

ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗ

Συστήματα Οπτικών Τηλεπικοινωνιών

Ιωάννης Δ. Τσαλαμάνης (MEng, PhD)

Τμήμα Βιομηχανικής Πληροφορικής
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών

ΤΕΙ Καβάλας, 2011

1.	Εισαγωγή στις Οπτικές Επικοινωνίες.....	1
2.	Πηγές Φωτός.....	2
2.1.	LED.....	3
2.2.	Semiconductor laser.....	4
2.3.	Παράμετροι πομπών.....	5
3.	Δέκτες Φωτός.....	6
3.1.	PIN φωτοδίοδος.....	6
3.2.	APD φωτοδίοδος.....	7
4.	Οπτικές Ίνες.....	7
4.1.	Αρχές λειτουργίας.....	8
4.2.	Δομή και χαρακτηριστικά οπτικών ινών.....	9
4.3.	Τύποι οπτικών ινών.....	10
4.4.	Καλώδια οπτικών ινών.....	11
5.	Απώλειες και περιορισμοί εύρους ζώνης στις οπτικές ίνες.....	12
5.1.	Εξασθένηση (Attenuation).....	12
5.2.	Διασπορά (Dispersion).....	14
5.2.1	Χρωματική διασπορά (Chromatic Dispersion).....	14
5.2.2	Διασπορά τρόπων διάδοσης.....	16
5.2.3	Διασπορά τρόπων πόλωσης.....	16
5.3.	Μη γραμμικά φαινόμενα.....	17
6.	Οπτικοί Ενισχυτές.....	18
6.1.	Ενισχυτές ημιαγωγού.....	19
6.2.	Ενισχυτές ίνας προσμείξεων ερβίου.....	19
7.	Wavelength Division Multiplexing.....	20
7.1.	Coarse-WDM.....	22
7.2.	Dense-WDM.....	22

1. Εισαγωγή στις Οπτικές Επικοινωνίες

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες έχει παρατηρηθεί μία ταχύτατη ανάπτυξη στα τηλεπικοινωνιακά στοιχεία και δίκτυα, η οποία οφείλεται κυρίως στην εξάπλωση του διαδικτύου σε ολόένα και μεγαλύτερο μέρος του ανθρώπινου πληθυσμού. Έχει δημιουργηθεί έτσι μία παγκόσμια κοινότητα, με παραπάνω από 300 εκατομμύρια μέλη, όπου άνθρωποι από κάθε σημείο του πλανήτη μπορούν να επικοινωνήσουν και να ανταλλάξουν απόψεις, να αγοράσουν ή να πουλήσουν προϊόντα, να ενημερωθούν και να ψυχαγωγηθούν. Η πρόσβαση και η πλοήγηση στο διαδίκτυο είναι σχετικά απλές διαδικασίες, αρκεί να υπάρχει η υποδομή που θα καλύπτει τις εκάστοτε ανάγκες και τις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις για μεγαλύτερο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Παράλληλα, ολόένα και περισσότερες εταιρίες στηρίζουν τις υπηρεσίες που προσφέρουν στους πελάτες τους και την παραγωγικότητά τους σε μικρότερα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, καθιστώντας απαραίτητη την ανάπτυξή τους.

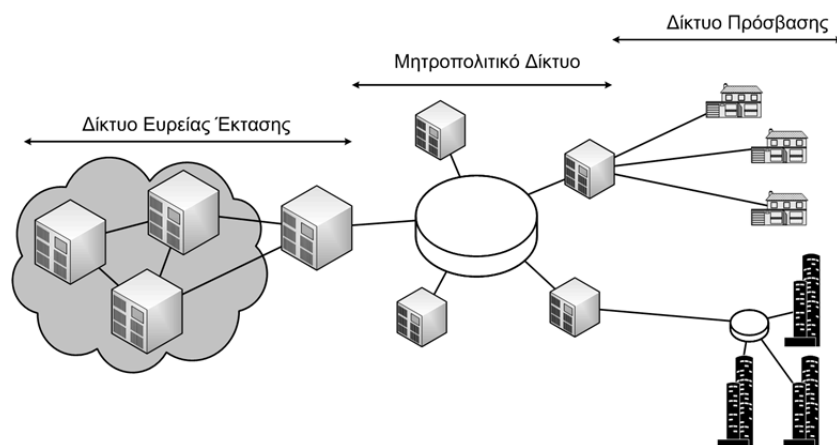
Η συνεχής όμως ανάπτυξη του διαδικτύου σημαίνει ότι η τεχνολογία θα πρέπει να είναι σε θέση να διαχειριστεί τη διακίνηση ολόένα και μεγαλύτερης ποσότητας πληροφορίας και ταυτόχρονα να μπορεί να υποστηρίξει και νέες υπηρεσίες με αυξημένες απαιτήσεις από πλευράς ρυθμού μετάδοσης. Για παράδειγμα καινούριες υπηρεσίες, όπως η τηλεσυνδιάσκεψη, έχουν αυξημένες απαιτήσεις ρυθμού μετάδοσης σε αντίθεση με παλαιότερες, όπως το παραδοσιακό ηλεκτρονικό ταχυδρομείο. Επίσης, σε τέτοιες εφαρμογές πραγματικού χρόνου, επιτακτική είναι και η ανάγκη μειωμένης καθυστέρησης ανταπόκρισης του δικτύου έτσι ώστε να μην γίνεται αντιληπτή από τους χρήστες. Τέλος, το κόστος υλοποίησης των νέων υπηρεσιών πρέπει πάντοτε να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερο, ώστε αυτές να είναι προσιτές στους πελάτες.

Τα οπτικά δίκτυα υψηλής χωρητικότητας έχουν γνωρίσει μεγάλη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες, γιατί προσφέρουν πολύ υψηλό εύρος ζώνης το οποίο δεν μπορεί να επιτευχθεί από καμία άλλη τεχνολογία και η οπτική ίνα έχει αποδείξει πως έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης κατά μήκος μεγάλων αποστάσεων. Συνεπώς, τα δίκτυα τα οποία χρησιμοποιούν οπτικές ίνες είναι σε θέση να ανταποκριθούν στις παραπάνω απαιτήσεις χωρητικότητας, ταχύτητας και απόστασης. Σε πολλά ήδη εγκατεστημένα οπτικά δίκτυα επιτυγχάνονται ρυθμοί της τάξεως των 2.5Gbps, 5Gbps και των 10Gbps ανά κανάλι, ενώ σε ερευνητικό επίπεδο ακόμα βρίσκονται τεχνικές μετάδοσης που υποστηρίζουν ρυθμούς 40Gbps ανά κανάλι.

Η συνηθέστερη δομή των τηλεπικοινωνιακών οπτικών δικτύων φαίνεται στο σχήμα1. Ο κύριος διαχωρισμός των δικτύων είναι σε μητροπολιτικά και ευρείας έκτασης. Τα μητροπολιτικά δίκτυα αφορούν συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή, όπως είναι για παράδειγμα ένας δήμος, και κατηγοριοποιούνται περαιτέρω σε δίκτυα διανομής και δίκτυα πρόσβασης. Τα δίκτυα πρόσβασης συγκεντρώνουν την πληροφορία που παράγεται από τους χρήστες στους κόμβους πρόσβασης και τα δίκτυα διανομής διασυνδέουν αυτούς τους κόμβους πρόσβασης με μεγαλύτερους κόμβους διανομής. Τα ευρείας έκτασης δίκτυα αφορούν την διασύνδεση των μητροπολιτικών δικτύων από απομακρυσμένες περιοχές (όπως πόλεις ή και χώρες) και μπορεί να καλύπτουν μέχρι και υπερωκεάνιες αποστάσεις πολλών χιλιάδων χιλιομέτρων. Η διασύνδεση αυτή γίνεται με στους κύριους κόμβους του δικτύου ευρείας έκτασης.

Παράλληλα, τα δίκτυα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δημόσια και ιδιωτικά. Τα δημόσια δίκτυα, που είναι και τα περισσότερα, παρέχουν μεγαλύτερη γεωγραφική κάλυψη και η διαχείρισή

τους γίνεται από δικτυακούς παρόχους και φορείς. Τα πρώτα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα προσέφεραν μόνο τηλεφωνικές υπηρεσίες, ενώ σήμερα παρέχουν και υπηρεσίες διαδικτύου σε πάρα πολλούς χρήστες. Πλέον τα δημόσια δίκτυα καλούνται να παρέχουν τηλεφωνικές γραμμές, μισθωμένες γραμμές αλλά και υποδομές σε δίκτυα παρόχων διαδικτύου και κινητής τηλεφωνίας. Αντίθετα, τα ιδιωτικά δίκτυα είναι ιδιοκτησία διαφόρων οργανισμών και υλοποιούνται για να καλύψουν εσωτερικές ανάγκες. Ανάλογα την περιοχή που καλύπτουν, χωρίζονται σε τοπικά δίκτυα (local area network (LAN)), σε μητροπολιτικά δίκτυα (metropolitan area network (MAN)) και σε δίκτυα ευρείας περιοχής (wide area network (WAN)). Στις δύο τελευταίες περιπτώσεις ο οργανισμός συνήθως μισθώνει κομμάτια από το δημόσιο δίκτυο για την ολοκλήρωση του δικού του ιδιωτικού δικτύου, οπότε το δίκτυό του δεν είναι εντελώς ιδιόκτητο.



Σχήμα 1 – Δομή τηλεπικοινωνιακών οπτικών δικτύων

Η τεχνολογία που προσφέρουν οι οπτικές ίνες καθιστά εφικτή πλέον την οπτική διασύνδεση σε όλα τα παραπάνω επίπεδα και είδη δικτύων, παρέχοντας τεράστιους ρυθμούς μετάδοσης και κοινή υποδομή για μεγάλη γκάμα υπηρεσιών. Η ευρυζωνικότητα που παρέχεται οφείλεται εκτός από τις οπτικές ίνες και σε άλλους παράγοντες που θα περιγραφούν σε επόμενες ενότητες. Οπτικές ίνες έχουν εγκατασταθεί ευρέως σήμερα σε δίκτυα ευρείας έκτασης και μητροπολιτικά δίκτυα, όχι όμως και σε δίκτυα πρόσβασης. Αν και μεγάλες εταιρίες και βιομηχανίες έχουν διαδικτυακή πρόσβαση μέσω οπτικών ινών, οι τελικοί χρήστες δεν είναι ακόμα συνδεδεμένοι οπτικά λόγω του υψηλού κόστους. Η τεχνική fiber-to-the-home (FTTH), οπτική ίνα μέχρι το σπίτι, έχει αρχίσει να εφαρμόζεται σε αρκετές χώρες τα τελευταία χρόνια και είναι μία λύση που πιθανώς θα χρησιμοποιηθεί και στην χώρα μας μετά το VDSL (very-high-bitrate digital subscriber line) που βρήκε πρόσφατες εφαρμογές.

