυρήνα (διάμετρος) από 50μm μέχρι και mm. Ο αριθμός των τρόπων μετάδοσης που υποστηρίζει μια ίνα καθορίζει, ως ένα βαθμό, την δυνατοτήτά της να μεταφέρει πληροφορία λόγω του φαινομένου της διασποράς. 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 τρόπους 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 τρόπων 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.

3.4.1 Κανονικοποιημένη συχνότητα και τρόποι διάδοσης

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

a = ακτίνα πυρήνα [μm]

NA = αριθμητικό άνοιγμα

λ = μήκος κύματος [μm]

k = αριθμός μηκών κύματος φωτός ανά μήκος 2π

Η κανονικοποιημένη συχνότητα δίνεται από τον τύπο :

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

Ο αριθμός των τρόπων 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 τρόπων διάδοσης μπορεί να προσεγγιστεί από τον τύπο :

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

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

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

Αν θέλουμε να μειώσουμε τον αριθμό των τρόπων 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

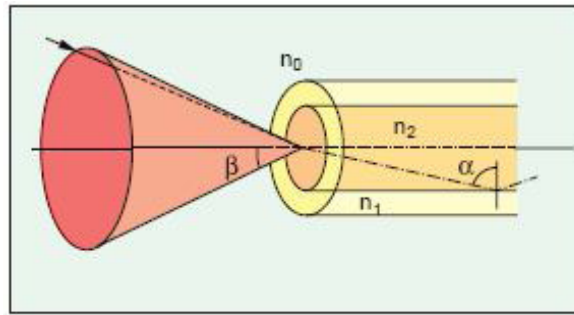
Κάνοντας αλλαγές σε μία ή περισσότερες από τις παραπάνω παραμέτρους, μπορεί να δημιουργηθεί μια μονότροπη ίνα. Οι αλλαγές αυτές όμως συνοδεύονται από ένα πλήθος περιπλοκών. Για παράδειγμα, μια ελάττωση του αριθμητικού ανοίγματος θα προκαλέσει προβλήματα στο ποσό του φωτός που εισέρχεται στην ίνα, γεγονός που σημαίνει ότι 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.

3.5 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 3.3
Ο κώνος αποδοχής μιας ίνας

3.5.1 Αριθμητικό άνοιγμα για ίνα με διαβαθμισμένο προφίλ δείκτη

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

Λόγω του ότι ο δείκτης διάθλασης σε μια ίνα με διαβαθμισμένο 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 :

Αυτό σημαίνει ότι η γωνία αποδοχής πλησιάζει πολύ τον κεντρικό άξονα της ίνας, καθώς μειώνεται βαθμιαία η τιμή προς τον μανδύα.

Με μια πιο ενδελεχή μελέτη, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι μια ίνα με διαβαθμισμένο 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.

3.6 Διάμετρος του πεδίου του ρυθμού διάδοσης

Ο όρος διάμετρος πεδίου ρυθμού διάδοσης ($2w_0$) εισήχθη στην οπτική ινών για να περιγράψει την ακτινική διάδοση του θεμελιώδους ρυθμού διάδοσης LP₀₁ μέσα σε μια ίνα. Για να παραχθεί μια ίνα με χαμηλή εξασθένιση (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 2w0 μειώνεται στα 9 μm περίπου. Μια ίνα που επιτρέπει τη διάδοση μόνο του θεμελιώδους ρυθμού διάδοσης ονομάζεται μονότροπη ίνα.

3.7 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 80μm² και για μια αντίστοιχη ίνα μετατοπισμένης διασποράς είναι 55 μm². 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.

3.8 Διασπορά

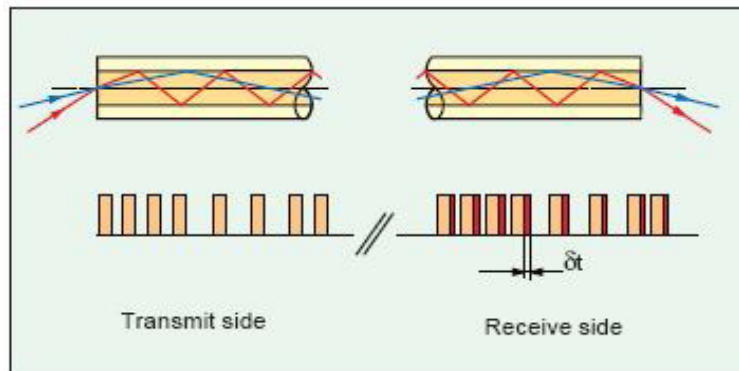
Το φως που ταξιδεύει μέσα σε ένα κυματοδηγό θα υποστεί παραμόρφωση. Το εκπεμπόμενο φως θα διευρυνθεί στο πεδίο του χρόνου. Στον τομέα της οπτικής ινών το παραπάνω φαινόμενο ονομάζεται διασπορά. Υπάρχουν δυο διαφορετικά είδη διασποράς :

- Η intermodal (διατροπική) διασπορά που εμφανίζεται στις πολύτροπες ίνες
- Η intramodal (ενδοτροπική) διασπορά που εμφανίζεται στις μονότροπες και στις πολύτροπες ίνες

3.8.1 Intermodal or modal dispersion (Διατροπική 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 3.4

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).

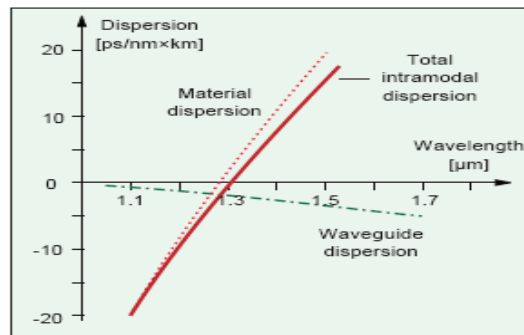
3.8.2 Intramodal dispersion - Ενδοτροπική διασπορά

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.

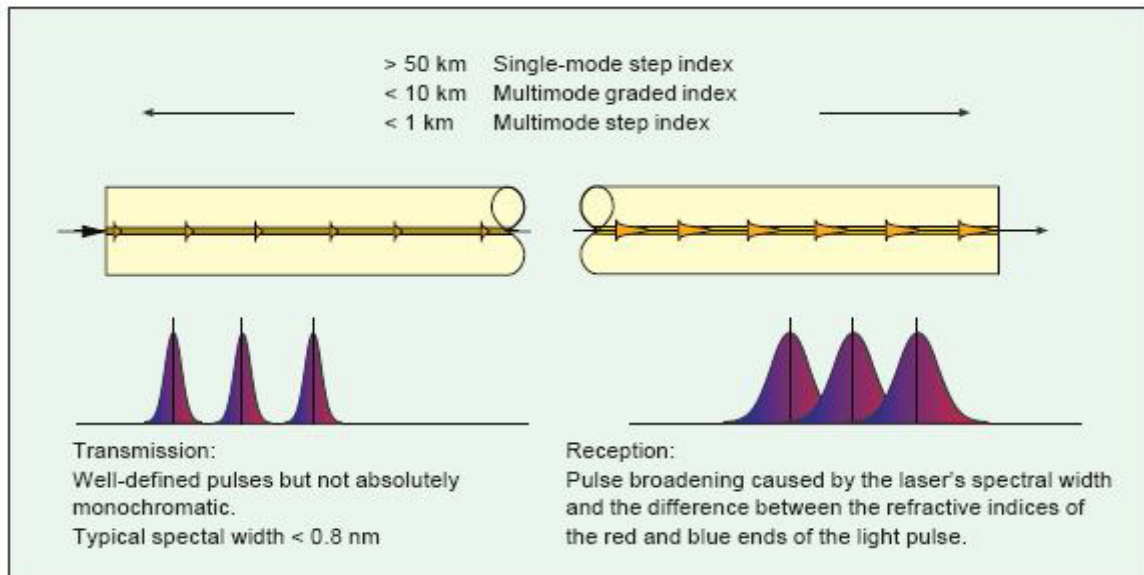
Η διασπορά υλικού και κυματοδηγού τείνουν να αλληλοαναιρούνται σε μήκη κύματος κοντά στα 1310 nm, όπου η χρωματική διασπορά θεωρείται μηδέν. Για μικρότερα μήκη κύματος η χρωματική διασπορά είναι αρνητική ενώ για μεγαλύτερα μήκη κύματος είναι θετική. Η διασπορά υλικού μπορεί να διορθωθεί μόνο αν αλλάξουμε 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 πρωτεύον 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. 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 3.5

Η χρωματική διασπορά είναι το άθροισμα της διασποράς υλικού και κυματοδηγού



Εικόνα 3.6

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

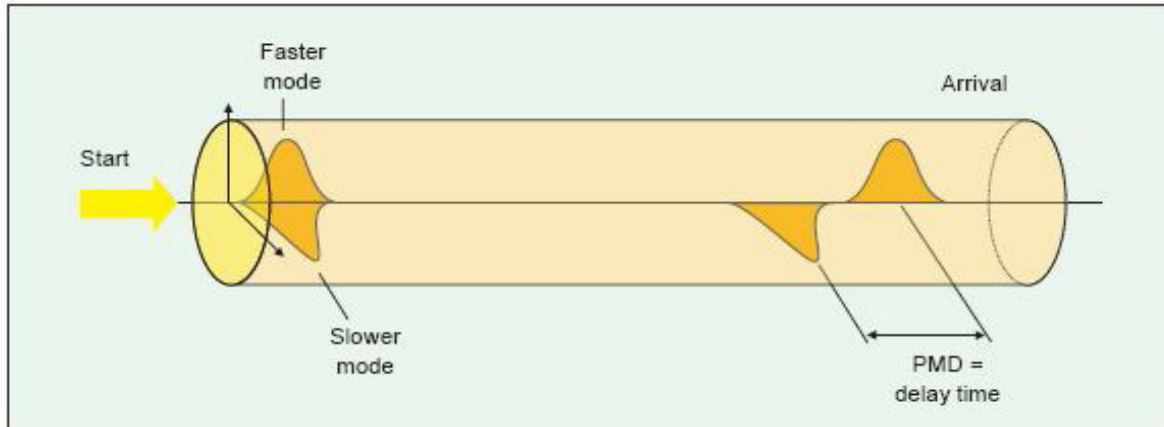
3.8.3 Διασπορά πόλωσης του ρυθμού μετάδοσης (PMD)

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. 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 3.7
Διεύρυνση παλμού λόγω PMD

3.9 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.

3.9.1 Διεγερόμενη σκέδαση Brillouin, SBC

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

3.9.2 Διεγερόμενη σκέδαση Raman, SRS

Η διεγερόμενη σκέδαση Raman είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ του φωτός και των δονήσεων των μορίων της ίνας. Η SRS σκεδάζει φως και προς τα εμπρός και προς τα πίσω. Η μετάδοση ισχύος προς τα πίσω μπορεί να μηδενιστεί χρησιμοποιώντας ένα οπτικό απομονωτή. Η SRS εμφανίζεται για ισχύ εισόδου μεγαλύτερη από 27 dBm, δηλαδή κοντά στο 1 W. Η διεγερόμενη σκέδαση Raman αποτελεί σημαντικότερο πρόβλημα για την μετάδοση μέσω μίας οπτικής ίνας αλλά εμφανίζεται, όπως προαναφέραμε, αποκλειστικά όταν η ισχύς εισόδου είναι αρκετά υψηλή (περίπου 1 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.

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

Η SPM περιγράφει την επίδραση που έχει ένας παλμός φωτός στην ίδια του τη φάση. Η ίδια η ισχύς του διαδιδόμενου παλμού μπορεί να μεταβάλλει τον δείκτη διάθλασης της ίνας μέσα στην οποία διαδίδεται ο παλμός με διαφορετικό τρόπο για τα διάφορα μήκη κύματος. Ο μεταβαλλόμενος δείκτης διάθλασης διαμορφώνει τη φάση του μεταδιδόμενου κύματος. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί στην διεύρυνση το φάσματος του διαδιδόμενου παλμού. Αν είναι αρκετά μεγάλη αυτή η διεύρυνση μπορεί να επικαλυφθούν κανάλια σε συστήματα DWDM. Η SPM εμφανίζεται για ισχύ εισόδου μεγαλύτερη από 5 dBm. Η αυτό-διαμόρφωση φάσης είναι ένα αρκετά σύνθητες φαινόμενο στα οπτικά δίκτυα που χρησιμοποιούν μονοτροπικές ίνες. Πέρα από την φασματική διεύρυνση του παλμού η αυτό-διαμόρφωση φάσης μπορεί να προκαλέσει και έντονη παραμόρφωση της μορφής του παλμού. Η επίδραση του φαινομένου της αυτό-διαμόρφωσης γίνεται πιο έντονη καθώς αυξάνεται η ισχύς. Οπότε κρίνεται αναγκαίο κατά την διάδοση ενός παλμού μέσα από την οπτική ίνα τα επίπεδα ισχύος του να μην ξεπερνάνε αυτά στα οποία αρχίζει να εμφανίζεται το φαινόμενο της αυτό-διαμόρφωσης φάσης.

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

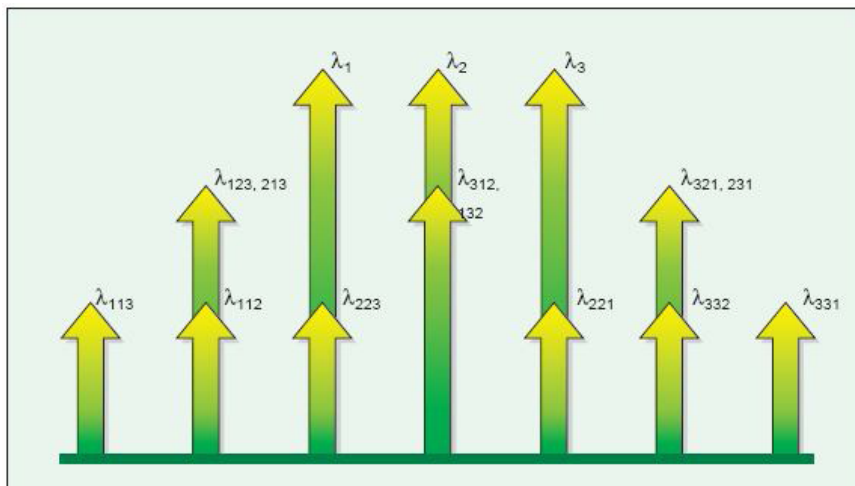
Η XPM σχετίζεται αρκετά με την SPM. Η SPM περιγράφει την επίδραση που έχει ένας παλμός στον εαυτό του ενώ η XPM περιγράφει την επίδραση που έχει ένας παλμός στους παλμούς άλλων καναλιών. Η SPM μπορεί να εμφανιστεί σε μονοκάναλα και πολυκάναλα συστήματα ενώ η XPM εμφανίζεται μόνο σε πολυκάναλα συστήματα.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

3.9.5 Μείξη τεσσάρων κυμάτων

Ένα από τα πιο σοβαρά μη γραμμικά φαινόμενα είναι η μείξη τεσσάρων κυμάτων. Εμφανίζεται όταν πολλαπλά σήματα μεταδίδονται ταυτόχρονα. Τα σήματα αυτά «αναμειγνύονται» με αποτέλεσμα να παράγουν νέα κανάλια που μπορούν να «κλέψουν» ισχύ από τα ήδη υπάρχοντα κανάλια και να τα επικαλύψουν. Η εικόνα 8 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 3.8

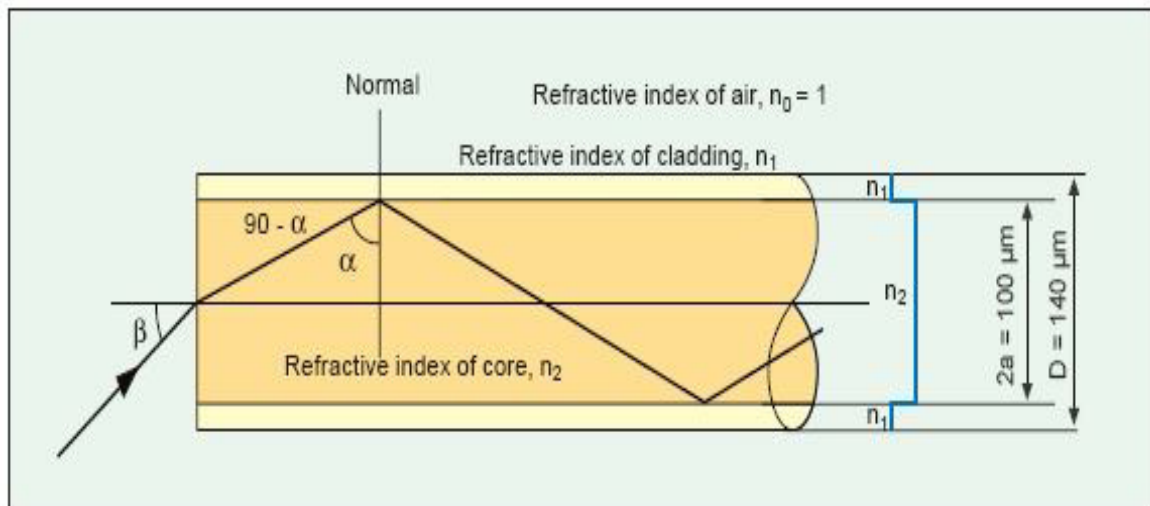
Λόγω του ότι τα κανάλια (μήκη κύματος) λ_1 , λ_2 και λ_3 ισαπέχουν μεταξύ τους σε αυτό το παράδειγμα, κάποια από τα σήματα που δημιουργούνται επιδρούν στα ήδη υπάρχοντα κανάλια

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.

[3.10 Πολύτροπη ίνα με βηματικό προφίλ δείκτη](#)

Αν χρησιμοποιήσουμε μια ίνα με βηματικό 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 9 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 3.9

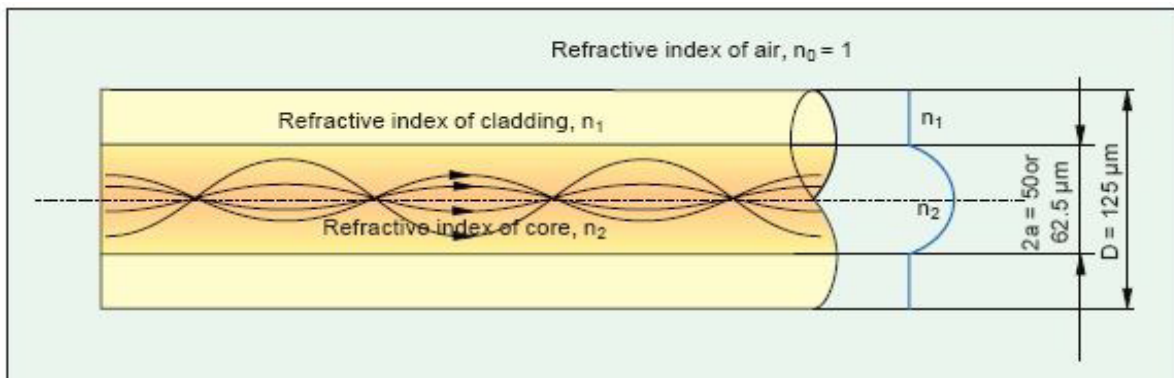
Ενεργειακό μονοπάτι σε πολύτροπη ίνα με βηματικό δείκτη. Παρατηρούμε ότι η γωνία $(90^\circ - \alpha) < \beta$

3.11 Πολύτροπη ίνα με διαβαθμισμένο προφίλ δείκτη

Όπως αναφέρθηκε και πριν, μια πολύτροπη ίνα με βηματικό 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 διαβαθμισμένου δείκτη.

Στην εικόνα 10, 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 3.10
 Διαδρομή φωτός μέσα σε πολύτροπη ίνα με βαθμιαίο δείκτη διάθλασης

Τυπικές τιμές ίνας με βαθμιαίο δείκτη :

<i>Διάμετρος πυρήνα</i>	50 ή 62.5 μm
<i>Διάμετρος μανδύα</i>	125 μm
<i>Μέγιστος δείκτης διάθλασης πυρήνα</i>	1.46
<i>Σχετική διαφοροποίησης δείκτη διάθλασης</i>	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 διαβαθμισμένο δείκτη. Αυτές οι ίνες μπορεί να χρησιμοποιηθούν για μήκη κύματος 850 nm και 1300 nm ή σε εφαρμογές διπλού παραθύρου.

3.12 Μονότροπη ίνα με βηματικό 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 11 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 :

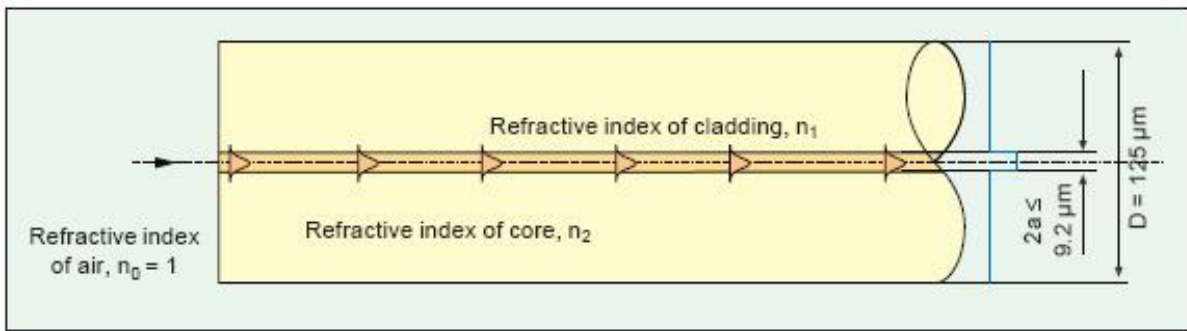
<i>Διάμετρος μανδύα</i>	125 nm
<i>Δείκτης διάθλασης πυρήνα</i>	1.4485
<i>Δείκτης διάθλασης μανδύα</i>	1.4440
<i>Διαφοροποίηση δείκτη διάθλασης</i>	0.003 = 0.3 %

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.

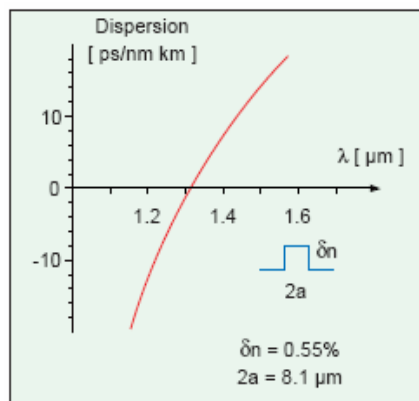


Εικόνα 3.11

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 12 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 3.12

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

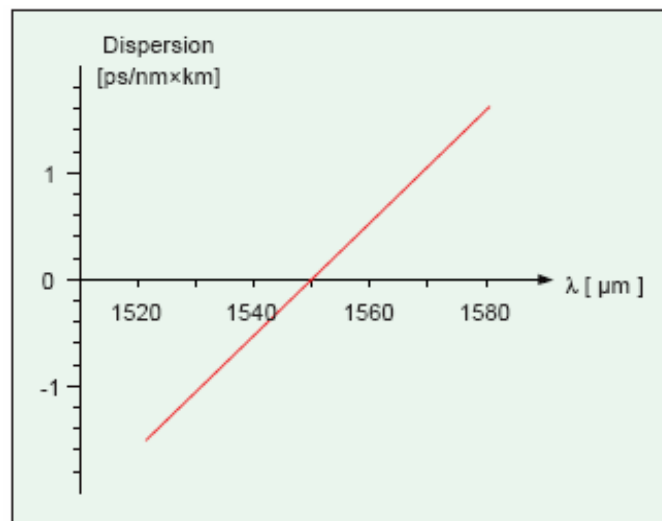
3.13 Ίνες μετατοπισμένου σημείου διασποράς

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

3.14 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 3.13

Χρωματική διασπορά για μια ίνα μετατοπισμένου σημείου διασποράς

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΗΓΕΣ ΦΩΤΟΣ ΚΑΙ ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ

Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό , θα εξετάσουμε τις πηγές οπτικής εκπομπής τις συσκευές φωτοανίχνευσης που χρησιμοποιούνται σε οπτικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα.Εισαγωγικά , δίνεται μία γενική παρουσίαση των laser και ειδικότερα των διόδων laser και των LED's. Παραθέτονται επίσης ημιαγώγιμα υλικά και η λειτουργία τους και περιγράφεται η ποικιλία των οπτοηλεκτρικών εξαρτημάτων(OE components)που χρησιμοποιούνται σαν πηγές φωτός σε πληροφοριακά συστήματα οπτικών ινών.Στη συνέχεια γίνεται εκτενής αναφορά , στους κυριότερους τύπους οπτικών ανιχνευτών και στους παράγοντες που επηρεάζουν την ανίχνευση φωτός σε συστήματα οπτικών ινών.

4.1 LASER και αρχή λειτουργίας τους

Ο όρος λέιζερ προέρχεται από το αγγλικό ακρωνύμιο Laser: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, που αποδίδεται στα ελληνικά ως ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας και καλύπτει τόσο τις συσκευές που την παράγουν όσο και την αντίστοιχη ακτινοβολία.

Το laser είναι μια πηγή φωτός όπως ένας φακός, μια ηλεκτρική λάμπα, ή ο ήλιος. Προς το παρόν το laser παράγει ακτινοβολία σε μια περιοχή συχνοτήτων από το υπέρυθρο μέχρι και το υψηλό υπεριώδες με σοβαρή πιθανότητα πως σύντομα θα επεκταθεί και στην περιοχή συχνοτήτων των ακτίνων Χ. ([Εικόνα 2.1](#))

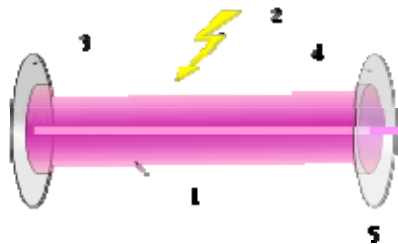
Σαν πηγή ακτινοβολίας το laser έχει τέσσερις ιδιότητες που το ξεχωρίζουν από τις άλλες γνωστές πηγές και που δημιουργούν τις απαραίτητες προϋποθέσεις για τις πολλές και ποικίλες εφαρμογές του. Οι ιδιότητες αυτές είναι:

- **Μεγάλη ένταση** (Πολλή ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας και ανά περιοχή συχνοτήτων).
- **Μονοχρωματικότητα** (Η ενέργεια είναι συγκεντρωμένη σε μια στενή περιοχή συχνοτήτων).
- **Κατευθυντικότητα** (η δέσμη αποκλίνει πολύ λίγο).
- **Συμφωνία φάσης** (Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που αποτελούν τη δέσμη ακολουθούν το ένα το άλλο με τάξη).

Η λειτουργία των λέιζερ ερμηνεύεται από την θεωρία της κβαντικής μηχανικής και της θερμοδυναμικής. Πολλά υλικά έχουν βρεθεί ότι έχουν τα απαραίτητα χαρακτηριστικά για να αποτελέσουν ενεργό υλικό των λέιζερ, με αποτέλεσμα την δημιουργία πολλών τύπων λέιζερ με διαφορετικά χαρακτηριστικά, που χρησιμοποιούνται σε μεγάλο εύρος εφαρμογών.

Η εφεύρεση των λέιζερ στηρίχθηκε στην κατασκευή των μείζερ στην δεκαετία του 1950. Το πρώτο λέιζερ κατασκευάστηκε το 1960, από τότε όμως τα λέιζερ βρήκαν εφαρμογή στις θετικές επιστήμες, στην βιομηχανία, στην ιατρική, και στην ηλεκτρονική.

Τα λέιζερ αποτελούνται από το ενεργό υλικό, και την οπτική κοιλότητα. Το ενεργό υλικό μετατρέπει την εξωτερική ενέργεια σε δέσμη φωτός. Συνήθως είναι υλικό με συγκεκριμένο μέγεθος, σύσταση, καθαρότητα και μορφή, που παράγει φως μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής, η οποία αποτελεί κβαντομηχανική διαδικασία που προτάθηκε από τον Αλβέρτο Αϊνστάιν για να ερμηνεύσει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Το ενεργό υλικό αντλείται από μία εξωτερική πηγή ενέργειας. Τέτοιες πηγές μπορεί να είναι ηλεκτρικές ή φωτεινές, όπως η λυχνία έκλαμψης (flash lamp) ή κάποια άλλη πηγή λέιζερ. Η ενέργεια που απορροφάται αποτίθεται στα σωματίδια του ενεργού υλικού έτσι, ώστε αυτά να οδηγηθούν σε μια διεγερμένη κβαντική κατάσταση. Όταν ο αριθμός των σωματιδίων που βρίσκονται στην διεγερμένη κατάσταση είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των ατόμων που βρίσκεται στην βασική κατάσταση, επιτυγχάνεται αντιστροφή πληθυσμού. Έτσι λοιπόν, μία δέσμη φωτός που περνάει μέσα από το υλικό έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να οδηγήσει σε εξαναγκασμένη εκπομπή φωτονίων από ότι σε εξαναγκασμένη απορρόφηση, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται ενίσχυση της δέσμης. Ένα διεγερμένο ενεργό υλικό μπορεί να λειτουργήσει επίσης και σαν οπτικός ενισχυτής.



Εικόνα 4.1 Αρχή λειτουργίας του Λείζερ:

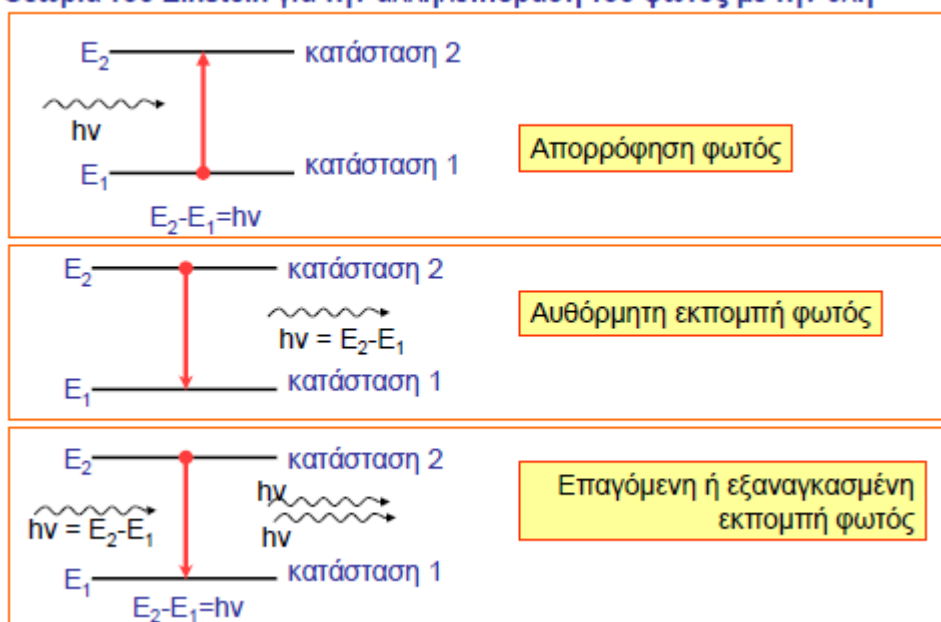
1. Ενεργό υλικό του Λείζερ
2. Προσφερόμενη ενέργεια άντλησης
3. Υψηλής ανακλαστικότητας κάτοπτρο
4. Διάταξη εξόδου δέσμης
5. Δέσμη Λείζερ

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

Η οπτική κοιλότητα αποτελεί παράδειγμα κοιλότητας ταλάντωσης και περιέχει μια σύμφωνη δέσμη φωτός μεταξύ δύο ανακλαστικών επιφανειών, έτσι ώστε κάθε φωτόνιο να περνά τουλάχιστον δύο φορές από το ενεργό υλικό προτού φύγει από την οπή εξόδου της πηγής λέιζερ ή χαθεί λόγω απορρόφησης ή περίθλασης. Αν η ενίσχυση που προέρχεται από την επαναλαμβανόμενη διέλευση του φωτός μέσα από το ενεργό υλικό είναι μεγαλύτερη από τις απώλειες της κοιλότητας, τότε εμφανίζεται εκθετική αύξηση της

ισχύς του φωτός μέσα στην κοιλότητα. Όμως, κάθε εξαναγκασμένη εκπομπή αναγκάζει ένα σωματίδιο να επιστρέψει από την διεγερμένη κατάσταση στην βασική, μειώνοντας έτσι την ικανότητα του ενεργού υλικού για επιπλέον ενίσχυση. Όταν αυτό το φαινόμενο μεγιστοποιείται τότε λέμε ότι η ενίσχυση έχει φτάσει σε κορεσμό. Η συνθήκη όπου η ισχύς άντλησης γίνεται περίπου ίση με την τιμή κορεσμού της ενίσχυσης και με τις απώλειες της κοιλότητας οδηγεί σε κατάσταση ισορροπίας της ισχύς του λέιζερ μέσα στην κοιλότητα. Αυτή η τιμή ισορροπίας καθορίζει και το σημείο λειτουργίας του λέιζερ. Αν η ισχύς άντλησης είναι πολύ μικρή, η ενίσχυση δεν είναι αρκετή ώστε να καλυφθούν οι απώλειες του ταλαντωτή, με αποτέλεσμα να εκπέμπεται πολύ μικρή ένταση λέιζερ. Η ελάχιστη τιμή ισχύς άντλησης που απαιτείται για την παραγωγή λέιζερ ονομάζεται κατώφλι λέιζερ. Το ενεργό υλικό ενισχύει οποιοδήποτε φωτόνιο περάσει μέσα από αυτό, αλλά μόνο αυτά που είναι ευθυγραμμισμένα με την κοιλότητα μπορεί να περάσουν περισσότερο από μια φορά μέσα από το ενεργό υλικό για να επιτευχθεί σημαντική ενίσχυση.

Θεωρία του Einstein για την αλληλεπίδραση του φωτός με την ύλη



Εικόνα 4.2

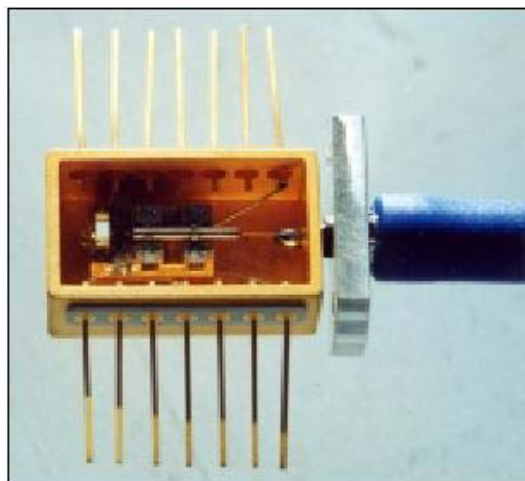
Αν η δέσμη δημιουργείται και διαδίδεται σε ελεύθερο περιβάλλον και όχι μέσα σε κυματοδηγούς (όπως στην περίπτωση των οπτικών ινών), τότε η ένταση του φωτός εμφανίζει κανονική (Γκαουσιανή) κατανομή, κάθετα στην διεύθυνση διάδοσής της. Η δέσμη του λέιζερ είναι σχεδόν απόλυτα ευθυγραμμισμένη, δηλαδή δεν αποκλίνει. Παρόλα αυτά, τέλεια ευθυγραμμισμένη δέσμη δεν μπορεί να υπάρξει λόγω περίθλασης. Για παράδειγμα, μια δέσμη με αρχική διάμετρο 2 mm, που δημιουργείται από ένα μικρό εργαστηριακό λέιζερ (όπως ένα λέιζερ Ηλίου-Νέου), αποκλίνει αποκτώντας διάμετρο 1,6 χιλιόμετρα, όταν διανύσει απόσταση ίση με αυτή της γης-σελήνης.

4.1.1 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 4.3
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

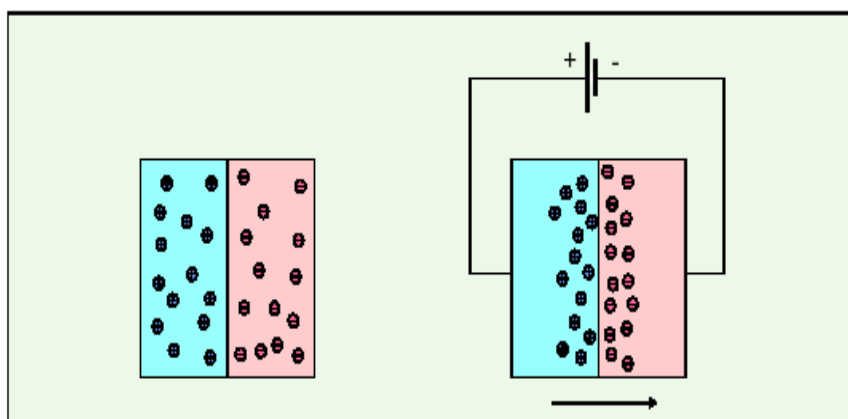
χρήση πολύ υψηλών συχνοτήτων . Αυτό δεν είναι δυνατό με τα lasers αερίου χωρίς τη χρήση ολοκληρωμένου , περιφερειακού εξοπλισμού .

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

4.1.2 Σχεδιασμός δίοδου LASER

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.

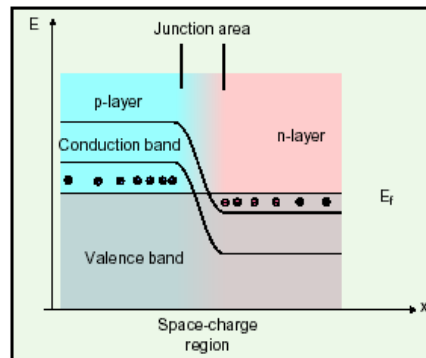
Ένα από τα κυριότερα πλεονεκτήματα των ημιαγωγών είναι η δυνατότητα που έχουμε να προκαλέσουμε τη δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων-οπών με την εισαγωγή φορέων μειονότητας σε μια επαφή p-n . Αυτή είναι μια πολύ απλή και αποτελεσματική μέθοδος διέγερσης .



Εικόνα 4.4

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

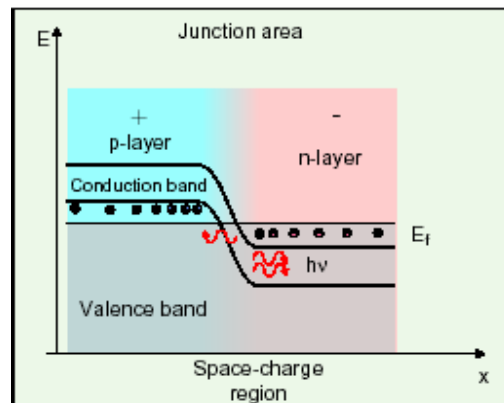
Χωρίς την ύπαρξη ορθής πόλωσης, το επίπεδο Fermi (E_f) είναι το ίδιο μέσα στο υλικό σαν συνέπεια της κατάστασης ισορροπίας που βρίσκεται ο ημιαγωγός. Χάρη στην ανισορροπία που δημιουργείται από την πληθώρα ηλεκτρονίων στην περιοχή n- και την πληθώρα οπών στην περιοχή p-, εμφανίζεται ηλεκτρικό πεδίο γύρω από την επαφή p-n. Το ηλεκτρικό αυτό πεδίο δημιουργείται από τους ιονισμένους δότες και δέκτες στον κρύσταλλο όταν τα ηλεκτρόνιά 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 4.5

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 4.6

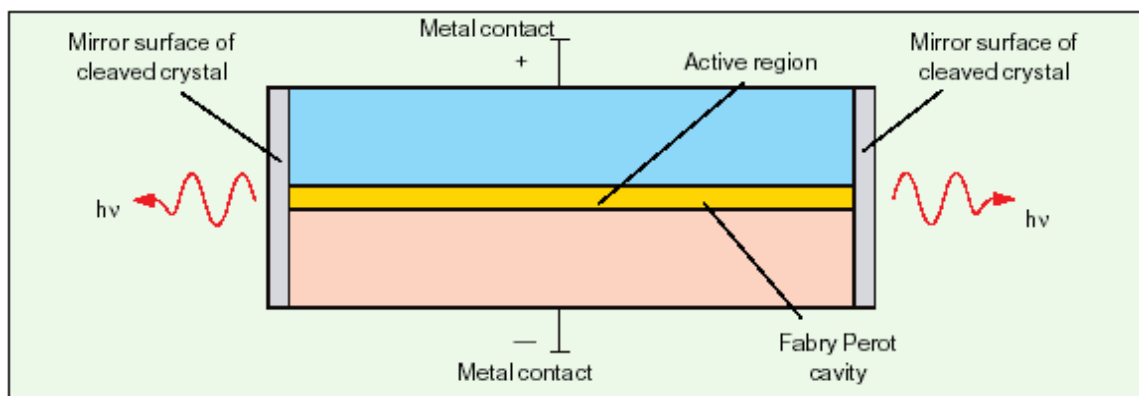
Ορθά πολωμένη επαφή p-n. Το ρεύμα προκαλεί την επανασύνδεση μεγάλου αριθμού ηλεκτρονίων –οπών στην περιοχή επαφής. Ο πλεονασμός ενέργειας εκπέμπεται με τη μορφή κβάντων φωτός (φωτονίων)

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) .