2. Πηγές Φωτός

Οι πηγές φωτός, είτε ορατού είτε μη ορατού, βρίσκονται σήμερα στο επίκεντρο των δύο πλέον αναπτυσσόμενων βιομηχανιών: των υπολογιστών και των τηλεπικοινωνιών. Η οπτική ίνα μεταφέρει το φως ειδικών πηγών το οποίο μπορεί να περιέχει πληροφορία δεδομένων, εικόνας και φωνής, σε πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Η αναγκαιότητα της ανάπτυξης και χρησιμοποίησης οπτικών τηλεπικοινωνιακών μέσων προέκυψε από την αυξανόμενη ανάγκη μεταφοράς ολοένα και μεγαλύτερου όγκου πληροφοριών.

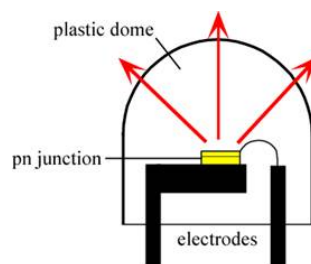
Η ικανότητα που έχει μια πηγή να μεταφέρει πληροφορία εξαρτάται αποκλειστικά από την συχνότητά της, η οποία είναι γνωστή σαν φέρουσα συχνότητα. Όσο μεγαλύτερη είναι η φέρουσα συχνότητα, τόσο περισσότερη πληροφορία μπορεί να μεταδώσει και η οπτική πηγή. Υπάρχουν

πηγές με φέρουσες συχνότητες της τάξης 10^{14} Hz, οι οποίες υπερτερούν κατά 4-5 τάξεις μεγέθους σε σχέση με τις μικροκυματικές πηγές, οι οποίες συνήθως εκπέμπουν σε συχνότητες μερικών GHz (10^9 Hz). Συνεπώς, τα συστήματα οπτικών μέσων είναι ικανά να μεταβιβάζουν 10 έως 100 χιλιάδες φορές περισσότερη πληροφορία από τα μικροκυματικά και βεβαίως εκατοντάδες εκατομμύρια φορές σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο μέσο μετάδοσης (π.χ. χάλκινα καλώδια). Η ανακάλυψη του laser το 1960, σε συνδυασμό με τις εξαιρετικές ικανότητες της οπτικής ίνας να μεταφέρει το φως σε πολύ μακρινές αποστάσεις, επέτρεψαν τη ραγδαία ανάπτυξη των οπτικών επικοινωνιών μέσα σε διάστημα λίγων δεκαετιών.

Οι δύο βασικότερες κατηγορίες οπτικών πηγών είναι τα LED (Light Emitting Diode) και τα Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Σκοπός και των δύο είναι να μετατρέπουν το ηλεκτρικό ρεύμα με το οποίο τροφοδοτούνται σε δέσμη φωτός, μεταφέροντας με αυτό τον τρόπο την πληροφορία από το ρεύμα τροφοδοσίας στη φωτεινή δέσμη. Η πληροφορία, η οποία εμπεριέχεται στις μεταβολές ή διακυμάνσεις του ρεύματος, μετατρέπεται στις μεταβολές των χαρακτηριστικών (π.χ. της έντασης) της φωτεινής δέσμης.

2.1. LED

Τα LED είναι απλούστερες πηγές οι οποίες βρίσκουν ευρεία χρήση σε ασύρματες υπέρυθρες επικοινωνίες, στα τηλεχειριστήρια διάφορων συσκευών, σε εφαρμογές ηλεκτρονικής απεικόνισης (φωτεινοί δείκτες) κλπ. Το LED είναι μία ημιαγωγική διάταξη ένωσης p-n (σχήμα 2, σχήμα 4), η οποία εκπέμπει φως, όταν ο θετικός ακροδέκτης τροφοδοσίας συνδεθεί στην περιοχή τύπου p και ο αρνητικός στην περιοχή τύπου n, πετυχαίνοντας έτσι ορθή πόλωσή του. Η παραγωγή φωτός στην ένωση p-n οφείλεται στα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Όταν ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο κινείται από τον αρνητικό προς το θετικό ακροδέκτη, συναντά μια αντίθετα κινούμενη οπή στην περιοχή της ένωσης. Τα δύο σωματίδια επανασυνδέονται μεταξύ τους και εκπέμπουν ενέργεια με την μορφή ενός φωτονίου. Αυτός ο τρόπος παραγωγής φωτός είναι γνωστός σαν αυθόρμητη εκπομπή και χαρακτηρίζει τον τρόπο λειτουργίας των LED κατά τον οποίο το φως που παράγουν εκπέμπεται ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις στο χώρο.



Σχήμα 2 – Διάταξη LED

Η παραγωγή φωτός προκύπτει από συγκεκριμένους ημιαγωγούς και όχι από οποιοδήποτε ημιαγωγό. Στο πυρίτιο και το γερμάνιο, αγωγούς που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρονικά κυκλώματα, η επανασύνδεση πραγματοποιείται με απελευθέρωση θερμότητας και επομένως οι ημιαγωγοί αυτοί δεν είναι κατάλληλοι για κατασκευή οπτικών πηγών. Οι πιο κατάλληλοι ημιαγωγοί είναι οι σύνθετοι ημιαγωγοί που προέρχονται από ανάμειξη των στοιχείων αλουμινίου (Al), γαλλίου (Ga), ή ινδίου (In) με τα στοιχεία φώσφορο (P), αρσενικό (As), ή αντιμόνιο (Sb). Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι ημιαγωγοί GaAsP, GaAlAs και GaInAsP. Το μήκος κύματος του φωτός το οποίο εκπέμπει η κάθε πηγή εξαρτάται από την ακριβή σύνθεση του ημιαγωγού.

Η ισχύς των LED φτάνει τα μερικά mW και η απόδοση τους είναι το κλάσμα της ηλεκτρικής ισχύς εισόδου που μετατρέπεται σε φωτεινή ισχύ εξόδου. Η απόδοση αυτή στις σημερινές συσκευές είναι της τάξης του 10%. Τα LED μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετάδοση πληροφορίας είτε σε ψηφιακή είτε σε αναλογική μορφή μέσα από μια οπτική ίνα. Στην ψηφιακή μορφή, ο ρυθμός μετάδοσης μπορεί να φτάσει τις μερικές εκατοντάδες Mbps, γεγονός που επιτυγχάνεται με την κατάλληλη διαμόρφωση του ρεύματος οδήγησης του LED από το σήμα πληροφορίας. Σαν διαμόρφωση ορίζεται η μεταβολή της φωτεινής ισχύς εκπομπής του LED σύμφωνα με τις μεταβολές του ρεύματος οδήγησης που το διαρρέει.

2.2. Semiconductor laser

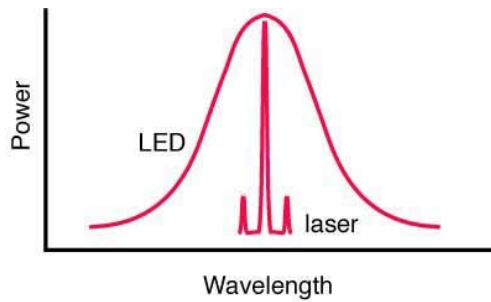
Στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα με οπτικές ίνες οι πηγές που χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά είναι τα διοδικά laser ημιαγωγού. Τα πρώτα laser ημιαγωγού κατασκευάστηκαν το 1962 και τελειοποιήθηκαν το 1970, οπότε και άρχισαν να παίρνουν θέση σε εφαρμογές. Ο όρος 'laser' προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation (Ενίσχυση Φωτός από Εξαναγκασμένη Εκπομπή Ακτινοβολίας), οι οποίες δείχνουν την δυνατότητα που έχουν τα laser να παράγουν φως εκμεταλλευόμενα την εξαναγκασμένη ακτινοβολία μέσα σε ένα υλικό.

Τα laser είναι παρόμοια κατασκευαστικά με τα LED (δηλαδή είναι και αυτά ενώσεις p-n), αλλά διαφέρουν στο ότι το φως παράγεται από εξαναγκασμένη (όχι αυθόρμητη) επανασύνδεση ηλεκτρονίων-οπών. Επίσης διαθέτουν ανακλαστικά άκρα, στα οποία το φως ανακλάται πολλαπλά εσωτερικώς μεταξύ τους, όταν το laser τροφοδοτηθεί με ρεύμα (σχήμα 4). Οι πολλαπλές αυτές ανακλάσεις των φωτεινών κυμάτων (οπτική ανατροφοδότηση) έχουν ως αποτέλεσμα την εξαναγκασμένη αποδιέγερση όλο και περισσότερων ηλεκτρονίων και την ενίσχυση της ακτινοβολίας λόγω εξαναγκασμένης εκπομπής. Μόλις το ρεύμα αυξηθεί αρκετά, τότε:

- α) η ενίσχυση (απολαβή) ξεπερνά τις εσωτερικές απώλειες του υλικού
- β) η φωτεινή δέσμη διαπερνά τα ημιδιαφανή ανακλαστικά άκρα (κάτοπτρα) και
- γ) εκπέμπεται μια σχεδόν μονοχρωματική φωτεινή δέσμη, εξαιρετικά μεγάλης λαμπρότητας και μεγάλης κατευθυντικότητας.