4.1.3 Fabry - Petrol LASER

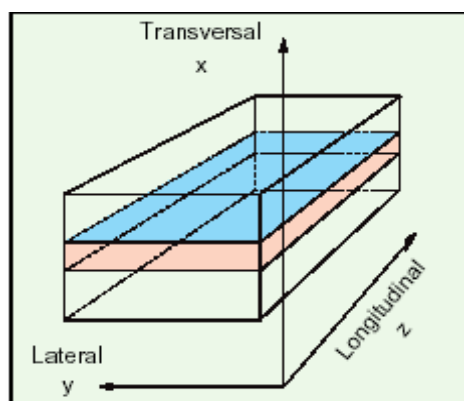
Για την βελτιστοποίηση της απόδοσης μιας διόδου laser για όσο το δυνατόν περισσότερες εφαρμογές, αναπτύχθηκε μια ποικιλία διαφορετικών lasers . Οι απλούστερες διόδοι laser καλούνται «broadstripe Fabry-Perot».Ο χαρακτηρισμός broadstripe προκύπτει από το σχετικά μεγάλο πλάτος (>10μm) της μεταλλικής επαφής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



Εικόνα 4.7

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.



Εικόνα4.8
Καθορισμός των κατευθύνσεων σε μια διάταξη laser

4.2 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 :

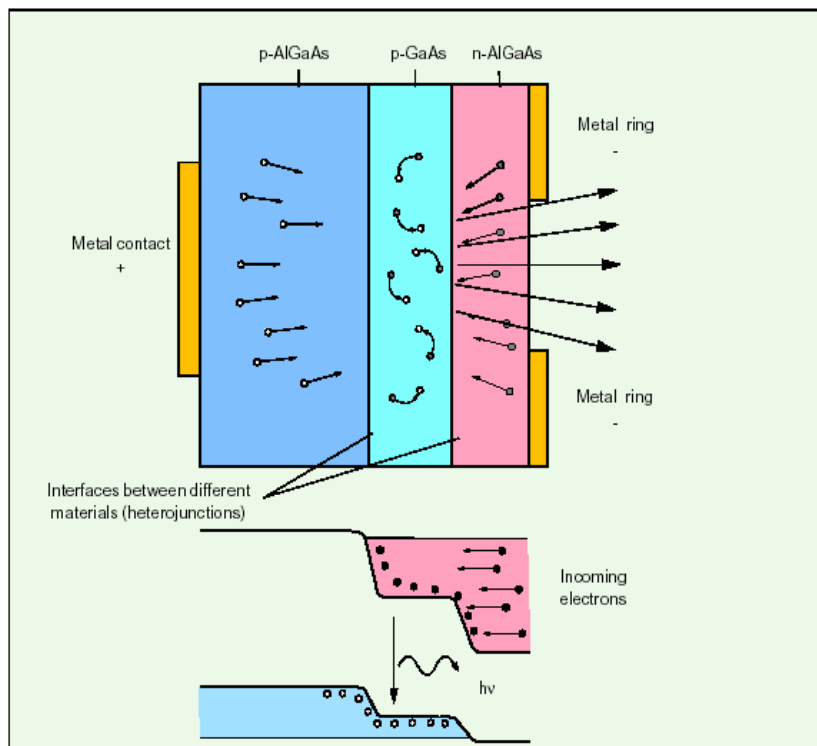
- Απλούστερη κατασκευή (δεν χρειάζονται επιφάνειες ανάκλασης , γραμμική γεωμετρική σχεδίαση)
- Φτηνότερα . Παρατηρείται μεγάλη μείωση του κόστους παραγωγής με τη χρήση του led και των αντίστοιχων κυκλωμάτων οδήγησης
- Αξιόπιστα . Ένα LED δεν « γερνά » τόσο γρήγορα όσο η δίοδος laser
- Μικρότερη ευαισθησία 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 κλασσικό παράδειγμα χρήσης των LEDS για οπτική εκπομπή .

Τα LEDS κατασκευάζονται από τον ίδιο συνδυασμό υλικών με τις διόδους 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 .

4.2.1 Διπλό LED ετεροεπαφής (dual junction led)

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



Εικόνα 4.9
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 .

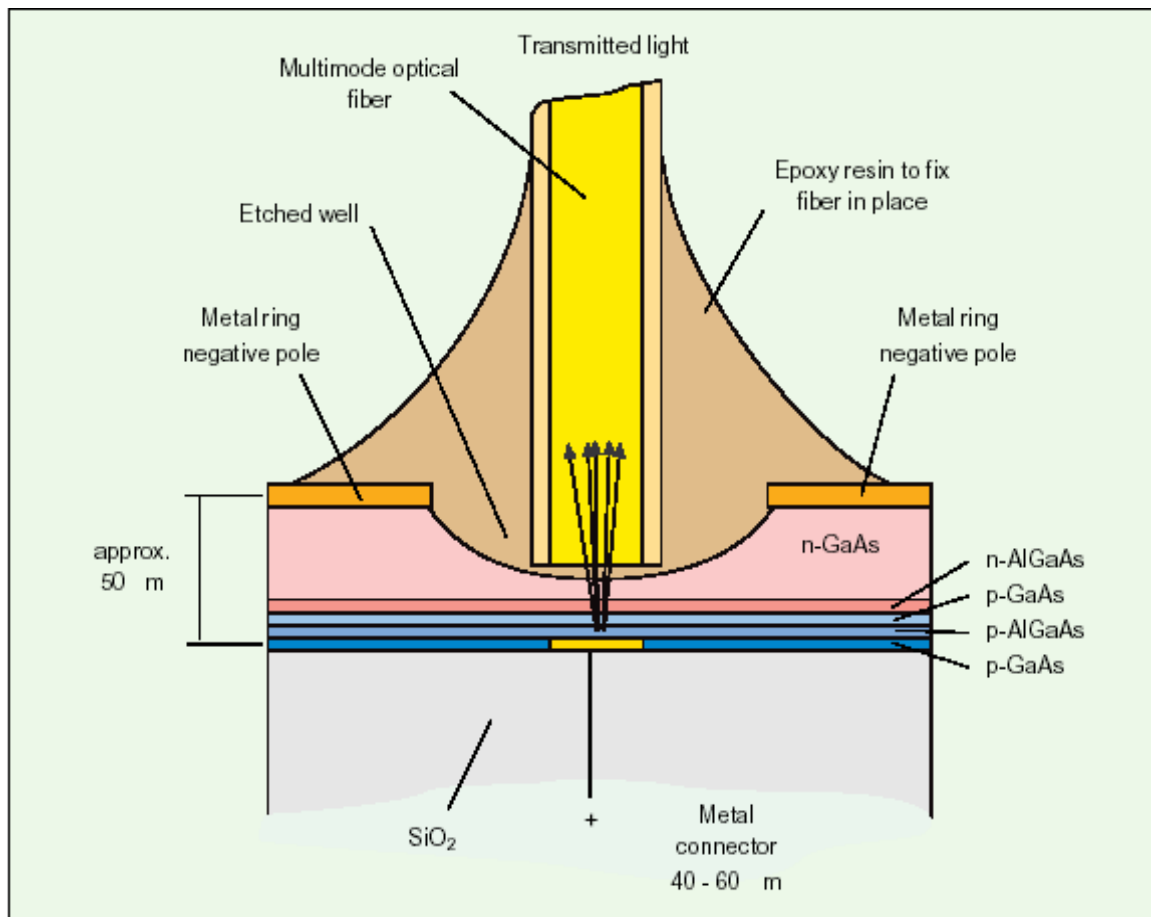
4.2.2 Διαφορετικοί τύποι LED

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
- Ακμοπυροδοτίτο 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 γειτονικά 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 κυματοδήγησης του πυρήνα της ίνας .

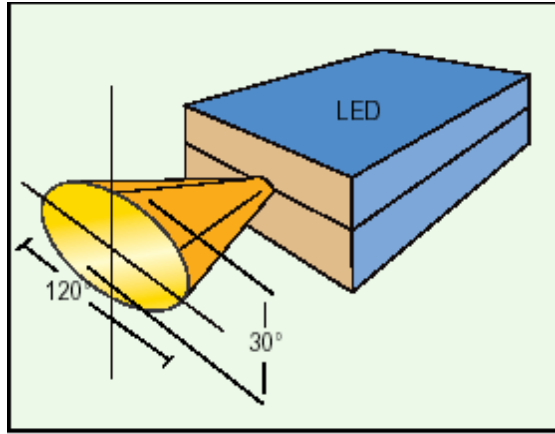


Εικόνα 4.10

LED τύπου Burghs με κατάλληλο σχήμα αύλακος για το περιορισμό της απορρόφησης στο στρώμα τύπου n του GaAs

Ακμοπυροδότιο 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 4.11

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 .

4.2.3 Απόδοση LED

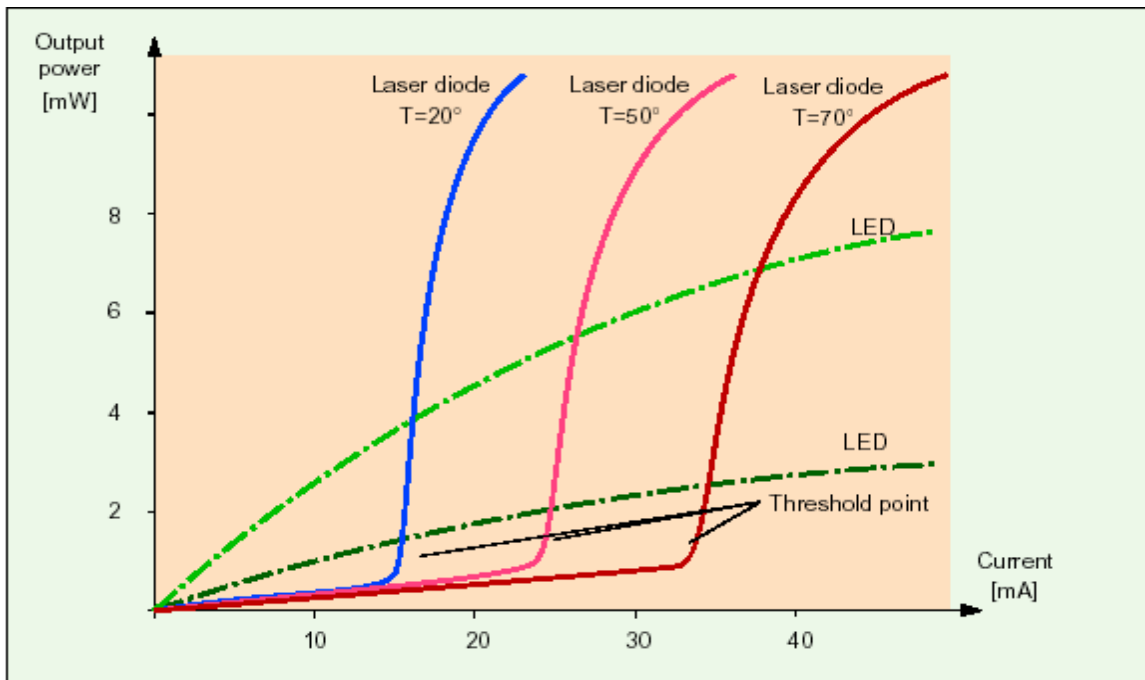
Η απόδοση ενός LED εξαρτάται πλήρως από το πόσα φωτόνια δημιουργούνται από τα διεγερμένα ηλεκτρόνια . Εάν λάβουμε υπ όψη τις μη ακτινοβολούσες επαφές σε σημεία που ο κρύσταλλος παρουσιάζει ατέλειες παρατηρείται κβαντική απόδοση περίπου στο 50% στα LEDS ομοεπαφής . Σε LEDS ετεροεπαφής , η αναμενόμενη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

4.3 Χαρακτηριστικά των LASERS και των LEDS

4.3.1 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 διόδου 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 $\theta > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$).

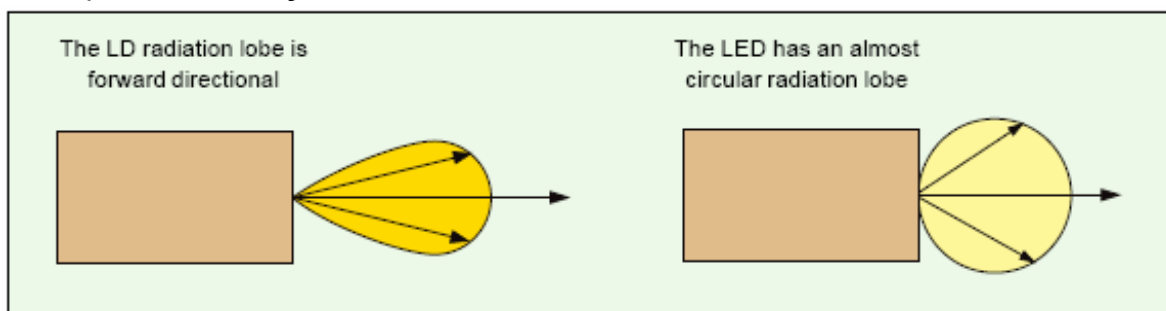


Εικόνα 4.12

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

4.3.2 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.

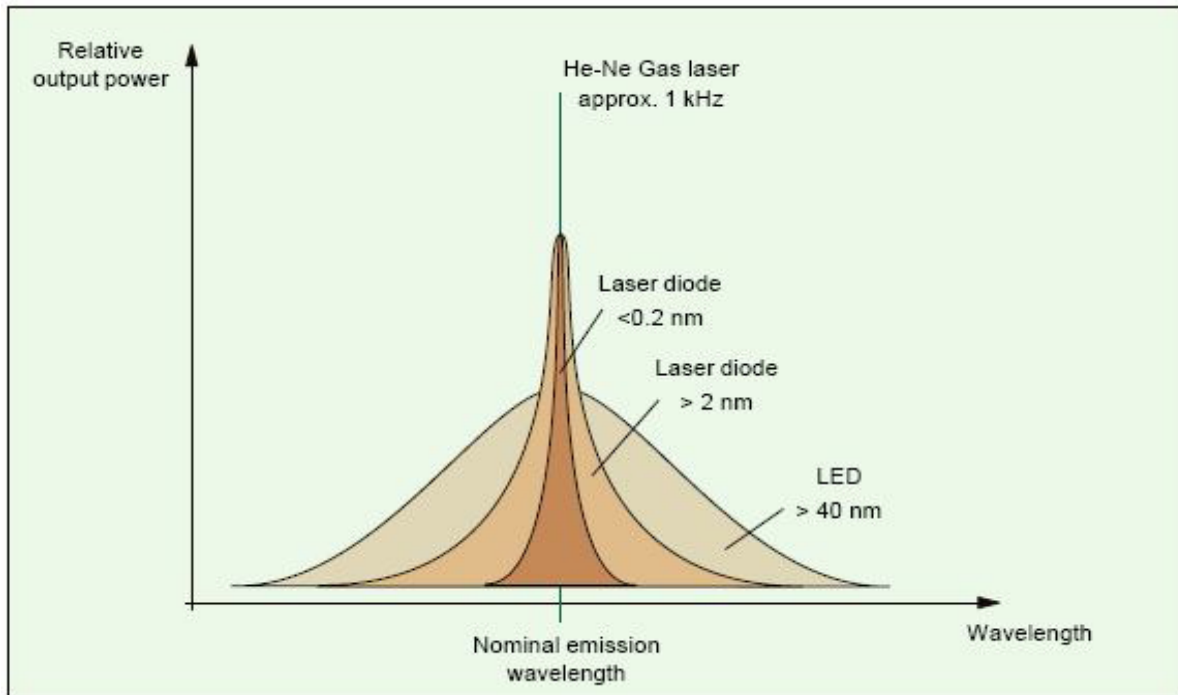


Εικόνα 4.13 Οι διαφορές μεταξύ των λοβών ακτινοβολίας ενός LD και ενός LED

4.3.3 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 10¹⁴Hz. Αν το LD/LED είναι διαμορφωμένο, θα εμφανιστούν πλευρικές ζώνες και στις δύο 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 4.14

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 :

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

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.

4.3.4 Διαμόρφωση

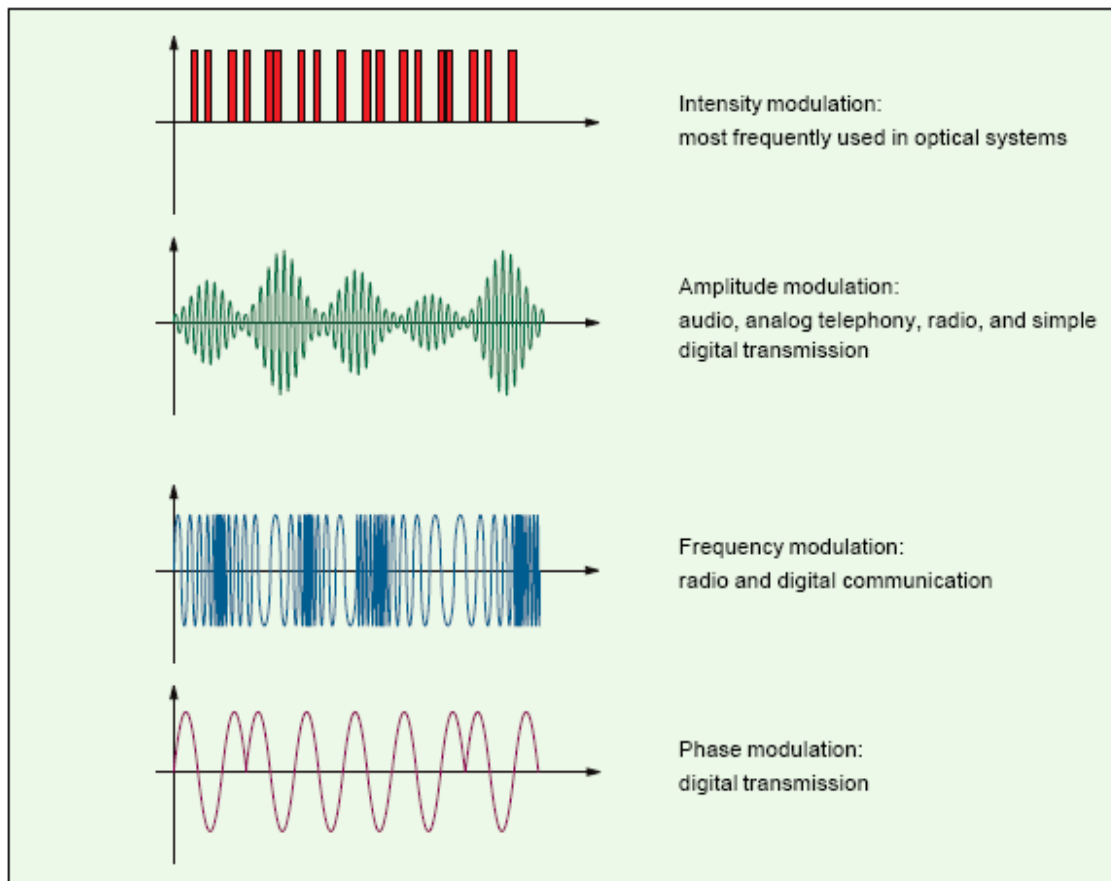
Όπως συμβαίνει και με τους ράδιο-πομπούς, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλοί τύποι διαμόρφωσης για να μεταδοθεί μια πληροφορία με ένα οπτικό φορέα. Ο πιο απλός τύπος

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 4.15

Διάφοροι τύποι διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση πληροφοριών

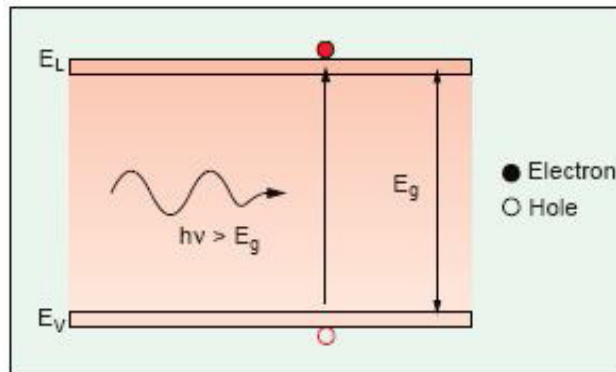
4.4 Οπτικοί Ανιχνευτές

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 θα παρουσιάσουμε 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 : πυρίτιο (Si) 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 χάσμα 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.

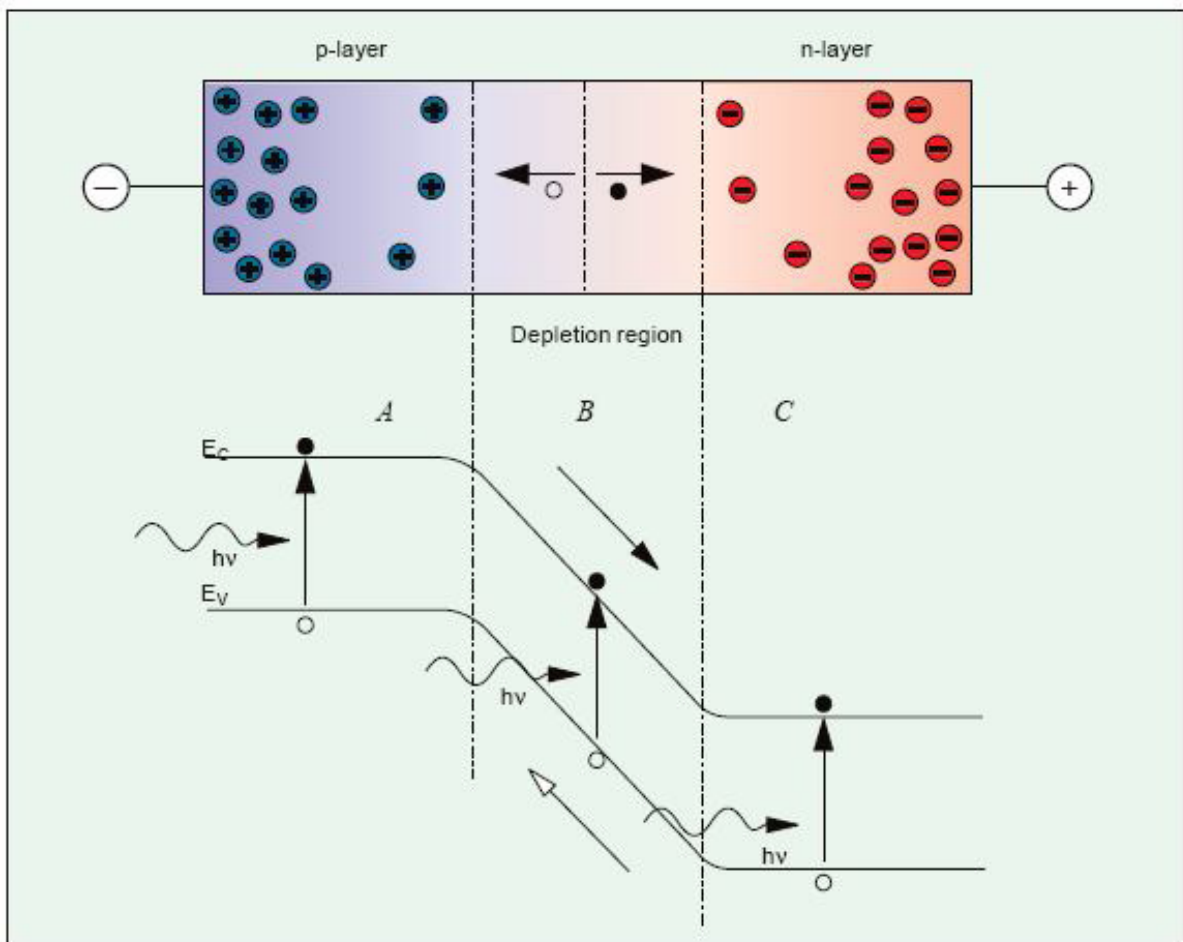


Εικόνα 4.16

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

4.4.1 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 4.17 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.

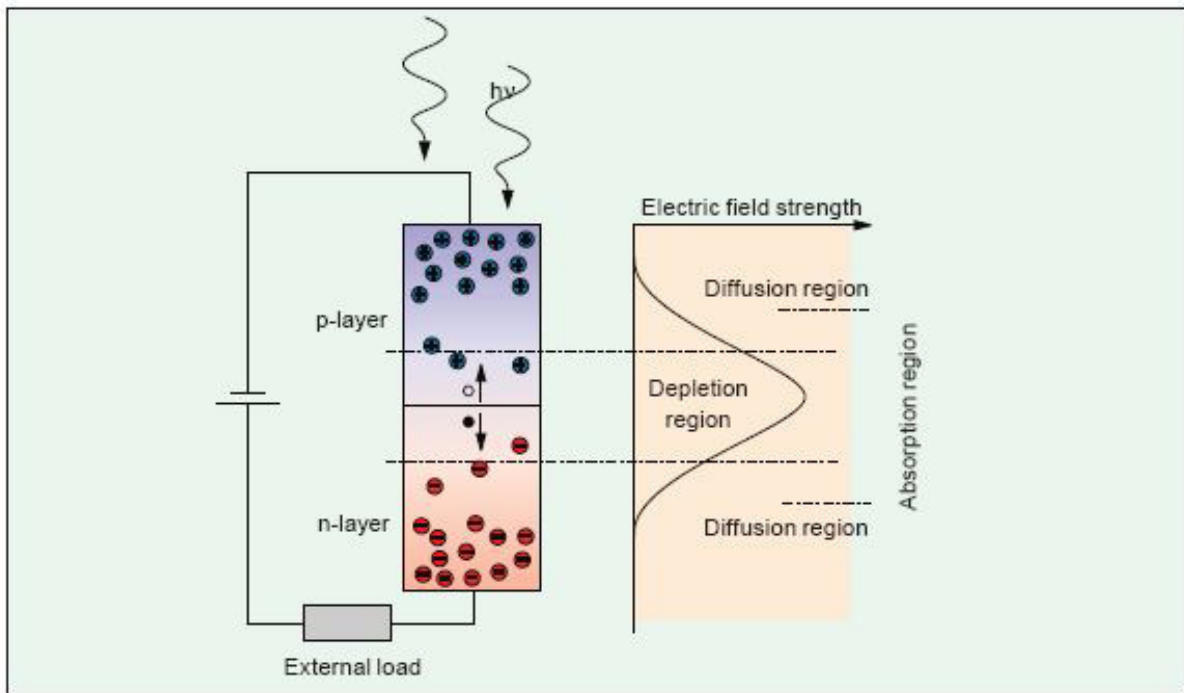


Εικόνα 4.17

Ένα φωτόνιο μπορεί να δημιουργήσει ζεύγη e-h σε τρεις διαφορετικές περιοχές της διόδου (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 διόδου, 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 διόδων 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.



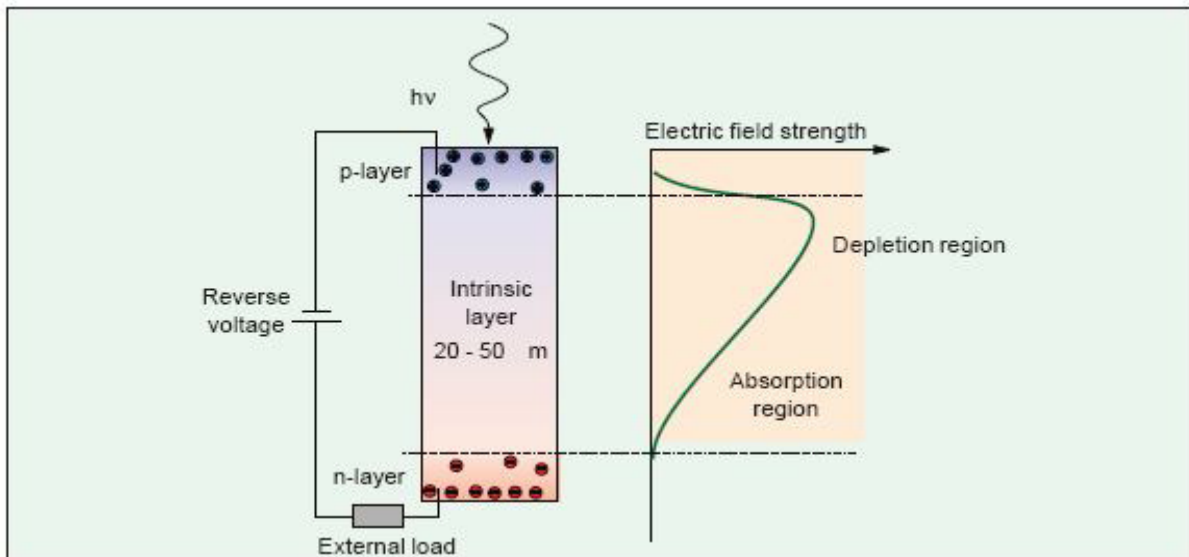
Εικόνα 4.18

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

Όπως φαίνεται και παραπάνω, η διαδικασία διάχυσης στις περιοχές A και 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.

4.4.2 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).

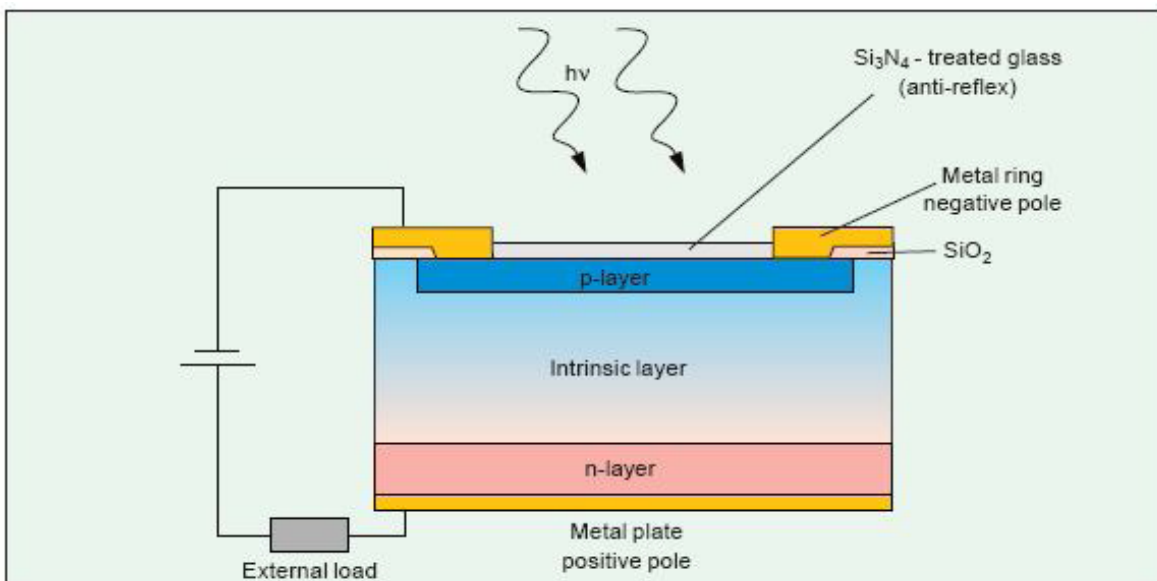


Εικόνα 4.19

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.

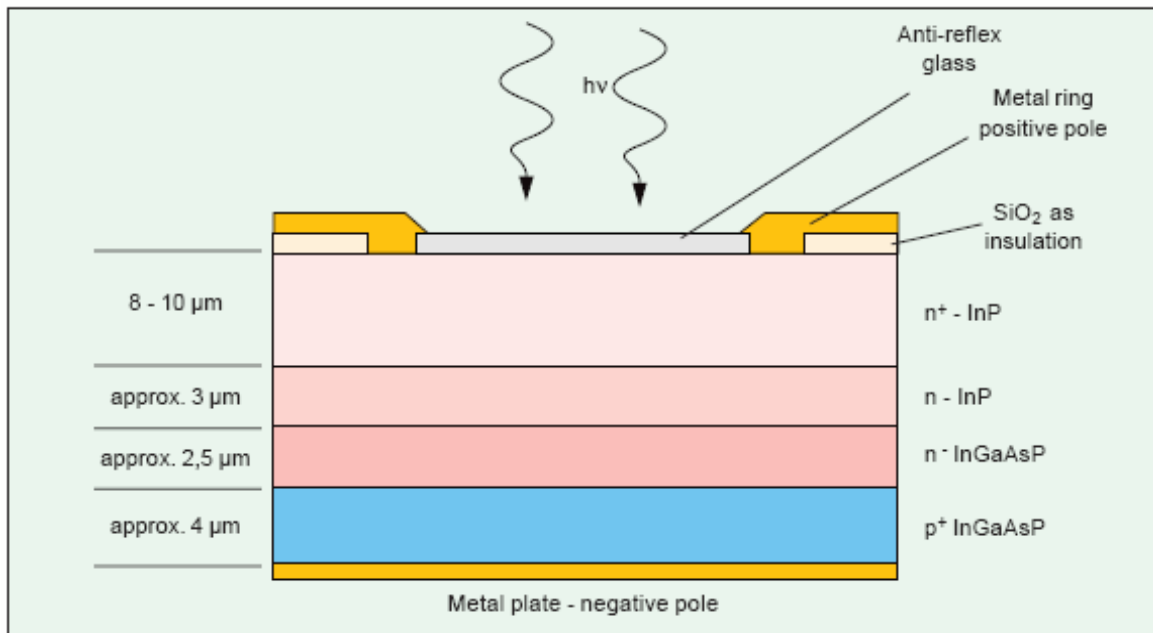
Η εικόνα 4.20 παρουσιάζει μια πυριτίου PIN δίοδο. Αυτός ο τύπος δίοδου χρησιμοποιείται για μήκη κύματος 0.8 μέχρι 0.9 μm. Ένα μεταλλικό δακτυλίδι λειτουργεί σαν αρνητικός πόλος. Κάτω απ' αυτό το δακτυλίδι βρίσκεται ένα λεπτό p-στρώμα και κάτω από αυτό ένα λεπτό i-στρώμα (20-50μm). Το i-στρώμα είναι όσο 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.



Εικόνα 4.20 Τα τρία στρώματα της πυριτίου PIN δίοδου

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

Τελευταία έχουν αρχίσει και χρησιμοποιούνται συνδυασμοί υλικών που δεν περιέχουν πυρίτιο και γερμάνιο. Για ακόμα μεγαλύτερα μήκη κύματος οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν συνδυασμούς InGaAsP με InP ή GaAlAsSb με GaSb. Η εικόνα 4.21 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 4.21
PIN δίοδος για μεγάλα μήκη κύματος. Ημιαγωγοί : InP και InGaAsP

4.5 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).

4.5.1 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 μ W. Άλλη μια συνηθισμένη μονάδα μέτρησης της έντασης είναι τα dBm.

4.5.2 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.

4.5.3 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 φωτο-πολλαπλασιασμού που λαμβάνει χώρα σε διόδους τύπου APD.

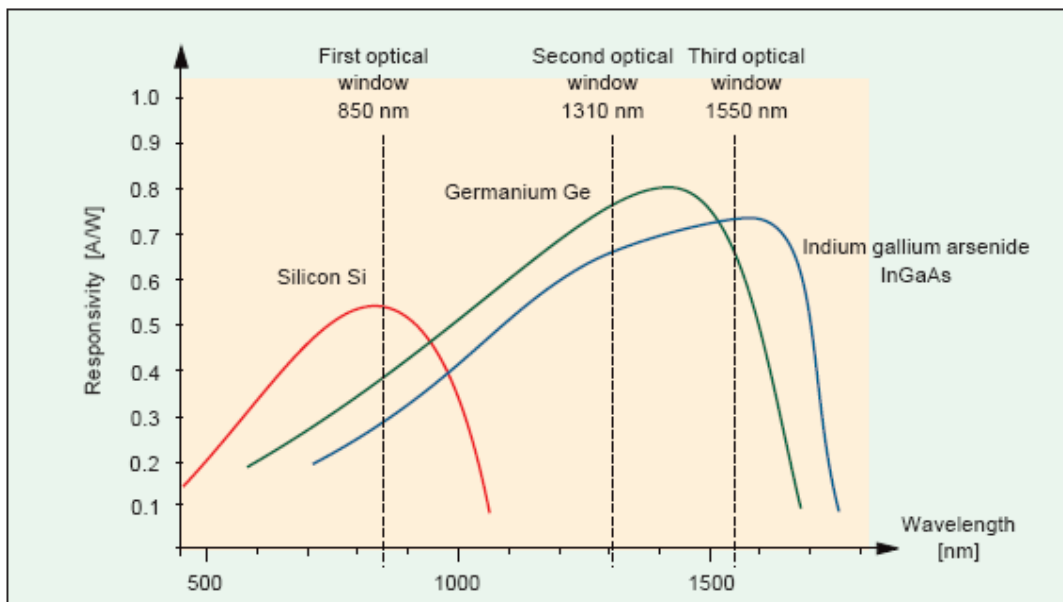
Απόκριση δέκτη (R)

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 $R=0.7 \text{ A/W}$). Προσπίπτον φως με ισχύ 20mW προκαλεί ένταση 14mA εντός της διόδου. Μια APD δίοδος παρουσιάζει $R=80\text{A/W}$, 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 4.22

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

4.5.4 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 :

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

4.5.5 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.

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.

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 .

4.5.6 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.

4.5.7 Εύρος ζώνης

Το εύρος ζώνης μιας διόδου εξαρτάται εξ' ολοκλήρου από το πόσο γρήγορα ένα προσπίπτον φωτόνιο δημιουργεί ηλεκτρική ένταση εντός της διόδου. 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 διόδου και την αντίσταση του φορτίου

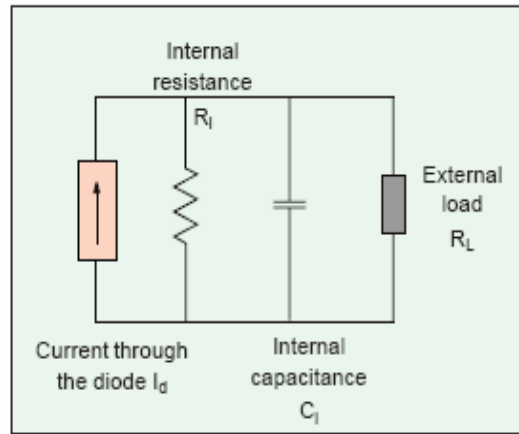
Το εύρος ζώνης για ένα φίλτρο πρώτης τάξης μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την παράμετρο rise time, από τον παρακάτω τύπο :

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

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 4.23

Μοντελοποίηση μιας PIN διόδου με χρήση της εσωτερικής αντίστασης και χωρητικότητας της

Ανάστροφη πόλωση

Για να ανιχνεύσουν φως οι διόδοι 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.

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

SNR

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

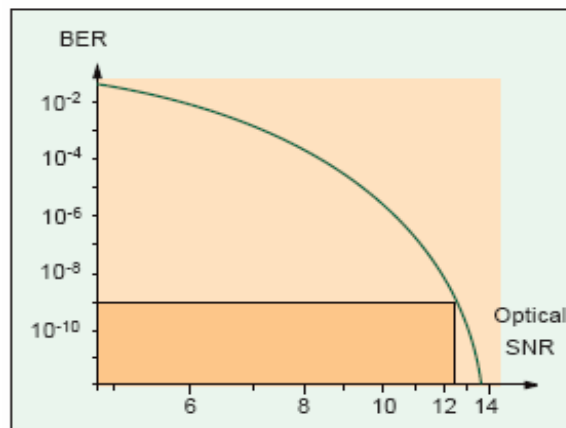
$$SNR = \frac{S_{eff}}{N_{eff}}$$

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

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 4.24

Σχέση μεταξύ BER και οπτικού SNR

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΟΠΤΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

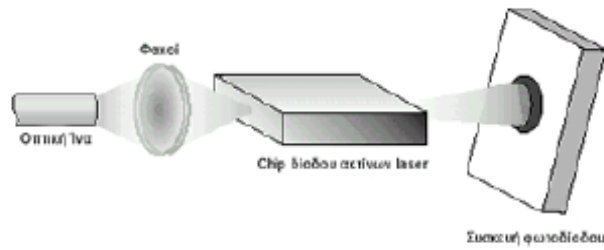
Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με τα βασικά στοιχεία της τεχνολογίας WDM. Θα αναλύσουμε δομοστοιχεία όπως πηγές φωτός και ανιχνευτές (Light Sources and Detectors), αναμεταδότες (Transponders), οπτικούς ενισχυτές (Optical Amplifiers), οπτικούς πολυπλέκτες-αποπολυπλέκτες (Multiplexers and Demultiplexers), οπτικούς πολυπλέκτες προσθαφαίρεσης (OADM's) και οπτικούς διασταυρωτήρες (OXC's). Επίσης θα αναλύσουμε κάποιες τεχνικές πολυπλεξίας-αποπολυπλεξίας και θα αναφερθούμε στην δρομολόγηση μήκους κύματος.

5.1 Πηγές Φωτός και Ανιχνευτές

Οι πηγές φωτός και οι συσκευές φωτοανίχνευσης (Light Sources and Detectors) βρίσκονται στα αντίθετα άκρα ενός συστήματος οπτικής εκπομπής. Οι πηγές/πομποί οπτικών σημάτων αναλαμβάνουν τη μετατροπή των ηλεκτρικών σημάτων σε παλμούς φωτός. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται είτε μέσω της εξωτερικής διαμόρφωσης ενός συνεχούς οπτικού σήματος, είτε με τη χρήση κατάλληλης συσκευής που παράγει άμεσα διαμορφωμένους παλμούς φωτός. Υπάρχουν δύο γενικοί τύποι συσκευών εκπομπής φωτός, οι δίοδοι φωτοεκπομπής (LED's) και οι δίοδοι ακτινών laser ή ημιαγωγοί laser (laser diodes/semiconductor lasers).

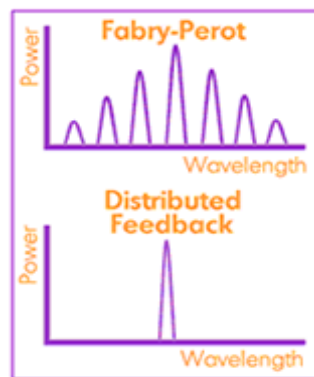
Οι δίοδοι φωτοεκπομπής (LED's) αποτελούν συσκευές χαμηλών ταχυτήτων, κατάλληλες για εφαρμογές με ταχύτητες χαμηλότερες από 1 Gbps, ενώ παράγουν ακτινοβολία σε ένα σχετικά ευρύ φάσμα. Οι διατάξεις αυτές χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές πολύτροπων οπτικών ινών. Από την άλλη, οι ημιαγωγοί laser (semiconductor lasers) διαθέτουν χαρακτηριστικά και απόδοση που τους καθιστά καταλληλότερους για εφαρμογές μονότροπης οπτικής ίνας. Στο ακόλουθο σχήμα, περιγράφονται οι γενικές αρχές εισαγωγής οπτικού σήματος στην οπτική ίνα.



Σχήμα 5.1

Τυπικός σχεδιασμός για την τροφοδοσία παλμών φωτός σε οπτική ίνα

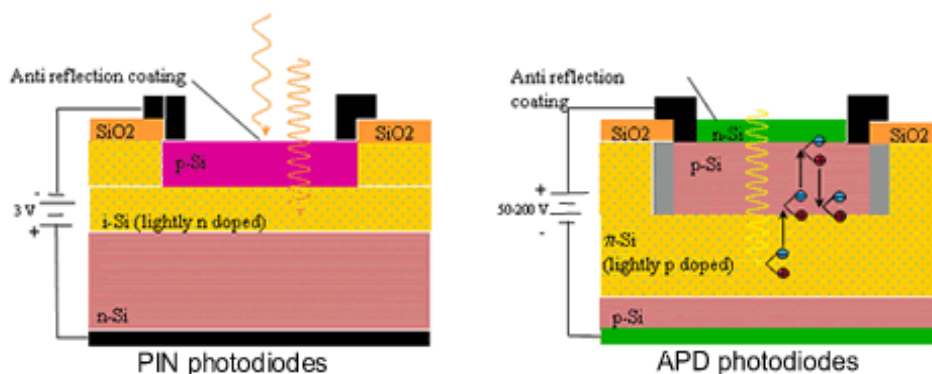
Τα είδη των laser που συναντάμε είναι τα τύπου κατανεμημένης ανάδρασης - Distributed Feedback (DFB) και τα Fabry-Perot. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός, ότι τα DFB εκπέμπουν ένα μόνο μήκος κύματος, ενώ τα Fabry-Perot εκπέμπουν πολλά μήκη κύματος το ένα κοντά στο άλλο. (Σχήμα 5.2)



Σχήμα 5.2

DFB και Fabry-Perot laser

Οι συσκευές φωτοανίχνευσης είναι διαθέσιμες σε δύο γενικούς τύπους, τις φωτοδιόδους PIN (Positive Intrinsic Negative) και τις φωτοδιόδους χιονοστιβάδας APD των LED's, μετατρέποντας τα φωτεινά σήματα σε ηλεκτρόνια μέσω μιας σχέσης 1:1. Ο δεύτερος τύπος διαφέρει από τον προηγούμενο στο γεγονός ότι παρέχει επιπλέον και τη διεργασία της ενίσχυσης, μέσω της μετατροπής ενός φωτονίου σε πολλά ηλεκτρόνια (Σχήμα 5.3). Τα κύρια πλεονεκτήματα των PIN φωτοδίοδων περιλαμβάνουν το χαμηλό κόστος και την αξιοπιστία, ενώ οι APD φωτοδιόδοι έχουν μεγαλύτερο κόστος, υψηλότερη ακρίβεια αλλά και ευαισθησία.



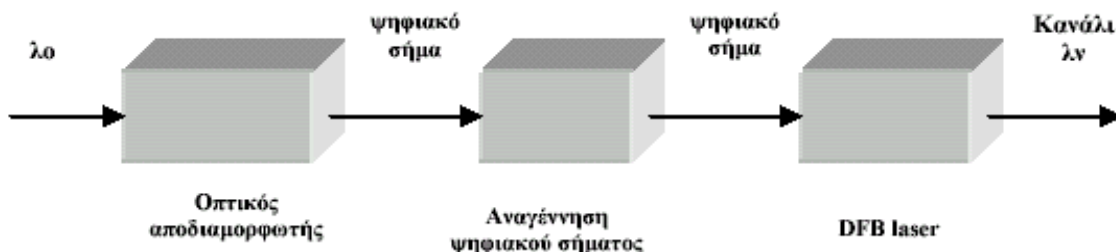
Σχήμα 5.3

PIN και APD φωτοδιόδοι

5.2 Αναμεταδότες

Ο ρόλος των αναμεταδοτών (Transponders) είναι η δημιουργία οπτικών σημάτων συμβατών με την τεχνολογία WDM, για την οποία θα αναφερθούμε στο επόμενο κεφάλαιο. Τα οπτικά σήματα που τροφοδοτούν τους αναμεταδότες προέρχονται από άλλα ινοοπτικά δίκτυα και δεν ικανοποιούν κατ' ανάγκη τις απαιτήσεις των συστημάτων WDM. Έτσι, ο κάθε αναμεταδότης λαμβάνει ένα οπτικό σήμα, εξάγει (μέσω ηλεκτροοπτικής αποδιαμόρφωσης) το αντίστοιχο ψηφιακό σήμα πληροφορίας και με αυτό διαμορφώνει ένα laser τα χαρακτηριστικά του οποίου (μήκος κύματος εκπομπής, οπτική ισχύς εξόδου, εύρος μήκους κύματος) είναι προκαθορισμένα και συμβατά με τις απαιτήσεις της τεχνολογίας WDM.

Το laser αυτό είναι υψηλών επιδόσεων (συνήθως τύπου κατανεμημένης ανάδρασης - Distributed FeedBack – DFB) και κατασκευασμένο έτσι ώστε να εκπέμπει σε μία από τις προκαθορισμένες (για τη ζεύξη WDM) περιοχές μήκους κύματος. Με τον τρόπο αυτόν, από τους διαθέσιμους αναμεταδότες, δημιουργούνται ισάριθμα οπτικά κανάλια (με κεντρικά μήκη κύματος τα $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$) καθένα από τα οποία χρησιμοποιείται για τη μετάδοση ενός ψηφιακού σήματος πληροφορίας. Στις εξόδους των αναμεταδοτών, μπορούν να τοποθετηθούν εξασθενητές για την προσαρμογή της οπτικής ισχύος στις απαιτήσεις του πολυπλέκτη και των οπτικών ενισχυτών που ακολουθούν (Σχήμα 5.4).



Σχήμα 5.4
Δομικό διάγραμμα αναμεταδότη

Σημείωση

Η χρήση αναμεταδοτών μπορεί να αποφευχθεί (με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του κόστους) όταν έχει ληφθεί πρόνοια τα προς πολυπλεξία οπτικά σήματα να είναι συμβατά με την προς ανάπτυξη ζεύξη WDM (κάτι τέτοιο είναι π.χ. δυνατόν όταν μια ζεύξη WDM εγκαθίσταται μαζί με το ινοοπτικό δίκτυο που παρέχει τα προς πολυπλεξία οπτικά σήματα).

Τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση της εξόδου του DFB laser του αναμεταδότη. Η διαμόρφωση αυτή (τύπου κλειδώματος πλάτους - Amplitude Shift Keying - ASK) μπορεί να είναι είτε άμεση (με εφαρμογή του ψηφιακού σήματος απευθείας στην τροφοδοσία του laser) είτε εξωτερική, συνήθως με χρήση ηλεκτροοπτικών διαμορφωτών Mach-Zehnder.

Η ανάγκη για συμβατότητα μεταξύ των χρησιμοποιούμενων διατάξεων και συστημάτων έχει οδηγήσει την ITU-T στην υιοθέτηση συγκεκριμένων μηκών κύματος στα οποία μπορεί να εκπέμψει ένας αναμεταδότης (Σύσταση G.692). Αυτά τα μήκη κύματος(και οι αντίστοιχες συχνότητες) συνιστούν ένα “πλέγμα” (grid) τιμών (πίνακας 5.1) με συχνότητα αναφοράς τα 193.100 GHz (1552,527 nm) και απόσταση μεταξύ των συχνοτήτων $\Delta f = 100$ GHz

($\Delta\lambda = 0,8$ nm).

f (THz)	λ (nm)	f (THz)	λ (nm)	f (THz)	λ (nm)	f (THz)	λ (nm)	f (THz)	λ (nm)
197,100	1521,020								
197,000	1521,792	195,000	1537,400	193,000	1553,331	191,000	1569,597	189,000	1586,206
196,900	1522,565	194,900	1538,189	192,900	1554,137	190,900	1570,419	188,900	1587,046
196,800	1523,338	194,800	1538,978	192,800	1554,943	190,800	1571,242	188,800	1587,886
196,700	1524,113	194,700	1539,769	192,700	1555,750	190,700	1572,066	188,700	1588,728
196,600	1524,888	194,600	1540,560	192,600	1556,557	190,600	1572,891	188,600	1589,570
196,500	1525,664	194,500	1541,352	192,500	1557,366	190,500	1573,716	188,500	1590,414
196,400	1526,441	194,400	1542,145	192,400	1558,175	190,400	1574,543	188,400	1591,258
196,300	1527,218	194,300	1542,939	192,300	1558,986	190,300	1575,370	188,300	1592,103
196,200	1527,997	194,200	1543,733	192,200	1559,797	190,200	1576,199	188,200	1592,949
196,100	1528,776	194,100	1544,528	192,100	1560,609	190,100	1577,028	188,100	1593,796
196,000	1529,556	194,000	1545,325	192,000	1561,422	190,000	1577,858	188,000	1594,643
195,900	1530,337	193,900	1546,122	191,900	1562,235	189,900	1578,689	187,900	1595,492
195,800	1531,118	193,800	1546,919	191,800	1563,050	189,800	1579,520	187,800	1596,342
195,700	1531,901	193,700	1547,718	191,700	1563,865	189,700	1580,353	187,700	1597,192
195,600	1532,684	193,600	1548,517	191,600	1564,681	189,600	1581,187	187,600	1598,044
195,500	1533,468	193,500	1549,318	191,500	1565,499	189,500	1582,021	187,500	1598,896
195,400	1534,253	193,400	1550,119	191,400	1566,316	189,400	1582,856	187,400	1599,749
195,300	1535,038	193,300	1550,921	191,300	1567,135	189,300	1583,692	187,300	1600,603
195,200	1535,825	193,200	1551,723	191,200	1567,955	189,200	1584,529	187,200	1601,458
195,100	1536,612	193,100	1552,527	191,100	1568,775	189,100	1585,367	187,100	1602,314

Πίνακας 5.1

Πλέγμα συχνοτήτων (μηκών κύματος) κατά την ITU-T (Σύσταση G.692)

5.3 Οπτικοί Ενισχυτές

Η παρουσία συσκευών ενίσχυσης οπτικού σήματος καθίσταται απαραίτητη λόγω της εξασθένησής του κατά τη μετάδοσή του μέσα από την ίνα. Πριν την ανάπτυξή τους, ο μόνος τρόπος να ενισχυθεί το σήμα ήταν μέσω ηλεκτρικής αναγέννησης, δηλαδή να μετατραπεί το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό, να ενισχυθεί, να επαναμετατραπεί σε οπτικό και ακολούθως να μεταδοθεί. Κάτι τέτοιο θα απαιτούσε μία ξεχωριστή συσκευή (regenerator - αναγεννητή) για κάθε μήκος κύματος. Αντιθέτως, ο οπτικός ενισχυτής μπορεί να ενισχύσει ταυτόχρονα όλα τα μήκη κύματος σε μια ίνα. Έτσι, το κόστος της ενίσχυσης μπορεί να καταναμηθεί σε διάφορους χρήστες ή εφαρμογές.

Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα είναι πως επειδή είναι αυστηρά οπτικές συσκευές, είναι ανεξάρτητες από πρωτόκολλο και ρυθμό μετάδοσης. Αυτό το γεγονός παρέχει ευελιξία στο ότι μια σύνδεση μπορεί να υποστηρίξει διάφορα πρωτόκολλα (π.χ. ATM, SONET, PPP) με οποιονδήποτε ρυθμό μετάδοσης. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε πως πρόκειται για μικρές σε μέγεθος συσκευές και με ελάχιστες απαιτήσεις σε ηλεκτρική ισχύ κάτι που αποτελεί πολύ σημαντικό πλεονέκτημα.

Επιπρόσθετα της χρήσης των συσκευών αυτών στις οπτικές συνδέσεις, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και για την ενίσχυση της ισχύος του σήματος μετά από διαδικασίες πολύπλεξης/αποπολύπλεξης, οι οποίες προκαλούν απώλειες στο σύστημα. Ειδικά για την περίπτωση της τεχνολογίας WDM, η οποία επιβάλλει την εκπομπή υψίρρυθμων σημάτων και σε μεγάλες αποστάσεις, ο ιδανικός τύπος οπτικού ενισχυτή είναι ο Ivo-Οπτικός Ενισχυτής Ερβίου (Erbium-Doped Fiber Amplifier-EDFA).

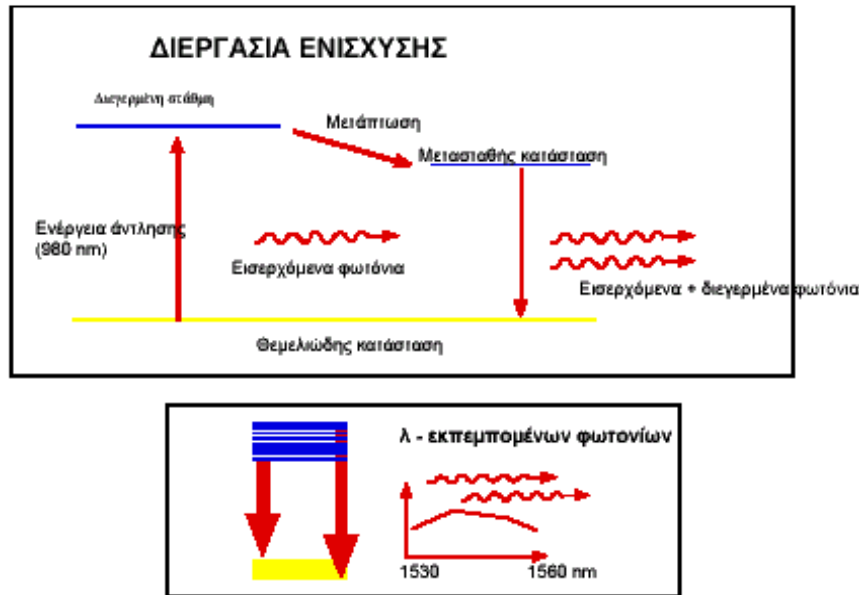
5.3.1 Ivo-Οπτικός Ενισχυτής Ερβίου (EDFA)

Οι οπτικοί ενισχυτές που χρησιμοποιούνται σήμερα στα ινοοπτικά δίκτυα είναι Ivo- Οπτικοί Ενισχυτές Ερβίου (Erbium-Doped Fibre Amplifiers - EDFAs). Το βασικό στοιχείο των ενισχυτών αυτών είναι μια οπτική ίνα, μήκους μερικών δεκάδων μέτρων, της οποίας ο πυρήνας είναι νοθευμένος με ιόντα Ερβίου. Όταν η ίνα αυτή τροφοδοτηθεί με τη δέσμη ενός laser άντλησης (pump laser), με τη «μεσολάβηση» των ιόντων Ερβίου, ξεκινάει μια διεργασία «αναστροφής πληθυσμών», η οποία οδηγεί σε (αμιγώς οπτική) ενίσχυση των πολυπλεγμένων οπτικών σημάτων. Λόγω του ότι, στους συνήθεις EDFAs, η οπτική ενίσχυση, επιτελείται στην περιοχή 1525 - 1565 nm, οι ζεύξεις WDM λειτουργούν στο οπτικό παράθυρο των 1550 nm.

Ο μηχανισμός της οπτικής ενίσχυσης στους EDFAs απεικονίζεται στο σχήμα 5.5. Λόγω της παρουσίας των ιόντων Ερβίου στο υλικό της ίνας ενίσχυσης, δημιουργείται μια δομή τριών ενεργειακών ζωνών, με ενεργειακές διαφορές ΔE_{12} και ΔE_{31} , τέτοιες ώστε τα αντίστοιχα μήκη κύματος $\lambda_{12} = hc/\Delta E_{12}$ και $\lambda_{31} = hc/\Delta E_{31}$ να είναι ίσα με 980 nm και 1525 - 1565 nm αντίστοιχα. (Ως γνωστόν, ενεργειακή διαφορά ΔE αντιστοιχεί σε φωτόνια συχνότητας f (αντίστοιχα, μήκους κύματος $\lambda=c/f$), μέσω του τύπου $\Delta E = hf = hc/\lambda$, όπου h είναι η σταθερά του Plank) .

Υπό την επίδραση της δέσμης του laser άντλησης ($\lambda_{12} = 980$ nm), φωτόνια «μεταφέρονται» στην ανώτερη ζώνη, από την οποία «μεταπίπτουν» στην ενδιάμεση. Η ζώνη αυτή είναι μετασταθής (metastable) και, λόγω του μεγάλου χρόνου ημιζωής της ($\tau_a = 10$ ms), προσφέρεται για τη «συσσώρευση» ηλεκτρονίων και τη δημιουργία κατάστασης «αναστροφής πληθυσμών» σε βάρος της βασικής ζώνης. Έτσι, μεταξύ της μετασταθούς και της βασικής ζώνης ξεκινάει μια διεργασία «εξαναγκασμένης εκπομπής» (lasing) η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία φωτονίων μηκών κύματος $\lambda = 1525-1565$ nm και την ενίσχυση του αρχικού οπτικού σήματος (που περιέχει τα πολυπλεγμένα κανάλια).

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.4, η διεργασία άντλησης μπορεί να πραγματοποιηθεί και με laser μήκους κύματος 1480 nm (τα φωτόνια «μεταφέρονται» απευθείας στην ενδιάμεση μετασταθή ζώνη). Πράγματι, lasers άντλησης 1480 nm χρησιμοποιούνται στους ενισχυτές ίνας Erbium, προσφέροντας μεγαλύτερες ενισχύσεις αλλά και υψηλότερο θόρυβο.



Σχήμα 5.5
Μηχανισμός Οπτικής Ενίσχυσης Erbium

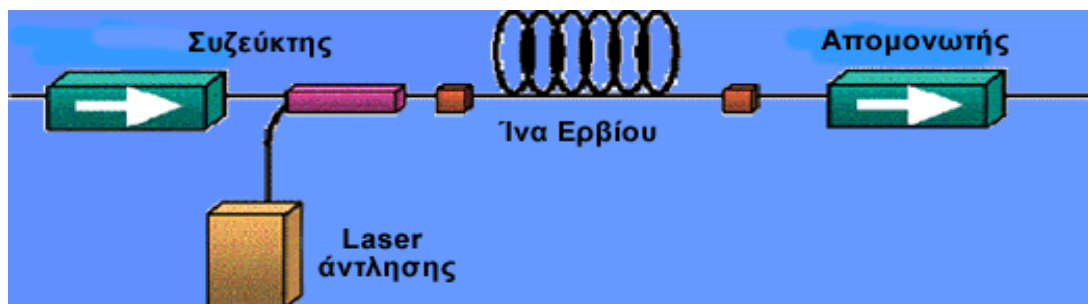
Επειδή αυτός ο μηχανισμός ενίσχυσης είναι ανεξάρτητος από το μήκος κύματος εντός μιας συγκεκριμένης φασματικής περιοχής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση σημάτων διαφορετικών μηκών κύματος στην ίδια οπτική ίνα. Έτσι, περισσότεροι τέτοιοι οπτικοί ενισχυτές μπορούν να συνδυαστούν σε σειρά για τη διάδοση του οπτικού σήματος μέσω μιας οπτικής ίνας για χιλιάδες χιλιόμετρα. Θα πρέπει να τονίσουμε ότι ο μέγιστος αριθμός ενισχυτών σε σειρά δεν πρέπει να υπερβαίνει τους έξι, λόγω θορύβου που εισάγουν και που ενισχύεται σε κάθε βαθμίδα. Επιπλέον, έχει διαπιστωθεί ότι οι οπτικοί ενισχυτές δουλεύουν ικανοποιητικά στο κομμάτι εκείνο του φάσματος στο οποίο λειτουργούν τα συστήματα οπτικών ινών.

Σε ότι αφορά τη θέση των οπτικών ενισχυτών σε μία ζεύξη WDM, διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

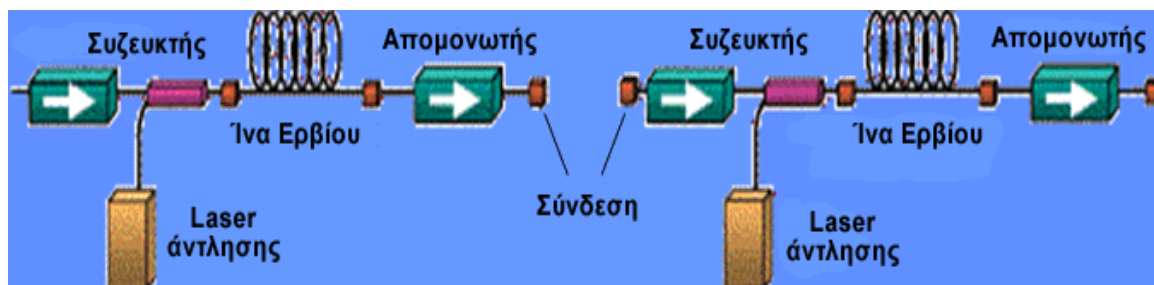
- Ο οπτικός ενισχυτής χρησιμοποιείται ως ενισχυτής ισχύος (booster amplifier ή postamplifier) μετά την έξοδο του πολυπλέκτη, προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή ενίσχυση του σύνθετου (aggregate) οπτικού σήματος.

- Ο οπτικός ενισχυτής χρησιμοποιείται ως ενισχυτής γραμμής (in-line amplifier) για την ενίσχυση του σήματος σε τακτές αποστάσεις (συνήθως 80-120 km).
- Ο οπτικός ενισχυτής χρησιμοποιείται ως προενισχυτής (pre-amplifier) πριν την είσοδο του αποπολυπλέκτη, προκειμένου το οπτικό σήμα να αποκτήσει επαρκή ισχύ για τη διεργασία της αποπολυπλεξίας και τη λήψη των αποπολυπλεγμένων καναλιών από τους επιμέρους δέκτες.

Η βασική διάταξη ενός Ino-Οπτικού Ενισχυτή Ερβίου φαίνεται στο σχήμα 5.6 . Στο σχήμα 5.7 φαίνεται η ενίσχυση με δύο βαθμίδες, η οποία επιτυγχάνει ενίσχυση με χαμηλό θόρυβο στην πρώτη βαθμίδα και μεγαλύτερη ενίσχυση στην δεύτερη.



Σχήμα 5.6
Βασική σχεδίαση Ino-Οπτικού Ενισχυτή Ερβίου



Σχήμα 5.7
Ενίσχυση με δύο βαθμίδες

Το μειονέκτημα των EDFA είναι ότι λειτουργούν στο διάστημα 1530-1560 nm, ενώ η εξασθένηση του σήματος στην περιοχή 1500-1600nm είναι ελάχιστη. Ένα πρόσθετο πρόβλημα είναι ότι η απόσταση μεταξύ των διαφορετικών μηκών κύματος είναι πολύ μικρή, στο διάστημα 0.8-1.6nm, κάτι που προκαλεί crosstalk. Γι' αυτούς τους λόγους οδηγηθήκαμε στους Silica Erbium fiber-based Dual-band fiber amplifier (DBFA), οι οποίοι δρουν στο διάστημα 1528-1610nm. Οι DBFA ουσιαστικά είναι σαν τους EDFA με λειτουργία σε πρόσθετο διάστημα, κάτι που έχει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους EDFA όπως το ότι φτάνουν στον κόρο πιο αργά και ότι εμφανίζουν λιγότερο θόρυβο.

5.3.2 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 δείχτεί 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.

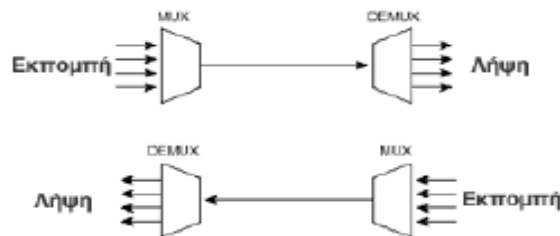
Είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε, ότι για ένα συγκεκριμένο σήμα εισόδου, υπάρχει ένα βέλτιστο ζεύγος (μήκος ίνας, ισχύς άντλησης) για το οποίο ο συντελεστής θορύβου παίρνει την ελάχιστη τιμή του. Αυξάνοντας το μήκος της ίνας και την ισχύ άντλησης θα έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ASE προς την αντίθετη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

5.4 Οπτικοί Πολυπλέκτες-Αποπολυπλέκτες

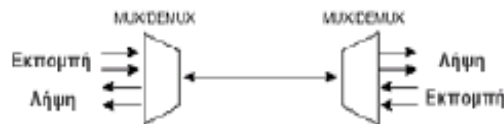
Οι συσκευές πολύπλεξης και αποπολύπλεξης επιτρέπουν το συνδυασμό των εισερχόμενων προς μετάδοση σημάτων (σημείο εκπομπής) ή το διαχωρισμό του οπτικού σήματος στα στοιχειώδη σήματα που το απαρτίζουν (σημείο λήψης) αντίστοιχα.

Συνήθως οι παραπάνω λειτουργίες συνδυάζονται σε μία συσκευή, αν και σε κάποιες περιπτώσεις ο πολυπλέκτης και ο αποπολυπλέκτης είναι διαφορετικές συσκευές. Πολλές συσκευές πολύπλεξης–αποπολυπλεξης λειτουργούν χωρίς ηλεκτρική παροχή, δηλαδή είναι εντελώς παθητικά στοιχεία και συμπεριφέρονται σαν φίλτρα υψηλής επιλεκτικότητας, που συνδυάζουν και διαχωρίζουν τα μήκη κύματος του οπτικού σήματος. Τα περισσότερα παθητικά στοιχεία λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο και όταν αντιστραφεί η φορά του οπτικού σήματος.

Οι διαδικασίες πολύπλεξης/αποπολυπλεξης διαφοροποιούνται ελαφρώς ανάλογα με το αν τα συστήματα μετάδοσης είναι μονόδρομης ή αμφίδρομης κατεύθυνσης (Unidirectional/Bidirectional Systems). Το γεγονός αυτό απεικονίζεται στα ακόλουθα σχήματα:



Σχήμα 5.8
Εκπομπή/Λήψη σε Διαφορετικές Οπτικές Ύνες



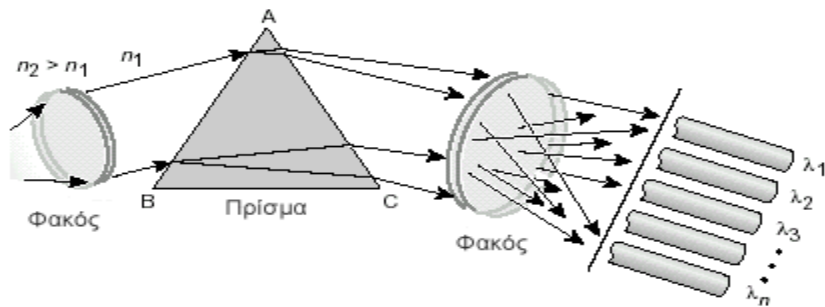
Σχήμα 5.9
Εκπομπή/Λήψη σε μία Οπτική Ύνα

5.4.1 Συσκευές Πολυπλεξίας-Αποπολυπλεξίας

Όσον αφορά τις υφιστάμενες τεχνικές αποπολυπλεξίας, αυτές απεικονίζονται στα παρακάτω σχήματα. Είναι προφανές ότι οι ίδιες διατάξεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντίστροφα για την πολύπλεξη πολλών μηκών κύματος σε μια οπτική ίνα.

Μια απλή τεχνική πολυπλεξίας-αποπολυπλεξίας βασίζεται στη χρήση ενός πρίσματος. Το σχήμα 5.10 δείχνει τη διάταξη αποπολυπλεξίας. Μια παράλληλη ακτίνα του πολυχρωματικού φωτός προσπίπτει στην επιφάνεια ενός πρίσματος.

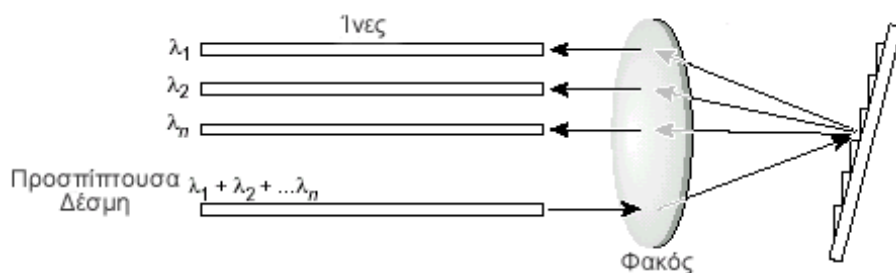
Κάθε μήκος κύματος διαθλάται με διαφορετική γωνία. Αυτό είναι φαινόμενο αντίστοιχο της ανάλυσης του φωτός στο «ουράνιο τόξο» (rainbow effect). Ένας φακός εστιάζει κάθε μήκος κύματος στο σημείο εισαγωγής ανεξάρτητης οπτικής ίνας.



Σχήμα 5.10

Διάταξη Αποπολύπλεξης με χρήση Πρίσματος (Prism Refraction Demultiplexing)

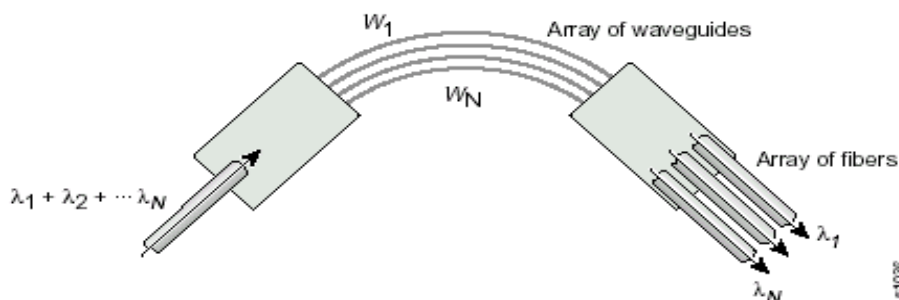
Μια άλλη τεχνική είναι βασισμένη στις αρχές της διάθλασης και της οπτικής περίθλασης. Όταν μία πολυχρωματική πηγή φωτός προσπίπτει σε ένα οπτικό φράγμα (Σχήμα 5.11), κάθε μήκος κύματος ανακλάται με διαφορετική γωνία. Με τη χρήση ενός φακού, μπορούμε να συλλέξουμε τα μήκη κύματος να τα στρέψουμε πάνω σε μεμονωμένες οπτικές ίνες.



Σχήμα 5.11

Κυματοδηγός πλέγματος περίθλασης (Waveguide Grating Diffraction)

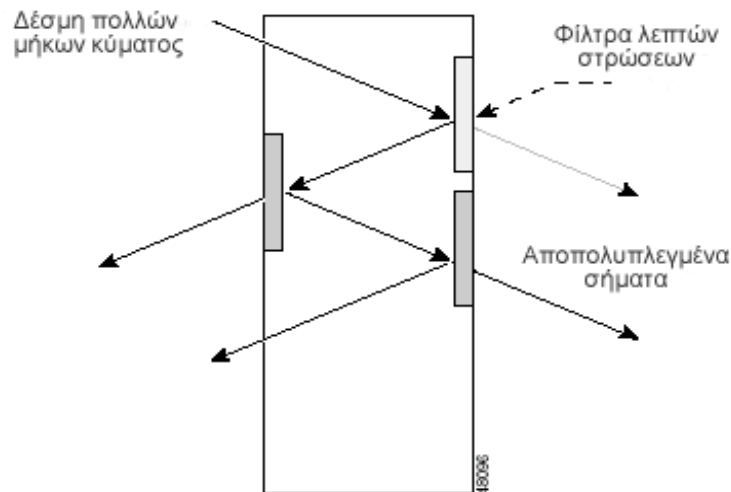
Η τεχνική του πλέγματος κυματοδηγών (AWG) είναι επίσης βασισμένη στις αρχές της συμβολής του φωτός. Μια συσκευή AWG, που πολλές φορές καλείται οπτικός κυματοδηγός δρομολόγησης ή κυματοδηγός δρομολόγησης πλέγματος, αποτελείται από μια σειρά κυματοδηγών -κυρτών καναλιών- με σταθερή διαφορά στο μήκος μετάδοσης (Σχήμα 5.12).



Σχήμα 5.12

Πλέγμα Κυματοδηγών (Arrayed Waveguide Grating-AWG)

Μια διαφορετική τεχνική χρησιμοποιεί φίλτρα υψηλής επιλεκτικότητας σε συσκευές που ονομάζονται φίλτρα λεπτών στρώσεων ή φίλτρα παρεμβολής πολλαπλών στρωμάτων. Με τον προσδιορισμό θέσης των φίλτρων, που αποτελούνται από λεπτές στρώσεις διαφορετικού συντελεστή διάθλασης, τα μήκη κύματος μπορούν να αποπολυπλεχτούν (Σχήμα 5.13).



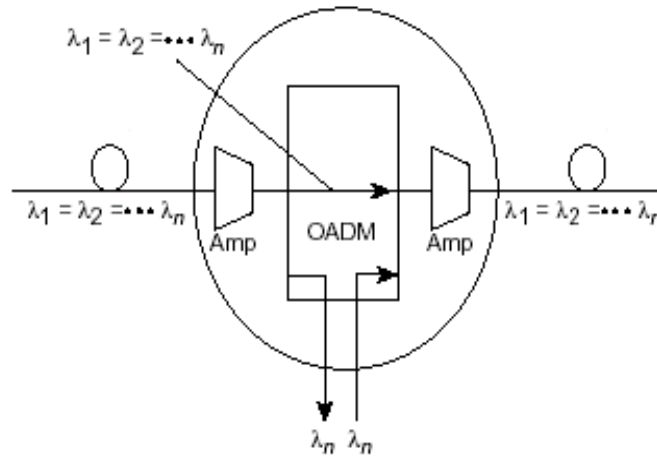
Σχήμα 5.13

Φίλτρα πολλαπλών στρωμάτων (Multilayer Interference Filters)

Οι τεχνικές AWG και των φίλτρων πολλαπλών στρωμάτων φαίνεται να υπερτερούν. Η τεχνική των φίλτρων παρεμβολής προσφέρει υψηλή σταθερότητα και απομόνωση μεταξύ των καναλιών με ικανοποιητικό κόστος, έχοντας ωστόσο μεγάλες απώλειες παρεμβολής του συστήματος (insertion losses). Η τεχνική AWG έχει ως βασικότερο πλεονέκτημα τη δυνατότητα σχεδιασμού ώστε οι διαδικασίες πολύπλεξης/αποπολύπλεξης να πραγματοποιούνται ταυτόχρονα. Επιπλέον, είναι κατάλληλη όταν απαιτείται μεγάλος αριθμός καναλιών, ενώ εμφανίζει χαμηλότερες απώλειες παρεμβολής (insertion losses). Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η θερμοκρασιακή ευαισθησία των διατάξεων της, καθιστώντας την έτσι ακατάλληλη για ορισμένα περιβάλλοντα.

5.5 Οπτικοί Πολυπλέκτες Προσθαφαίρεσης

Μια ειδική κατηγορία οπτικών πολυπλεκτών, αυτή των οπτικών πολυπλεκτών προσθαφαίρεσης (Optical Add/Drop Multiplexers-OADM's) κατέχει σημαντικότατο ρόλο στην προσπάθεια δημιουργίας εξολοκλήρου οπτικών δικτύων. Ο ρόλος τους είναι η εξαγωγή (dropping) από το σύνθετο (aggregate) οπτικό σήμα ή/και η εισαγωγή (adding) σε αυτό, ενός ή περισσοτέρων οπτικών καναλιών (Σχήμα 5.14). Ένας OADM μπορεί να εκτελέσει τις παραπάνω λειτουργίες απευθείας στο οπτικό επίπεδο (optical layer) χωρίς να υπάρχει η ανάγκη για εξαγωγή των ψηφιακών σημάτων από τα οπτικά κανάλια στο ηλεκτρικό επίπεδο. Η λειτουργία τους έχει πολλά κοινά σημεία με τις αντίστοιχες ADM/SONET διατάξεις, με τη βασική διαφορά-πλεονέκτημα της μη μετατροπής του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό πριν το διαχωρισμό. Η σημαντικότερη παράμετρος για έναν OADM είναι ο αριθμός των καναλιών τα οποία μπορεί να εισάγει/εξάγει. Ανάλογα με τον κατασκευαστή, ο αριθμός αυτός ποικίλει από 4 έως 32.



Σχήμα 5.14

Οπτικός πολυπλέκτης προσθαφαίρεσης (σχηματική αναπαράσταση)

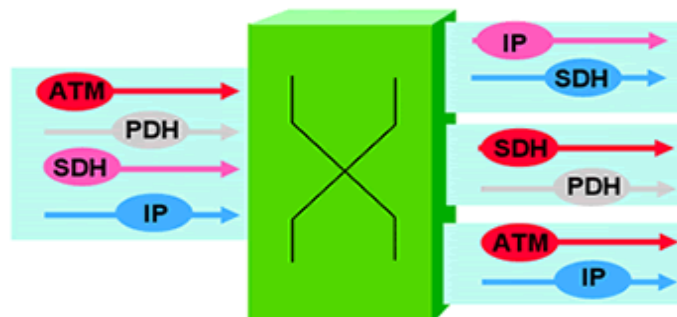
Υπάρχουν δύο γενικοί τύποι των OADM's. Ο πρώτος τύπος είναι μια σταθερή συσκευή που είναι φυσικά διαμορφωμένη ώστε να εξαγάγει (drop) συγκεκριμένα και προκαθορισμένα μήκη κύματος καθώς εισάγει (add) άλλα. Ο δεύτερος τύπος είναι ικανός να επιλέγει δυναμικά ποια μήκη κύματος να εισάγει (add) και ποια να εξαγάγει (drop).

Σημείωση

Τα φίλτρα λεπτών στρώσεων ή φίλτρα παρεμβολής πολλαπλών στρωμάτων έχουν αποδειχθεί ως η καλύτερη επιλογή για OADM's μητροπολιτικών WDM συστημάτων λόγω του χαμηλότερου κόστους και της σταθερότητάς τους.

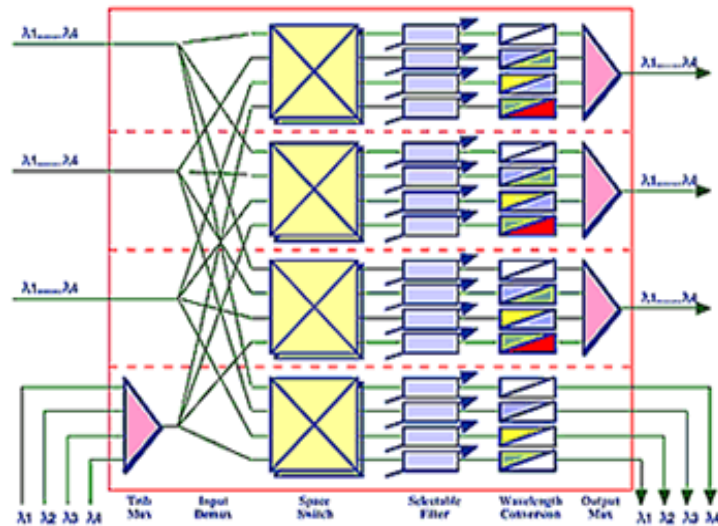
5.6 Οπτικοί Διασταυρωτήρες

Ένας οπτικός διασταυρωτήρας (Optical Cross Connect – OXC) είναι μια διάταξη N οπτικών εισόδων και N οπτικών εξόδων, η οποία, στην πιο εξελιγμένη της μορφή, έχει τη δυνατότητα δρομολόγησης οπτικών καναλιών (στο οπτικό επίπεδο, χωρίς εξαγωγή των ψηφιακών σημάτων από τα οπτικά κανάλια στο ηλεκτρικό επίπεδο) από οποιαδήποτε είσοδο σε οποιαδήποτε έξοδο και μάλιστα δυναμικά. Η σημασία μιας τέτοιας διάταξης, για την ανάπτυξη ευέλικτων ολο-οπτικών δικτύων (all-optical networks) είναι προφανής.