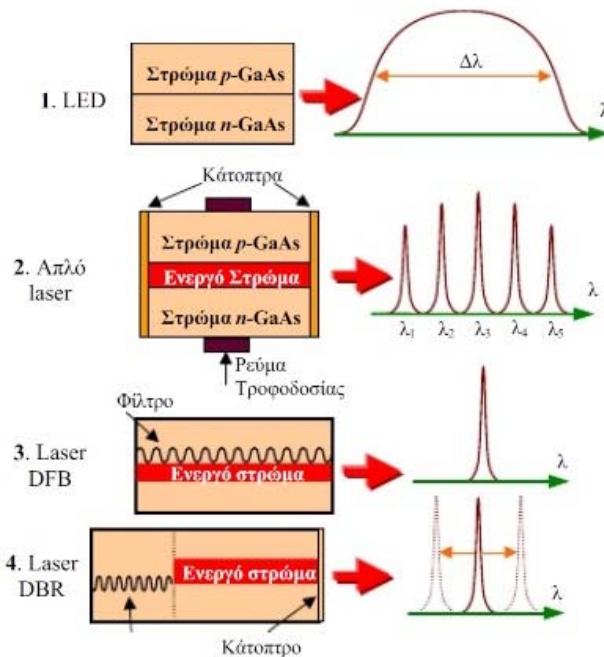
Στα laser, η περιοχή γύρω από την ένωση p-n, στην οποία πραγματοποιείται η παραγωγή σύμφωνα φωτός, ονομάζεται ενεργός περιοχή ή ενεργό στρώμα και το ρεύμα πάνω από το οποίο παράγεται σύμφωνα φως ονομάζεται ρεύμα κατωφλίου. Οι διαστάσεις των ημιαγωγικών laser συμβαδίζουν με αυτές των οπτικών ινών. Το μήκος τους είναι 300-400μm, ενώ το εύρος της ενεργού περιοχής είναι της τάξης των 10μm, όσο περίπου και η διάμετρος της οπτικής ίνας. Λόγω της μεγάλης κατευθυντικότητας και της μονοχρωματικότητάς τους, επιτρέπουν την εύκολη εστίαση της δέσμης φωτός με φακούς και την αντιμετώπιση του φαινομένου της διασποράς των οπτικών ινών. Η διαφορά φάσματος μεταξύ laser και LED φαίνεται στο σχήμα 3, όπου διακρίνεται η ικανότητα των laser να παράγουν στενούς παλμούς ενός μήκους κύματος.

Τα laser έχουν ισχύ εκπομπής μερικών Watt. Είναι όμως πολύ ισχυρότερα από τα LED και, επομένως, έχουν την δυνατότητα μετάδοσης πληροφορίας σε πολύ πιο μακρινές αποστάσεις μέσα στην ίνα. Η απόδοση των laser είναι σήμερα της τάξης του 30%. Ένα άλλο πλεονέκτημα των laser, ως προς τα LED, είναι η ικανότητά τους να διαμορφώνονται με ταχύτερους ρυθμούς που σήμερα ξεπερνούν τα 10Gbps.



Σχήμα 3 – Φάσμα καναλιού laser και LED

Η δομές των laser ποικίλουν, με την πιο απλή να είναι η δομή ημιαγωγικού laser, που ήδη αναφέρθηκε, και περιλαμβάνει δύο κάτοπτρα στα άκρα της. Το laser αυτό όμως εκπέμπει πολλά μήκη κύματος ταυτόχρονα σε μια στενή περιοχή του οπτικού φάσματος, κάτι που δεν είναι εύχρηστο σε πολλές εφαρμογές. Υπάρχουν laser τα οποία εκπέμπουν σε ένα μόνο μήκος κύματος (δηλαδή πολύ στενό φάσμα εκπομπής ή 'μονοχρωματική' εκπομπή). Τα δύο σημαντικότερα τέτοια laser είναι τα DFB laser (distributed feed back) και τα DBR (distributed bragg reflector) που χρησιμοποιούν ένα φίλτρο μέσα στον ημιαγωγό, το οποίο επιτρέπει την ανατροφοδότηση του φωτός σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος (σχήμα 4). Τα DFB laser εκπέμπουν σε ένα προκαθορισμένο μήκος κύματος, ενώ τα DBR έχουν τη δυνατότητα να μεταβάλλουν το μήκος κύματος εκπομπής μέσα σε μια περιοχή αλλάζοντας τα χαρακτηριστικά του φίλτρου.

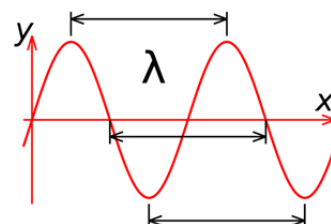


Σχήμα 4 – Πηγές φωτός

2.3. Παράμετροι πομπών

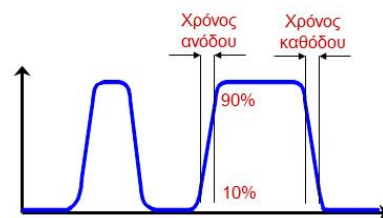
Μήκος κύματος

Μήκος κύματος είναι η απόσταση μεταξύ δύο κορυφών ενός ημιτονοειδούς σήματος και είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας του ίδιου σήματος. Δίνεται από την σχέση $\lambda = c/f$, όπου λ είναι το μήκος κύματος, c η ταχύτητα του φωτός και f η συχνότητα. Μονάδα μέτρησης είναι το μέτρο.



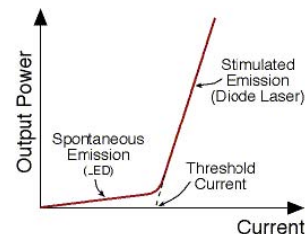
Χρόνος ανόδου και χρόνος καθόδου

Χρόνος ανόδου είναι ο χρόνος που χρειάζεται το σήμα να πάει από χαμηλή τάση σε υψηλή και χρόνος καθόδου είναι ο χρόνος που χρειάζεται το σήμα για να πάει από υψηλή τάση σε χαμηλή. Είναι ένα μέτρο σύγκρισης του πόσο γρήγορα μπορεί ένα laser να ανοίγει και να κλείνει, και υπολογίζεται μεταξύ του 10% και 90% των επιπέδων ισχύος του σήματος. Μία τυπική τιμή είναι 0.3ns.



Ρεύμα κατωφλίου

Είναι το κατώτερο ρεύμα στο οποίο λειτουργεί το laser. Μία τυπική τιμή είναι τα 50mA και το κανονικό ρεύμα λειτουργίας είναι περίπου 70mA.



Θερμοκρασία λειτουργίας

Είναι η θερμοκρασίες στις οποίες μπορεί να δουλεύει το laser χωρίς να αλλοιώνονται τα χαρακτηριστικά των ημιαγωγών και να αλλάζουν έτσι οι ιδιότητες του laser.

Φασματικό εύρος

Είναι το εύρος ζώνης του εκπεμπόμενου φωτός, όπως φαίνεται στο σχήμα 3. Τυπικά φασματικά εύρη κυμαίνονται μεταξύ 1 και 5 nm. Ένα laser με μήκος κύματος 1550nm και φασματικό εύρος 4nm θα εκπέμπει φως μεταξύ 1548 και 1552nm.

3. Δέκτες Φωτός

Οι ανιχνευτές ή δέκτες φωτός εκτελούν την ακριβώς αντίθετη λειτουργία από τους πομπούς φωτός. Οι πομποί είναι ηλεκτρο-οπτικές συσκευές που μετατρέπουν τους ηλεκτρικούς παλμούς σε παλμούς φωτός, ενώ οι δέκτες είναι οπτο-ηλεκτρικές συσκευές που μετατρέπουν το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικούς παλμούς που λαμβάνονται από τον ακροδέκτη των δεδομένων των οπτικών ινών. Ο πιο συνηθισμένος δέκτης είναι η φωτοδίοδος ημιαγωγού, που παράγει ρεύμα ανάλογα με το φως το οποίο προσπίπτει σε αυτή. Σε αντίθεση με τις διόδους εκπομπής φωτός (όπως τα LED) όπου η ενέργεια που εκπέμπεται κατά την επανασύνδεση ηλεκτρονίων-οπών είναι με τη μορφή φωτός, στις φωτοδιόδους το φως που πέφτει σε αυτές δημιουργεί ένα ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα. Απορροφημένα φωτόνια διεγείρουν τα ηλεκτρόνια και το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής. Για κάθε ζεύγος που δημιουργείται, ένα ηλεκτρόνιο τίθεται σε κυκλοφορία σαν ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα.

Ο ιδανικός φωτοδέκτης, σε ένα οπτικό σύστημα υψηλού ρυθμού μετάδοσης, θα πρέπει να έχει υψηλή ευαισθησία (δηλαδή υψηλή απόδοση μετατροπής του φωτός σε ρεύμα) στο μήκος κύματος του φωτός που πρόκειται να ανιχνεύσει, να μην προσθέτει θόρυβο στο σήμα, να ανταποκρίνεται στο ρυθμό δεδομένων, να είναι αξιόπιστος και φθηνός και να έχει διαστάσεις συγκρίσιμες με τη διάμετρο του πυρήνα της οπτικής ίνας. Τις απαιτήσεις αυτές ικανοποιούν οι φωτοδιόδους ημιαγωγού, που χρησιμοποιούνται σήμερα στους δέκτες όλων των οπτικών συστημάτων. Υπάρχουν δύο τύποι τέτοιων φωτοδίοδων ημιαγωγού, η φωτοδίοδος PIN και η φωτοδίοδος χινοσστιβάδας APD.

3.1. PIN φωτοδίοδος

Η φωτοδίοδος PIN αποτελείται από τρία στρώματα. Ένα τύπου p, ένα τύπου n και μεταξύ τους παρεμβάλλεται ένα φωτοευαίσθητο στρώμα χαμηλής νόθευσης (intrinsic). Σε αυτό το στρώμα πραγματοποιείται η μετατροπή της οπτικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η φωτοδίοδος πολώνεται

ανάστροφα (δηλαδή ο θετικός ακροδέκτης τροφοδοσίας συνδέεται στην περιοχή τύπου $-n$ και ο αρνητικός στην περιοχή τύπου $-p$) με τυπική τιμή τάσης 5V. Όταν πέσει φως πάνω στη φωτοδίοδο, τότε κάθε φωτόνιο απορροφάται και δημιουργείται ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής. Κάτω από την επίδραση της ανάστροφης πόλωσης, τα αντίθετα ηλεκτρικά φορτία ηλεκτρονίου και οπής κινούνται σε αντίθετες διευθύνσεις και δημιουργούν ένα ηλεκτρικό ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα.

Το μήκος κύματος λειτουργίας μιας φωτοδίοδου εξαρτάται από το υλικό κατασκευής της. Το Si είναι κατάλληλο για τα μικρά μήκη κύματος (0,8-0,9 μ m), το Ge για το πρώτο 'παράθυρο' των οπτικών ινών (1,3 μ m) και το InGaAs (Ινδίο-Γάλλιο-Αρσενικό) για το δεύτερο 'παράθυρο' των οπτικών ινών (1,55 μ m).



Η σημαντικότερη παράμετρος μιας φωτοδίοδου είναι η αποκρισμότητα R (Responsivity) που συσχετίζει το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα I με την προσπίπτουσα στη φωτοδίοδο οπτική ισχύ P , όπως δείχνει ο τύπος $R=I/P$, και εξαρτάται από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι τυπικές τιμές της αποκρισμότητας είναι 0,75 – 0,9A/W.

Σημαντική επίσης ιδιότητα μιας φωτοδίοδου PIN είναι το μεγάλο εύρος φωτεινής ισχύος που μπορεί να ανιχνεύσει. Η φωτοδίοδος μπορεί να ανιχνεύσει φωτεινή ισχύ στην περιοχή από μερικά nWatts μέχρι μερικές δεκάδες mWatts. Σε όλη αυτήν την περιοχή η φωτοδίοδος παράγει ρεύμα ανάλογο ($I=R \cdot P$) της προσπίπτουσας φωτεινής ισχύος.

Επειδή το ρεύμα εξόδου μιας PIN είναι πολύ ασθενές (της τάξης των μ A), χρειάζεται ενίσχυση πριν διοχετευθεί στις υπόλοιπες βαθμίδες του ηλεκτρονικού δέκτη. Η ενίσχυση πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενισχυτή με τρανζίστορ FET και έτσι έχουμε το συνδυασμό PIN με τρανζίστορ FET, ο οποίος ονομάζεται με μία λέξη φωτοδέκτης PIN-FET.

3.2. APD φωτοδίοδος

Η φωτοδίοδος APD (Avalanche Photodiode) χρησιμοποιεί τον ρυθμό λειτουργίας ανάστροφης κατάρρευσης, που συναντάται στις Zener διόδους. Όταν εφαρμόζεται μια κατάλληλη ανάστροφη τάση σε αυτή, τότε ρέει ένα εξαιρετικά υψηλό ρεύμα λόγω του φαινομένου της χιονοστιβάδας. Συνήθως εφαρμόζεται μια ανάστροφη πόλωση μερικών εκατοντάδων volt, κάτω ακριβώς από το κατώφλι κατάρρευσης. Όταν το φως προσπίπτει στην επαφή, πραγματοποιείται κατάρρευση και ρέει μεγάλο ρεύμα. Όσο υψηλότερη είναι η αντίστροφη τάση τόσο υψηλότερο είναι και το κέρδος στην ένταση του ρεύματος που παράγεται. Το κέρδος αυτό ποικίλλει έντονα με την ανάστροφη τάση και την θερμοκρασία, οπότε είναι απαραίτητο να ελέγχεται η αντίστροφη τάση προκειμένου να κρατηθεί σταθερό το κέρδος.

Το πλεονέκτημα των APD είναι ότι το μεγάλο αυτό ρεύμα δεν απαιτεί μεγάλη ενίσχυση, σε αντίθεση με το μικρό ρεύμα που παράγεται από μία τυποποιημένη φωτοδίοδο. Επίσης, είναι ταχύτερες και πολύ πιο ευαίσθητες από τις PIN φωτοδίοδους, καταφέροντας έτσι να ανταπεξέλθουν στους πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων των σύγχρονων συστημάτων.

4. Οπτικές Ίνες

Οι οπτικές ίνες είναι σήμερα η καλύτερη λύση στην μετάδοση πληροφορίας γιατί παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα άλλα μέσα. Διαθέτουν πολύ μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται υψηλές ταχύτητες μετάδοσης (της τάξης των Gbps). Οι πιο συνηθισμένες ταχύτητες είναι στα 2.5 και 10 Gbps, ενώ έχουν αναπτυχθεί και συστήματα των

20, 40 και 50 Gbps. Χρησιμοποιώντας την τεχνική της πολυπλεξίας μήκους κύματος, που θα περιγραφεί παρακάτω, οι ταχύτητες μπορούν να φτάσουν τα μερικά Tbps. Η εξασθένιση του σήματος είναι μικρότερη από ότι στα χάλκινα και ομοαξονικά καλώδια, με αποτέλεσμα οι αποστάσεις μεταξύ ενισχυτών ή άλλων ενεργών στοιχείων του δικτύου να κυμαίνονται από μερικά μέχρι και μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα, ανάλογα με τη τεχνική και το ρυθμό μετάδοσης.

Παράλληλα, δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικά πεδία, με αποτέλεσμα να συνιστάται η χρήση τους σε βιομηχανικό περιβάλλον και σε χώρους με υψηλό θόρυβο. Επιπλέον, δεν είναι ευαίσθητες στο υγρό περιβάλλον, όπου τα χάλκινα καλώδια μπορεί να δημιουργήσουν βραχυκυκλώματα. Επειδή η οπτική ίνα δεν μεταφέρει ηλεκτρικό σήμα, προτιμάται σε περιοχές υψηλού κίνδυνου εκρήξεων από σπινθήρες (χώροι καυσίμων, εύφλεκτων αερίων κλπ.). Επίσης, το βάρος και ο όγκος τους είναι σημαντικά μικρότερος από τα αντίστοιχα μεγέθη των άλλων αγωγών. Αξίζει να αναφερθεί ότι ένα χάλκινο καλώδιο με 1000 ζεύγη και μήκος 500 μέτρων ζυγίζει περίπου 4 τόνους, ενώ μία οπτική ίνα του ίδιου μήκους, που περιέχει τον ίδιο αριθμό καναλιών, ζυγίζει μόνο 45 κιλά. Τέλος, η υποκλοπή ή η παρεμβολή πληροφορίας είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθούν, με αποτέλεσμα οι οπτικές ίνες να συνιστούν πολύ ασφαλές μέσο μετάδοσης. Συμπερασματικά, πρέπει να αναφερθεί, ότι τα καλώδια οπτικών ινών παρουσιάζουν τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες με τα ομοαξονικά, αλλά είναι ελαφρότερα, μικρότερα σε διάμετρο και οι αποστάσεις μεταξύ των επαναληπτών είναι μεγαλύτερες.

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

4.1. Αρχές λειτουργίας

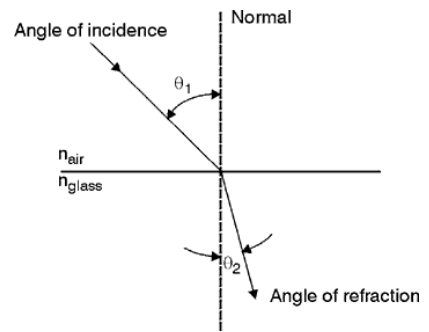
Η λειτουργία των οπτικών ινών βασίζεται στην ικανότητά τους να μεταδίδουν φως από ένα σημείο σε ένα άλλο, λόγω της κατασκευής τους. Η δυσκολία την οποία συναντά το φως κατά την κίνησή του μέσα στην οπτική ίνα καθορίζεται από τον δείκτη διάθλασης του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένη η ίνα. Δείκτης διάθλασης είναι ο λόγος της ταχύτητας του φωτός στο κενό, που είναι η μεγαλύτερη δυνατή ταχύτητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, προς την ταχύτητα στο μέσο διάδοσης. Η ταχύτητα του φωτός σε κάποιο υλικό είναι πάντα μικρότερη από αυτή στο κενό και αντίστοιχα ο συντελεστής διάθλασης των διαφόρων υλικών είναι μεγαλύτερος από αυτόν του κενού.

Η διάδοση του φωτός στα υλικά, γενικά, περιγράφεται από το νόμο του Snell που προσδιορίζει τις γωνίες ανάκλασης (angle of incidence) θ_1 και διάθλασης (angle of refraction) θ_2 κάνοντας χρήση του λόγου των δεικτών διάθλασης n . Η εξίσωση που περιγράφει τον νόμο του Snell είναι:

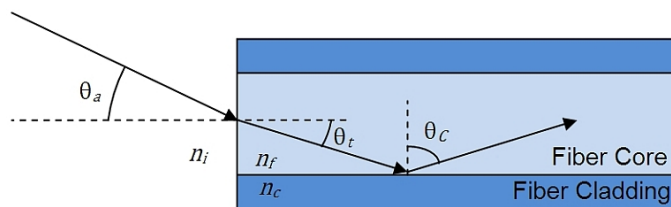
$$n_1 \cdot \sin\theta_1 = n_2 \cdot \sin\theta_2$$

Ο νόμος του Snell λέει ότι όταν το φως κινείται προς ένα υλικό με μικρότερο δείκτη διάθλασης, από αυτό στο οποίο βρίσκεται, και η γωνία πρόσπτωσης γίνει αρκετά μεγάλη δεν θα πραγματοποιηθεί διάθλαση αλλά ολική ανάκλαση. Η χαρακτηριστική γωνία με την οποία συμβαίνει αυτό το φαινόμενο ονομάζεται οριακή γωνία. Αυτό το φαινόμενο έχει σαν αποτέλεσμα τη συνεχόμενη

διάδοση του φωτός στο ίδιο υλικό και αποτελεί την αρχή λειτουργίας των οπτικών ινών. Το φως διαδίδεται μέσα σε αυτές λόγω των συνεχόμενων ανακλάσεων που συμβαίνουν στο εσωτερικό τους. Η οριακή γωνία για την οποία συμβαίνει ολική ανάκλαση στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ δύο υλικών καθορίζεται από το δείκτη διάθλασης των δύο αυτών υλικών.



Για την περίπτωση των οπτικών ινών η οριακή γωνία αντιστοιχεί σε έναν κώνο ο οποίος καθορίζεται από το αριθμητικό άνοιγμα (numerical aperture (NA)) της ίνας, όπως στο σχήμα 5. Το αριθμητικό άνοιγμα είναι το ημίτονο της μέγιστης γωνίας εισόδου μιας ακτίνας φωτός ώστε αυτή να διαδοθεί μέσα στην οπτική ίνα με ολική ανάκλαση και δίνεται από την σχέση $NA = n_i \cdot \sin \theta_a$, όπου n_i είναι ο δείκτης διάθλασης του υλικού έξω από την οπτική ίνα (συνήθως αέρας) και θ_a είναι η γωνία αποδοχής μιας ίνας. Σαν γωνία αποδοχής ορίζεται η μισή γωνία του κώνου φωτός που μπορεί να πέσει πάνω στην οπτική ίνα και να ανακλαστεί ολικά. Το αριθμητικό άνοιγμα μιας ίνας και οι γωνίες αποδοχής χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίζουν την ποιότητα των πομπών και των ανιχνευτών. Όταν ο εξωτερικός χώρος είναι ο αέρας, τότε $n=1$, το άνοιγμα δεν μπορεί να υπερβεί την τιμή της μονάδας και λαμβάνει τυπικές τιμές, που κυμαίνονται μεταξύ 0.2 και 1.0. Στο σχήμα 5, θ_c είναι η οριακή γωνία για ολική ανάκλαση του σήματος στο εσωτερικό της οπτικής ίνας.