Σχήμα 5.15

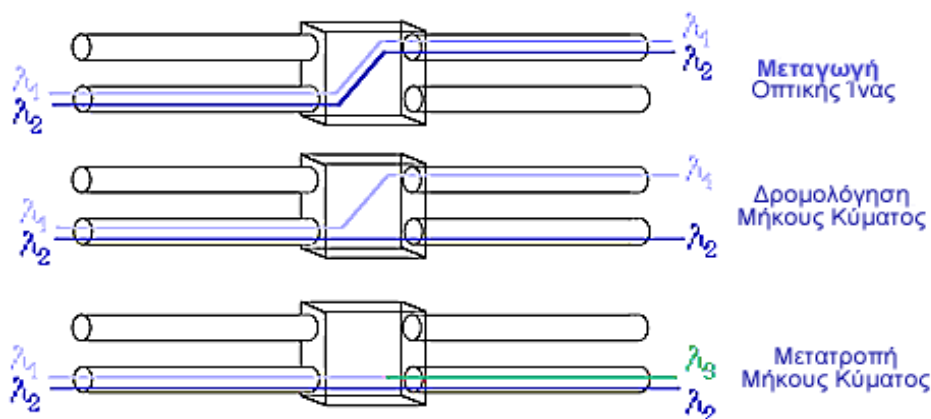
Οπτικός διασταυρωτήρας (σχηματική αναπαράσταση)



Σχήμα 5.16
Οπτικός Διασταυρωτήρας (Block διάγραμμα)

Στην οπτική περιοχή, όπου μπορούν να μεταδοθούν 40 οπτικά κανάλια από μία μόνο οπτική ίνα, απαιτείται ένα στοιχείο δικτύου να μπορεί να δέχεται διάφορα μήκη κύματος στις εισόδους του και να τα καθοδηγεί στις κατάλληλες εξόδους. Για να πραγματοποιηθεί αυτό ο οπτικός διασταυρωτήρας (ΟΧC) χρειάζεται τρεις δομικές μονάδες (Σχήμα 5.15) :

- Μεταγωγή οπτικής ίνας (fiber switching) – Η ικανότητα να καθοδηγούνται όλα τα μήκη κύματος από μια οπτική ίνα εισόδου σε μια διαφορετική οπτική ίνα εξόδου.
- Δρομολόγηση μήκους κύματος (wavelength switching) – Η ικανότητα δρομολόγησης συγκεκριμένων μήκων κύματος από μια οπτική ίνα εισόδου σε πολλαπλές οπτικές ίνες εξόδου.
- Μετατροπή μήκους κύματος (wavelength conversion) – Η ικανότητα μετατροπής επαναχρωματισμού των εισερχόμενων μήκων κύματος και η μετάδοσή τους με άλλη συχνότητα στην έξοδο.



Σχήμα 5.17
Δομικές μονάδες ΟΧC

Αν και επί του παρόντος, δεν διατίθενται οπτικοί διασταυρωτήρες από τους κατασκευαστές, αρκετές εταιρείες έχουν ανακοινώσει τη μελλοντική διάθεση των πρώτων σχετικών προϊόντων. Στα ερευνητικά εργαστήρια, έχουν δοκιμαστεί και δοκιμάζονται διάφορες τεχνικές με ελπιδοφόρα αποτελέσματα. Κύριοι στόχοι, στις προσπάθειες αυτές, είναι η μείωση του χρόνου διασταύρωσης (cross-connection time), σήμερα της τάξης των 2 – 30 ms (ανάλογα με την χρησιμοποιούμενη τεχνική), η μείωση των απωλειών παρεμβολής (insertion losses) και η επίτευξη υψηλής (80 dB) διακαναλικής απομόνωσης (interchannel isolation) για την αποφυγή αλληλοπαρεμβολών.

5.7 Δρομολόγηση Μήκους Κύματος

Ένα οπτικό δίκτυο περιλαμβάνει δρομολογητές μήκους κύματος (wavelength switches) και τελικούς κόμβους που συνδέονται ανά ζεύγη. Οι μεταγωγείς δρομολόγησης μήκους κύματος (wavelength-routing switches) διασυνδέονται μέσω οπτικής ίνας. Παρόλο που κάθε σύνδεση μπορεί να υποστηρίξει πολλά σήματα, απαιτείται κάθε ένα από αυτά να έχει ξεχωριστό μήκος κύματος. Οι δρομολογητές (routers) μεταδίδουν το σήμα στο ίδιο μήκος κύματος με το οποίο το λαμβάνουν. Ένα πλήρως οπτικό wavelength-routed δίκτυο είναι ένα δίκτυο το οποίο μεταφέρει δεδομένα από τον ένα σταθμό στον άλλο χωρίς να γίνεται καμία οπτική ή ηλεκτρική μετατροπή.

5.7.1 Μεταγωγείς Μήκους Κύματος (Wavelength Switches)

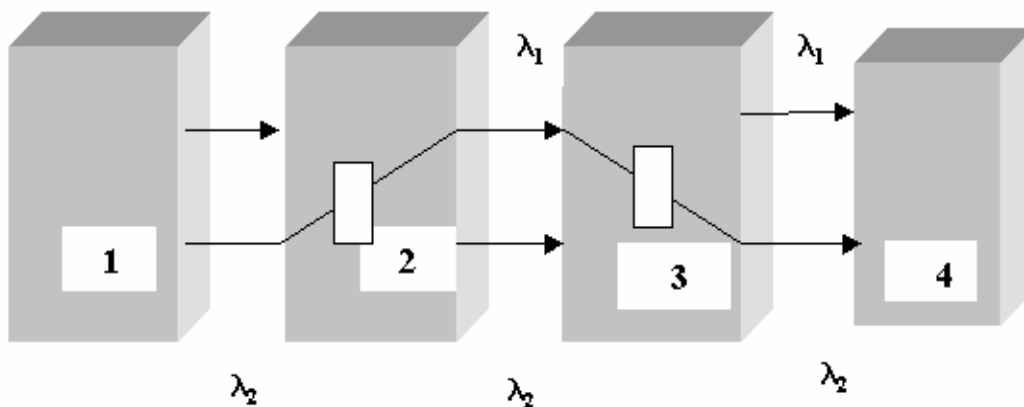
Οι μεταγωγείς μήκους κύματος (wavelength switches) χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες :

- Μη επαναδιαμορφώσιμος μεταγωγέας: Αυτού του είδους οι μεταγωγείς, για κάθε θύρα εισόδου και κάθε μήκος κύματος μεταδίδουν προς ένα καθορισμένο σύνολο θυρών εξόδου στο ίδιο μήκος κύματος. Αυτό δε μπορεί να αλλάξει από τη στιγμή που θα διαμορφωθεί η διάταξη μεταγωγής. Τα δίκτυα που περιέχουν μόνο τέτοιους μεταγωγείς ονομάζονται μη-επαναδιαμορφώσιμα δίκτυα.
- Επαναδιαμορφώσιμος ανεξάρτητος από το μήκος κύματος μεταγωγέας: Αυτού του είδους οι μεταγωγείς έχουν μια σχέση εισόδου-εξόδου που μπορεί να αλλάξει δυναμικά. Αυτή η σχέση δεν εξαρτάται από το μήκος κύματος του σήματος, δηλαδή υπάρχουν καθορισμένα σύνολα θυρών εξόδου όπου μπορεί να μεταδοθεί ένα εισερχόμενο σήμα.
- Επαναδιαμορφώσιμος εξαρτώμενος από το μήκος κύματος μεταγωγέας: Αυτού του είδους οι μεταγωγείς συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά των δύο πρώτων κατηγοριών. Είναι επίσης γνωστά ως γενικευμένοι (generalized) μεταγωγείς, και εκτός από το ότι μπορούν να αλλάξουν δυναμικά, η σχέση εισόδου-εξόδου είναι συνάρτηση του μήκους κύματος του εισερχόμενου σήματος.

Οι επαναδιαμορφώσιμοι μεταγωγείς είναι πεπερασμένου βαθμού, ενώ οι μη-επαναδιαμορφώσιμοι μπορεί και να μην είναι. Αυτό σημαίνει ότι η πολυπλοκότητα ενός μη-επαναδιαμορφώσιμου δικτύου μπορεί να αγνοηθεί, καθώς δεν είναι σταθερού βαθμού. Αντίθετα, η πολυπλοκότητα ενός διαμορφώσιμου δικτύου είναι ισχυρά εξαρτημένη από το βαθμό περιορισμού.

5.7.2 Μετατροπή Μήκους Κύματος

Έστω ότι το δίκτυο παρουσιάζει την εικόνα του σχήματος 6.18. Τα μήκη κύματος λ_1 και λ_2 που φαίνονται είναι ελεύθερα μεταξύ των κόμβων 1, 2 και 3 αντίστοιχα. Υπάρχουν δύο μετατροπείς μήκους κύματος, ένας στον κόμβο 2 και ο άλλος στον κόμβο 3. Στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν είναι δυνατή η δημιουργία διαδρομής από τον κόμβο 1 στον κόμβο 4 χωρίς μετατροπή, επειδή τα διαθέσιμα μήκη κύματος είναι διαφορετικά για κάθε σύνδεση.



Σχήμα 5.18
Μετατροπή Μήκους Κύματος

Θα μπορούσαμε λοιπόν να επιλύσουμε αυτό το πρόβλημα μετατρέποντας το μήκος κύματος, που χρησιμοποιούν τα δεδομένα που φτάνουν από τον κόμβο 1 στον 2, από λ_1 σε λ_2 , στη σύνδεση των κόμβων 2 και 3. Αυτή η τεχνική καλείται μετατροπή μήκους κύματος. Λειτουργικά, ένα τέτοιο δίκτυο μοιάζει με δίκτυο μεταγωγής κυκλωμάτων. Για οποιοδήποτε μοντέλο οπτικής δρομολόγησης, πρέπει να γίνεται όσο το δυνατόν αποδοτικότερη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Οι μετατροπείς μήκους κύματος προτάθηκαν ως λύση γι' αυτό το πρόβλημα, και παρέχουν βελτίωση της τάξης 10%-40% στην αξιοποίηση μέσω επαναχρησιμοποίησης, όταν υπάρχουν λίγα διαθέσιμα μήκη κύματος.

Υπάρχουν οι ακόλουθες δυνατότητες μετατροπής μήκους κύματος:

- Καμία μετατροπή: δεν γίνεται μετατροπή μήκους κύματος.
- Πλήρης μετατροπή: κάθε αλλαγή μήκους κύματος είναι δυνατή και επομένως τα κανάλια μπορούν να συνδεθούν ανεξάρτητα από τα διαθέσιμα μήκη κύματος.
- Μερική μετατροπή: η αλλαγή μήκους κύματος είναι περιορισμένη και δεν είναι δυνατός ο συνδυασμός όλων των καναλιών.
- Σταθερή μετατροπή: είναι προκαθορισμένες οι αλλαγές μήκους κύματος, που μπορούν να γίνουν μεταξύ των καναλιών.
- Αραιή μετατροπή: το δίκτυο περιέχει τόσο κόμβους που υποστηρίζουν πλήρη μετατροπή όσο και κόμβους που δεν υποστηρίζουν μετατροπή.

Μολαταύτα, η μετατροπή μήκους κύματος έχει πολύ υψηλό κόστος ως τεχνολογία και δεν είναι ρεαλιστική η θεώρηση, ότι όλοι οι κόμβοι του δικτύου θα έχουν τη δυνατότητα μετατροπής του μήκους κύματος. Επομένως, εξετάζεται περισσότερο η περίπτωση που δεν υφίσταται πλήρης μετατροπή. Οι συχνότερες περιπτώσεις που συναντώνται στη βιβλιογραφία είναι η αραιή και η περιορισμένη.

Σημείωση

Ο όρος μήκος κύματος (wavelength) χρησιμοποιείται αντί του όρου συχνότητα (frequency) για αποφυγή συγχύσεων με άλλες χρήσεις του όρου frequency. Ο όρος μήκος κύματος (wavelength) πολλές φορές εμφανίζεται και ως lambda ή channel.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Εισαγωγή στην Τεχνολογία WDM

Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά θα αναφερθούμε στην τεχνολογία SONET/SDH που καθορίζει την τυποποίηση για τους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων πάνω από οπτικά δίκτυα. Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε με τα τρία είδη πολυπλεξίας, Πολυπλεξία με Διαίρεση Χρόνου (Time Division Multiplexing - TDM), Πολυπλεξία με Διαίρεση Συχνότητας (Frequency Division Multiplexing - FDM), Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος (Wavelength Division Multiplexing - WDM), καθώς και με δύο μορφές της τεχνολογίας WDM, την Πυκνή και Χονδροειδή Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος (Dense Wavelength Division Multiplexing - DWDM, Coarse Wavelength Division Multiplexing – CWDM).

6.1 Τεχνολογία SONET/SDH

Οι όροι SONET (Σύγχρονο Οπτικό Δίκτυο - Synchronous Optical Network) και SDH (Σύγχρονη Ψηφιακή Ιεραρχία - Synchronous Digital Hierarchy) αναφέρονται σε ένα σύνολο καθορισμένων προτύπων που περιγράφουν την εκπομπή δεδομένων με τη μέθοδο της Πολυπλεξίας με Διαίρεση Χρόνου (Time Division Multiplexing - TDM) σε δίκτυα οπτικών ινών (fiber optical networks). Ουσιαστικά, πρόκειται για την αμερικανική και την διεθνή έκδοση της ίδιας σειράς προτύπων. Έτσι, το Αμερικανικό Ινστιτούτο Εθνικών Προτύπων (ANSI) είναι υπεύθυνο για το συντονισμό και την έκδοση των προτύπων SONET, ενώ η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) είναι υπεύθυνη για τη σειρά SDH.

Το βασικό πρόβλημα το οποίο επιλύει επιτυχώς η τεχνολογία SONET/SDH είναι οι πολύπλοκες διαδικασίες μετατροπών (πολύπλεξης-αποπολύπλεξης κωδικοποίησης-αποκωδικοποίησης) που θα απαιτούνταν για την επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών τύπων δικτύων. Το γεγονός αυτό επιτυγχάνεται μέσω της τυποποίησης κατά SONET/SDH των ρυθμών μεταφοράς και των τρόπων με τον οποίο είναι οργανωμένα τα δεδομένα. Έτσι, είναι δυνατή η μεταφορά πολλών διαφορετικών τύπων δεδομένων μέσω μιας κοινής γραμμής. Ειδικότερα, άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα που εξασφαλίζει η τεχνολογία SONET/SDH είναι τα εξής:

- Σχεδιάστηκε για συμφέρουσα, από πλευράς κόστους, και ευέλικτη τηλεπικοινωνιακή δικτύωση. Τα πρότυπα του SONET/SDH βασίζονται στις αρχές της άμεσης σύγχρονης πολυπλεξίας, που είναι το κλειδί για οικονομική και ευέλικτη τηλεπικοινωνιακή δικτύωση. Ουσιαστικά, αυτό σημαίνει ότι συγκεκριμένα σήματα εισόδου μπορεί να πολυπλεχθούν κατ' ευθείαν σε ένα SONET/SDH σήμα υψηλότερης ταχύτητας, χωρίς ενδιάμεσα στάδια πολυπλεξίας. Στη συνέχεια τα στοιχεία του SONET/SDH δικτύου (network elements) μπορούν να διασυνδεθούν κατ' ευθείαν στο υπάρχον δίκτυο, με προφανή οφέλη από πλευράς κόστους και οικονομίας συσκευών.

- Εξασφαλίζει ενσωματωμένη χωρητικότητα σήματος, για προηγμένη διαχείριση και συντήρηση δικτύου. Ικανότητες για προηγμένη διαχείριση και συντήρηση δικτύου έτσι ώστε να είναι δραστικά διαχειρίσιμη η ευελιξία του. Περίπου 5% της δομής SONET/SDH σήματος χρησιμοποιείται για υποστήριξη διαδικασιών και πρακτικών προηγμένης διαχείρισης και συντήρησης του δικτύου.
- Εξασφαλίζει ευέλικτη μεταφορά σήματος. Το SONET/SDH σήμα είναι ικανό να μεταφέρει όλα τα συνηθισμένα σήματα, που υπάρχουν στα σημερινά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Αυτό σημαίνει ότι το SONET/SDH μπορεί να αναπτυχθεί σαν ένα πλαίσιο επικάλυψης στο υπάρχον δίκτυο και όπου χρειαστεί, εξασφαλίζει βελτιωμένη ευελιξία δικτύου, μεταφέροντας διάφορους τύπους σημάτων . Επιπρόσθετα, το SONET/SDH έχει τη δυνατότητα να ενσωματώσει εύκολα νέους τύπους σημάτων, που εξυπηρετούν πελάτες, και τα οποία θα ζητηθούν στο μέλλον από τους χρήστες δικτύων.
- Οδηγεί σε μία απλή και ενιαία δομή τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Το SONET/SDH μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλα τα παραδοσιακά πεδία εφαρμογής των τηλεπικοινωνιών. Συνεπώς, το SONET/SDH καθιστά δυνατή την ύπαρξη ενοποιημένης δομής δικτύου τηλεπικοινωνιών. Το γεγονός ότι το SONET/SDH βασίζεται κοινά δικτυακά πρότυπα, σημαίνει ότι μπορούν να διασυνδεθούν χωρίς προβλήματα συσκευές από διαφορετικούς κατασκευαστές.

Το βασικό δομικό στοιχείο των οπτικών διεπαφών (optical interfaces) της τεχνολογίας SONET είναι το Σήμα Σύγχρονης Μεταφοράς (Synchronous Transport Signal-STS). Το αντίστοιχο για το πρότυπο SDH είναι η Μονάδα Σύγχρονης Μεταφοράς (Synchronous Transfer Module-STM). Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται οι προτυποποιημένοι ρυθμοί για τις πλατφόρμες SONET/SDH, με τους αντίστοιχους συμβολισμούς για το οπτικό και το ηλεκτρικό επίπεδο.

Οπτικό Επίπεδο	Ισοδύναμο SDH block	Ηλεκτρικό Επίπεδο	Ρυθμός (Mbps)	Payload Rate (Mbps)	Overhead Rate (Mbps)
OC-1	-	STS-1	51,840	50,112	1,728
OC-3	STM-1	STS-3	155,520	150,336	5,184
OC-9	STM-3	STS-9	466,560	451,008	15,552
OC-12	STM-4	STS-12	622,080	601,344	20,736
OC-18	STM-6	STS-18	933,120	902,016	31,104
OC-24	STM-8	STS-24	1244,160	1202,688	41,472
OC-36	STM-12	STS-36	1866,240	1804,032	62,208
OC-48	STM-16	STS-48	2488,320	2405,376	82,944
OC-96	STM-32	STS-96	4976,640	4810,752	165,888
OC-192	STM-64	STS-192	9953,280	9621,504	331,776

Πίνακας 6.1
Η ψηφιακή ιεραρχία SONET/SDH

Σημείωση

STS-1 (Synchronous Transport Signal-Level 1). Σήμα 51,840 Mbps γνωστό ως Σήμα Σύγχρονης Μεταφοράς 1ου επιπέδου. (SONET)

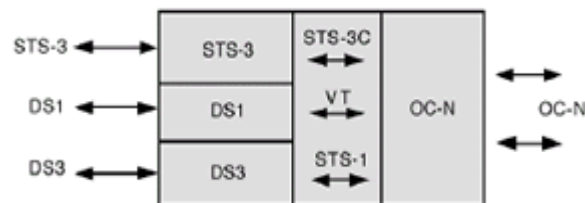
OC-1 (Optical Carrier-Level 1). Οπτικός Φορέας 1ου επιπέδου, είναι το σήμα που λαμβάνεται στην έξοδο ενός ηλεκτροοπτικού μετατροπέα, όταν στην είσοδο εισάγεται στο σήμα STS-1. (SONET)

STM-1 (Synchronous Transport Module-Level 1). Μονάδα Σύγχρονης Μεταφοράς 1ου επιπέδου, 155,520 Mbps. (SDH)

6.1.1 Δομοστοιχεία της τεχνολογίας SONET/SDH

Τα βασικά δομοστοιχεία ενός δικτύου που χρησιμοποιεί την τεχνολογία SONET/SDH περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω:

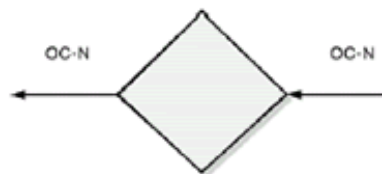
- **Τερματικοί Πολυπλέκτες (Terminal Multiplexers - PTEs):** Επιτελούν το σημαντικότερο έργο της συγκέντρωσης όλων των ψηφιακών (ηλεκτρικών ή οπτικών) σημάτων. Τα σήματα πολυπλέκονται και μεταδίδονται σε οπτικό επίπεδο, μέσω μιας κοινής OC-N γραμμής.



Σχήμα 6.1

Παράδειγμα λειτουργίας Τερματικού Πολυπλέκτη

- **Συσκευές Αναγέννησης Σήματος (Regenerators):** Αυτές οι συσκευές είναι απαραίτητες στις περιπτώσεις κατά τις οποίες, λόγω μεγάλων αποστάσεων μεταξύ των πολυπλεκτών, το σήμα εξασθενίζει σημαντικά.

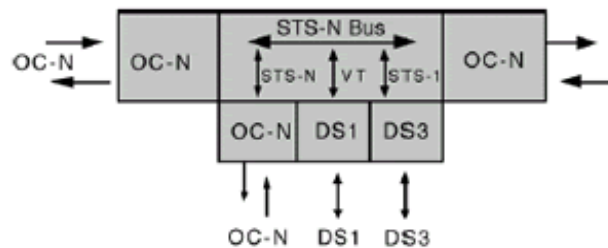


Σχήμα 6.2

Αναγεννητής Σήματος

- **Πολυπλέκτες Προσθαφαίρεσης (Add/Drop Multiplexers - ADMs):**

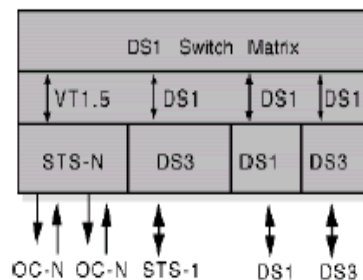
Οι συγκεκριμένες συσκευές αναλαμβάνουν να αποπολυπλέξουν μόνο τα σήματα που είναι απαραίτητο να προσπελαστούν στο δεδομένο σημείο του δικτύου, ενώ τα υπόλοιπα περνούν διαβατικά δίχως να υποστούν οποιαδήποτε επεξεργασία. Οι πολυπλέκτες αυτοί επιτρέπουν τη διασύνδεση μεταξύ των σημάτων SONET/SDH και των διαφορετικού τύπου σημάτων στο δίκτυο.



Σχήμα 6.3
Πολυπλέκτης Προσθαφαίρεσης

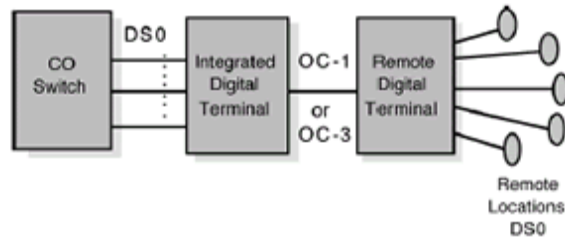
- **Ψηφιακές Διατάξεις Ευρυζωνικής Διασύνδεσης (Wideband Digital Cross-Connects):**

Ο ρόλος τους έγκειται στο να δέχονται πολλαπλά οπτικά σήματα, προσπελάζοντας τα στοιχειώδη σήματα STS-1 και επιτρέποντας τη μεταγωγή τους στο επίπεδο αυτό. Τα στοιχεία αυτά καθιστούν δυνατή τη διασύνδεση πολύ μεγαλύτερου αριθμού STS-1 σημάτων, σε σχέση με τους πολυπλέκτες αποπολύπλεξης, λόγω του ότι γίνεται προσπέλαση και μεταγωγή μόνο των απαιτούμενων σημάτων. Τα χαρακτηριστικά αυτών των συσκευών, τις καθιστούν κατάλληλες για εφαρμογές διαχείρισης δικτύων.



Σχήμα 6.4
Ψηφιακές Διατάξεις Ευρυζωνικής Διασύνδεσης

- **Μεταφορείς Ψηφιακού Βρόχου (Digital Loop Carriers-DLCs):** Η συσκευή αυτή περιλαμβάνει ένα σύνολο πολυπλεκτών και διακοπών και μπορεί να θεωρηθεί ως ένα είδος συγκεντρωτή υπηρεσιών χαμηλών ταχυτήτων, προτού αυτές εισέλθουν στο Τηλεπικοινωνιακό Κέντρο (CO). Με αυτόν τον τρόπο, ο αριθμός των συνδρομητών που μπορούν να εξυπηρετηθούν δεν περιορίζεται από τον αριθμό των γραμμών που εξυπηρετούνται από το CO.

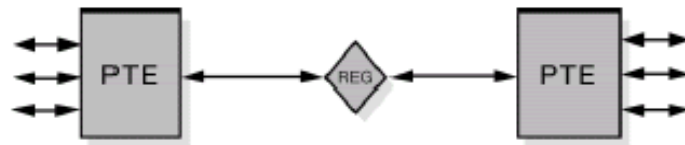


Σχήμα 6.5
Μεταφοράς Ψηφιακού Βρόχου

6.1.2 Αρχιτεκτονικές Δικτύων SONET/SDH

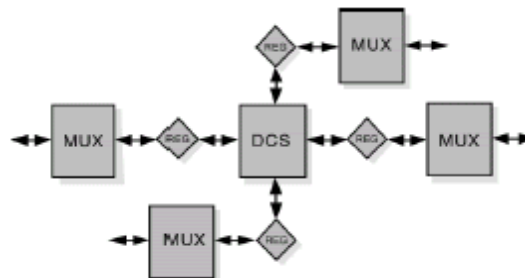
Μετά την εξέταση των δομοστοιχείων του δικτύου SONET/SDH, κρίνεται σκόπιμη η παράθεση των δυνατών αρχιτεκτονικών ενός τέτοιου δικτύου:

- Σημείο-σημειακή (point-to-point) Αρχιτεκτονική: Στην απλούστερη έκδοσή του περιλαμβάνει δύο τερματικούς πολυπλέκτες (PTE), οι οποίοι συνδέονται μέσω οπτικής ίνας, με ή χωρίς συσκευή αναγέννησης σήματος (regenerator). Η αρχιτεκτονική αυτή αποτελεί ταυτόχρονα και την απλούστερη υλοποίηση δικτύων SONET/SDH.



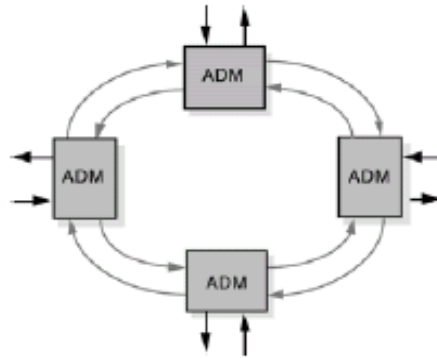
Σχήμα 6.6
Αρχιτεκτονική Σημείο-πολυσημειακή

- Δίκτυο κομβικού σημείου (Hub Network): Ένα “hub” αποτελεί το κομβικό σημείο της κίνησης στο δίκτυο, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την επανατροφοδότηση (reprovisioning) των κυκλωμάτων.



Σχήμα 6.7
Αρχιτεκτονική Κομβικού Σημείου (Hub)

- Αρχιτεκτονική Δακτυλίου (Ring Architecture): Τα βασικά δομικά στοιχεία αυτής της διαμόρφωσης είναι τα ADMs, τα οποία και τοποθετούνται σε τοπολογία δακτυλίου επιτρέποντας την κατεύθυνση της πληροφορίας προς μία ή και προς τις δύο κατευθύνσεις. Το κύριο πλεονέκτημα της αρχιτεκτονικής δακτυλίου είναι η ύπαρξη εναλλακτικής διαδρομής για αναδρομολόγηση σε περίπτωση βλάβης.



Σχήμα 6.8
Αρχιτεκτονική Δακτυλίου (Ring Architecture)

6.2 Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου (TDM)

Η πολυπλεξία (multiplexing) είναι μία τεχνική στην οποία ένας αριθμός ανεξάρτητων σημάτων μπορεί να συνδυαστεί σε σύνθετο σήμα κατάλληλο για μετάδοση σε ένα κοινό δίαυλο επικοινωνίας. Για να μεταδώσουμε ένα αριθμό τέτοιων σημάτων στον ίδιο φορέα, πρέπει τα σήματα να κρατηθούν απομακρυσμένα, να μην επηρεάζονται μεταξύ τους και έτσι ώστε να μπορούν να διαχωριστούν εύκολα στη λήψη. Η τεχνική διαχωρισμού των σημάτων στο χρόνο ονομάζεται Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου (Time Division Multiplexing - TDM). Η αρχή της TDM απεικονίζεται στο διάγραμμα που φαίνεται στο Σχήμα 6.9.



Σχήμα 6.9
Δομικό Διάγραμμα του Συστήματος TDM

Στην είσοδο του πολυπλέκτη κάθε σήμα πληροφορίας περιορίζεται αρχικά σε εύρος ζώνης από ένα βαθυπερατό φίλτρο που χρησιμοποιείται για να αφαιρέσει τις συχνότητες που δεν είναι σημαντικές για την ικανοποιητική αναπαράσταση του σήματος. Οι έξοδοι των βαθυπερατών φίλτρων στη συνέχεια εφαρμόζονται σε ένα μεταγωγέα (commutator) που υλοποιείται συνήθως με χρήση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Η λειτουργία του μεταγωγέα είναι διπλή:

i) να πάρει ένα στενού εύρους δείγμα καθεμιάς από τις N πληροφορίες εισόδου με ρυθμό δειγματοληψίας $1/T$, που είναι μεγαλύτερος από το $2W$, όπου το W είναι η συχνότητα αποκοπής του βαθυπερατού φίλτρου εισόδου και

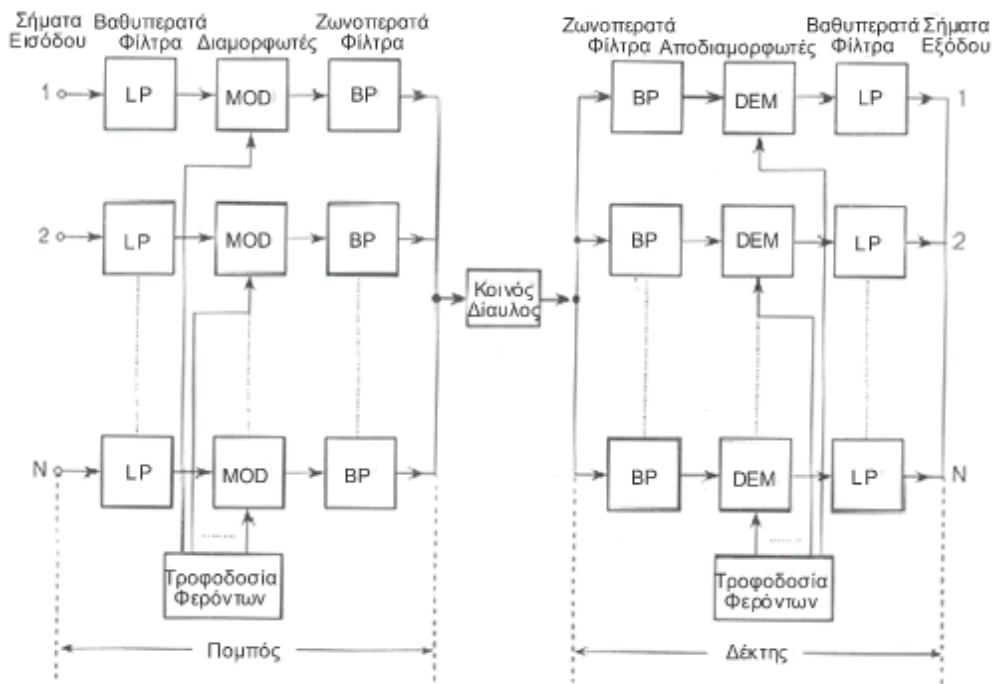
ii) να ενοποιήσει αυτά τα N δείγματα μέσα σε ένα διάστημα μετάδοσης.

Στην πραγματικότητα, η τελευταία λειτουργία είναι η ουσία της λειτουργίας πολύπλεξης με διαίρεση του χρόνου. Μετά τη διαδικασία μεταγωγής, το πολυπλεγμένο σήμα εισέρχεται σε ένα διαμορφωτή παλμών (pulse modulator), ο σκοπός του οποίου είναι να μετασχηματίσει το πολυπλεγμένο σήμα σε μια μορφή πιο κατάλληλη για μετάδοση μέσω του κοινού διαύλου. Είναι φανερό ότι η χρήση της πολυπλεξίας με διαίρεση χρόνου αυξάνει σημαντικά το εύρος ζώνης, επειδή η διάταξη πρέπει να διαχειριστεί N δείγματα που προέρχονται από N ανεξάρτητες πηγές πληροφορίας σε χρονική περίοδο ίση με το διάστημα δειγματοληψίας. Στην πλευρά λήψης του συστήματος, το λαμβανόμενο σήμα οδηγείται σε έναν αποδιαμορφωτή παλμών (pulse demodulator) που εκτελεί την αντίστροφη λειτουργία από το διαμορφωτή παλμών. Τα στενού πλάτους δείγματα που παράγονται στην έξοδο του αποδιαμορφωτή, διανέμονται στα κατάλληλα φίλτρα ανακατασκευής μέσω ενός μεταγωγέα (decommutator), που λειτουργεί σε συγχρονισμό με τον μεταγωγέα του πομπού.

Η πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου και η πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας (που περιγράφεται στην ενότητα 6.3) αποτελούν τις δύο βασικές μορφές πολυπλεξίας που χρησιμοποιούνται στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα που βασίζονται στην μεταγωγή κυκλώματος.

6.3 Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (FDM)

Η τεχνική διαχωρισμού των σημάτων στη συχνότητα αναφέρεται σαν Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (Frequency Division Multiplexing - FDM). Η αρχή της FDM απεικονίζεται στο διάγραμμα που φαίνεται στο Σχήμα 6.10.



Σχήμα 6.10
 Δομικό Διάγραμμα του Συστήματος FDM

Τα εισερχόμενα σήματα πληροφορίας θεωρούνται βαθυπερατά, αλλά τα φάσματά τους δεν έχουν απαραίτητα μη μηδενικές τιμές όσο πλησιάζουμε τη μηδενική συχνότητα. Μετά το κάθε σήμα εισόδου φαίνεται ένα βαθυπερατό φίλτρο, το οποίο είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να αποκόπτει συνιστώσες υψηλής συχνότητας που δεν συνεισφέρουν σημαντικά στην αναπαράσταση του σήματος, αλλά είναι δυνατόν να παρενοχλούν άλλα σήματα πληροφορίας που μοιράζονται τον κοινό δίαυλο.

Αυτά τα βαθυπερατά φίλτρα μπορούν να παραλειφθούν μόνο αν τα σήματα εισόδου είναι επαρκώς περιορισμένα σε εύρος ζώνης από την αρχή. Τα φιλτραρισμένα σήματα εφαρμόζονται σε διαμορφωτές που μετατοπίζουν τις περιοχές συχνοτήτων των σημάτων, έτσι ώστε να καταλαμβάνουν διαφορετικά μεταξύ τους περιοχές συχνοτήτων. Οι απαραίτητες φέρουσες συχνότητες για αυτές τις μετατοπίσεις συχνοτήτων, λαμβάνονται μέσω μιας γεννήτριας φέρουσων συχνοτήτων. Για τη διαμόρφωση χρησιμοποιούμε τη διαμόρφωση απλής πλευρικής ζώνης. Τα ζωνοπερατά φίλτρα που ακολουθούν τους διαμορφωτές χρησιμοποιούνται για να περιορίσουν τη ζώνη κάθε διαμορφωμένης κυματομορφής στο προδιαγεγραμμένο της εύρος. Οι προκύπτουσες έξοδοι των ζωνοπερατών φίλτρων, στη συνέχεια συνενώνονται, έτσι ώστε να σχηματίσουν την έξοδο στον κοινό δίαυλο. Στην πλευρά της λήψης χρησιμοποιείται μια σειρά ζωνοπερατών φίλτρων, με τις εισόδους τους συνδεδεμένες παράλληλα, για να διαχωρίσει τα σήματα πληροφορίας με βάση τη ζώνη συχνοτήτων που καταλαμβάνουν. Τελικά τα αρχικά σήματα πληροφορίας επανακτώνται και οδηγούνται σε ξεχωριστούς αποδιαμορφωτές.

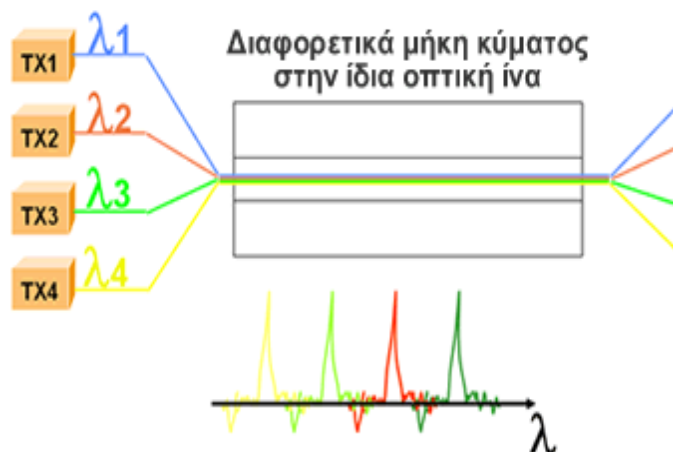
Παρατηρείστε ότι το παραπάνω σύστημα FDM λειτουργεί μόνο κατά τη μία κατεύθυνση. Για να εξασφαλίσουμε μετάδοση δύο κατευθύνσεων, όπως στην τηλεφωνία, θα πρέπει να διπλασιάσουμε πλήρως όλη τη διάταξη πολυπλεξίας, με τα στοιχεία της συνδεδεμένα με αντίθετη φορά και με τα σήματα να προχωρούν από τα δεξιά προς τ' αριστερά.

6.4 Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος (WDM)

Για την καλύτερη δυνατή αξιοποίηση των οπτικών ινών και την μεγιστοποίηση του μεταφερόμενου όγκου δεδομένων μέσα από μια ίνα, έχει εφαρμοσθεί τα τελευταία χρόνια μια νέα τεχνολογία, η τεχνολογία της Πολυπλεξίας με Διαίρεση Μήκους Κύματος (Wavelength Division Multiplexing - WDM).

Η τεχνολογία αυτή συνίσταται στην πολυπλεξία οπτικών σημάτων με διαφορετικά μήκη κύματος και την μετάδοσή τους μέσα από μια μόνο οπτική ίνα.

Η βασική ιδέα πάνω στην οποία στηρίχτηκε η νέα τεχνολογία ήταν η εξής: σε κάθε οπτική ίνα το οπτικό σήμα που διαδίδεται έχει μια συγκεκριμένη φέρουσα συχνότητα. Είναι δυνατόν από την ίδια ίνα να περάσουν περισσότερα του ενός διαφορετικά σήματα διαφορετικής συχνότητας ή αλλιώς διαφορετικού μήκους κύματος μιας και μιλάμε για οπτικά σήματα, που το καθένα να μεταφέρει διαφορετικά δεδομένα. Τα παραπάνω φαίνονται πολύ παραστατικά στο Σχήμα 6.11:



Σχήμα 6.11
Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος

Έτσι, σε ένα σύστημα WDM, ένα πλήθος διαφορετικών σημάτων μεταφέρονται υπό τη μορφή διακριτών μηκών κύματος ή καναλιών μέσω της οπτικής ίνας και αποπολυπλέκονται στο σημείο λήψης. Όπως και με τη μέθοδο TDM, που χρησιμοποιείται από την τεχνολογία SONET/SDH, η ολική χωρητικότητα του μέσου είναι το άθροισμα της χωρητικότητας των εισερχόμενων σημάτων, με τη διαφορά ότι καθένα από τα σήματα αυτά μεταφέρεται ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι κάθε κανάλι έχει το δικό του, αποκλειστικό, εύρος ζώνης.

Το προφανέστερο πλεονέκτημα της τεχνολογίας WDM εντοπίζεται στη δυνατότητά της να παρέχει τεράστια αύξηση (πρακτικά απεριόριστη) της χωρητικότητας μετάδοσης.

Άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα της WDM συνοψίζονται στα παρακάτω:

- **Διαφάνεια (Transparency):** Δεδομένου ότι η WDM αποτελεί μια αρχιτεκτονική στο φυσικό επίπεδο, είναι δυνατή η διαφανής υποστήριξη τόσο της TDM τεχνολογίας όσο και δεδομένων τυποποιήσεων όπως ATM, Gigabit Ethernet, ESCON και Fibre Channel, επιτυγχάνοντας τη διασύνδεση διαφόρων υπηρεσιών μέσω του κοινού φυσικού μέσου.
- **Κλιμάκωση Μεγέθους (Scalability):** Επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή αξιοποίηση της οπτικής ίνας, ειδικότερα σε επίπεδο, μητροπολιτικών και επιχειρησιακών δικτύων.
- **Δυναμική Παροχή Εύρους Ζώνης (Dynamic Provisioning):** Η ταχύτητα, απλή και με δυναμικό τρόπο παροχή των δικτυακών συνδέσεων, δίνουν τη δυνατότητα παροχής υπηρεσιών υψηλών ταχυτήτων για ικανοποίηση αναγκών των χρηστών μέσα σε διάστημα ολίγων ημερών παρά μηνών.