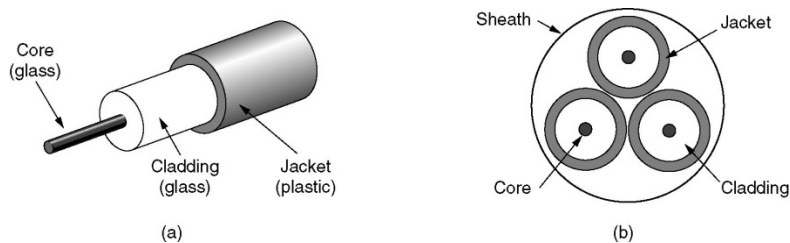


Σχήμα 5 – Ανάκλαση του φωτός στην οπτική ίνα

4.2. Δομή και χαρακτηριστικά οπτικών ινών

Η οπτική ίνα αποτελείται από τρία βασικά μέρη: τον πυρήνα (core), το περίβλημα (cladding) και το κάλυμμα (jacket).

Ο πυρήνας βρίσκεται στο κέντρο της ίνας και είναι η περιοχή η οποία στην πραγματικότητα μεταφέρει το φως. Είναι κατασκευασμένος από γυαλί και η διάμετρος του κυμαίνεται από 9μm έως 100μm, ανάλογα το είδος της ίνας που χρησιμοποιείται.



Σχήμα 6 – Δομή της οπτικής ίνας

Περίβλημα ονομάζεται το υλικό όπου περιβάλλει τον πυρήνα και είναι το μέρος της ίνας που ανακλά το φως πίσω στον πυρήνα. Είναι κατασκευασμένο από γυαλί και έχει διάμετρο 125μm ή 140μm. Ένα σχεδιαστικό χαρακτηριστικό όλων των οπτικών ινών είναι ότι ο δείκτης διάθλασης του

πυρήνα είναι υψηλότερος από τον δείκτη διάθλασης του περιβλήματος. Και τα δυο, ο πυρήνας και το περίβλημα, μπορεί να είναι κατασκευασμένα και από πλαστικό υψηλής καθαρότητας.

Κάλυμμα ή ενίσχυση είναι η εξωτερική περιοχή της ίνας και είναι ένα πλαστικό υλικό, που παρέχει προστασία και διατηρεί την αντοχή του γυαλιού της ίνας. Τυπικοί διάμετροι για το κάλυμμα είναι 250, 500 και 900 μm , ανάλογα τον τύπο της ίνας.

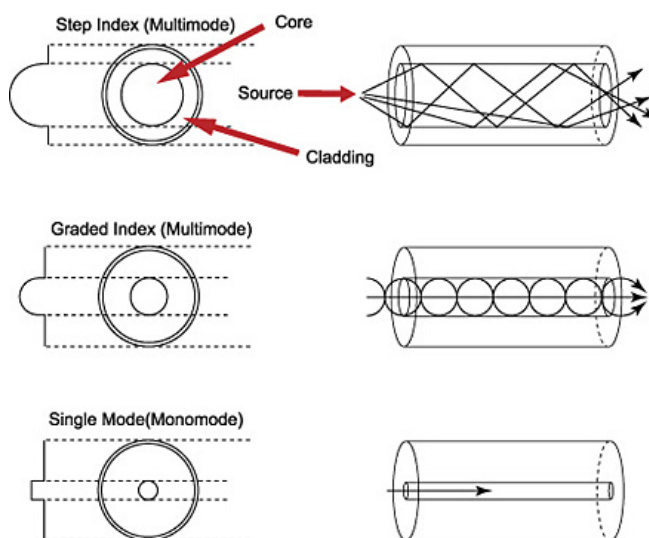
4.3. Τύποι οπτικών ινών

Όπως περιγράφηκε νωρίτερα, η εκπομπή του οπτικού σήματος στην οπτική ίνα γίνεται από πηγή LED ή laser, και τα μήκη κύματος του φωτός, που η οπτική ίνα είναι σχεδιασμένη να μεταφέρει, ποικίλουν από 800nm μέχρι 1500nm. Οι οπτικές ίνες διαφοροποιούνται, κατ' αρχήν, από τον τρόπο μετάδοσης του σήματος σε αυτές. Η πρώτη βασική διάκριση είναι μεταξύ των πολύτροπων (multimode) και μονότροπων (single mode) οπτικών ινών.

Στις πολύτροπες οπτικές ίνες αναφέρεται πρώτα η διάμετρος του πυρήνα και στη συνέχεια η διάμετρος του περιβλήματος. Οι πολύτροπες οπτικές ίνες έχουν τυπικά μεγέθη 50 μm /125 μm , 62,5/125, 85/125 ή 100/140, με τον συνηθέστερο τύπο να είναι ο 62,5/125 μm . Η ολική διάμετρος της οπτικής ίνας, συμπεριλαμβανομένων των ενισχυτικών συνθετικών ινών και του εξωτερικού περιβλήματος, φτάνει τα 900 μm . Η αρχή μετάδοσης σε πολύτροπη οπτική ίνα είναι ότι οι διάφορες ακτίνες φωτός ταξιδεύουν ανακλώμενες υπό διαφορετικές γωνίες, ανάλογα με την γωνία εισόδου τους στην οπτική ίνα, όπως φαίνεται στο σχήμα παρακάτω. Ο τρόπος αυτός μετάδοσης ονομάζεται πολύτροπος επειδή υπάρχουν πολλοί δρόμοι μετάδοσης που αντιστοιχούν στις διαφορετικές γωνίες ανάκλασης. Οι πολύτροπες οπτικές ίνες διακρίνονται σε δυο υποκατηγορίες: τις διακριτού δείκτη (step index) και τις βαθμιαίου δείκτη (graded index).

Στις ίνες διακριτού δείκτη γίνεται απότομη μεταβολή του δείκτη διάθλασης μεταξύ της κεντρικής ίνας και του περιβλήματος. Στην περίπτωση αυτή, η πορεία των ακτινών φαίνεται στο σχήμα δίπλα.

Οι ίνες βαθμιαίου δείκτη χαρακτηρίζονται από βαθμιαία μεταβολή του δείκτη διάθλασης του υλικού της κεντρικής ίνας. Έτσι γίνεται βαθμιαία μείωση όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο προς την εξωτερική επιφάνεια του γυαλιού. Η πορεία των ακτινών σε μια τέτοια ίνα είναι αυτή που φαίνεται δίπλα.



Στις μονότροπες οπτικές ίνες η διάμετρος του πυρήνα είναι πολύ μικρή και πλησιάζει περίπου το επίπεδο του μήκους κύματος του εκπεμπόμενου σήματος. Στην περίπτωση αυτή, υπάρχει ένας μόνο δυνατός τρόπος μετάδοσης του οπτικού σήματος, ο αξονικός. Η πορεία των ακτινών σε μια τέτοια οπτική ίνα είναι ευθεία, φαίνεται στο σχήμα παραπάνω. Η κεντρική ίνα στις μονότροπες οπτικές ίνες έχει διάμετρο από 5 μm έως 10 μm με συνηθέστερη τιμή τα 8,3 μm .

4.4. Καλώδια οπτικών ινών

Τα οπτικά καλώδια περιλαμβάνουν μία ή περισσότερες οπτικές ίνες μέσα σε ειδική επικάλυψη που φροντίζει για τη προστασία και την αντοχή της γυάλινης οπτικής ίνας από τις περιβαλλοντικές αλλαγές, μηχανικές τάσεις και ρωγμές. Λόγω των απαραίτητων προστατευτικών μέτρων που πρέπει να παρθούν, και την ειδική κατασκευή τους, το κόστος των οπτικών καλωδίων είναι συνήθως μεγαλύτερο από αυτό των χάλκινων καλωδίων. Οι απαιτήσεις προστασίας και αντοχής ενός οπτικού καλωδίου καθορίζονται από την αντοχή σε έκταση, την σκληρότητα, τις περιβαλλοντική συνθήκες, την διάρκεια ζωής, την ευκαμψία, το σχήμα, το μέγεθος και το βάρος.

Η επιλογή του κατάλληλου κάθε φορά καλωδίου εξαρτάται από την εφαρμογή αφού κανένα καλώδιο δεν είναι κατασκευασμένο για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις όλων των χρήσεων. Τα κύρια τμήματα της δομής ενός οπτικού καλωδίου είναι: πρωτεύουσα επικάλυψη (buffer), ίνες Kevlar (Kevlar fibers), άκαμπτο τμήμα (strength member), δευτερεύουσα επικάλυψη (buffer), εξωτερικό περίβλημα (jacket).

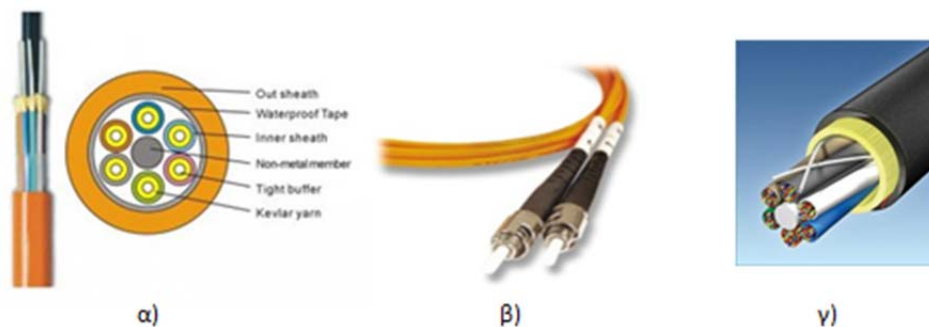
Οι εσωτερικές επικαλύψεις χρησιμοποιούνται για να προστατέψουν την κάθε ίνα και το σύνολο τους από σπάσιμο. Το άκαμπτο τμήμα για να αποτρέψει το λύγισμα του καλωδίου και για να αυξήσει την αντοχή του καλωδίου κατά την τοποθέτηση του. Το εξωτερικό περίβλημα παρέχει προστασία από το νερό, τα οξέα και την υγρασία και μπορεί να αποτελείται από περισσότερα του ενός στρώματα. Η ικανότητα επιμήκυνσης της οπτικής ίνας είναι πάρα πολύ μικρή καθώς δε και η εξωτερική της διάμετρος είναι μικρή. Αν εφαρμοσθεί μια τάση (τράβηγμα) για μεγάλο χρονικό διάστημα ακόμα και για φορτία κάτω του φορτίου θραύσης της ίνας, η ίνα παθαίνει μία μόνιμη παραμόρφωση με συνέπεια την αύξηση των απωλειών του σήματος.

Όταν σχεδιάζεται και κατασκευάζεται ένα καλώδιο πρέπει να λαμβάνονται όλες οι προφυλάξεις που απαιτούνται για να προφυλάξουν την ίνα από μόνιμες παραμορφώσεις που σαν αποτέλεσμα έχουν το σπάσιμο της ίνας και από μικροκάμψεις που σαν αποτέλεσμα έχουν την αύξηση των απωλειών.

Τα καλώδια οπτικών ινών συνήθως περιέχουν από 1 έως 36 οπτικές ίνες. Τα πιο συνηθισμένα είναι τα καλώδια με ζυγό αριθμό οπτικών ινών που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία των πλήρως αμφίδρομων (full-duplex) κυκλωμάτων. Οι δυο βασικοί τύποι τέτοιων οπτικών ινών περιγράφονται παρακάτω, και φαίνονται στο σχήμα 7.

Ο πρώτος τύπος είναι γνωστός σαν Tight Buffer καλώδιο, σχήμα 7α, όπου σε κάθε οπτική ίνα και εξωτερικά από την επίστρωση υπάρχουν συνθετικές ίνες και εξωτερικό μονωτικό περίβλημα. Μέσα στο καλώδιο υπάρχουν πολλές ίνες, όπου η κάθε ίνα αποτελεί και ένα ξεχωριστό καλώδιο, και καλώδια τα οποία χρησιμεύουν για ενίσχυση και στρογγυλοποίηση του όλου σχήματος. Όλα αυτά τα καλώδια, τέλος, περικλείονται από εξωτερικό περίβλημα. Παρόμοιας κατασκευής είναι τα εύκαμπτα καλώδια, που χρησιμοποιούμε για τη σύνδεση με τον ενεργό εξοπλισμό (optical patch cords), σχήμα 7β. Αποτελούνται από δυο καλώδια ενωμένα στο εξωτερικό τους, το κάθε ένα από τα οποία περιέχει οπτική ίνα από πλαστικό.

Ο δεύτερος τύπος είναι γνωστός σαν Loose Buffer, σχήμα 7γ, όπου οι οπτικές ίνες με την επίστρωση τους είναι τοποθετημένες ελεύθερα μέσα στο καλώδιο και περικλείονται από εξωτερικό περίβλημα. Εδώ υπάρχει επίσης επίστρωση από συνθετικές ίνες μέσα από το εξωτερικό περίβλημα, για την ανθεκτικότητα του καλωδίου.



Σχήμα 7 – α) Tight Buffer, β) optical patch cord, γ) Loose Buffer καλώδια οπτικών ινών

5. Απώλειες και περιορισμοί εύρους ζώνης στις οπτικές ίνες

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι παράγοντες που σχετίζονται με το εύρος ζώνης της οπτικής ίνας και την εξασθένηση που επιφέρει η ίνα στο οπτικό σήμα. Το εύρος ζώνης υποδεικνύει άμεσα τον ρυθμό μετάδοσης με τον οποίο μπορεί να σταλεί πληροφορία μέσω της οπτικής ίνας, ενώ η εξασθένηση του σήματος καθορίζει τον αριθμό ενισχυτών ή επαναληπτών που πρέπει να τοποθετηθούν μεταξύ πομπού και δέκτη σε μια οπτική ζεύξη. Η τοποθέτηση και η συντήρηση αυτών των διατάξεων έχει μεγάλη επίδραση στο ολικό κόστος του συστήματος.

Γενικά, τα φαινόμενα που επηρεάζουν τη διάδοση του φωτός στις οπτικές ίνες χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα γραμμικά φαινόμενα και τα μη γραμμικά. Τα γραμμικά φαινόμενα είναι η εξασθένηση (απώλειες) του σήματος και η διασπορά των παλμών. Εξασθένηση του σήματος είναι η απώλεια στην αρχική ισχύ του σήματος που παράγεται από τον πομπό και καθορίζει άμεσα τη μέγιστη απόσταση της τηλεπικοινωνιακής ζεύξης. Διασπορά είναι ο πεπλατισμός των οπτικών παλμών καθώς ταξιδεύουν στην οπτική ίνα και καθορίζει τον μέγιστο ρυθμό μετάδοσης (bit rate) που μπορεί να διακινήσει, δηλαδή το μέγιστο χρήσιμο εύρος ζώνης (bandwidth) της ίνας. Εκτός από τους περιορισμούς που θέτουν τα δύο αυτά φαινόμενα λόγω της οπτικής ίνας, υπάρχουν και άλλοι που οφείλονται σε άλλα δομικά στοιχεία των οπτικών δικτύων όπως πομποί, δέκτες ή ενισχυτές.

Τα βασικότερα μη γραμμικά φαινόμενα που επηρεάζουν τη διάδοση του φωτός στην οπτική ίνα είναι η μίξη τεσσάρων κυμάτων (four wave mixing (FWM)), η εξαναγκασμένη σκέδαση Raman (stimulated Raman Scattering (SRS)) και Brillouin (SBS) και η αυτοδιαμόρφωση και η ετεροδιαμόρφωση φάσης (Self/Cross Phase Modulation (SPM/XPM)). Τα μη γραμμικά φαινόμενα παρατηρούνται όταν χρησιμοποιούνται οπτικοί παλμοί μεγάλης έντασης και θα μελετηθούν σε επόμενη παράγραφο. Για συνηθισμένες τιμές της έντασης σήματος, ο κυρίαρχος μηχανισμός που επηρεάζει τη διάδοση των παλμών είναι τα γραμμικά φαινόμενα.

5.1. Εξασθένηση (Attenuation)

Σαν εξασθένηση σήματος (ή απώλεια σήματος) σε μια οπτική ίνα ορίζεται ως ο λόγος της οπτικής ισχύος στην έξοδο της ίνας σε σχέση με τη ισχύ εισόδου και καθορίζει, κατά μεγάλο μέρος, τη μέγιστη απόσταση στην οποία απαιτείται αναγέννηση και ενίσχυση του σήματος. Εκφράζεται σε

dB/km και ο συντελεστής εξασθένησης α γράφεται: $\alpha(dB) = -\frac{10}{L} \log \frac{P_{out}}{P_{in}}$, όπου L είναι το μήκος

της οπτικής ίνας, P_{out} είναι η ισχύς στην έξοδο και P_{in} η ισχύς στην είσοδο της οπτικής ίνας.

Διάφοροι μηχανισμοί είναι υπεύθυνοι για την εξασθένηση του σήματος στην οπτική ίνα και οφείλονται στην απορρόφηση του σήματος λόγω του υλικού κατασκευής της ίνας, σε σκεδάσεις στο εσωτερικό της ίνας, στα σημεία συνενώσεων (splices) δύο οπτικών ινών και στους συνδετήρες (connectors) που χρησιμοποιούνται για να συνδέσουν τα οπτικά στοιχεία.

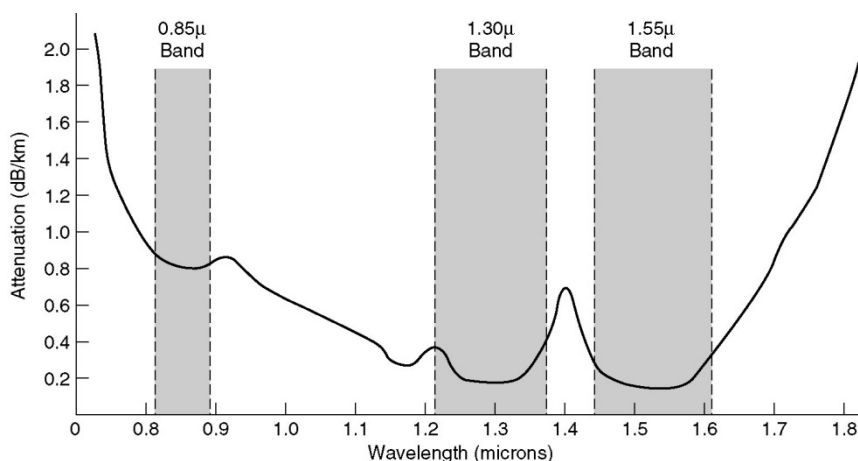
Απορρόφηση (Absorption)

Στο γυαλί, από το οποίο είναι κατασκευασμένη η οπτική ίνα, υπάρχουν ηλεκτρόνια ξένων προσμείξεων, όπως είναι το ιόντα, τα οποία απορροφούν μέρος της μεταδιδόμενης οπτικής ισχύος. Επίσης, απώλειες απορρόφησης υπάρχουν ακόμα στην περιοχή του υπεριώδους φωτός λόγω του ίδιου του υλικού της ίνας και στο υπέρυθρο φως λόγω αλληλεπίδρασης των φωτονίων με τα ταλαντευόμενα μόρια του πλέγματος του γυαλιού. Άλλοι εξωγενείς παράγοντες, όπως ξένες προσμίξεις και ανομοιογένειες στη κατασκευή της ίνας, συμβάλλουν στις απώλειες λόγω απορρόφησης της οπτικής ενέργειας η οποία καταναλώνεται με την μορφή θερμότητας.

Σκέδαση (Scattering)

Με τον όρο αυτό χαρακτηρίζεται η διάχυση (σκόρπισμα) που υφίσταται η φωτεινή ακτινοβολία στο μανδύα καθώς διαδίδεται στον πυρήνα της ίνας. Μπορεί να οφείλεται σε ανωμαλίες στη σύνθεση του υλικού της ίνας, που μπορεί να είναι είτε κάποιες ξένες προσμείξεις είτε κάποια σημειακή ανομοιογένεια του δείκτη διάθλασης. Αν αυτές οι ανωμαλίες έχουν μέγεθος r αρκετά μικρότερο από το χρησιμοποιούμενο μήκος κύματος λ (δηλαδή $r < 0.1\lambda$), η σκέδαση ονομάζεται Rayleigh scattering και έχει ισχυρή εξάρτηση από το μήκος κύματος στο οποίο γίνεται η μετάδοση. Η σκέδαση είναι πολύ μεγαλύτερη στα μικρά μήκη κύματος γιατί είναι ανάλογη του $1/\lambda^4$. Αυτός ο τύπος σκέδασης είναι υπεύθυνος για τις απώλειες στις ίνες αλλά και για το μπλε χρώμα του ουρανού.

Στο σχήμα 8 βλέπουμε την εξάρτηση των απωλειών μιας τυπικής οπτικής ίνας σε σχέση με το χρησιμοποιούμενο μήκος κύματος και με τους μηχανισμούς που τις προκαλούν. Φαίνονται οι περιοχές των 850nm, 1300nm και 1550nm. Στις δύο τελευταίες φαίνεται ότι η οπτική ίνα παρουσιάζει μικρή εξασθένηση σε σχέση με την πρώτη. Οι τρεις αυτές περιοχές, γνωστές και σαν «φασματικά παράθυρα» των οπτικών επικοινωνιών, είναι οι κυριότερες περιοχές μηκών κύματος που χρησιμοποιούνται σήμερα για την μετάδοση.