6.5 Διάρθρωση ενός WDM συστήματος

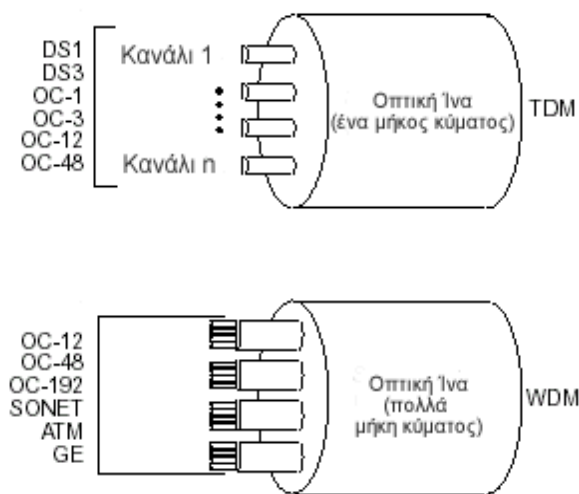
Τα βασικά δομοστοιχεία της τεχνολογίας WDM, με βάση και τη θέση τους στο δίκτυο, είναι συνοπτικά τα ακόλουθα:

- **Πηγές laser**, στην πλευρά της μετάδοσης, για την παροχή με χρήση αναμεταδοτών μηκών κύματος εξαιρετικής ακρίβειας και σταθερότητας.
- **Οπτική ίνα**, στην πλευρά της σύνδεσης, που εμφανίζει χαμηλές απώλειες και υψηλή απόδοση στην φασματική περιοχή μετάδοσης. Επιπλέον, απαραίτητη είναι και η παρουσία οπτικών ενισχυτών (optical amplifiers) για την ενίσχυση του σήματος και τη μεταφορά του σε μεγάλες αποστάσεις.
- **Συσκευές φωτοανίχνευσης (photodetectors)**, στην πλευρά του δέκτη.
- **Οπτικούς πολυπλέκτες προσθαφαίρεσης (add/drop optical multiplexers) και οπτικούς διασταυρωτήρες (optical cross-connect components).**

Τα προαναφερθείσα δομοστοιχεία αναλύονται περαιτέρω με στόχο την καλύτερη κατανόηση της τεχνολογίας WDM. (Κεφάλαιο 3ο - Οπτικές Ίνες, Κεφάλαιο 4ο - Πηγές Φωτός και Ανιχνευτές, Κεφάλαιο 5ο – Στοιχεία Οπτικού Δικτύου).

6.6 Σύγκριση TDM-WDM

Η μέθοδος TDM πολυπλέκει περισσότερα σήματα σε ένα ενιαίο υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης και τα μεταδίδει χρησιμοποιώντας ένα φέρον μήκος κύματος μέσα από την οπτική ίνα. Το WDM παίρνει πολλά οπτικά σήματα, σε συγκεκριμένα μήκη κύματος, και τα πολυπλέκει μέσα σε μία μόνο οπτική ίνα. Η WDM είναι επομένως ίδια με την FDM, όπου κάθε σήμα μεταδίδεται σε διαφορετική φέρουσα συχνότητα, επειδή όμως στα WDM οι συχνότητες αυτές είναι πολύ μεγαλύτερες και ανήκουν στο οπτικό φάσμα, αναφερόμαστε σε μήκη κύματος (W) και όχι συχνότητες (F). Επίσης μέσω της τεχνολογίας WDM είναι δυνατή η μεταφορά σημάτων σε διαφορετικά πρωτόκολλα, δίχως να απαιτείται η χρήση μιας ενιαίας τυποποίησης των σημάτων. Μερικές από τις βασικές διαφορές μεταξύ TDM και WDM φαίνονται στο Σχήμα 6.12



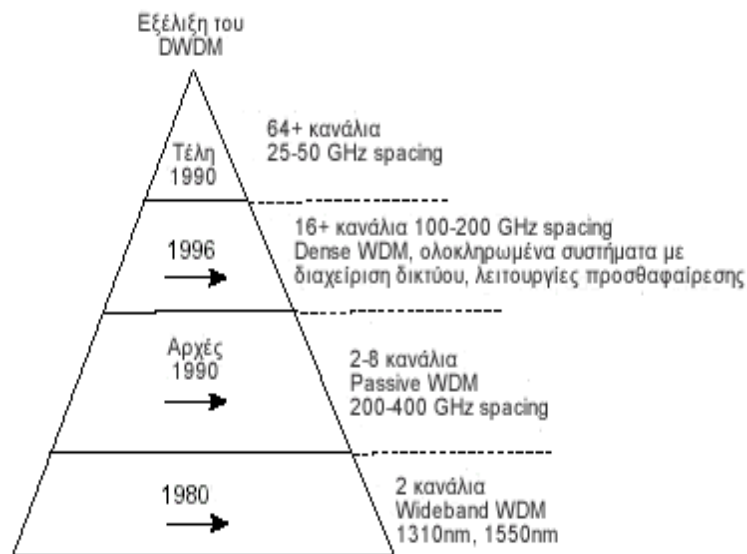
Σχήμα 6.12

Βασικές Διαφορές TDM και WDM (σχηματική αναπαράσταση)

6.7 Πυκνή Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος (DWDM)

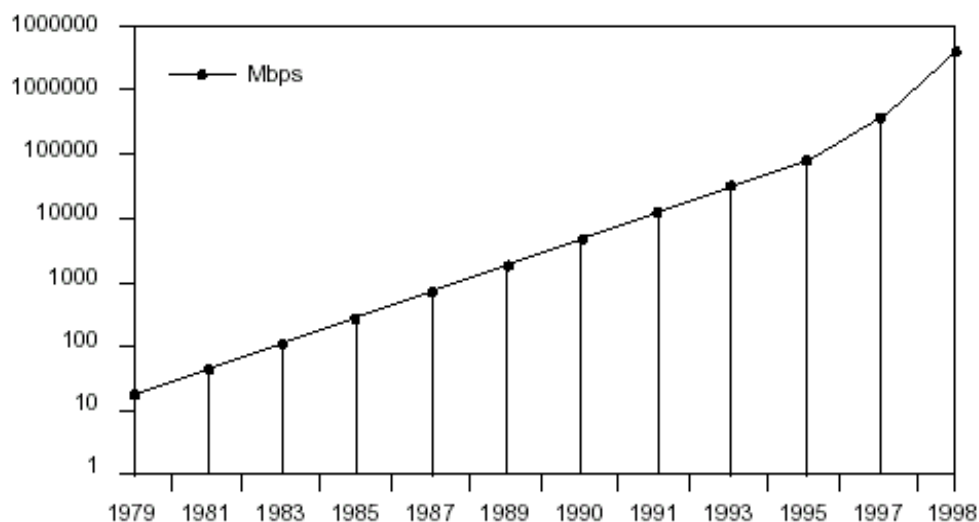
Συχνά, η τεχνολογία WDM αναφέρεται και ως Πυκνή Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος-DWDM (Dense-WDM) και προφανώς η μόνη διαφορά της DWDM έγκειται στο μεγαλύτερο αριθμό των μεταφερόμενων καναλιών, μέσω της διαίρεσης του διαθέσιμου φάσματος σε περισσότερα μήκη κύματος (συνήθως περισσότερα από 16).

Το διαθέσιμο οπτικό φάσμα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην τεχνολογία DWDM περιλαμβάνει δύο παράθυρα το ένα γύρω από τα 1300 nm, στο οποίο έχουμε την ελάχιστη διασπορά μετάδοσης σε μονότροπες ίνες (G.652) και το άλλο στην περιοχή των 1550 nm στο οποίο έχουμε την ελάχιστη εξασθένιση μετάδοσης σε μονότροπες ίνες. Σε καθένα από τα δύο αυτά παράθυρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα εύρος ζώνης γύρω στα 15.000 GHz, δηλαδή με άλλα λόγια το εύρος των παραθύρων είναι γύρω στα 100nm. Θεωρητικά σε αυτό το εύρος είναι δυνατόν να οριστούν γύρω στα 3000 διαφορετικά κανάλια με διαφορά μεταξύ τους περίπου 0.03 nm. Στην πραγματικότητα όμως μέχρι τώρα ο διαχωρισμός των καναλιών στα εμπορικά διαθέσιμα προϊόντα κυμαίνεται σε τιμές γύρω από το 1nm και το πλήθος των διαφορετικών καναλιών που προσφέρουν είναι από 4 τα πιο παλιά συστήματα μέχρι 80 τα νεότερα. Στο Σχήμα 6.13 φαίνεται παραστατικά η εξέλιξη του DWDM.



Σχήμα 6.13
Εξέλιξη της τεχνολογίας DWDM (σχηματική αναπαράσταση)

Στα τέλη της δεκαετίας του '80 εμφανίζεται η μορφή της τεχνολογίας WDM γνωστή ως wideband WDM, η οποία χρησιμοποιεί 2 κανάλια στις περιοχές των 1310 nm και 1510 nm. Στις αρχές του 1990 εμφανίζεται μια δεύτερη μορφή, που πολλές φορές ορίζεται ως narrowband WDM, και η οποία χρησιμοποιεί από 2 μέχρι 8 κανάλια. Στα μέσα της δεκαετίας του '90 κάνει την εμφάνισή της η τεχνολογία Dense-WDM όπου τα συστήματα αρχίζουν χρησιμοποιούν από 16 μέχρι 40 κανάλια. Στα τέλη της δεκαετίας του '90 τα συστήματα DWDM εξελίσσονται και είναι σε θέση να χρησιμοποιούν από 64 έως 160 παράλληλα κανάλια. Η αύξηση του αριθμού των καναλιών, ως αποτέλεσμα της τεχνολογίας DWDM, έχει δραματική επίδραση στην αύξηση της χωρητικότητας της οπτικής ίνας (Σχήμα 6.14).



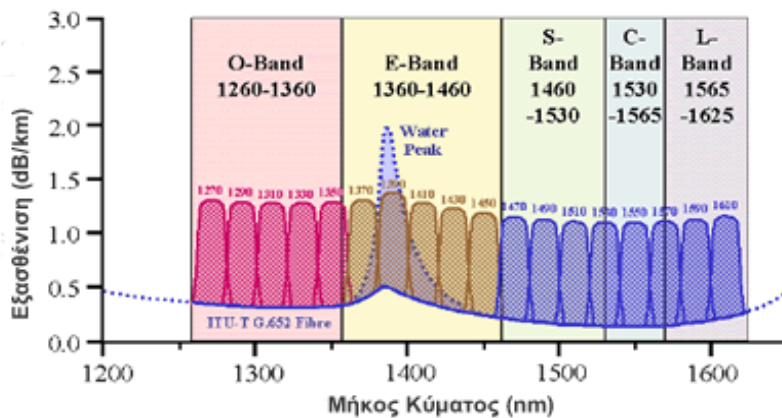
Σχήμα 6.14
Αύξηση της Χωρητικότητας της Οπτικής Ίνας

6.8 Χονδροειδής Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος(CWDM)

Η Χονδροειδής Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος (Coarse Wavelength Division Multiplexing-CWDM) είναι μία μορφή πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος η οποία εμφανίζει μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των φέροντων μηκών κύματος (γύρω στα 20nm) σε σχέση με την DWDM. Επίσης χρησιμοποιεί μια ευρύτερη περιοχή του οπτικού φάσματος και μπορεί να δεχτεί μέχρι 18 κανάλια. Η τεχνολογία CWDM μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε μονότροπες όσο και σε πολύτροπες οπτικές ίνες. Οι δαπάνες για την χρήση της τεχνολογίας CWDM είναι χαμηλότερες από τις άλλες μορφές WDM. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι διαφορές μεταξύ των τεχνολογιών CWDM, Wide-WDM και DWDM.

	Coarse WDM	Wide-WDM	DWDM
απόσταση μεταξύ των συχνοτήτων	Μεγάλη, από 1,6nm (200GHz) έως 25nm	1310nm και 1550nm lasers	Μικρή, 200GHz και μικρότερη
αριθμός παραθύρων	O, E, S, C και L	O και C	C και L
κόστος ανά κανάλι	χαμηλό	χαμηλό	υψηλό
αριθμός καναλιών	17-18	2	μεγάλος αριθμός
εφαρμογές	Short-haul, metro	Passive Optical Networks	Long-Haul

Πίνακας 6.2
Μορφές της Πολυπλεξίας με Διαίρεση Μήκους Κύματος



Σχήμα 6.15
CWDM πλέγμα μηκών κύματος κατά την ITU-T (Σύσταση G.694.2)

Η τεχνολογία CWDM έχει τη δυνατότητα να λειτουργήσει αποτελεσματικά και οικονομικά στα μητροπολιτικά δίκτυα. Η δυνατότητα να παρέχει πολλαπλά μήκη κύματος με λογικό κόστος οδηγεί τις εταιρίες παροχής υπηρεσιών τηλεπικοινωνιών να την επιλέγουν. Πρόσφατα αναπτύχθηκε τυποποίηση G.652.C για μονότροπη οπτική ίνα χωρίς την εξασθένιση στα 1400 nm ενοποιεί τα δύο παράθυρα μετάδοσης επιτρέποντας την καλύτερη εφαρμογή της CWDM.

Σημείωση

Η χρήση VCSELs (Vertical Cavity Surface Emitting Lasers) και uncooled DFB lasers μειώνουν το κόστος ενός συστήματος CWDM ακόμα περισσότερο.

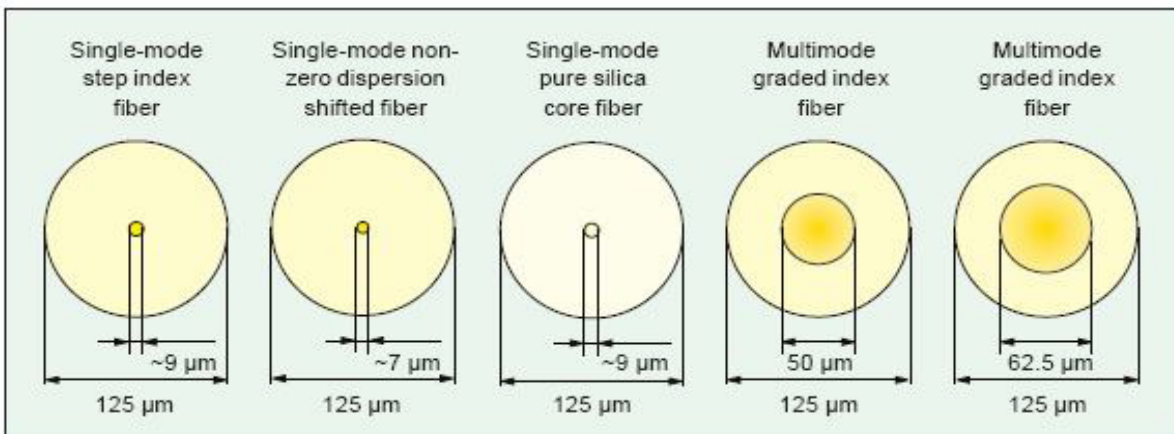
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

Εισαγωγή

Πιθανώς το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό των οπτικών ινών είναι η σχεδόν απεριόριστη χωρητικότητά τους για τη μετάδοση πληροφοριών σε μεγάλες αποστάσεις ($> 100 \text{ km}$) 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 7.1

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 $500 - 2000 \text{ MHz*km}$.

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) .

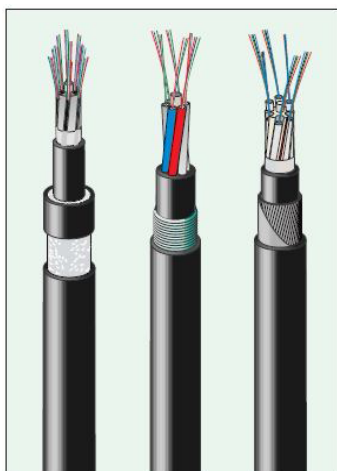
Οι μέθοδοι και ο εξοπλισμός για την εγκατάσταση χάλκινων καλωδίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλο βαθμό και στην εγκατάσταση καλωδίων οπτικών ινών . Ωστόσο , υπάρχουν μερικές πολύ σημαντικές διαφορές όπως για παράδειγμα η προσοχή που πρέπει να επιδείξουμε ώστε να μην λυγίσει ή να μην τανυστεί το 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).

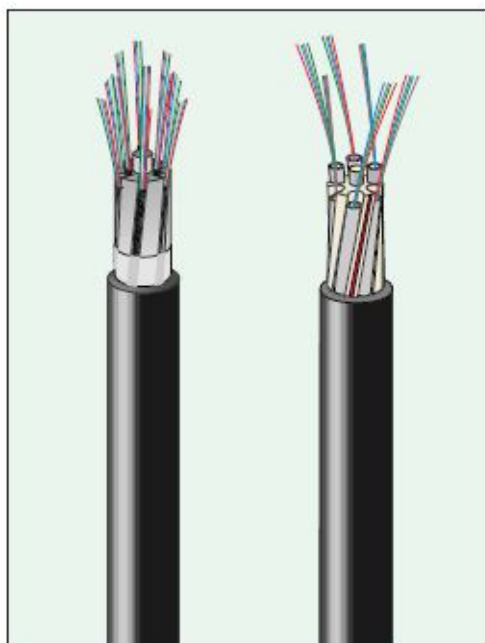
7.1 Άμεσα εγκατεστημένα καλώδια

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



Εικόνα 7.3 : Δύο καλώδια αγωγών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άμεση εγκατάσταση στο υπέδαφος. Από αριστερά προς τα δεξιά : GASLDV και GRSLDV

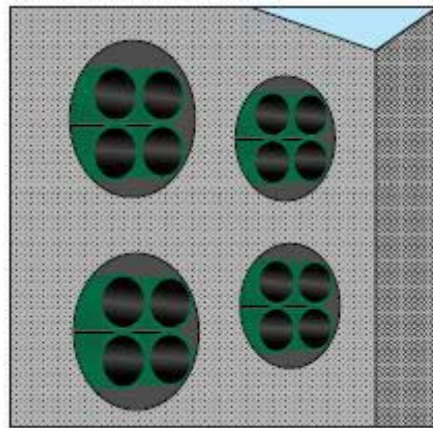
[7.2 Εγκατάσταση σε σωλήνες καλωδίων](#)

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

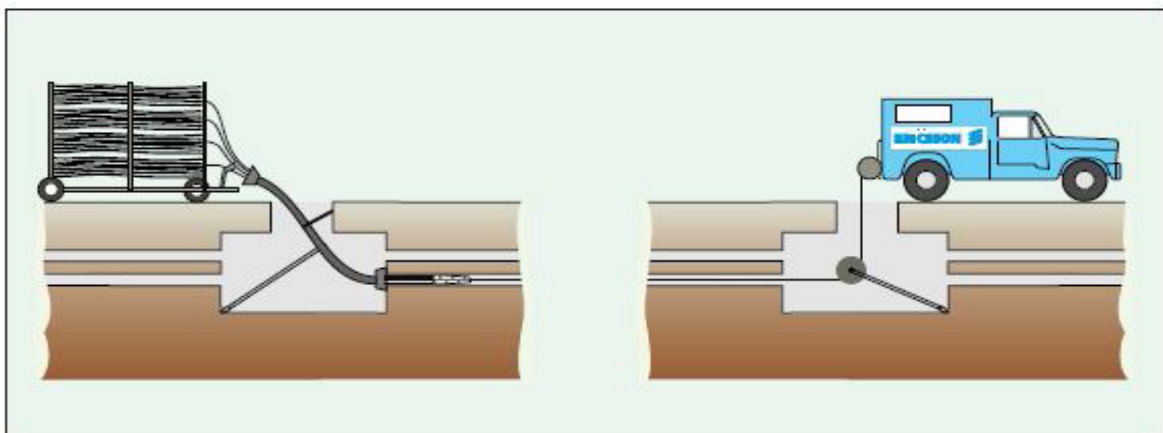
Όπως αναφέρθηκε ήδη , η χωρητικότητα των σωλήνων μπορεί να αυξηθεί με τη χρήση υποσωλήνων PVC . Μέχρι και τέσσερις υποσωλήνες PVC μπορούν να εισαχθούν σε έναν συνηθισμένο σωλήνα 100 mm .



Εικόνα 7.4

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 7.5 : Μέθοδος εισαγωγής υποσωλήνων μέσα στον κεντρικό αγωγό

7.2.1 Διαφορετικές μέθοδοι εγκατάστασης καλωδίου μέσα σε σωλήνα

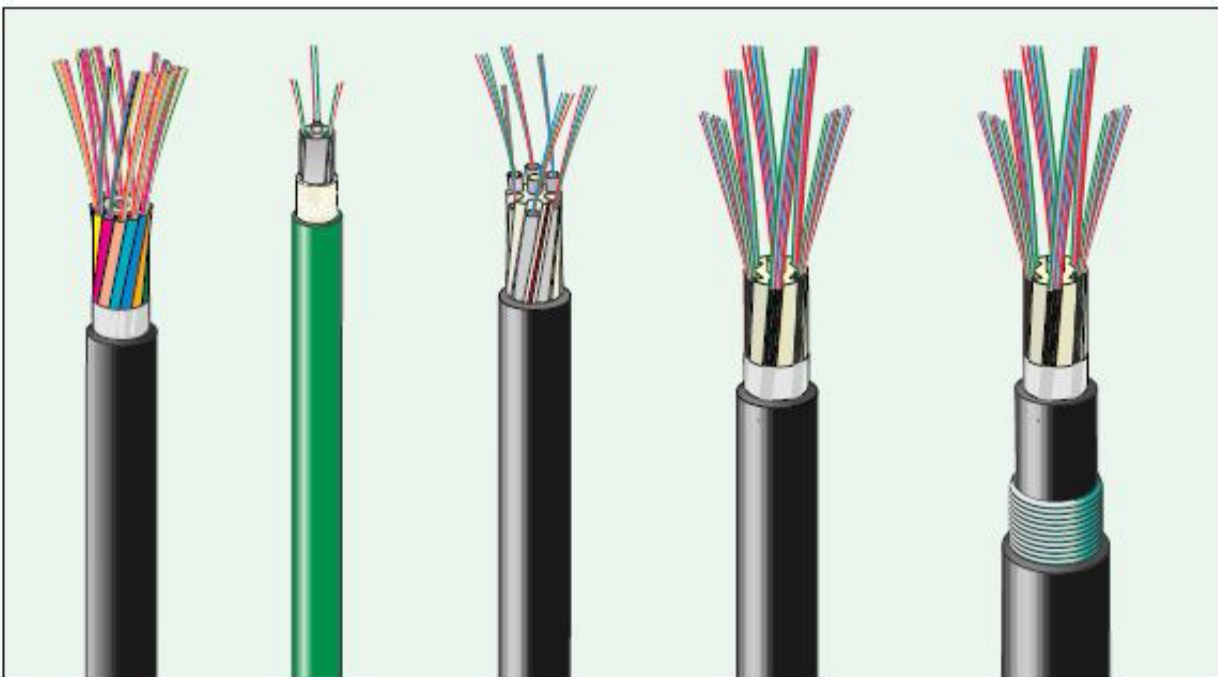
Η ακόλουθες μέθοδοι συνίστανται για την εγκατάσταση του καλωδίου στον σωλήνα :

- ● παραδοσιακό τράβηγμα με τη χρήση σχοινιού
- ● « 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 .

7.2.2 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 7.6 : Κλασικά παραδείγματα καλωδίων για εγκατάσταση μέσα σε αγωγούς

Η εικόνα 7.6 απεικονίζει διαφορετικούς τύπους καλωδίων που χρησιμοποιούνται μέσα σε σωληνώσεις :

- □ το ομοαξονικό καλώδιο , GRHLDV , το οποίο περιέχει μέχρι και 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 ατσάλινη ταινία ως επιπλέον προστασία ενάντια στα τρωκτικά)

7.3 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 .

7.4 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

Ένα 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 .

Ένα στο γραφείο (FTTD)

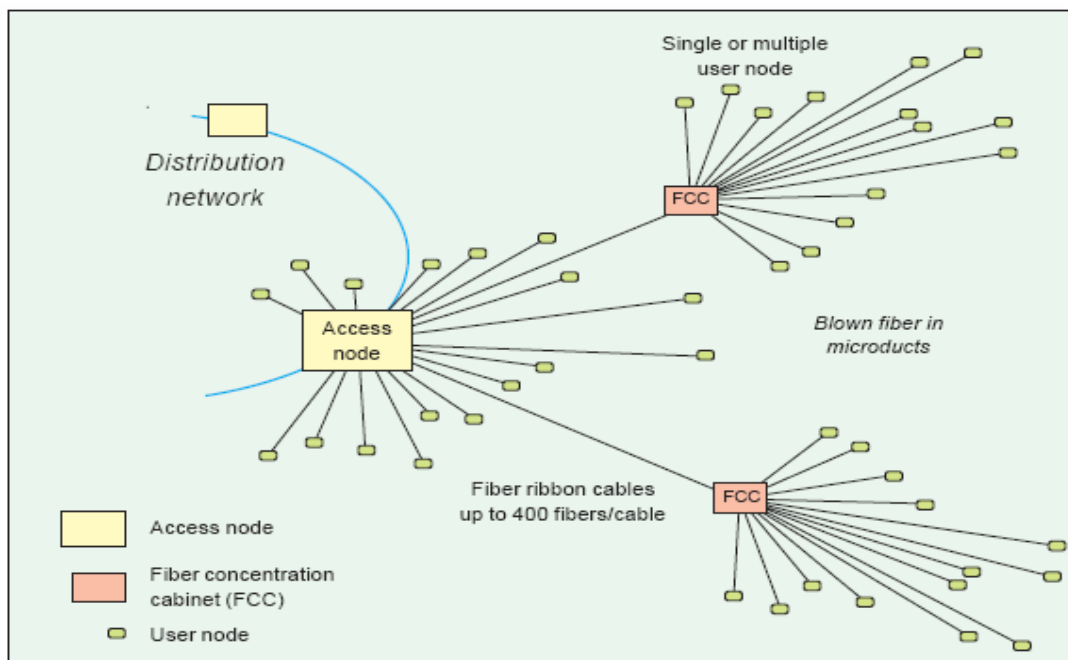
Το δίκτυο αυτό είναι πανομοιότυπο με το FTTH αλλά χρησιμοποιείται σε γραφεία

Ένα 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 .

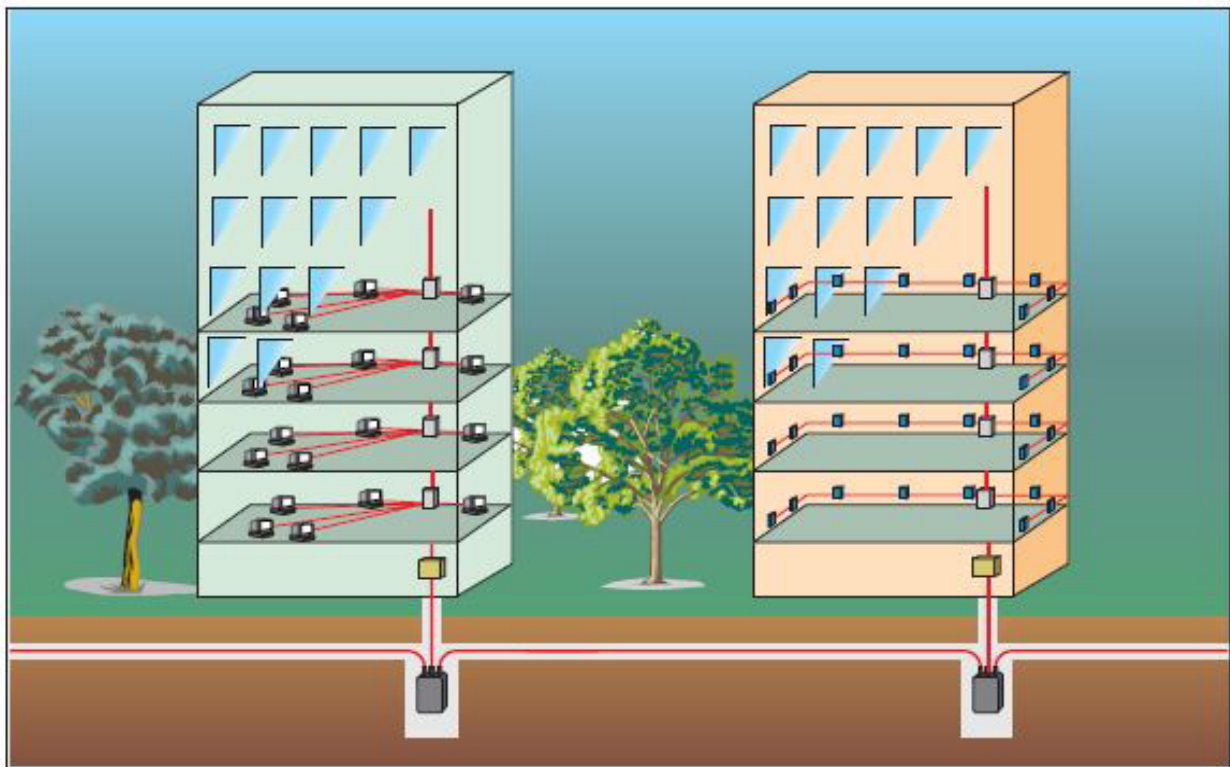


Εικόνα 7.7
Απεικόνιση ενός πιθανού FTTH δικτύου

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 .

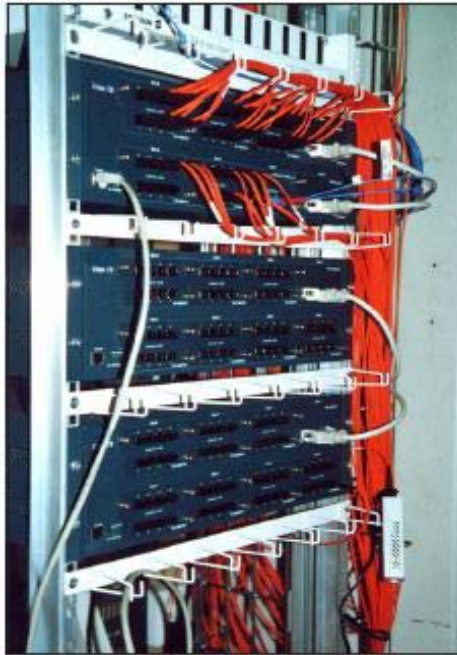


Εικόνα 7.8

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

7.5 Κόμβος πρόσβασης

Σε έναν κόμβο πρόσβασης οι ίνες στο δίκτυο διανομής 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 7.9

Κόμβος πρόσβασης για πάνω από 150 χρήστες

7.6 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 .

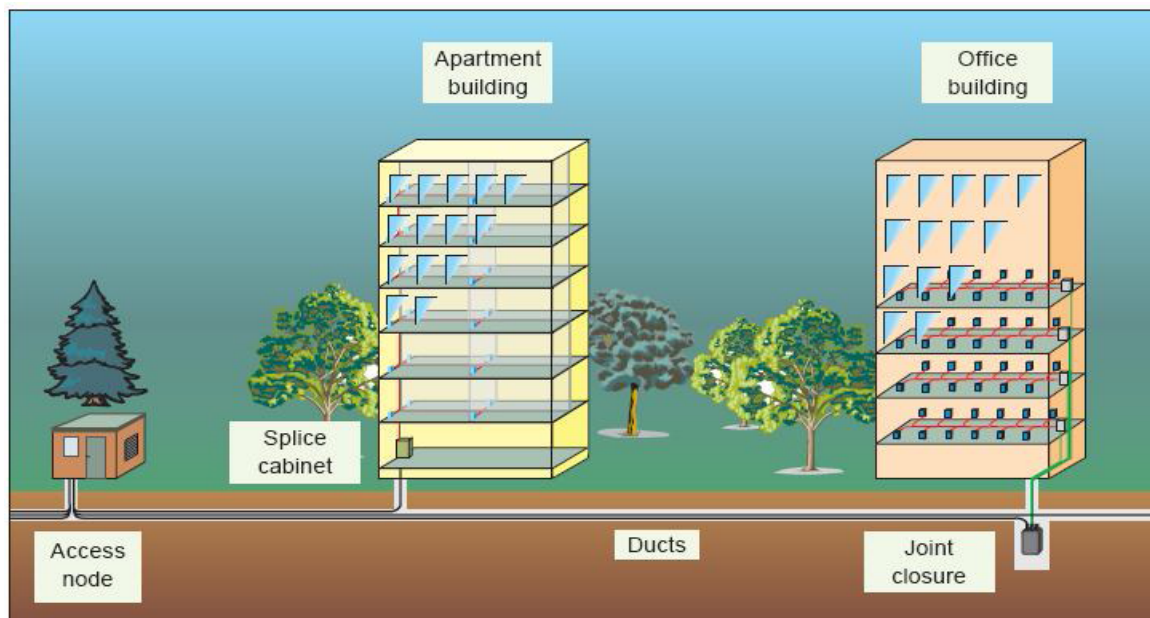


Εικόνα 7.10

Τερματικό τοίχου και το οπτοηλεκτρονικό switch του

Η εικόνα 7.11 απεικονίζει ένα κτήριο διαμερισμάτων και ένα κτήριο γραφείων (αριστερά και δεξιά) . Στην καμπίνα 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 συγκολλούνται 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 .

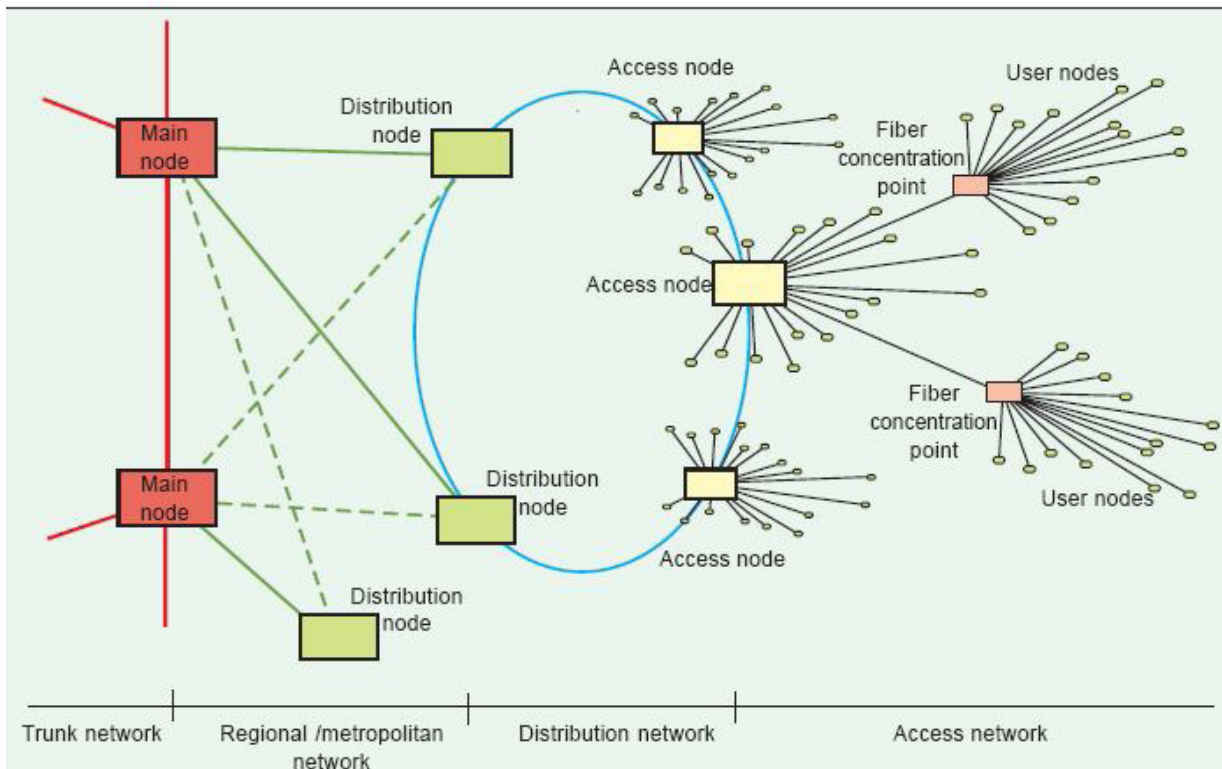


Εικόνα 7.11

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 «ίνα 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 7.12

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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΚΟΛΛΗΣΗ ΚΑΙ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

Εισαγωγή

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

8.1 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 υπάρχοντων 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 κόλληση είναι περίπου δεκαπλάσια και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται είναι πολύ φθηνότερος σε σχέση με τον προηγούμενο

Από τα παραπάνω διαφαίνεται ο λόγος για τον οποίο η μέθοδος κόλλησης fusion χρησιμοποιείται κατά κόρον σε δίκτυα μεγάλων αποστάσεων, όπου απαιτείται μηχανική ποιότητα και χαμηλή εξασθένιση. 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 εξασθένισης που παρουσιάζεται.

8.2 Απώλειες σε μια οπτική ζεύξη

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

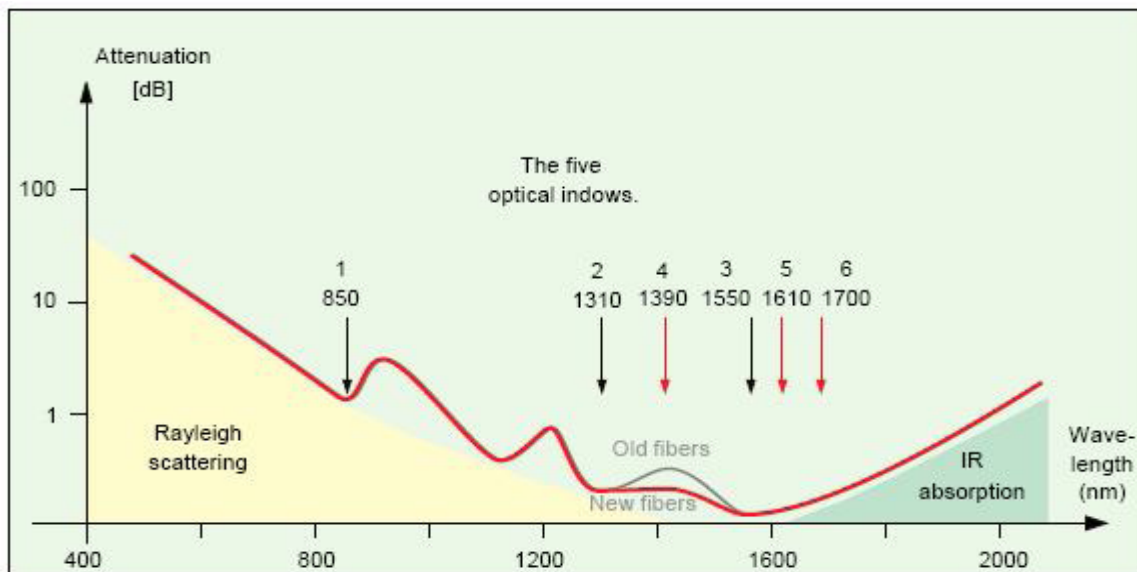
- Απώλειες που οφείλονται στην ίνα
- Απώλειες που οφείλονται στα υλικά των κολλήσεων/connectors

8.2.1 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 10³ nm, ακόμα όμως και τόσο μικρές αποκλίσεις συμβάλουν στη δημιουργία απωλειών κατά την (fusion) κόλληση των ινών. Μια ιδανική ίνα θα παρουσιάζει εξασθένιση κοντά στα 0.16 dB/km θεωρητικά (1550 nm). Στην πραγματικότητα η εξασθένιση 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

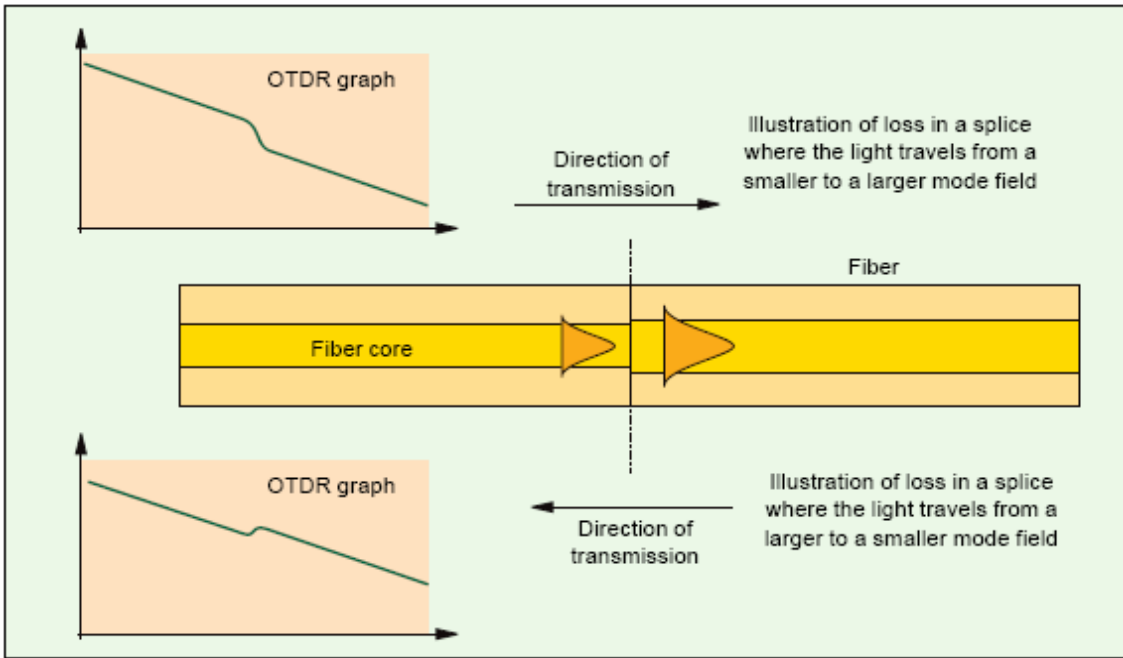


Εικόνα 8.1

Γραφική παράσταση της εξασθένισης μιας ίνας από σιλικόνη, σε συνάρτηση με το μήκος κύματος μετάδοσης

8.2.1.1 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 εξασθένιση του φωτός [πολλές φορές διακρίνεται σαν ενίσχυση του σήματος κατά τη μια κατεύθυνση, όταν παίρνουμε μετρήσεις με ένα OTDR (Optical Time Domain Reflectometer)].