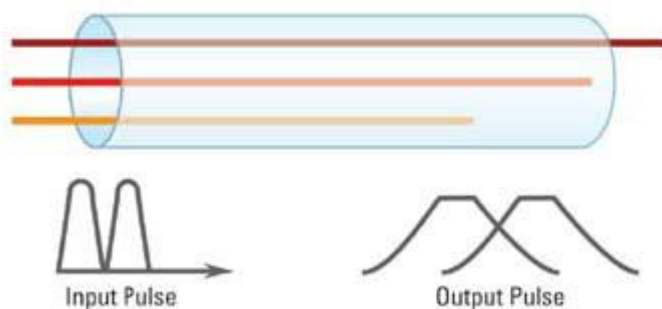
Σχήμα 8 – Εξασθένηση σε μια οπτική ίνα

Η περιοχή των 850nm χρησιμοποιήθηκε αρχικά στα πρώτα οπτικά συστήματα και είναι φανερή η ισχυρή εξάρτηση της σκέδασης από το μήκος κύματος λ . Τα παράθυρα των 1300nm με εύρος περίπου 12THz και των 1550nm με εύρος περίπου 15THz, χρησιμοποιούνται πλέον στα σημερινά

συστήματα, αφού η τεχνολογία επέτρεψε την κατασκευή κατάλληλων πομποδεκτών και παθητικών οπτικών στοιχείων. Οι μακροσκοπικές (macro bending) και οι μικροσκοπικές (micro bending) κάμψεις της οπτικής ίνας αποτελούν εξωγενή αίτια απωλειών.

5.2 Διασπορά (Dispersion)

Οι διάφοροι μηχανισμοί διασποράς σε μία οπτική ίνα έχουν σαν τελικό αποτέλεσμα τη διεύρυνση του πλάτους των φωτεινών παλμών καθώς αυτοί ταξιδεύουν στην ίνα. Το φαινόμενο φαίνεται στο σχήμα 9, όπου παρατηρείται ότι καθώς το πλάτος ενός παλμού διευρύνεται, κάποια στιγμή αλληλεπικαλύπτεται με γειτονικούς παλμούς και γίνεται δυσδιάκριτος στον δέκτη (intersymbol interference). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού λαθών στην μετάδοση και δυσκολία σωστής μετάφρασης των δεδομένων από τον δέκτη. Συνεπώς, η διασπορά των παλμών του σήματος περιορίζει το ρυθμό μετάδοσης στην οπτική ίνα, η με άλλα λόγια το εύρος ζώνης της ίνας που μπορεί να αξιοποιηθεί.



Σχήμα 9 – Το φαινόμενο της διασποράς

Η διασπορά D δεν εμφανίζεται από την αρχή της μετάδοσης των οπτικών παλμών, αλλά μετά από κάποιο μήκος οπτικής ίνας και δίνεται από την παρακάτω σχέση. Η απόσταση στην οποία εμφανίζεται η διασπορά εξαρτάται από τον ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων, το μήκος κύματος που χρησιμοποιείται και το υλικό της οπτικής ίνας, και δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις.

$$D = -\frac{2\pi \cdot c}{\lambda^2} \beta_2 \quad L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \Rightarrow L_D = \frac{2\pi \cdot c}{B^2 \cdot \lambda^2 \cdot |D|}$$

Όπου D είναι η διασπορά, c η ταχύτητα μετάδοσης τους φωτός στον αέρα, λ το μήκος κύματος, β_2 η σταθερά διασποράς της οπτικής ίνας, L_D το μήκος ίνας στο οποίο κάνει την εμφάνισή της η διασπορά, T_0 η περίοδος του σήματος και B ο ρυθμός μετάδοσης. Παρακάτω περιγράφονται τα διάφορα είδη διασποράς που εμφανίζονται σε μια οπτική μετάδοση.

5.2.1 Χρωματική διασπορά (Chromatic Dispersion)

Συναντάται σε όλους τους τύπους των οπτικών ινών και οφείλεται στο πεπερασμένο εύρος ζώνης της οπτικής πηγής που τροφοδοτεί την ίνα. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η πηγή μπορεί να είναι είτε ένα laser συνεχούς εκπομπής και είτε ένα LED. Οι πηγές αυτές, όπως φαίνεται στο σχήμα 3, δεν εκπέμπουν μόνο μια συχνότητα αλλά ομάδα συχνοτήτων πεπερασμένου εύρους (π.χ. ένα LED με ονομαστικό μήκος κύματος στα 850nm στην πραγματικότητα εκπέμπει μήκη κύματος από 825nm μέχρι 875nm). Τα διαφορετικά μήκη κύματος υπόκεινται διαφορετικές καθυστερήσεις στη διάδοσή τους λόγω της διαφορετικής τους συχνότητας και ταχύτητας με την οποία ταξιδεύουν στην οπτική ίνα. Αυτές οι χρονικές καθυστερήσεις των διαφόρων συχνοτήτων στο άλλο άκρο του δέκτη έχουν σαν αποτέλεσμα τη χρονική διεύρυνση (διασπορά) του παλμού. Οι καθυστερήσεις αυτές μπορεί να οφείλονται είτε στις συγκεκριμένες ιδιότητες του υλικού της ίνας, είτε στην επιλεκτική με τη

συχνότητα κυματοδότηση της ίνας. Στην πρώτη περίπτωση έχουμε τη διασπορά υλικού Δ_t και στην δεύτερη τη διασπορά κυματοδηγού δ_w . Η συνολική διασπορά δ είναι το άθροισμα $\delta = \Delta_t + \delta_w$.

Διασπορά κυματοδηγού (Waveguide Dispersion)

Στην περίπτωση που ο κυματοδηγός είναι μια μονότροπη ίνα, ο μοναδικός τρόπος διάδοσης στα μικρά μήκη κύματος περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό μέσα στον πυρήνα, στα μεσαία μήκη κύματος διαχέεται ελαφρά μέσα στο περιβλήμα ενώ στα μεγάλα μήκη κύματος διαχέεται σε μεγάλο βαθμό στο περιβλήμα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου διάδοσης καθώς το μήκος κύματος αυξάνεται και αυτό γιατί ο δείκτης διάθλασης n του περιβλήματος είναι μικρότερος από του πυρήνα άρα η ταχύτητα των κυμάτων που διαδίδονται εκεί μεγαλύτερη. Ο μηχανισμός αυτός είναι γνωστός ως διασπορά κυματοδηγού και εξαρτάται από τα γεωμετρικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της οπτικής ίνας και το μήκος κύματος και έχει ως αποτέλεσμα την διαπλάτυνση του διαδιδόμενου σήματος λόγω της διαφορικής χρονικής καθυστέρησης Δt των μηκών κύματος. Η διασπορά κυματοδηγού συμβάλλει στη χρωματική διασπορά, καθώς όμως εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπτικής ίνας μπορεί να πάρει ελεγχόμενες τιμές με την κατάλληλη σχεδίαση και μπορεί να αντισταθμίσει την χρωματική διασπορά.

Το πρόβλημα της διασποράς αυτής εξαλείφεται πλήρως αν χρησιμοποιηθεί οπτική πηγή που να εκπέμπει αυστηρά σε ένα μόνο μήκος κύματος. Επειδή όμως αυστηρά μονοχρωματικές πηγές βέβαια δεν υπάρχουν, οι ευρέως χρησιμοποιούμενες φωτεινές πηγές laser εκπέμπουν σε ένα φασματικό εύρος $\Delta\lambda$ από 1 έως 10nm ενώ οι πηγές LED έχουν μεγαλύτερο φασματικό εύρος 50 – 100nm. Άρα με την χρησιμοποίηση των laser μειώνεται το φαινόμενο της χρωματικής διασποράς μιας και οι μεταδιδόμενες συχνότητες είναι πολύ λιγότερες από αυτές των LED. Σήμερα κατασκευάζονται πηγές με ακόμη μικρότερο εύρος και με αμελητέα χρωματική διασπορά, ωστόσο είναι πολύ ακριβές και χρησιμοποιούνται μόνο σε ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων. Επιπλέον, ακόμη και μονοχρωματική πηγή να υπήρχε, μία διεύρυνση του φασματικού εύρους της είναι αναπόφευκτη λόγω της διαμόρφωσης που πρέπει να εφαρμοστεί για την μεταφορά του σήματος πληροφορίας.

Το ποσοστό διεύρυνσης του οπτικού παλμού εξαρτάται από την αρχική του χρονική διάρκεια. Σε παλμούς με μικρή χρονική διάρκεια, οι οποίοι συνεπώς έχουν μεγάλο εύρος ζώνης, η διασπορά θα κάνει πολύ έντονη την παρουσία της. Επομένως, η σημασία του φαινομένου γίνεται εντονότερη όσο αυξάνει ο ρυθμός του οπτικού σήματος. Η διασπορά κυματοδηγού είναι παρούσα τόσο σε μονότροπη όσο και σε πολύτροπη οπτική ίνα.

Διασπορά υλικού (Material Dispersion)

Η διασπορά υλικού οφείλεται στο γεγονός ότι οι διάφορες φασματικές συνιστώσες του σήματος ταξιδεύουν στην ίνα με διαφορετικές ταχύτητες, όποτε, όταν διανύσουν L χιλιόμετρα που είναι το μήκος της ίνας, φθάνουν στον δέκτη χρονικά καθυστερημένα.

Αντιμετώπιση διασποράς

Για την αντιμετώπιση του συνολικού φαινομένου της χρωματικής (υλικού και κυματοδηγού) διασποράς έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι μονότροπων οπτικών ινών. Οι ίνες αυτές έχουν ιδιαίτερο προφίλ δείκτη διάθλασης με το οποίο καταφέρνουν να ρυθμίσουν την διασπορά κυματοδηγού και κατ' επέκταση τη συνολική διασπορά.

Οι κυριότεροι τύποι οπτικών ινών που χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση της διασποράς είναι:

- Η ίνα επίπεδης διασποράς (dispersion flattened fiber (DFF))
- Η ίνα μετατοπισμένης διασποράς (dispersion shifted fiber (DSF))
- Η ίνα επανόρθωσης της διασποράς (dispersion compensation fiber-DCF)

Οι ίνες επίπεδης διασποράς DFF, είναι μονότροπες ίνες με πολύ μικρό συντελεστή διασποράς, περίπου 3psec/nm/km , σε ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος μεταξύ 1300nm και 1700nm περίπου. Συνήθως, για τις κλασικές μονότροπες ίνες η διασπορά είναι μηδενική στα 1310nm , οπότε σε αυτό το μήκος κύματος η διασπορά κυματοδηγού αντισταθμίζει την διασπορά υλικού και έτσι η συνολική χρωματική διασπορά είναι μηδενική. Σε μικρότερα (850nm) ή μεγαλύτερα (1550nm) μήκη κύματος όμως ο συντελεστής διασποράς παίρνει τιμές από -50psec/km/nm έως και $+20\text{psec/km/nm}$.