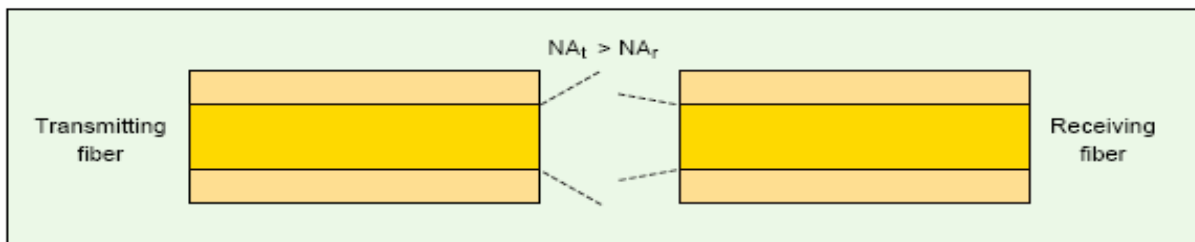
Εικόνα 8.2

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

8.2.1.2 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 :

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



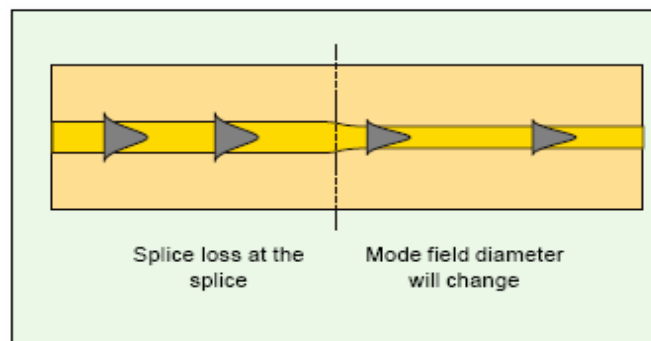
Εικόνα 8.3

Παρουσιάζονται απώλειες όταν $NA_t > NA_r$

8.2.1.3 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 8.4



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 ινών με διαφορετικές διαμέτρους πυρήνα δίνονται από τον παρακάτω τύπο :

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

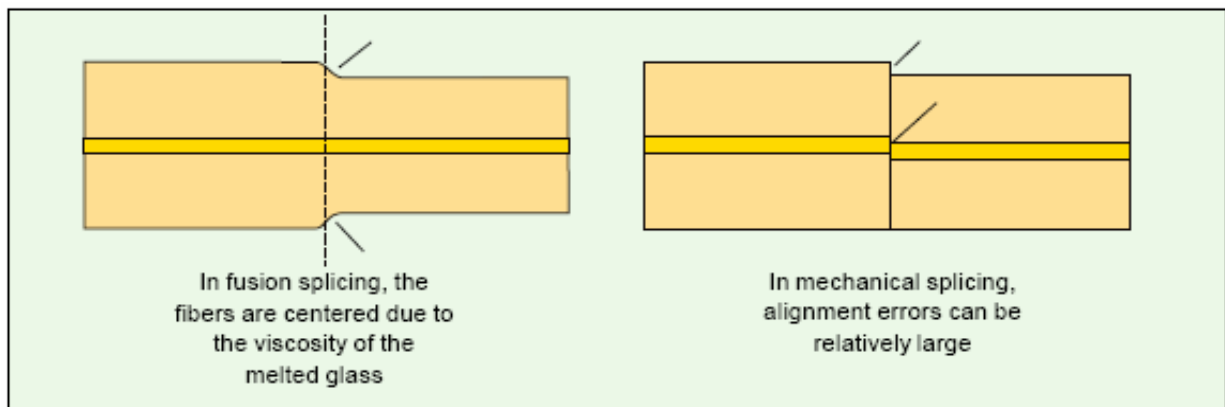
Όπου \varnothing_r και \varnothing_t είναι οι διαμέτροι πυρήνα των ινών που συνδέονται

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

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

8.2.1.4 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 $125\mu\text{m}$ μπορεί να κολληθεί με μια άλλη διαμέτρου $127\mu\text{m}$. 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.

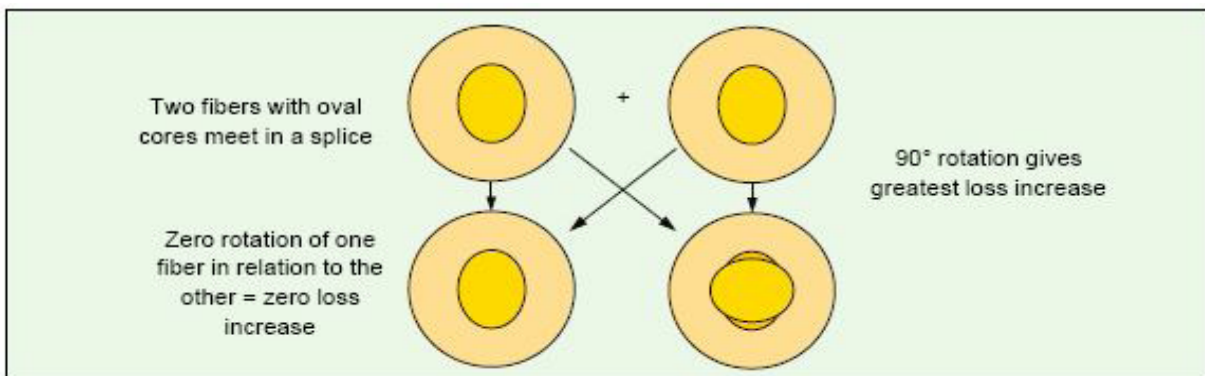


Εικόνα 8.5

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

8.2.1.5 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.

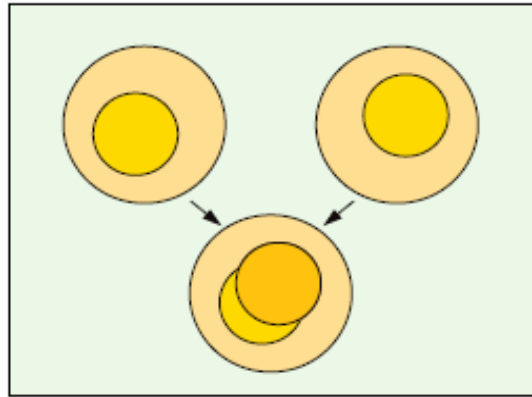


Εικόνα 8.6

Η μη κυκλικότητα του πυρήνα επηρεάζει τις απώλειες σε μια κόλληση

8.2.1.6 Μη-ομοκεντρικότητα πυρήνα ή/μανδύα

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



Εικόνα 8.7

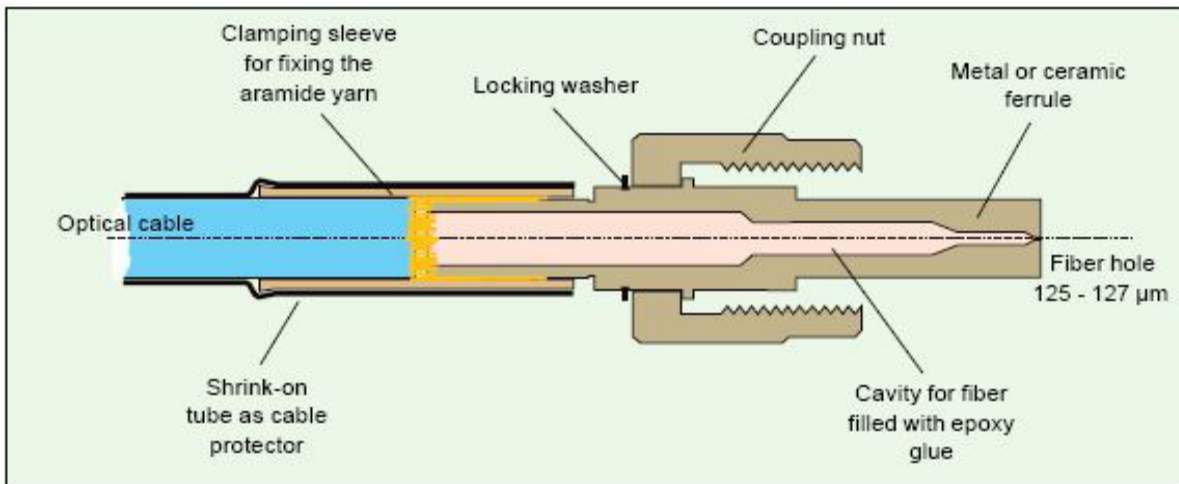
Παρουσίαση της κόλλησης δυο ινών, των οποίων οι πυρήνες δεν είναι ομόκεντροι

8.2.2 Απώλειες που οφείλονται σε connectors/κολλήσεις

Όταν δυο ίνες συνδέονται, η κόλληση θα συνεισφέρει κατά κάποιο τρόπο στην αύξηση της εξασθένισης. Η αύξησης 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.

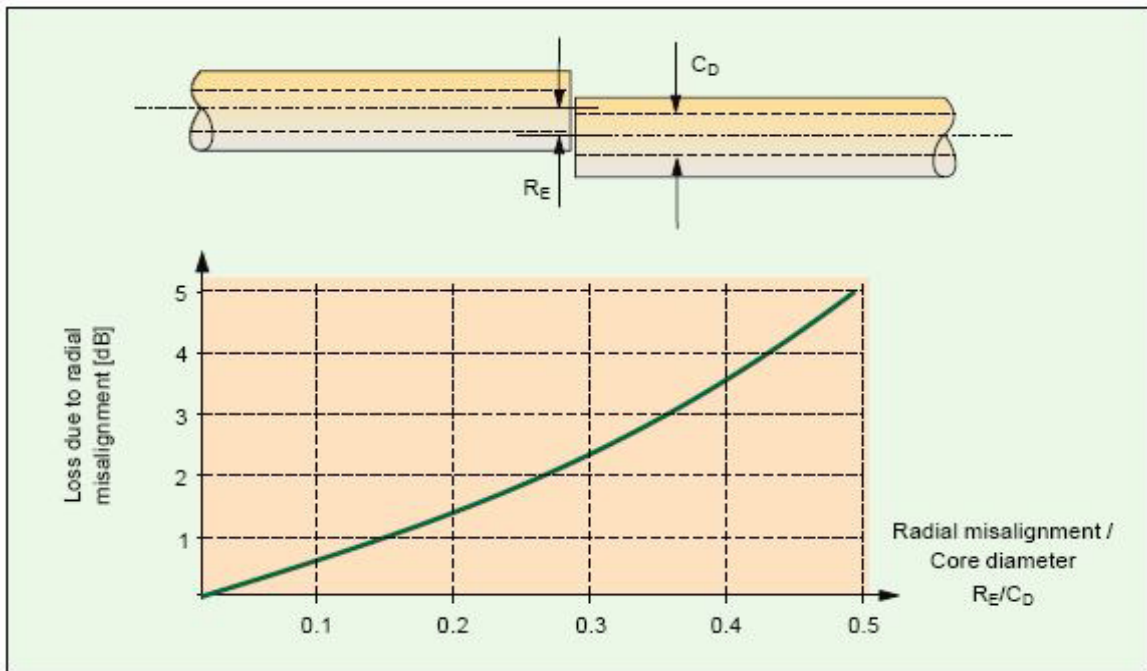


Εικόνα 8.8
Βασικά μέρη ενός SMA connector

8.2.2.1 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 RE εκφράζεται σε συνάρτηση με τη διάμετρο του πυρήνα της ίνας CD.

Από την επόμενη εικόνα (8.9) 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.

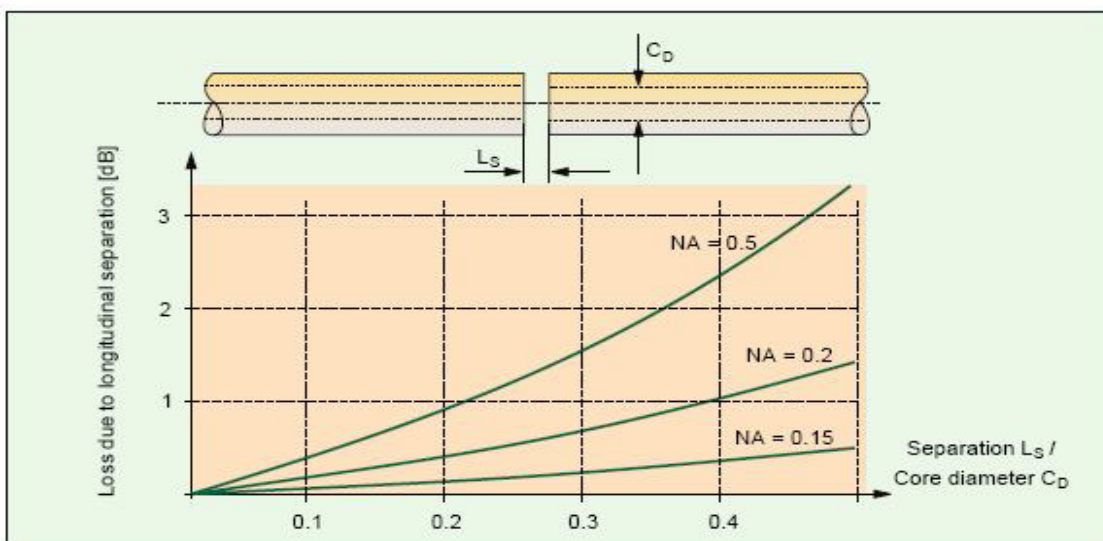


Εικόνα 8.9

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

8.2.2.2 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.

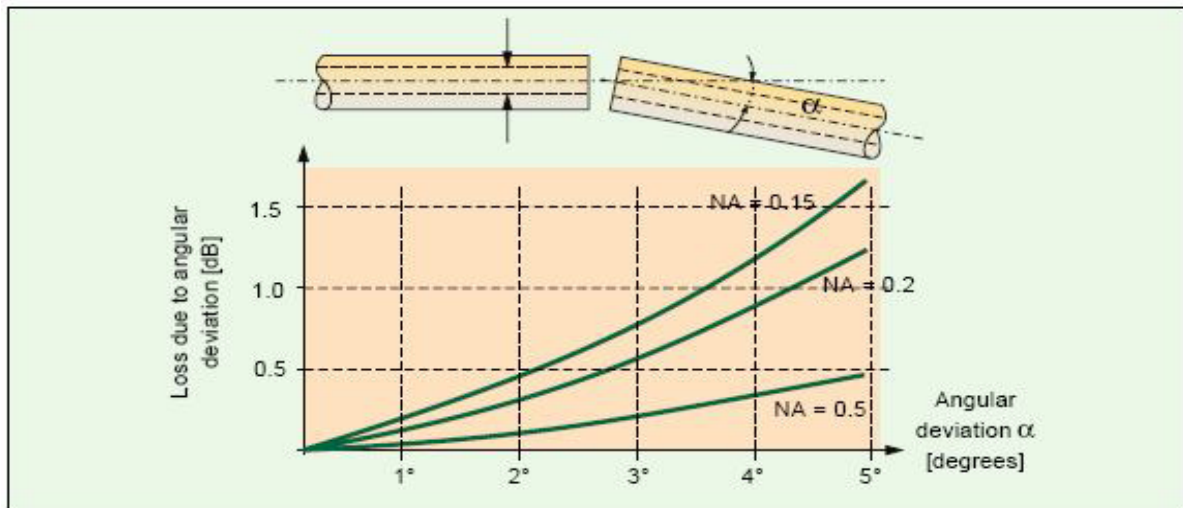


Εικόνα 8.10

Γραφική παράσταση των απωλειών που οφείλονται στο διάκενο

8.2.2.3 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.

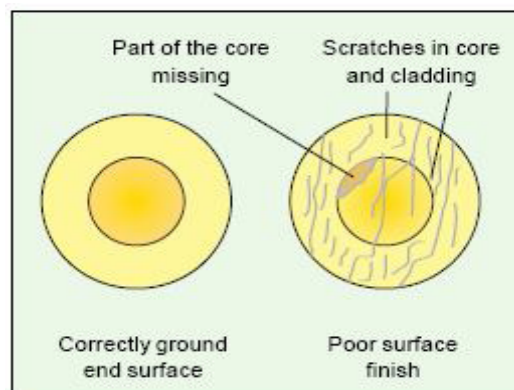


Εικόνα 8.11

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

8.2.2.4 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 γρατζουνιές. 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 8.12

Όταν η επιφάνεια δεν έχει καθαριστεί άριστα παρουσιάζονται απώλειες στην κόλληση

8.2.3 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.

8.2.4 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.

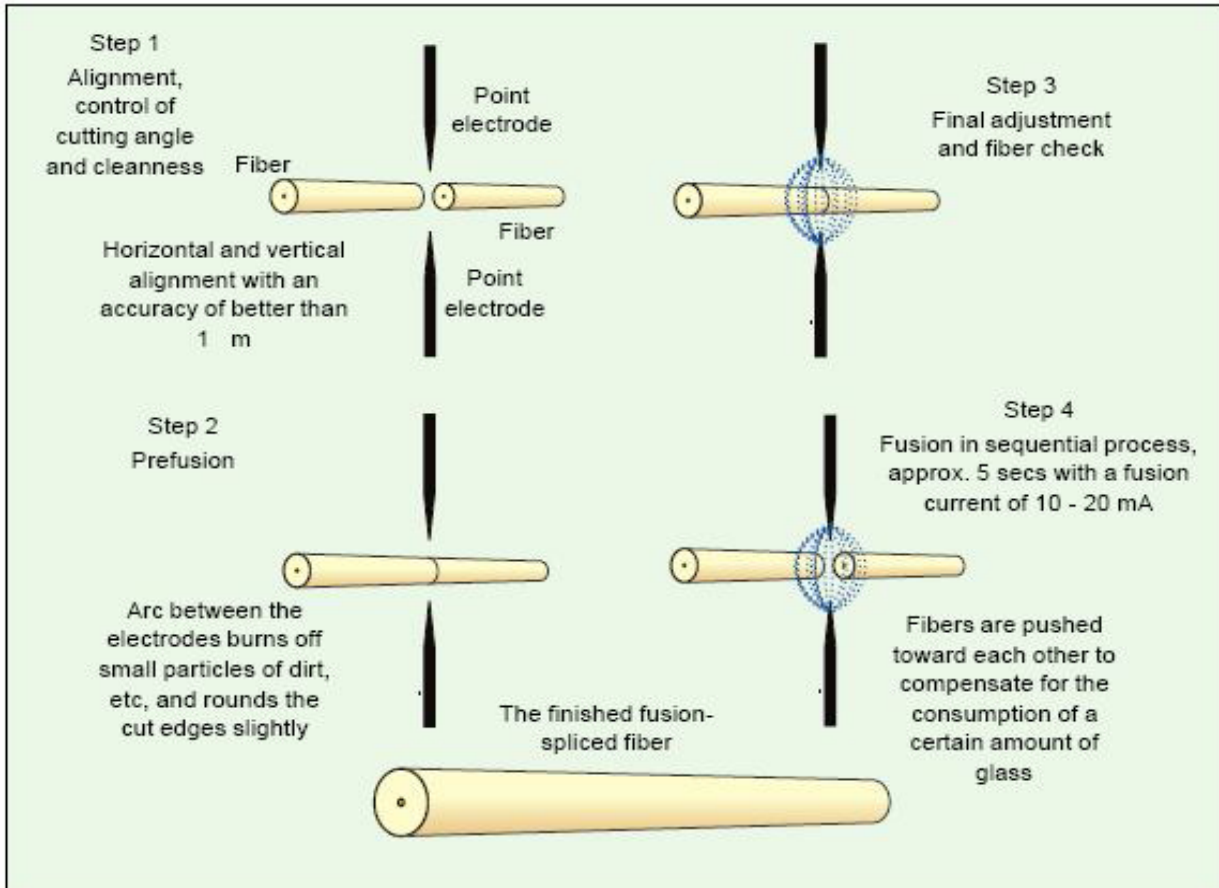


Εικόνα 8.13

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

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



Εικόνα 8.14

Απλοποιημένη αναπαράσταση των βασικότερων βημάτων της μεθόδου Fusion

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



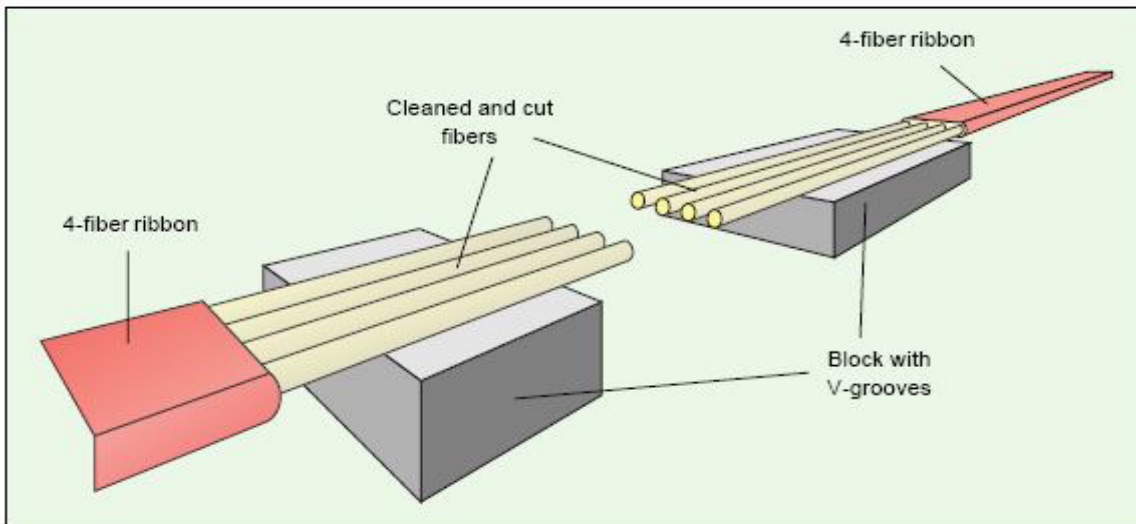
Εικόνα 8.15

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.

8.3.2 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 90ο. 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 ασφαρίζονται με ειδικά θερμο-συστελλόμενα μέλη.

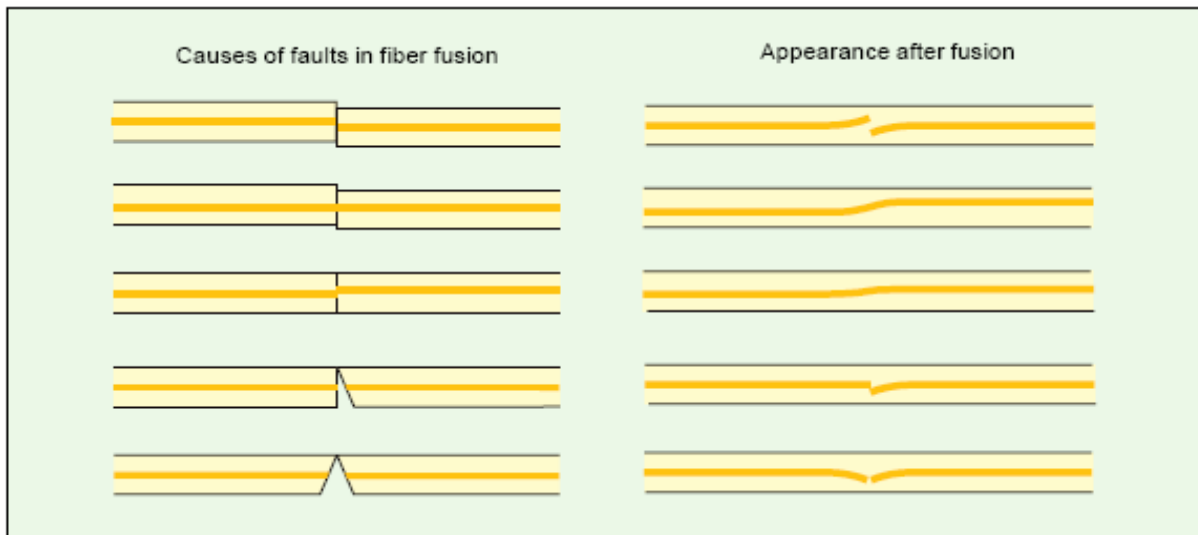


Εικόνα 8.16

Για την ευθυγράμμιση των ινών μιας κορδέλας χρησιμοποιείται «πίνακας» Vgroove

8.3.3 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.



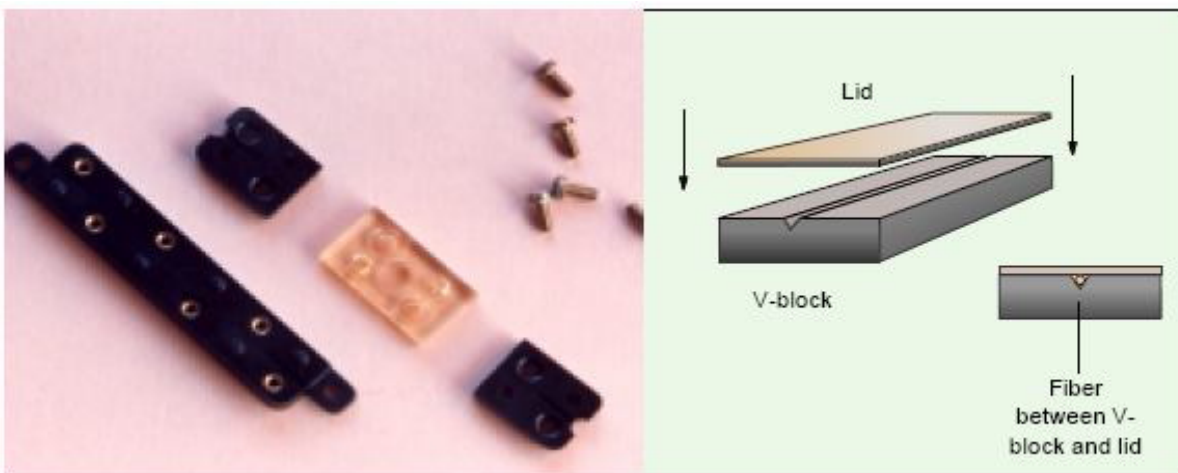
Εικόνα 8.17

Προβλήματα που παρουσιάζονται κατά τη διαδικασία Fusion splicing

8.4 Μηχανικές κολλήσεις

8.4.1 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).

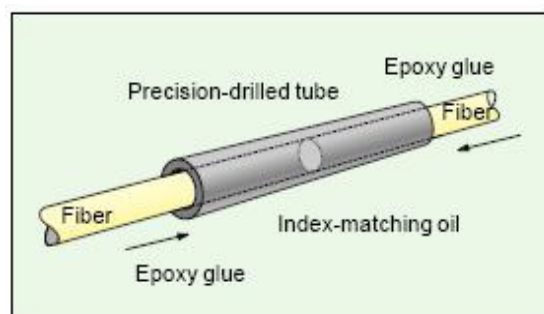


Εικόνα 8.18

Παρουσίαση της μεθόδου V-block για μηχανικές κολλήσεις ινών

8.4.2 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 ασφαλίζεται με ειδική κόλλα.



Εικόνα 8.19 Οι ίνες πιέζονται από δυο πλευρές και πλησιάζουν μέσα στο σωλήνα

8.4.3 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.

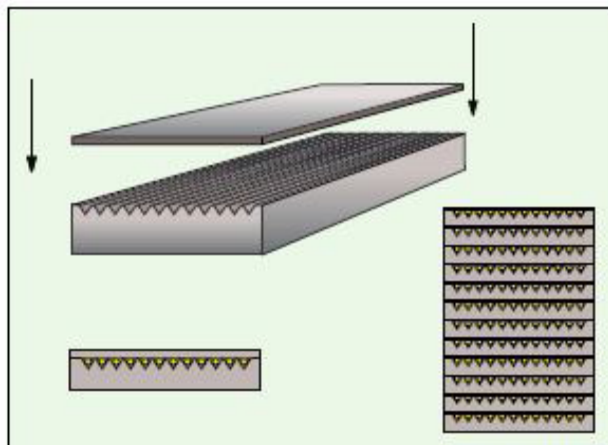


Εικόνα 8.20

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

8.4.4 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 8.21

Μέθοδος μηχανικής κόλλησης κορδελών ινών

8.5 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

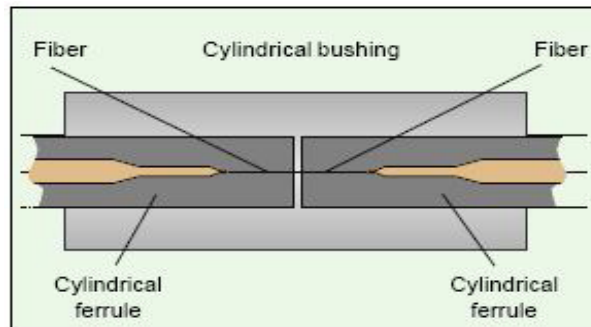
8.6 Τύποι Connectors

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

8.6.1 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 8.22
Μηχανική κόλληση με συνεκτικό δακτύλιο κυλινδρικού τύπου

8.6.1.1 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 8.23
LME connector
ένας από τους πρώτους connector για οπτικές ίνες

8.6.1.2 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 8.24

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

8.6.1.3 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).

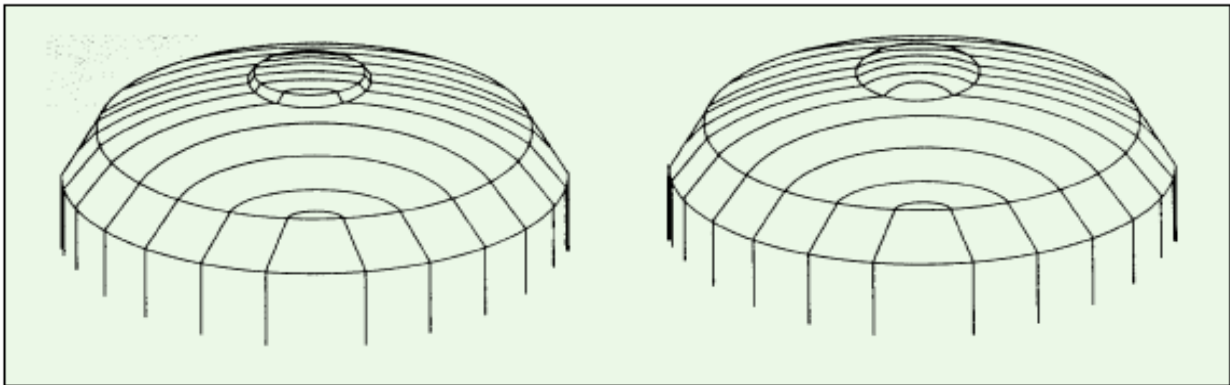


Εικόνα 8. 25

Διάφορα μέρη ενός FC connector

8.6.1.4 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.

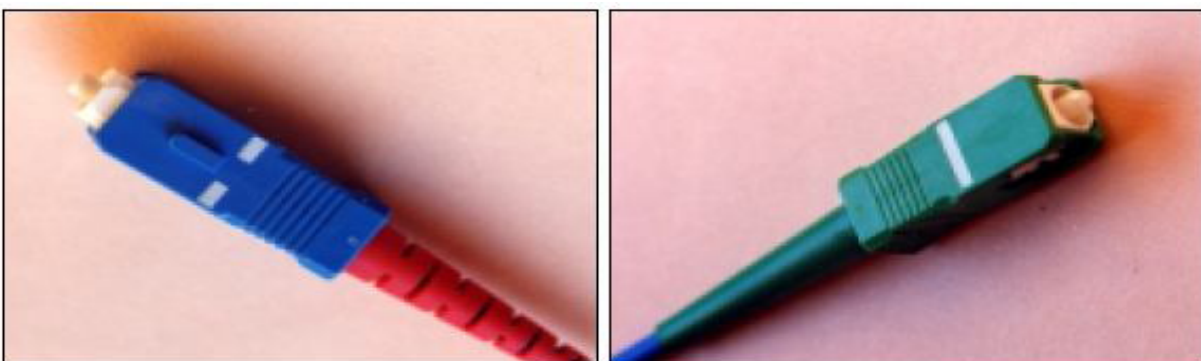


Εικόνα 8.26

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

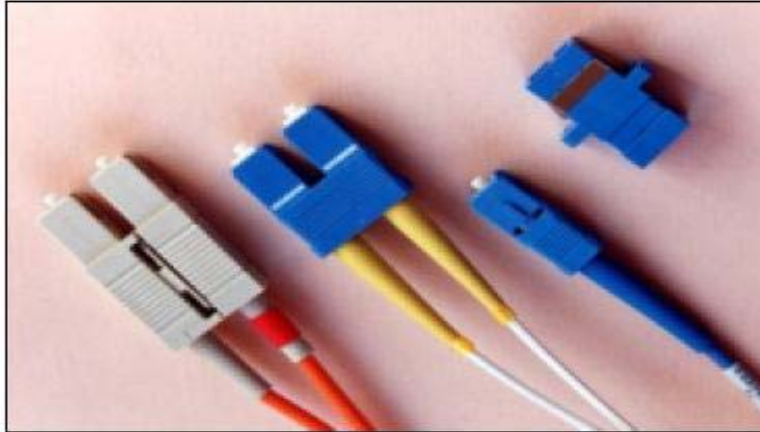
8.6.1.5 SC connector

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 8.27

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



Εικόνα 8.28

Διαφορετικοί SC connector που κυκλοφορούν στην αγορά

8.6.1.6 ST connector

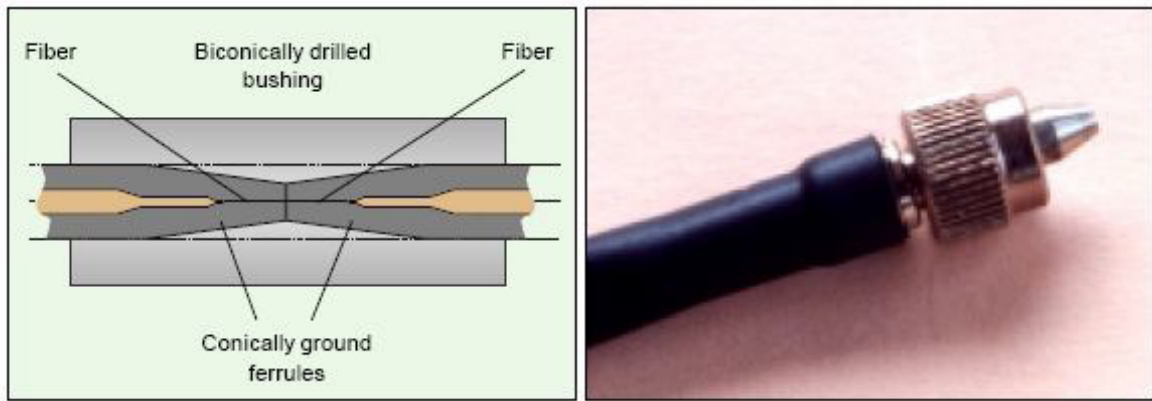
Οι ST connector κατασκευάζονται και για μονότροπες και για πολύτροπες ίνες. Αυτός ο τύπος connector παρέχει μεγάλη ευκολία στη χρήση του, αφού περιέχει ένα bayonet μέλος (σύνδεση και αποσύνδεση). Ο συνεκτικός δακτύλιος του είναι κεραμικό ή μεταλλικό/κεραμικό.



Εικόνα 8.29 ST connector με bayonet μέλος και κεραμικό συνεκτικό δακτύλιο

8.6.2 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.

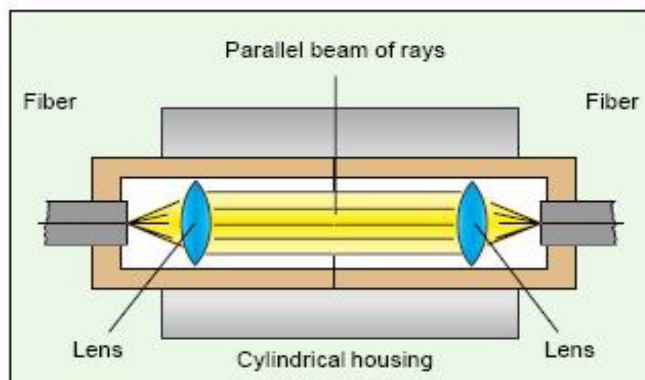


Εικόνα 8.30

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

8.6.3 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 8.31

Κόλληση με χρήση connector διαστελλόμενης δέσμης

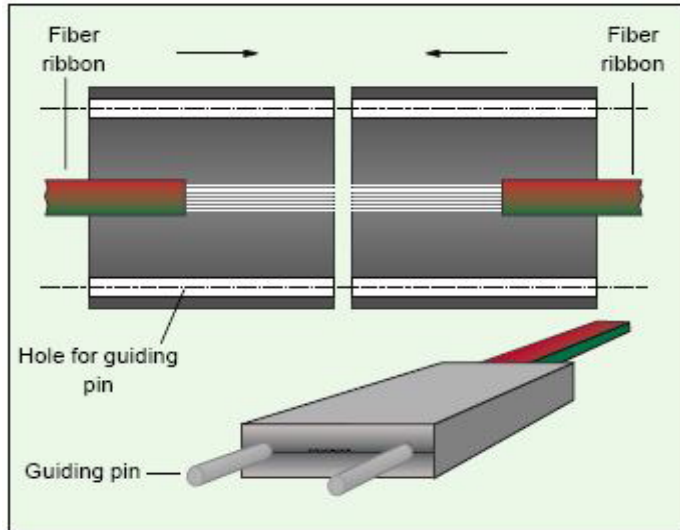


Εικόνα 8.32

Connector διαστελλόμενης δέσμης που χρησιμοποιείται κυρίως σε στρατιωτικές εφαρμογές

8.6.4 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.



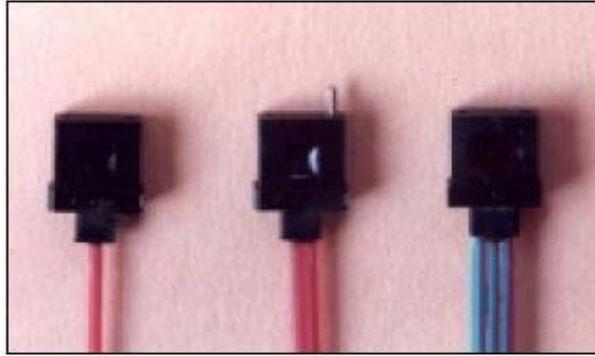
Εικόνα 8.33 Σχηματικό διάγραμμα κόλλησης κορδέλας ινών

8.6.4.1 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 8.34
MT connector κορδέλας 12 ινών



Εικόνα 8.35
MT connectors για κορδέλες με 4,8 και 12 ίνες

8.7 Ενώσεις (joint closures – « Μούφες »)

Μια προστατευτική ένωση για εξωτερικά καλώδια οπτικών ινών πρέπει :

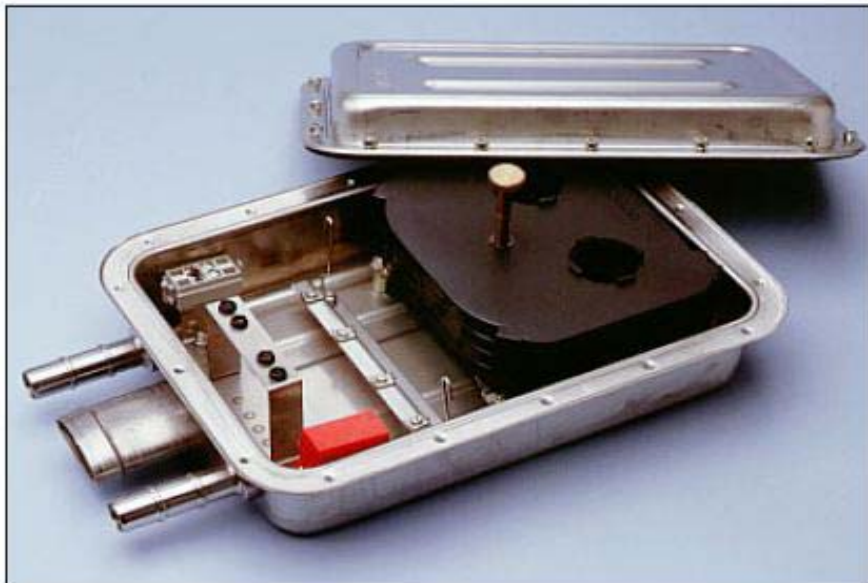
- να είναι εύκολη στην εγκατάστασή της
- να είναι εύκολη στο άνοιγμα και στο κλείσιμό της
- να παρέχει πολύ καλό επίπεδο μηχανικής προστασίας
- να παρέχει την ίδια προστασία για ενισχυμένα και μη καλώδια
- να παρέχει την ίδια προστασία για καλώδια διαφορετικών μεγεθών
- να προστατεύει καλώδια σε σωλήνες , 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 8.13
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) .



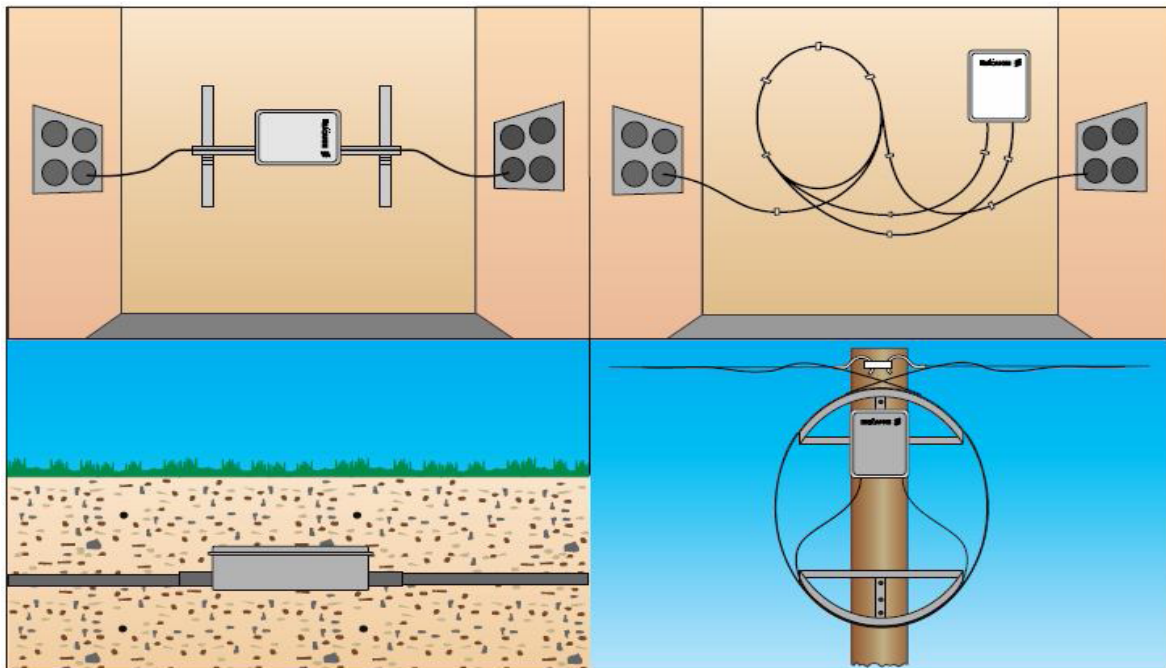
Εικόνα 8.14
Ένωση τύπου NCD 504

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 8.15
Ένωση τύπου NCD 505 1004



Εικόνα 8.16
Διαφορετικοί τρόποι εγκατάστασης οπτικών ενώσεων

8.8 Τερματικά και οπτικοί κατανομητές (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 .

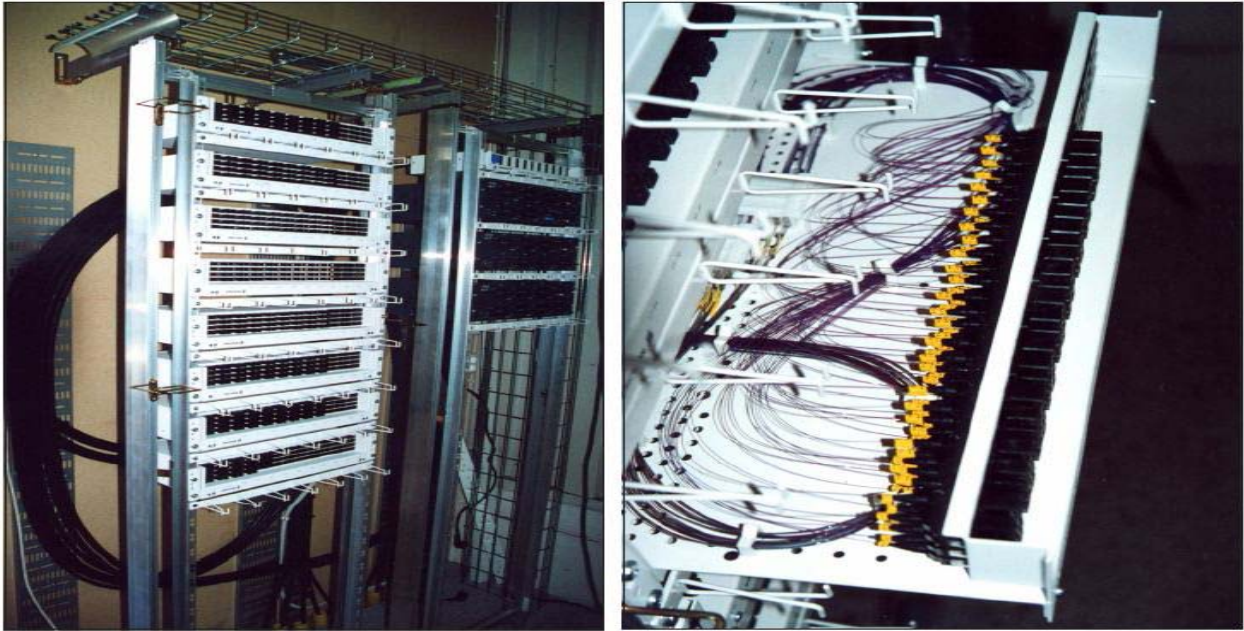
LT, ODF και FDF

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 8.18
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 κατανεμητή .



Εικόνα 8.19

Παράδειγμα rack κατανεμητών που μπορεί να εξυπηρετήσει τον τερματισμό ακόμα και 2000οπτικών ινών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΤΟ ΟΠΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ

Εισαγωγή

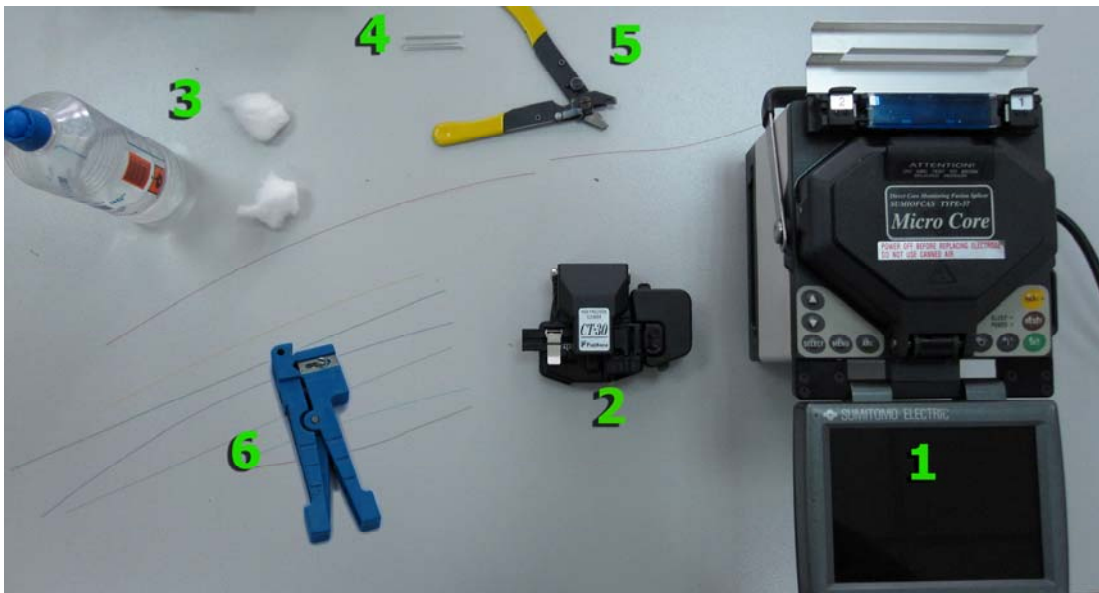
Στις κεφάλαιο αυτό θα έχουμε την δυνατότητα να παρακολουθήσουμε τις βασικές διαδικασίες κατασκευής και ελέγχου του οπτικού δικτύου σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Οργανισμού Τηλεπικοινωνιών Ελλάδος . Συγκεκριμένα πρώτα θα παρακολουθήσουμε βήμα προς βήμα την διαδικασία συγκόλλησης οπτικών ινών με την μέθοδο fusion splicing και μετά θα εξετάσουμε με την βοήθεια του οπτικού ανακλασίμετρου (OTDR) την εξασθένιση που προκύπτει σε μια οπτική ίνα λόγω καμψης . Στο τελευταίο κομμάτι του πειραματικού μέρους θα προσομοιώσουμε το κομμάτι του οπτικού δικτύου Κόρινθος-Τρίπολη με την βοήθεια της εφαρμογής LINKSIM .

8.9.1 Διαδικασία συγκόλλησης οπτικών ινών με την μέθοδο Fusion Splicing

Σε αυτό το σημείο θα παρακολουθήσουμε βήμα προς βήμα την μόνιμη κόλληση με την μέθοδο fusion splicing ενός καλωδίου οπτικών ινών με βάση τις προδιαγραφές του Ο.Τ.Ε.

Στην διαδικασία αυτή μας είναι απαραίτητα τα παρακάτω στοιχεία:

1. Κολλητήρι (Fusion splicer)
2. Κόφτης οπτικών ινών (cleaver)
3. Οινόπνευμα και βαμβάκι
4. Θερμοσυστελλόμενα σωληνάκια
5. Απογυμνωτής οπτικής ίνας
6. Απογυμνωτής σωληνίσκων χαλαρής δομής



Εικόνα 9.1 : Τα απαραίτητα εργαλεία μιας fusion splicing κόλλησης .

Ο κατασκευαστής του Fusion Splicer που χρησιμοποιήσαμε είναι η Ιαπωνική Εταιρία Sumitomo Electric η οποία ειδικεύεται στην κατασκευή εξοπλισμού οπτικών. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο SUMIOFCAS TYPE-37 DIRECT MICRO CORE MONITORING FUSION SPLICER

Specifications	
■ Applicable fiber	
Material	/Silica glass
Fiber type	/SMF, MMF, DSF, NZ-DSF, EDF, DCF, and others.
Fiber diameter	/125μm
Coating diameter	/0.25~0.9mm
Cleave length	/8~16mm (ø0.25mm), 16mm (except ø0.25mm)
■ Standard performance	
Splice loss (Our own identical fiber splicing)	
(Typical) / (SMF)0.02dB
(MMF)0.01dB
(DSF)0.05dB
Splice cycle time	/ Approx. 18 seconds
Heater cycle time	/ Approx. 75 seconds (With 60mm sleeve)
■ Splice programs	/ 48 (max.)
■ Heating programs	/ 10 (max.)
■ Functions	
• Splice data storage	(750 splicing)
• Fiber condition data storage	
• Screening of spliced portion	(Tension 1.96N(200gf))
• Built-in high speed heater	for thermal protection (Applicable for 40, 60mm sleeve)
• Automatic Arc test	
■ Dimensions	
Size	/ 150(W) x 150(D) x 176(H) mm
Weight	/ 4.1kg (With PS-65)
Monitor display	/ 5.6-inch large TFT color monitor
■ Power supply	/ AC 100-240V, (50/60Hz) DC 12V

SUMIOFCAS Type-37



Εικόνα 9.2 : Το fusion splicer SUMIOFCAS TYPE-37 της SUMIMOTO.
<http://www.sumitomelectric.com/products/fusionsplacers/type37microcore/>

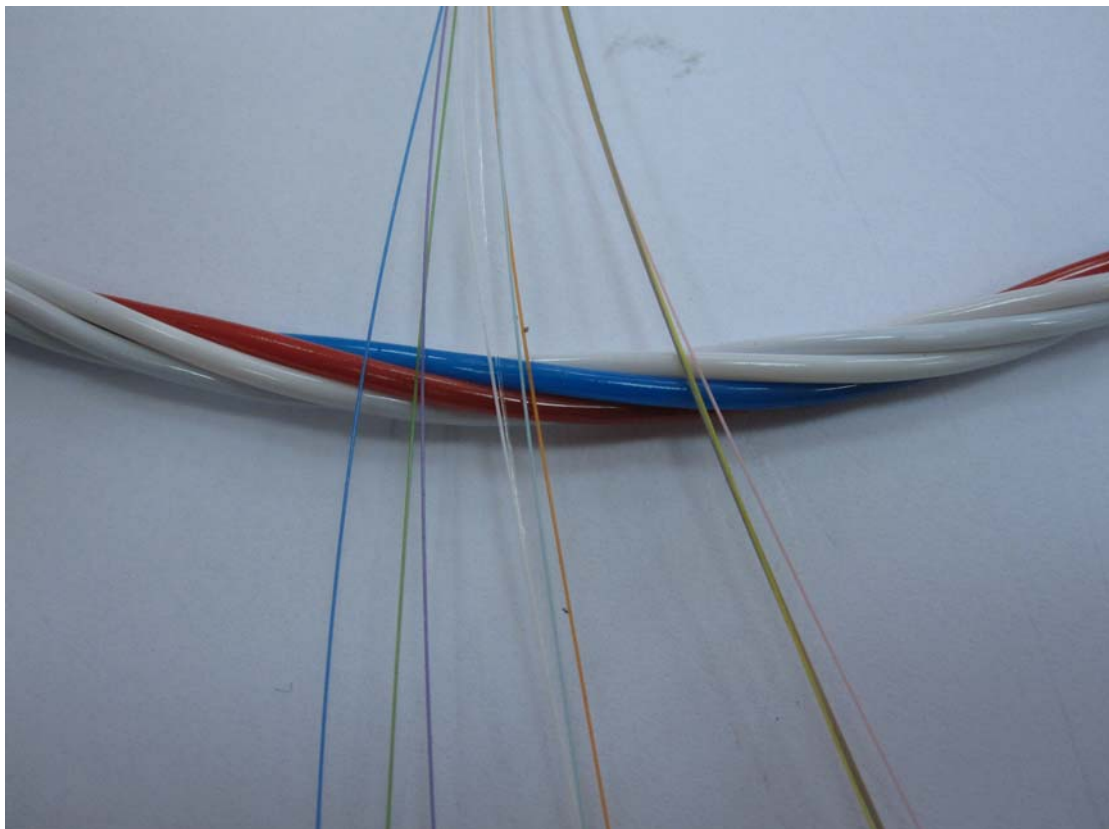
Για την υψηλής ακριβείας κοπή των οπτικών ινών χρησιμοποιήσαμε το εξειδικευμένο HIGH PRECISION CLEAVER CT-30 του Ιάπωνα κατασκευαστή FUJIKURA

SPECIFICATION	
Applicable fibers	Silica optical fiber
Bare fiber diameter	125 μ m
Cleaving angle	0.5 degrees at single fiber
Blade positions	3 height and 16 rotating positions
Blade life	48,000 fibers (1,000 fibers x 3 height x 16 positions)
Dimensions	69W x 82D x 41H (mm)
Weight	180g



Εικόνα 9.3: Το HIGH PRECISION CLEAVER CT-30 της FUJIKURA
<http://www.fujikura.com.sg/Files-Directory/CT-30.pdf>

Κάθε καλώδιο οπτικών ινών που χρησιμοποιείται από τον Ο.Τ. Ε αποτελείται από πλαστικούς σωληνίσκους χαλαρής δομής εντός των οποίων τοποθετούνται με περίσσεια μήκους μέχρι 12 οπτικές ίνες που περιβάλλονται από κατάλληλο πληρωτικό υλικό (jelly) για την προστασία τους από τυχόν διείδυση νερού στο καλώδιο.



Εικόνα 9.4: Σωληνίσκοι χαλαρής δομής και οπτικές ίνες

Με σκοπό τον μοναδικό προσδιορισμό κάθε οπτικής ίνας στο καλώδιο οι σωληνίσκοι είναι χρωματισμένοι με συγκεκριμένη διαδοχή χρωμάτων (π.χ. πρώτος σωληνίσκος κόκκινος, ο τελευταίος μπλε και οι υπόλοιποι λευκού χρώματος), ενώ σε κάθε σωληνίσκο οι οπτικές ίνες έχουν χρωματισμένη την πρωτεύουσα επικάλυψη τους ακολουθώντας συγκεκριμένη διαδοχή χρωμάτων η οποία επαναλαμβάνεται όπως στον πίνακα 1

1η ίνα: μπλε	5η ίνα: πράσινο	9η ίνα: τουρκουαζ
2η ίνα: κίτρινο	6η ίνα: βιολετί	10η ίνα: μαύρο
3η ίνα: κόκκινο	7η ίνα: πορτοκαλί	11η ίνα: καφέ
4η ίνα: λευκό	7η ίνα: γκρι	12η ίνα: ροζ

Πινάκας 9.1: Χρωματοκώδικας προτεραιότητας οπτικών ινών

<http://www.fulgor.gr/>

Γνωρίζοντας πλέον από ποια ίνα πρέπει να ξεκινήσουμε χρησιμοποιούμε τον απογυμνωτή για να αφαιρέσουμε το περίβλημα της ίνας. Απογυμνώνουμε την ίνα από το περίβλημα της τουλάχιστον 20mm και χρησιμοποιώντας καθαρό οινόπνευμα και βαμβάκι καθαρίζουμε το απογυμνωμένο κομμάτι απομακρύνοντας υπολείμματα του περιβλήματος. Τοποθετούμε την απογυμνωμένη και καθαρή ίνα στην στενότερη αυλάκωση του cleaver προσέχοντας το σημείο που ξεκινά το περίβλημα να είναι στην ένδειξη 12 της κλίμακας που έχει το cleaver. Αυτό γίνεται με σκοπό να κοπεί η ίνα ακριβώς 12mm από το σημείο που αρχίζει το περίβλημα της



Εικόνα 9.5 : Τα βήματα της διαδικασίας κοπής της οπτικής ίνας.

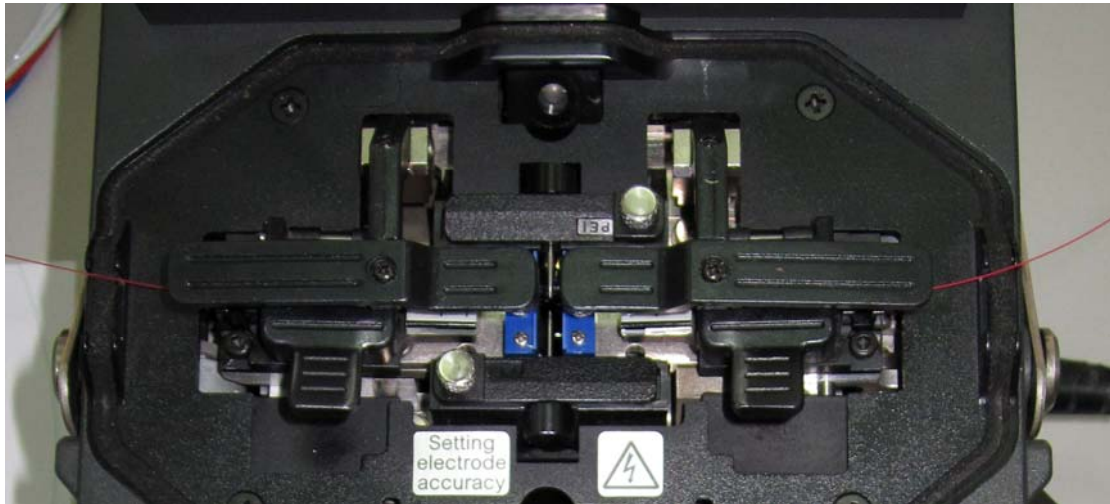
<http://www.fujikura.com.sg/cleaver.htm>

Εφαρμόζοντας πλέον και το τρίτο βήμα (εικόνα) έχουμε το ένα από τα δυο άκρα που θέλουμε να κολλήσουμε έτοιμο προς συγκόλληση.



Εικόνα 9.6: Το μηχάνημα υψηλής ακρίβειας κοπής οπτικών ινών της FUJIKURA.

Αφού επαναλάβουμε την ίδια διαδικασία και για το άλλο άκρο που θέλουμε να συγκολλήσουμε είμαστε έτοιμοι για την συγκόλληση. Τοποθετούμε τις κομμένες με ακρίβεια και καθαρές ίνες στις θέσεις αριστερά και δεξιά του splicer προσέχοντας πάλι το τέλος του περιβλήματος την ίνα να βρίσκεται στην βαθμίδα 12 της κλίμακας του splicer και κλείνουμε τις ειδικές ασφάλειες.



Εικόνα 9.7: Οι οπτικές μας ίνες έτοιμες προς συγκόλληση

Αφού βεβαιωθούμε πως έχουμε κάνει όλα τα παραπάνω βήματα σωστά κλείνουμε το προστατευτικό καπάκι του splicer και πατάμε το πλήκτρο SET.



Εικόνα 9.8: Το fusion splicer της SUMIMOTO

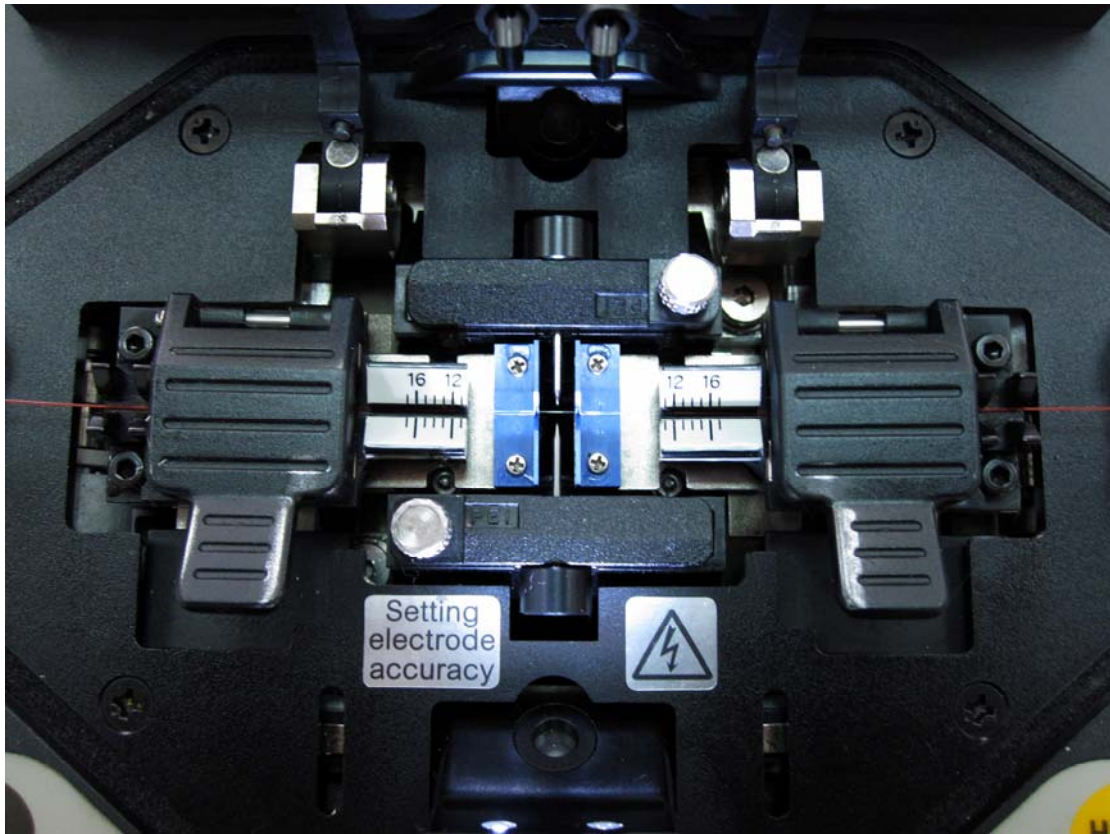
Στην εικόνα 9.9 βλέπουμε διαδοχικά στιγμιότυπα κατά την διάρκεια της διαδικασίας fusion splicing.



Εικόνα 9.9: Διαδοχικά στιγμιότυπα της οθόνης του fusion splicer από τα στάδια συγκόλλησης της οπτικής ίνας

Στην πρώτη σειρά βλέπουμε τα άκρα των οπτικών ινών που πρόκειται να κολληθούν. Στο στιγμιότυπο 3 οι ίνες έχουν ευθυγραμμιστεί με πολύ μεγάλη ακρίβεια από το splicer και έχει υπολογιστεί η γωνιακή απόκλιση της κοπής για κάθε ίνα. Παρατηρούμε στην αριστερή ίνα η γωνιακή απόκλιση είναι 1.27 μοίρες ενώ στην δεξιά 0.67. Οι τιμές αυτές είναι με σημείο αναφοράς τον κατακόρυφο άξονα και αφορούν μόνο τον πυρήνα των ινών.

Στην δεύτερη σειρά όπως βλέπουμε στο στιγμιότυπο 4 οι ίνες έχουν ευθυγραμμιστεί και πλησιάζουν μεταξύ τους ώστε να συγκολληθούν. Στα στιγμιότυπα 5,6 και 7 βλέπουμε την διαδικασία της θερμοκόλλησης των ινών. Στο στιγμιότυπο 8 βλέπουμε την τελική ομογενοποιημένη μορφή της πλέον μιας ίνας. Κοιτώντας στο μόνιτορ με γυμνό μάτι δεν παρατηρούμε καμία ένωση αν και η εικόνα που βλέπουμε είναι χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από την πραγματική. Τέλος στο στιγμιότυπο 9 βλέπουμε το σημείο που έχει η κόλληση από οριζόντια και από καθετή οπτική γωνία καθώς και την εκτιμωμένη εξασθένιση της κόλλησης που μόλις κάναμε. Στην συγκεκριμένη η εκτιμωμένη εξασθένιση είναι 0.01dB. Για να είναι αποδεκτή μια κόλληση με την μέθοδο fusion splicing πρέπει να έχει εκτιμωμένη εξασθένιση μικρότερη ή ίση με 0.05dB. Σε περίπτωση που ξεπεραστεί η ίνα πρέπει να κοπεί και όλη η διαδικασία να επαναληφθεί από την αρχή.



Εικόνα 9.10 : Η συγκολλημένη πλέον ίνα

Μέχρι τώρα περιγράψαμε την διαδικασία συγκόλλησης στην περίπτωση που η κοπή των ινών με το HIGH PRECISION CLEAVER CT-30 είναι ιδανική. Αρκετά συχνά η κοπή της ίνας δεν είναι μέσα στα αποδεκτά όρια με αποτέλεσμα να μην μπορεί να πραγματοποιηθεί η κόλληση από το splicer. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε την περίπτωση που η μια από τις δυο ίνες που πρόκειται να συγκολληθούν δεν έχει κοπεί σωστά.



Εικόνα 9.11: Μήνυμα λάθους από το fusion splicer λόγω σφάλματος κοπής της ίνας

Σε αυτήν την περίπτωση το fusion splicer μας ειδοποιεί πως υπάρχει σφάλμα κοπής στην αριστερή ίνα ενώ ταυτόχρονα μας ενημερώνει για τις γωνιακές αποκλίσεις και των δύο ινών.

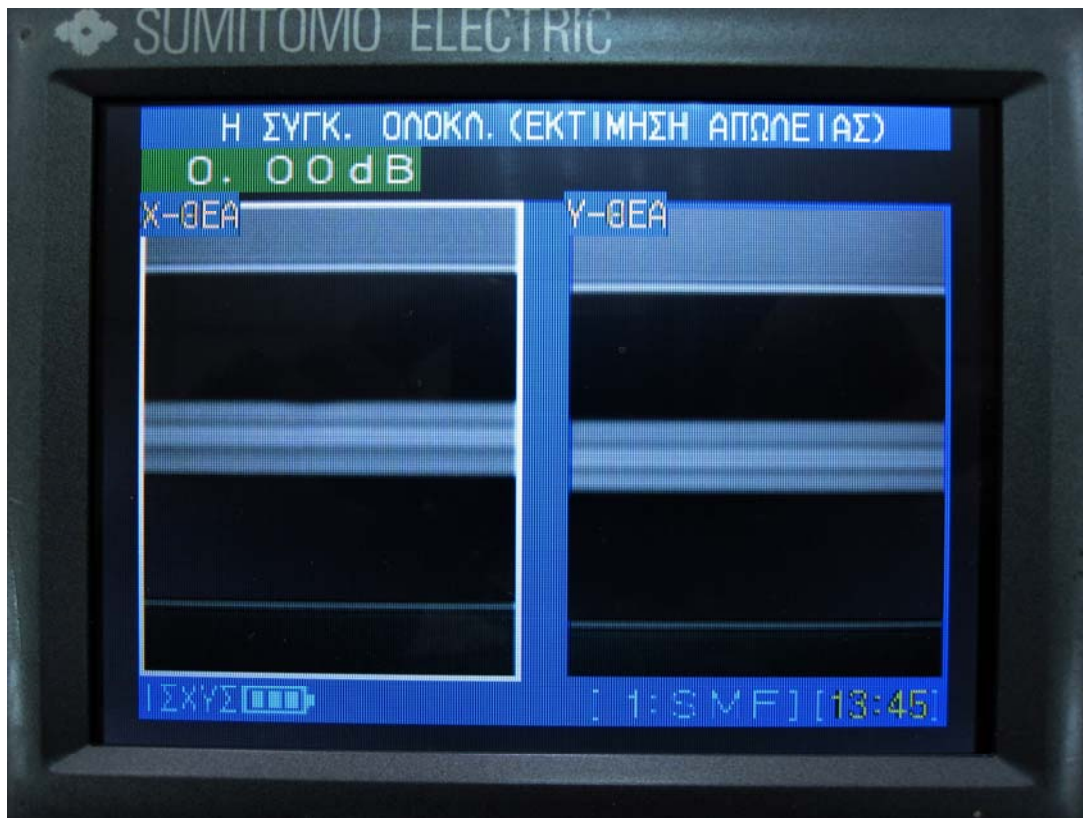
Μια άλλη περίπτωση εμφάνισης λάθους είναι όταν προσπαθήσουμε να κολλήσουμε 2 ίνες διαφορετικού τύπου (π.χ. μονότροπη με πολύτροπη) ή όταν οι ίνες έχουν διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά(διαφορετικές διαμέτροι πυρήνα).



Εικόνα 9.12: Μήνυμα λάθους από το fusion splicer λόγω διαφοράς του τρόπου πεδίου

Στην εικόνα 9.12 παρατηρούμε ότι οι δυο ίνες αν και έχουν ίδιες εξωτερικές διαστάσεις και ίσες γωνιακές αποκλίσεις έχουν αρκετά διαφορετικές διαμέτρους πυρήνα. Αν και το μήνυμα λάθους δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα διαπιστώνουμε πως το fusion splicer δεν μας επιτρέπει την συγκόλληση των οπτικών ινών.

Στην καλύτερη των περιπτώσεων και αν έχουν γίνει όλα τα βήματα σωστά με την μέθοδο συγκόλλησης fusion splicing μπορούμε να επιτύχουμε συγκόλληση με μηδενική εξασθένιση. Βεβαία για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να έχουμε και αρκετή δόση τύχης.



Εικόνα 9.13: Συγκόλληση ίνας με εκτιμωμένη απώλεια 0.00dB

Εφόσον η συγκολλημένη μας πλέον ίνα δεν ξεπερνά την μέγιστη επιτρεπόμενη εξασθένιση (0.05dB) μπορούμε να προχωρήσουμε στο επόμενο βήμα. Σε αυτό το σημείο της διαδικασίας η ίνα αφού περάσει μέσα από ένα θερμοσυστελλόμενο σωληνάκι τοποθετείται στην ειδική θυρίδα του fusion splicer και πιέζουμε το κουμπί HEAT.



Εικόνα 9.14: Η θυρίδα εφαρμογής των θερμοσυστελλόμενων σωληνίσκων

Τα θερμοσυστελλόμενα σωληνάκια έχουν την ιδιότητα να συστέλλονται μόλις θερμανθούν. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούμε καινούργιο περίβλημα στα σημεία της ίνας όπου νωρίτερα είχαμε απογυμνώσει για να γίνει η κοπή.



Εικόνα 9.15 : Ο θερμοσυστελλόμενος σωληνίσκος πριν και μετά την εφαρμογή

Μόλις τελειώσει και η εφαρμογή του θερμοσυστελλόμενου σωληνίσκου η διαδικασία της συγκόλλησης με την μέθοδο fusion splicing έφτασε στο τέλος της.

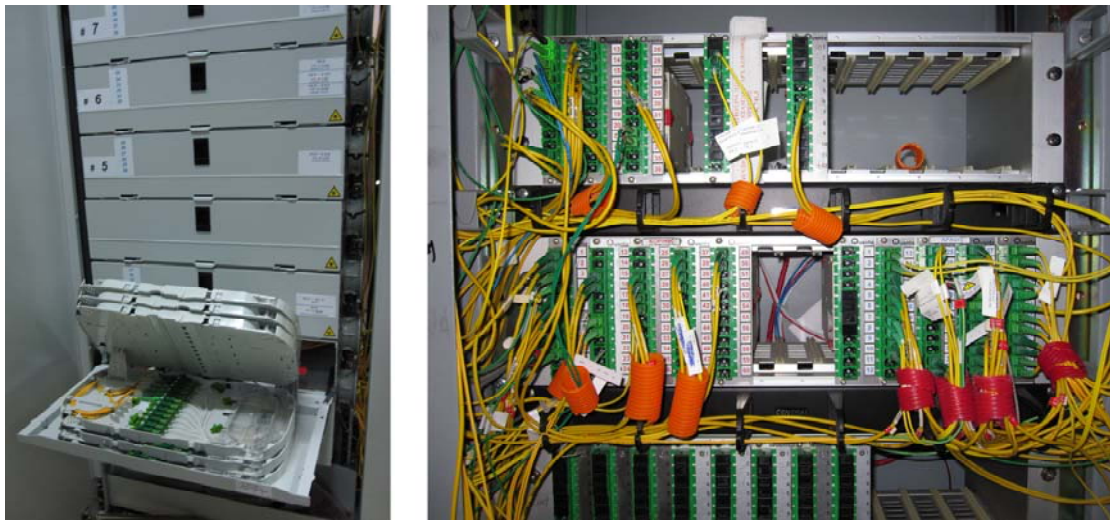
9.2 Έλεγχος για απώλειες με χρήση Οπτικού ανακλασίμετρου (OTDR)

Μόλις τελειώσει η διαδικασία συγκόλλησης πρέπει οι οπτικές ίνες που έχουν πλέον συγκολληθεί να αποθηκευτούν με κάποια λογική ώστε να προφυλάσσονται από διάφορα φυσικά φαινόμενα και να είναι οργανωμένες και με συγκεκριμένη διάταξη ώστε μελλοντικά αν χρειαστεί να είναι εύκολα προσβάσιμες. Η μέθοδος fusion splicing χρησιμοποιείται είτε για κατασκευή οπτικών συνδέσμων (μούφες) ανά συγκεκριμένες αποστάσεις οπτικού δικτύου είτε για τερματισμό σε οπτικούς κατανεμητές.

Στην εικόνα 9.16 βλέπουμε πως ακριβώς είναι μια μουφα ενώ στην εικόνα 9.17 πως είναι ένας οπτικός κατανεμητής παλιότερα και στις μέρες μας.

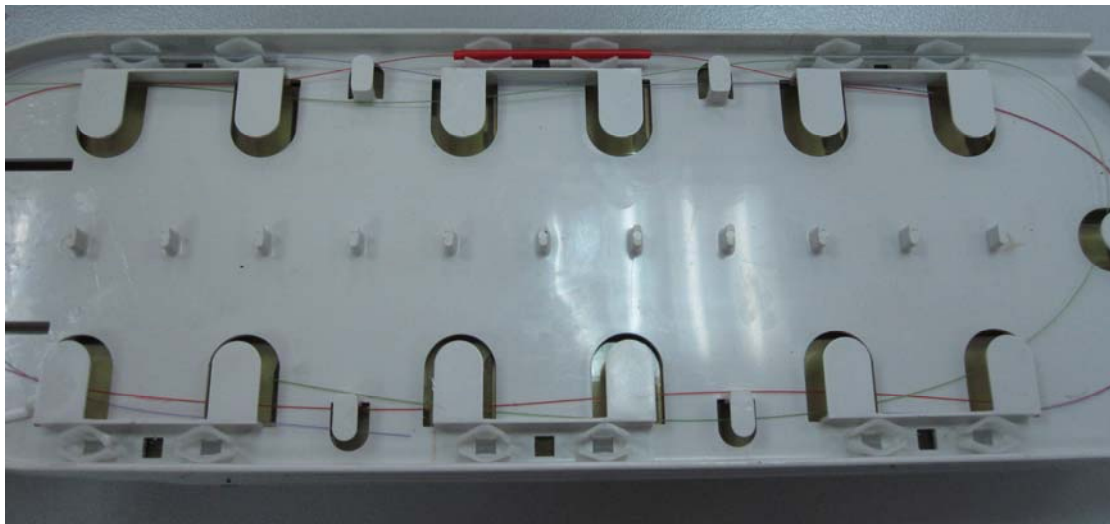


Εικόνα 9.16: Μουφα (joint closure) της εταιρείας RAYCAP

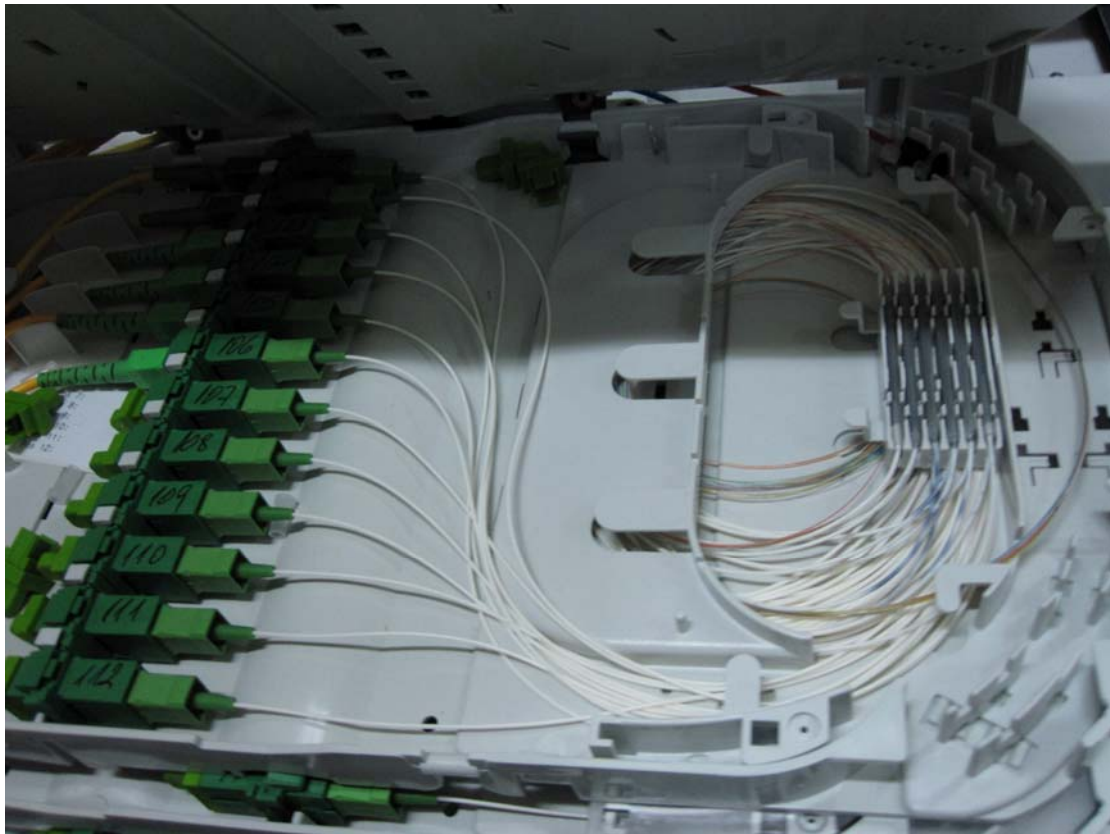


Εικόνα 9.17: Οπτικός καταμεμητής νέου (αριστερά) και παλαιού (δεξιά) τύπου

Είτε πρόκειται να τοποθετηθούν σε σύνδεσμο οπτικών ινών(μούφια) είτε σε οπτικό καταμεμητή οι ίνες πρέπει να τοποθετηθούν με μεγάλη προσοχή στις κασέτες και με τρόπο τέτοιο ώστε να μην εμφανίζονται κάμψη η οποία συνεπάγεται εξασθένιση.



Εικόνα 9.18: Κασέτα μούφας



Εικόνα 9.19 : Κασέτα οπτικού κατανομής νέου τύπου

Η κάμψη των οπτικών ινών είναι μια σοβαρή αιτία της εξασθένησης που παρουσιάζεται στα οπτικά δίκτυα. Σε αυτό το σημείο θα εξετάσουμε την εξασθένηση αυτή με την βοήθεια του παρακάτω εξειδικευμένου τεχνικού εξοπλισμού :

- **Οπτικό ανακλασίμετρο Agilent/HP OTDR E6000b.** Το οπτικό ανακλασίμετρο E6000b mini-OTDR χρησιμοποιείται από εξειδικευμένο τεχνικό προσωπικό για τις μετρήσεις των οπτικών ινών με σκοπό την διάγνωση βλαβών και την εμποπτεία της καλής λειτουργίας του οπτικού δικτύου

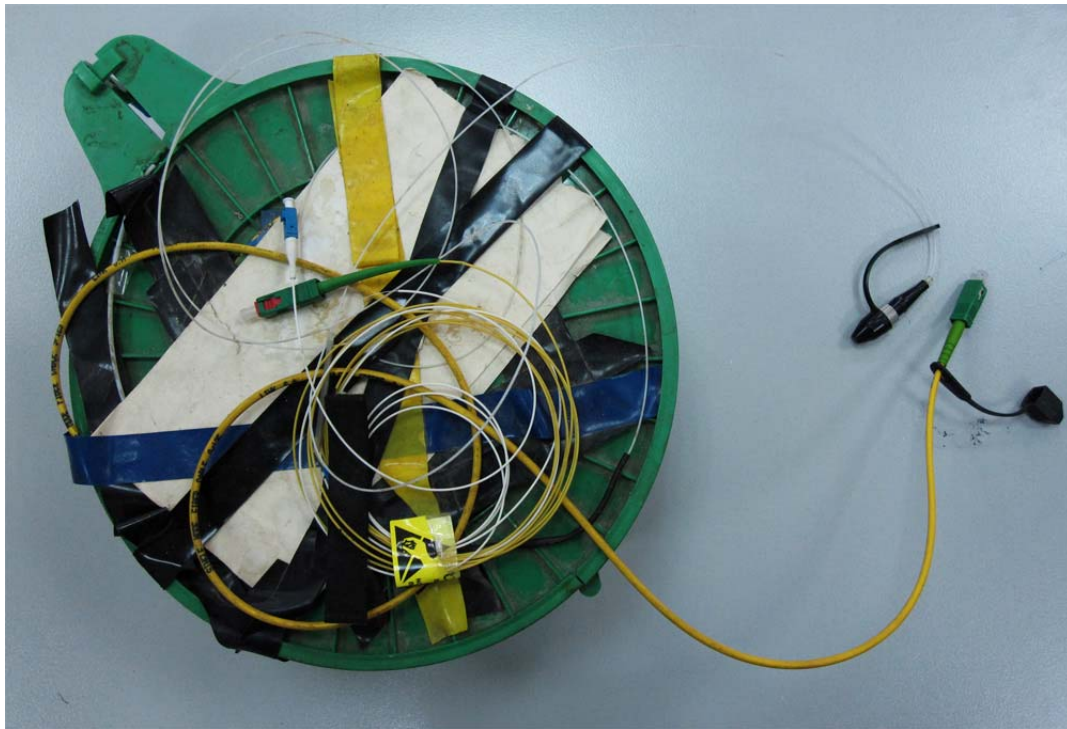


Central Wavelength	1310 nm ± 25 nm/1550 nm ± 25 nm			
Applicable Fiber	single mode			
Pulsewidth	10 ns	100 ns	1 μs	10 μ
Dynamic Range ¹ [dB]	19/17	24/22	30/29	35/3
Event Deadzone ²	3 m			
Attenuation Deadzone ³	10/12m			

Εικόνα 9.20 : Το οπτικό ανακλασίμετρο OTDR E6000b της AGILENT

- **Περίσσεια 500μ οπτικής ίνας.**

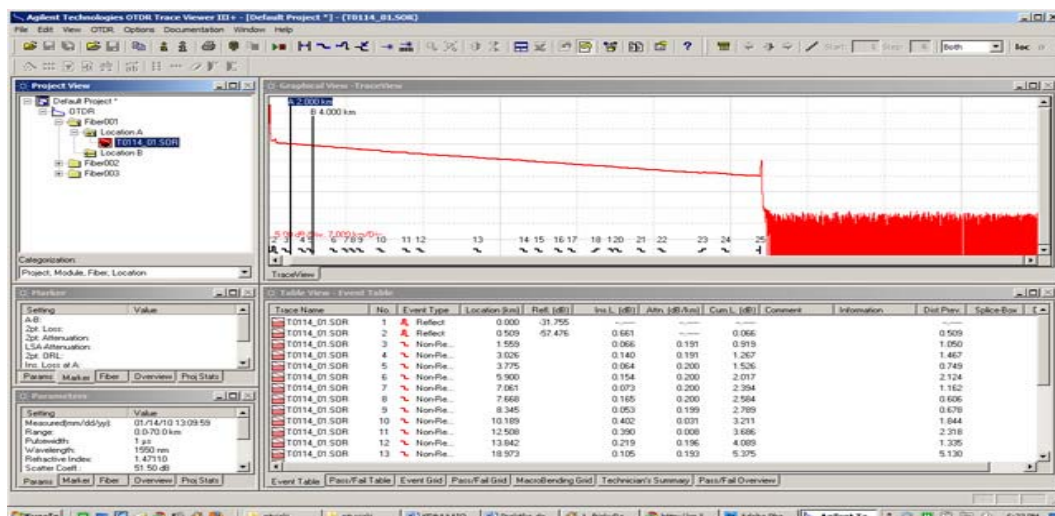
Η περίσσεια των 500 μέτρων οπτικής ίνα χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου θέλουμε να μετρήσουμε ένα σημείο του δικτύου που βρίσκεται σε μικρή απόσταση από το mini-OTDR. Αυτό γίνεται επειδή ο παλμός λέιζερ που στέλνει το οπτικό ανακλασίμετρο χρειάζεται κάποιες εκατοντάδες μέτρα για να σταθεροποιηθεί. Το οπτικό ανακλασίμετρο έχει εύρος λειτουργίας περίπου 100κμ.



Εικόνα 9.21: Η περίσσεια των 500 μέτρων οπτικής ίνας

- **Εφαρμογή OTDR Trace Viewer III**

Η εφαρμογή OTDR Trace Viewer III έχει αναπτυχτεί από την κατασκευάστρια εταιρία του E6000B OTDR Agilent Technologies που ειδικεύεται σε εξοπλισμό οπτικών δικτύων. Με την εφαρμογή αυτή έχουμε την δυνατότητα να μελετήσουμε και να παρατηρήσουμε στον ηλεκτρονικό μας υπολογιστή τα δεδομένα των μετρήσεων που έχουμε λάβει από το οπτικό ανακλασίμετρο.



Εικόνα 9.21 : Η εφαρμογή OTDR Trace Viewer III

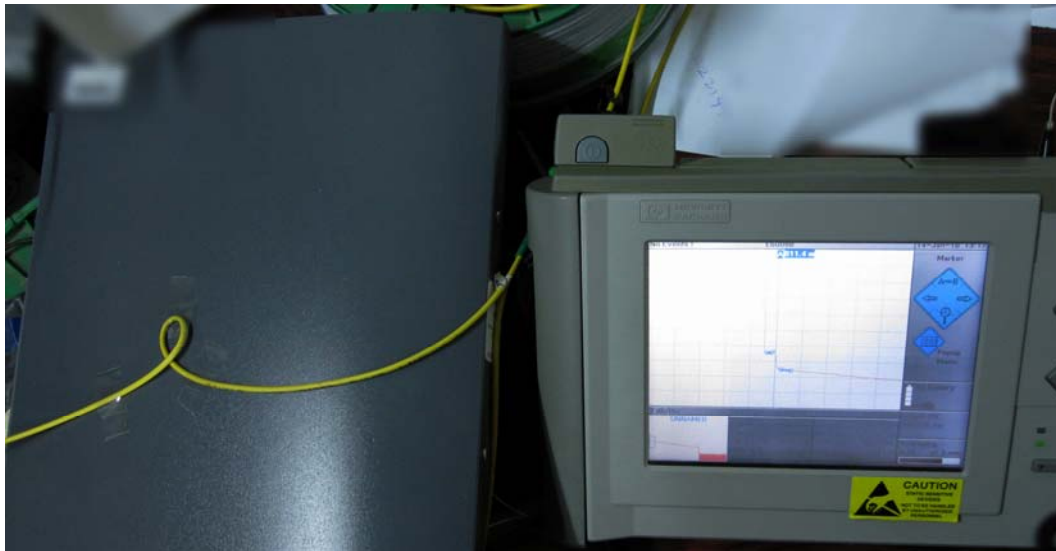
Μετά την σύντομη αναφορά στο εξοπλισμό που χρησιμοποιήσαμε μπορούμε να προχωρήσουμε στις μετρήσεις του δικτύου με την χρήση του OTDR.

Συνδέουμε την άκρη της περίσσειας της οπτικής ίνας στην είσοδο του οπτικού ανακλασίμετρου και την άλλη άκρη της περίσσειας σε μια μη ενεργή (dark) υποδοχή του οπτικού κατανομητή. Σε πρώτη φάση θα μετρήσουμε την εξασθένιση που παρουσιάζεται στην ίνα χωρίς να έχουμε κάμψη σε κάποιο σημείο της. Είναι λογικό να υπάρχει αρκετή εξασθένιση καθώς στο σημείο που μετράμε υπάρχουν δυο διαδοχικές μηχανικές ενώσεις της ίνας με FC-PC και SC connectors.



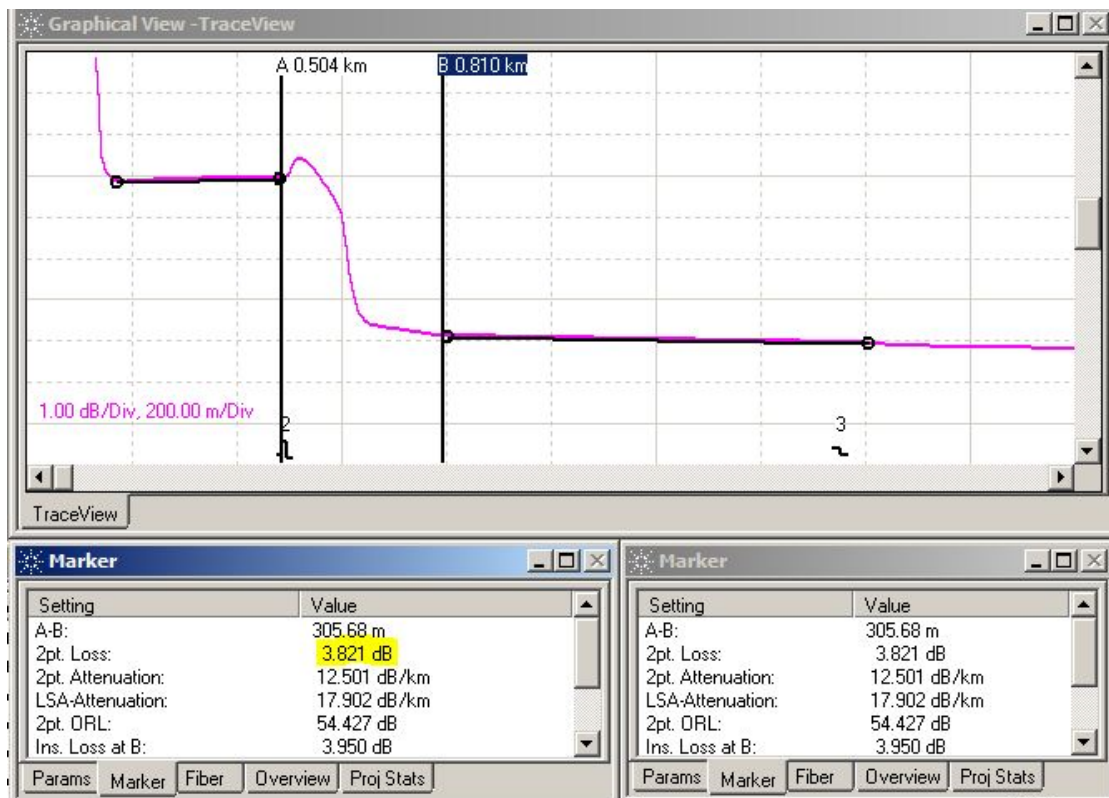
Εικόνα 9.22 : Γραφική παράσταση εξασθένισης οπτικής ίνας χωρίς κάμψη

Στην εικόνα 9.22 παρατηρούμε πως η εξασθένιση που παρουσιάζεται από τους connectors είναι περίπου 0.73dB. Πριν την επόμενη μέτρηση κάμπουμε την ίνα σε ένα σημείο δημιουργώντας ένα δακτύλιο διαμέτρου ενός εκατοστού όπως στην εικόνα 9.23.



Εικόνα 9.23 : Μέτρηση οπτικού ανακλασίμετρου με κάμψη της ίνας

Επαναλαμβάνουμε την μέτρηση που κάναμε στο προηγούμενο βήμα και παίρνουμε το γράφημα που απεικονίζεται στην εικόνα 9.24.



Εικόνα 9.24 : Γραφική παράσταση της εξασθένησης της ίνας με κάμψη

Παρατηρούμε ότι η κάμψη της οπτικής ίνας οδήγησε σε εξασθένιση της τάξεως των 3.8dB. Αν αφαιρέσουμε τα 0.7dB που οφείλονται στους connectors προκύπτει απώλεια της τάξεως των 3 περίπου dB. Στην εικόνα 25 βλέπουμε και τα δυο ίχνη των μετρήσεων (με κάμψη και χωρίς).



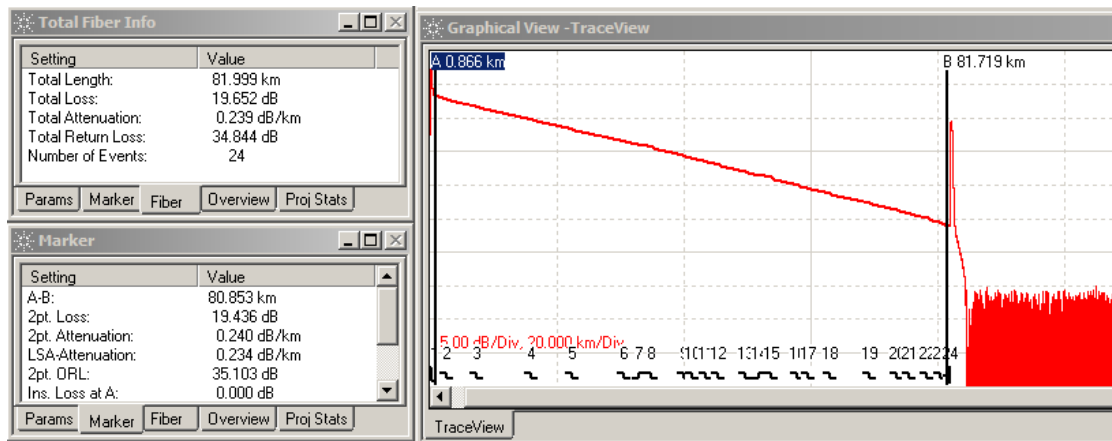
Εικόνα 9.25 : Σύγκριση γραφικών παραστάσεων εξασθένισης της ίνας με κάμψη(μωβ ίχνος) και χωρίς(κόκκινο ίχνος)

Παρατηρούμε πως και στις δυο μετρήσεις πριν αρχίσει η εξασθένιση το οπτικό σήμα ανακλάται. Αυτό οφείλεται στους connectors και στην κάμψη της ίνας.

[9.3 Προσομοίωση τμήματος οπτικού δικτύου με χρήση της εφαρμογής LINKSIM](#)

Σε αυτήν την ενότητα θα προσομοιώσουμε ένα κομμάτι του μητροπολιτικού οπτικού δικτύου Πελοποννήσου στην εφαρμογή LINKSIM και παράλληλα θα διαπιστώσουμε με ποιον τρόπο θα μπορούσαμε να βελτιστοποιήσουμε την απόδοση του δικτύου με το οποίο ασχοληθήκαμε.

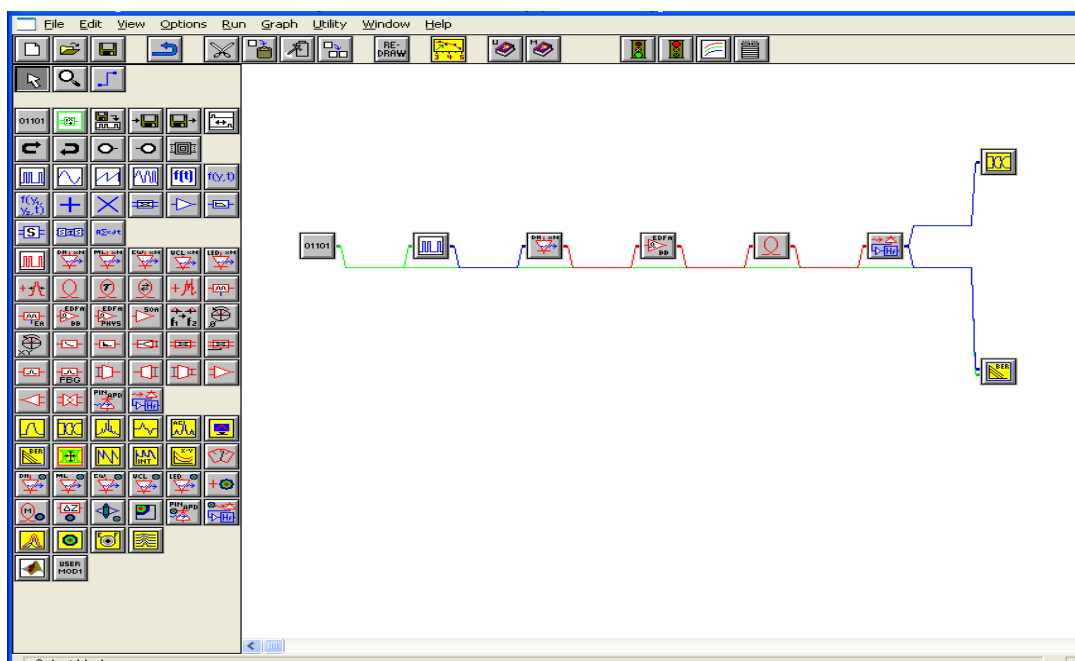
Αρχικά θα χρησιμοποιήσουμε την εφαρμογή OTDR Trace Viewer III για να γνωστοποιήσουμε τα ακριβή χαρακτηριστικά της ίνας που θα χρησιμοποιήσουμε στην προσομοίωση.



Εικόνα 9.25: Το ίχνος και τα χαρακτηριστικά της ίνας που εξετάζουμε

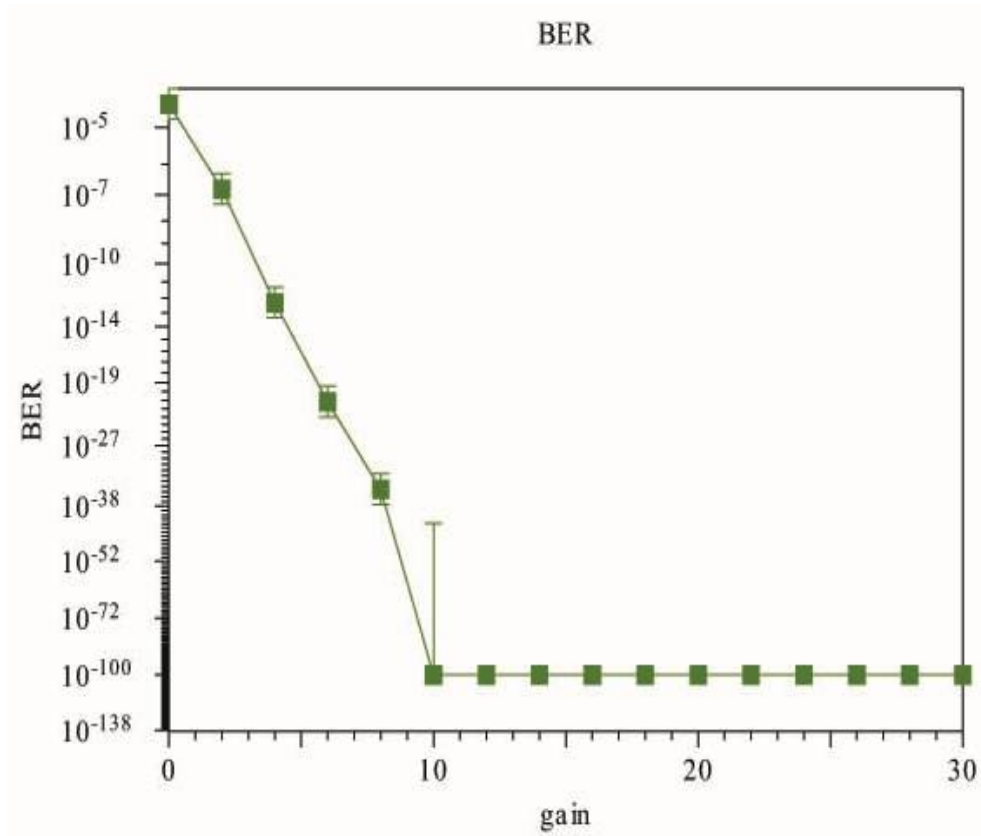
Όπως παρατηρούμε και στην εικόνα 25 το μήκος της ίνας είναι σχεδόν 82 χιλιόμετρα ενώ η συνολική εξασθένιση της είναι 0.24 dB / Km. Ένα άλλο χαρακτηριστικό της ίνας που βλέπουμε με την ανάλυση του ίχνους της είναι τον αριθμό των παθητικών συμβάντων. Αυτός ο αριθμός είναι τα σημεία εκείνα της ίνας στα οποία υπάρχουν απώλειες. Ουσιαστικά πρόκειται για τις μούφες που έχουν γίνει για να προκύψει το τελικό μήκος των 82 χιλιομέτρων.

Στην προσομοίωση που θα υλοποιήσουμε με την εφαρμογή LINKSIM θα προσθέσουμε στην τοπολογία του οπτικού έναν ενισχυτή ερβίου. Η προσθήκη αυτή γίνεται για να δούμε κατά πόσο θα μειώσει τις απώλειες που έχει η ίνα και θα γίνει στην αρχή, στην μέση και στο τέλος της ίνας.



Εικόνα 9.26: Τοπολογία δικτύου με προσθήκη ενισχυτή ερβίου στην αρχή της ίνας

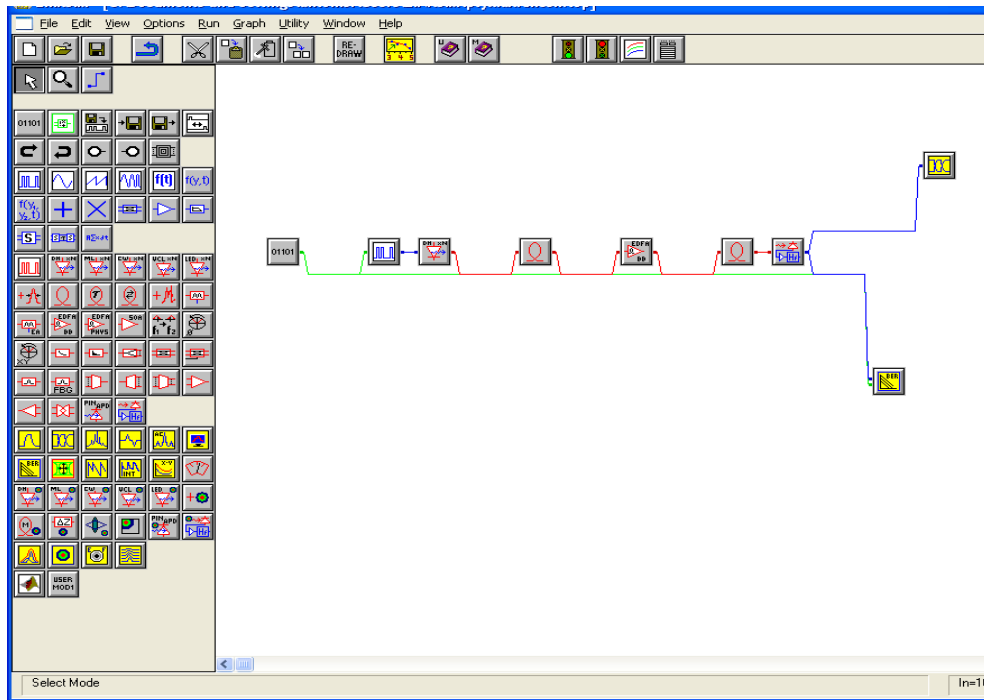
Ως έξοδο στην προσομοίωση μας παίρνουμε την γραφική παράσταση που βλέπουμε στην εικόνα 9.27. Η γραφική παράσταση είναι ο ρυθμός λαθών bit (BER) σε σχέση με την ενίσχυση που έχουμε ορίσει στον ενισχυτή ερβίου



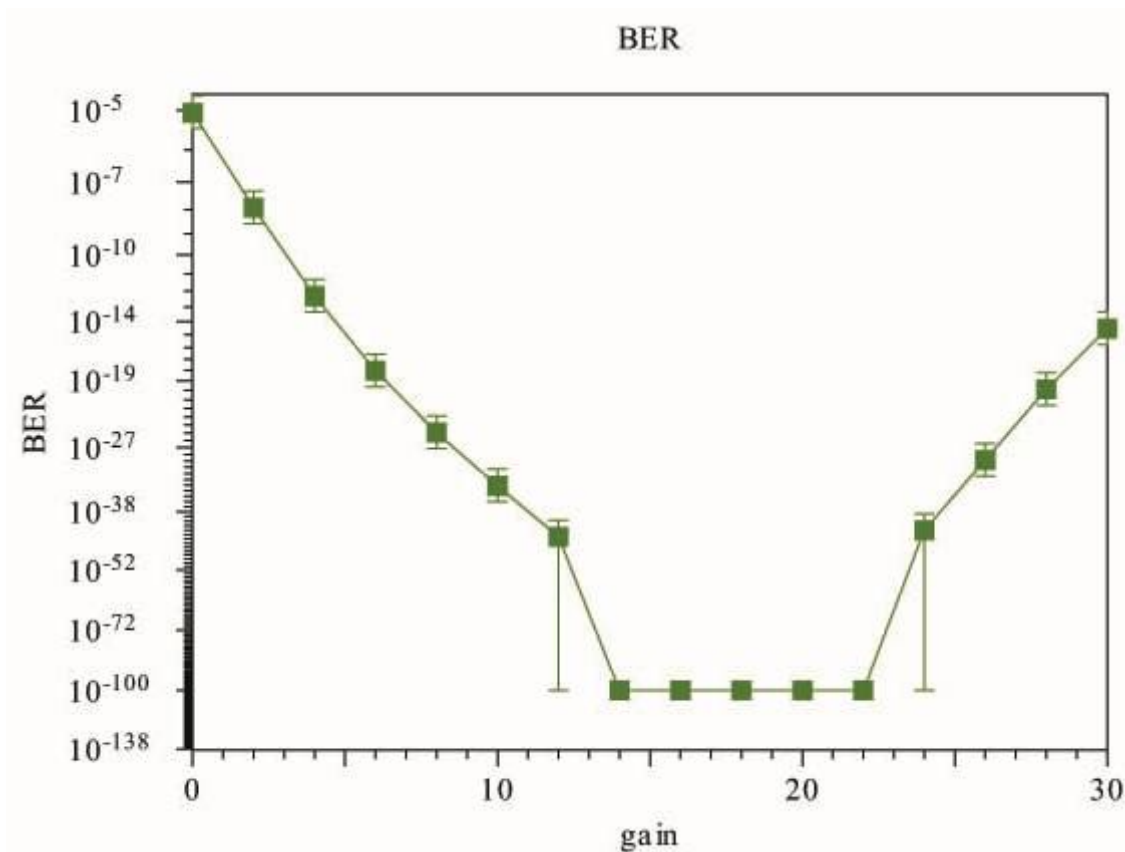
Εικόνα 9.27: Έξοδος προσομοίωσης με ενισχυτή ερβίου στην αρχή της ίνας

Παρατηρούμε ότι μετά τα 10dB ενίσχυσης ο ρυθμός σφάλματος bit είναι γραμμικός και αμελητέος.

Στην δεύτερη προσομοίωση θα τοποθετήσουμε τον ενισχυτή ερβίου στην μέση του τμήματος του οπτικού δικτύου περίπου στα 41 χιλιόμετρα.(εικόνα 28). Η έξοδος της προσομοίωσης μας απεικονίζεται στην εικόνα 29. Παρατηρούμε ότι όταν για ενίσχυση ίση με 14 έως 23 dB ο ρυθμός σφάλματος bit παραμένει ίδιος με την προηγούμενη προσομοίωση. Πριν τα 14 και μετά τα 23 υπάρχει αυξητική τάση για το BER.

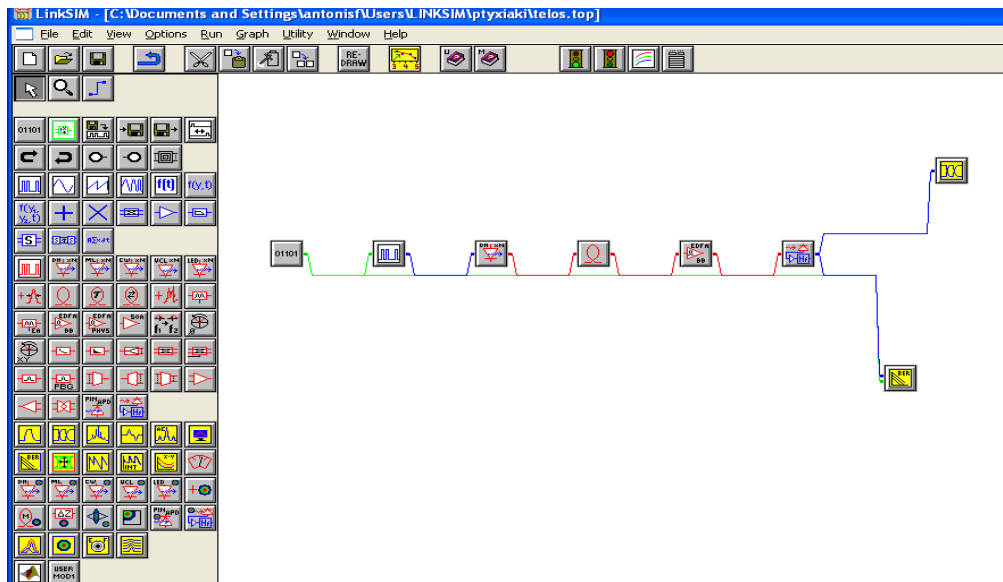


Εικόνα 9.28 : Τοπολογία οπτικού δικτύου με τοποθέτηση ενισχυτή ερβίου στην μέση του τμήματος της οπτικής ίνας.

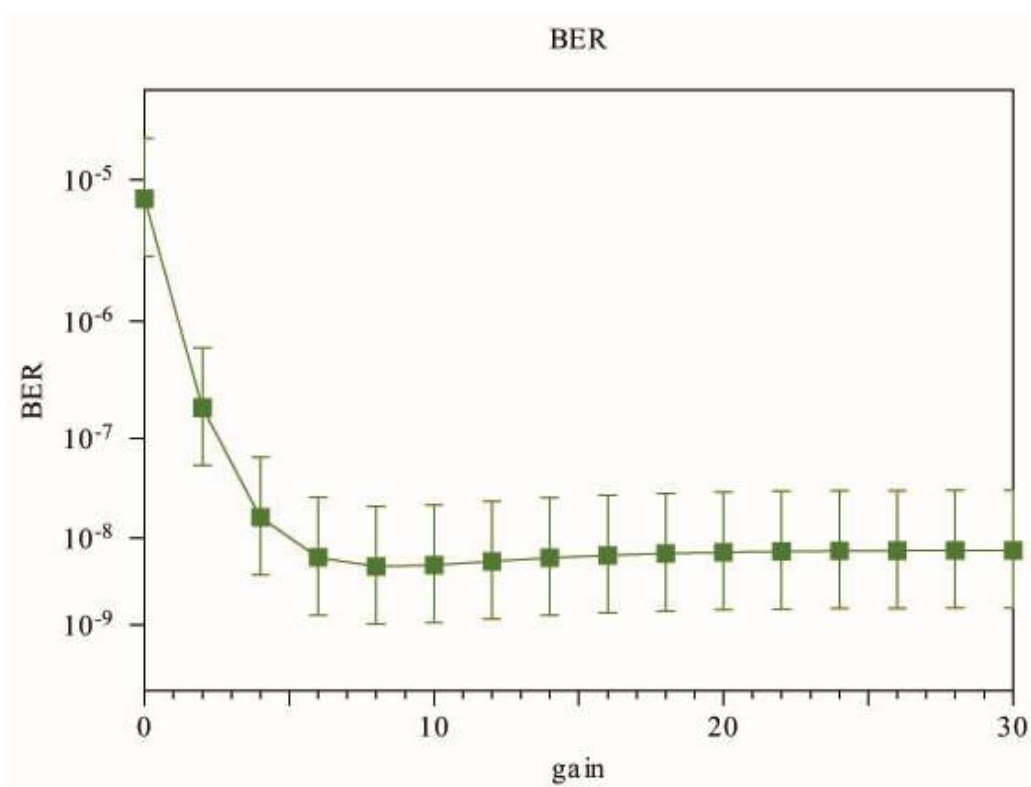


Εικόνα 9.29 : Έξοδος προσομοίωσης με τοποθέτηση ενισχυτή στην μέση του τμήματος του οπτικού δικτύου

Τέλος θα πραγματοποιήσουμε προσομοίωση του οπτικού δικτύου τοποθετώντας στο τέλος της οπτικής σύνδεσης(εικόνα 30). Στο σημείο δηλαδή που έχουμε την μεγαλύτερη εξασθένιση του οπτικού τμήματος.



Εικόνα 9.30 : Τοπολογία οπτικού δικτύου με τοποθέτηση ενισχυτή ερβίου στο τέλος του τμήματος οπτικής ίνας



Εικόνα 9.31 : Έξοδος προσομοίωσης οπτικού δικτύου με τοποθέτηση ενισχυτή ερβίου στο τέλος του τμήματος οπτικής ίνας

Παρατηρώντας και τα αποτελέσματα των τριών προσομοιώσεων και συγκρίνοντας τα διαγράμματα των BER/GAIN διαπιστώνουμε πως χαμηλότερο ρυθμό σφάλματος και ταυτόχρονα μεγαλύτερη ενίσχυση έχουμε στην περίπτωση που ενισχυτής ερβίου τοποθετηθεί στην αρχή της οπτικής ίνας . Βεβαία αξίζει να αναφέρουμε πως την δεδομένη χρονική στιγμή δεν κρίνεται απαραίτητη η ενίσχυση του οπτικού σήματος καθώς το εύρος ζώνης των οπτικών ινών είναι τεράστιο για τις σημερινές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης.

Συμπεράσματα

Με την εκπόνηση της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας είχαμε την δυνατότητα να γνωρίσουμε τον τρόπο λειτουργίας και τα χαρακτηριστικά των οπτικών δικτύων πρόσβασης. Επιπροσθέτως είχαμε την δυνατότητα να έρθουμε σε επαφή με το Τεχνικό Τμήμα Δικτύων του Τηλεπικοινωνιακού Διαμερίσματος Αργολιδοκορινθίας και να ασχοληθούμε με διαδικασίες κατασκευής και ελέγχου του οπτικού δικτύου.

Η κατασκευή οπτικών δικτύων αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία που απαιτεί εξειδικευμένη τεχνολογία ενώ έχει πολλά περιθώρια περαιτέρω εξέλιξης και αυτοματοποίησης. Στις κατασκευές οπτικών δικτύων πρέπει να έχουμε ως γνώμονα την μεγάλη προσοχή στην λεπτομέρεια. Αν αναλογιστούμε ότι μια οπτική ίνα έχει διατομή ίση με μια ανθρώπινη τρίχα καταλαβαίνουμε πως πρόκειται για διαδικασία που απαιτεί ακριβό εξοπλισμό, εμπειρία, λεπτομέρεια και τεχνογνωσία.

Αφού κατασκευαστούν τα οπτικά δίκτυα προκύπτει η ανάγκη για συντήρηση και έλεγχο τους. Βασικότερη προϋπόθεση για την απρόσκοπτη λειτουργία τους είναι ο περιορισμός των απωλειών. Κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας πτυχιακής εξετάσαμε όλες τις αιτίες απωλειών και εξασθένησης των οπτικών ινών. Με την χρήση ειδικού τεχνικού εξοπλισμού OTDR (οπτικού ανακλασίμετρου) είχαμε την δυνατότητα διάγνωσης βλαβών και βελτιστοποίησης της εξασθένησης των οπτικών σημάτων που οφείλονται σε ενώσεις, κάμψεις και τερματισμό των οπτικών ινών.

Τέλος προσομοιώνοντας ένα τμήμα του Μητροπολιτικού Δικτύου Πελοποννήσου στην εφαρμογή LINKSIM συμπεράναμε πως αν και η χρήση οπτικών ενισχυτών στο δίκτυο αυτήν την στιγμή δεν κρίνεται απαραίτητη, μελλοντικά θα ήταν εφικτή με αποτέλεσμα τον δεκαπλασιασμό του εύρους ζώνης του δικτύου.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ajoy Chatak, K. Thyagarajan, *Introduction to Fiber Optics*, Cambridge, 1998.
2. Andrew S. Tanenbaum , Βασίλης Στυλιανάκης μετ. “Δίκτυα Υπολογιστών “ 3η Έκδοση.
3. Barry Elliott and Mike Gilmore, *Fiber Optic Cabling*, 2nd Ed., Newnes, 2002.
4. *BICSI Telecommunications Cabling Installation* , 2nd Ed., McGraw-Hill, 2002.
5. Bob Chomycz, *Fiber Optic Installer’s Field Manual*, McGraw-Hill, 2000.
6. Cisco Systems Inc. - *Introduction to DWDM for Metropolitan Networks*
7. Corning Cable Systems, *Access Solutions Guide*, 2002.
8. Corning Cable Systems, *Design Guide, Release 4*, 2002.
9. *Customer-Owned Outside Plant Design Manual*, 2nd Ed., BICSI, 2001.
10. Daniel Minoli, Peter Johnson, and Emma Minoli, *Ethernet-Based Metro Area Networks*, McGraw-Hill, 2002.
11. Daniel Minoli, Peter Johnson, and Emma Minoli, *SONET-Based Metro Area Networks*, McGraw-Hill, 2002.
12. David Greenfield, *The Essential Guide to Optical Networks*, Prentice Hall PTR, 2002.
13. David R. Goff, *Fiber Optic Reference Guide, A practical Guide to Communications Technology* ,3rd Ed., Focal Press, 2002.
14. Debra Cameron, *Optical Networking, A Wiley Tech Brief*, Wiley, 2002.
15. Djafar K. Mynbaev and Lowell L. Scheiner, *Fiber-Optic Communications Technology*, PrenticeHall, 2001.
16. Edited by Casimer DeCusatis, *Handbook of Fiber Optic Data Communication*, 2nd Ed., Academic Press, 2002.
17. Govind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 3rd Ed., Wiley, 2002.
18. Gunther Mahlke and Peter Gossing, *Fiber Optic Cables*, 4th Ed., Publicis MCD, 2001.
19. Heinz Willebrand and Baksheesh S. Ghuman, *Free-Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today’s Networks, SAMs*, 2002.

20. Intracom S.A. - *Τηλεπικοινωνίες με Οπτικές Ίνες*.
21. Jeff Hecht, *Understanding Fiber Optics*, 4th Ed., Prentice Hall, 2002.
22. Jim Hayes, *Fiber Optics Technician's Manual*, 2nd Ed., DELMAR, 2001.
23. JoAnne Woodcock - *Εισαγωγή στα Δίκτυα Υπολογιστών*.
24. Leo Setian, *Applications in Electro-Optics*, Prentice Hall, 2002.
25. Marconi Academy - *Introduction to Dense Wavelength Division Multiplexing*.
26. Michael Bass and Eric Van Stryland, *Fiber Optics Handbook—Fiber, Devices, and Systems for Optical Communications*, McGraw-Hill, 2002.
27. *Optical fiber communications Principles & Practice* J.M.Senior 3rd Edition.
28. Pearson - Prentice Hal 2009 18. *Optical Communications Systems* J Gowar Prentice-Hall 1994.
29. Rajiv Ramaswami and Kumar N. Sivarajan, *Optical Networks, A Practical Perspective*, 2nd Ed., Morgan Kaufmann, 2002.
30. Ray Tricker, *Optoelectronics and Fiber Optic Technology*, Newnes, 2002.
31. *Recommended Practices for Optical Fiber Construction and Testing* , 2nd Ed., SCTE (Society of Cable Telecommunications Engineers), 2001.
32. Robert C. Elsenpeter and Toby J. Velte, *Optical Networking: A Beginner's Guide*, McGraw-Hill/Osborne
33. Rocencher & Vindrer Optoelectronics Cambridge University Press 2002, *20 Αρχές των LASERS* O. Svelto Εκδ. Συμμετρία, 2002.
34. Roger L. Freeman, *Fiber Optic Systems for Telecommunications*, John Wiley and Sons, NewYork, 2002.
35. Steven Shepard, *Optical Networking Crash Course*, McGraw-Hill, 2001.
36. Simon Haykin - *Συστήματα Επικοινωνίας*
37. *Telecommunications Distribution Methods Manual* , 9th Ed., BICSI, 2000.
38. Uyless Black, *Optical Networks, Third Generation Transport Systems* , Prentice Hall, 2002.
39. Α. Αλεξόπουλος, Γ. Λαγογιάννης - *Τηλεπικοινωνίες & Δίκτυα Υπολογιστών*
40. Ηλεκτρονική εγκυκλοπαίδεια : <http://en.wikipedia.org/wiki/>
40. *Δίκτυα Οπτικών Ινών* P.E Green Παπασωτηρίου 1994.

41. *Οπτικές Επικοινωνίες* – Μαρία Κωνσταντάκη, 2004.
42. Π. Λαμπρόπουλος – *LASER*
43. *Συστήματα Επικοινωνιών με οπτικές ίνες*, του G. Agrawal, 2η Έκδοση, Εκδ. Τζιολα 2001.
44. Χ. Βασιλόπουλος, Γ. Παγιατάκης - *Συστήματα Πολυπλεξίας Μήκους Κύματος (WDM)*.
45. <http://www.fujikura.com/prod/products.html>
46. <http://www.sumitomelectric.com/products/fusionsplacers/type37microcore/>
47. <http://www.iskraft.is/Uploads/document/baeklingar/ljosleidaraefni/Fujikura%20splaesivelar/NotkunarleiDbeiningar/CT-30%20new%20manual.pdf>
48. <http://www.fujikura.com.sg/cleaver.htm>
49. http://www.home.agilent.com/upload/cmc_upload/All/OTDRTraceViewerIII_2.7_English.exe
50. <http://www.fujikura.com.sg/Files-Directory/CT-30.pdf>
51. <http://www.raycap.gr/index.php>