Οι ίνες μετατοπισμένης διασποράς DSF, έχουν σχεδιαστεί ώστε να παρουσιάζουν μηδενική διασπορά στα 1550nm , και όχι στα 1310nm , μιας και αυτή η περιοχή είναι ιδιαίτερα ελκυστική στις οπτικές επικοινωνίες και προσφέρει το πλεονέκτημα της χαμηλότερης εξασθένησης σε σχέση με την περιοχή των 1310nm . Επιπλέον, σ' αυτή την περιοχή μηκών κύματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οπτικοί ενισχυτές (π.χ. EDFA) κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για WDM ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων.

Τέλος οι ίνες επανόρθωσης της διασποράς DCF, είναι ίνες με μεγάλη τιμή του συντελεστή διασποράς D αλλά με αντίθετο πρόσημο σε σχέση με τις κλασικές μονότροπες ίνες ώστε να αντισταθμίζουν τη διασπορά που δημιουργείτε από πολλά χιλιόμετρα κλασικής μονότροπης ίνας. Σε ζεύξεις μακρινών αποστάσεων ανάμεσα σε μεγάλα τμήματα απλής ίνας παρεμβάλλονται μικρά τμήματα DCF τα οποία «μαζεύουν» ξανά τον παλμό που είχε απλώσει εξαιτίας της διάδοσης του στην ίνα.

5.2.2 Διασπορά τρόπων διάδοσης

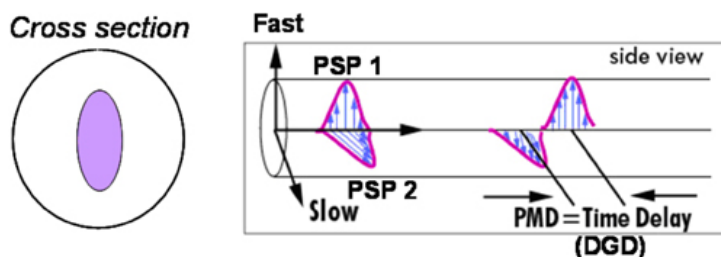
Όπως και η ονομασία αυτής της διασποράς, συναντάται μόνο σε πολύτροπες ίνες λόγω των πολλών διαθέσιμων τρόπων μετάδοσης του οπτικού παλμού. Η ισχύς ενός παλμού, καθώς αυτός οδηγείται σε μια πολύτροπη οπτική ίνα με σταθερούς δείκτες διάθλασης, διαμοιράζεται ανάλογα με τις διαστάσεις του πυρήνα της σε περισσότερους από έναν τρόπους. Η διεύρυνση ενός παλμού λόγω της διασποράς των τρόπων διάδοσης οφείλεται ουσιαστικά στις διαφορετικές χρονικές καθυστερήσεις που υφίστανται οι διάφοροι τρόποι στην πολύτροπη οπτική ίνα. Το πρόβλημα μετριάζεται με τη χρήση οπτικής ίνας, στην οποία ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα δεν είναι σταθερός, αλλά μειώνεται ακτινικά μέχρι το περίβλημα (ίνα διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης), όπως περιγράφηκε στην ενότητα 4.3. Με αυτό τον τρόπο σχεδόν εξισώνεται ο χρόνος διάδοσης των διαφόρων τρόπων.

5.2.3 Διασπορά τρόπων πόλωσης

Η διασπορά τρόπου πόλωσης (polarization mode dispersion (PMD)) οφείλεται στο γεγονός ότι κάθε τρόπος διάδοσης αποτελείται από δύο καταστάσεις πόλωσης (state of polarization (SOP)) κάθετες μεταξύ τους. Υπό ιδανικές συνθήκες ο πυρήνας της ίνας είναι κυκλικός και οι δύο αυτές καταστάσεις πόλωσης διαδίδονται με την ίδια ταχύτητα, μη χάνοντας την γωνία μεταξύ τους. Στην πραγματικότητα όμως εξαιτίας της κατασκευής της ίνας και κάποιων μηχανικών και θερμικών φορτίων που δέχεται η ίνα, το σχήμα του πυρήνα δεν είναι τελείως κυκλικό αλλά ελαφρά ελλειπτικό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ίνα να έχει ελάχιστα διαφορετικό δείκτη διάθλασης για κάθε κατάσταση πόλωσης. Η ιδιότητα αυτή λέγεται διπλοθλαστικότητα (birefringence) και εμφανίζεται και σε κάποιους κρυστάλλους εκ φύσεως.

Αυτό συνεπάγεται ότι οι δύο καταστάσεις πόλωσης που διαδίδονται στους δύο κάθετους μεταξύ τους άξονες να έχουν και διαφορετικές ταχύτητες πράγμα που οδηγεί στην καθυστέρηση του αργού τρόπου πόλωσης σε σχέση με τον ταχύ. Η καθυστέρηση αυτή είναι γνωστή και ως διαφορική καθυστέρηση ομάδας (differential group delay (DGD)) και έχει αποτέλεσμα τη διασπορά του

παλμού, όπως φαίνεται στο σχήμα 10. Ο δείκτης διάθλασης των δύο αξόνων μπορεί να έχει διαφορά της τάξης του 10^{-5} , πράγμα που σημαίνει ότι για μικρές αποστάσεις η καθυστέρηση είναι αμελητέα. Για δίκτυα πολλών χιλιομέτρων όμως ακόμα και αυτή η πολύ μικρή διαφορά μπορεί να δημιουργήσει μεγάλες σχετικές τιμές DGD.



Σχήμα 10 – Διασπορά τρόπου πόλωσης

Πολύ σημαντικός είναι και ο θόρυβος που προκαλεί η διπλοθλαστικότητα των οπτικών ινών. Στις συνηθισμένες ίνες, καθώς ο παλμός διαδίδεται, δε διατηρεί την πόλωση του. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας ατελειών στη σύνθεση και τη γεωμετρία της ίνας. Χωρίς να υπάρχει συνολικά απώλεια ενέργειας, ενέργεια μεταφέρεται από τον ένα άξονα πόλωσης στον άλλο, γεγονός που δεν είναι επιθυμητό όταν υπάρχουν συσκευές ευαίσθητες στην πόλωση όπως φωτοδίοδοι. Για να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο αυτό έχουν κατασκευαστεί ίνες με ειδική γεωμετρία, όπως ελλειπτικούς πυρήνες, και σύνθεση οι οποίες διατηρούν την πόλωση σταθερή χωρίς να υπάρχει μεταφορά ενέργειας από τη μια κατάσταση πόλωσης στην άλλη. Οι ίνες αυτές είναι γνωστές ως polarization maintaining fibers (PMF). Η διατήρηση της κατάστασης πόλωσης επιτυγχάνεται κάνοντας τις ίνες έντονα διπλοθλαστικές ώστε οι δύο καταστάσεις πόλωσης να έχουν πολύ διαφορετικές ταχύτητες και άρα να απέχουν μεγάλη απόσταση ώστε να μην μπορεί να γίνει μεταφορά ενέργειας μεταξύ τους.

5.3 Μη γραμμικά φαινόμενα

Μέχρι την ανακάλυψη και ανάπτυξη του laser, σχεδόν όλα τα οπτικά μέσα μετάδοσης (γυαλιά, κρύσταλλοι κ.α.) θεωρούνταν γραμμικά. Αυτό πρακτικά σήμαινε ότι η οπτικές ιδιότητες τους όπως ο δείκτης διάθλασης, ο συντελεστής απορρόφησης κ.α. ήταν ανεξάρτητες από την ένταση του φωτός που διαδιδόταν μέσα σε αυτά. Επίσης θεωρούνταν αποδεκτό ότι η συχνότητα του φωτός δεν μπορεί να αλλάξει λόγω της διάδοσης του μέσα από κάποιο μέσο. Η ανακάλυψη του laser όμως προσέφερε μεγαλύτερες εντάσεις ακτινοβολίας και έτσι διαπιστώθηκε ότι τα οπτικά μέσα μετάδοσης παρουσιάζουν εκτός από γραμμικά φαινόμενα και μη γραμμική συμπεριφορά για μεγάλες τιμές της έντασης ακτινοβολίας.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα συνηθισμένα φαινόμενα που συνήθως απασχολούν κατά το σχεδιασμό ενός δικτύου οπτικών ινών είναι τα γραμμικά φαινόμενα της απορρόφησης, της σκέδασης και της διασποράς. Σε μερικές περιπτώσεις όμως, όπως για παράδειγμα στον σχεδιασμό WDM ζεύξεων μεγάλων αποστάσεων (long haul), είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση παλμού φωτός μεγαλύτερης ισχύος. Η αυξημένη αυτή ισχύς όμως έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση των μη γραμμικών φαινομένων τα οποία επιδρούν στο σήμα που μεταφέρει την πληροφορία. Τα βασικότερα μη γραμμικά φαινόμενα είναι τα φαινόμενα λόγω σκέδασης, εξαναγκασμένη σκέδαση Brillouin και εξαναγκασμένη σκέδαση Raman, και τα φαινόμενα λόγω εξάρτησης του δείκτη διάθλασης από το φαινόμενο Kerr, αυτοδιαμόρφωση φάσης (self-phase modulation), ετεροδιαμόρφωση φάσης (cross-phase modulation) και μίξη τεσσάρων κυμάτων (four-wave mixing).

Η εξαναγκασμένη σκέδαση Brillouin SBS οφείλεται στην σκέδαση του φωτός από ακουστικά κύματα. Πιθανοί τρόποι αντιμετώπισης είναι η διατήρηση της ισχύος σε επίπεδα χαμηλότερα από το κατώφλι του SBS, η μείωση της απόστασης μεταξύ των ενισχυτών, η διεύρυνση του φάσματος του εκπεμπόμενου σήματος και η χρήση σχημάτων διαμόρφωσης κατά φάση. Η εξαναγκασμένη σκέδαση Raman SRS οφείλεται στην σκέδαση του φωτός από μοριακές δονήσεις και το φως που σκεδάζεται μπορεί να κινηθεί και προς τις δύο κατευθύνσεις. Πιθανοί τρόποι αντιμετώπισης είναι η μείωση των καναλιών σε ένα σύστημα, η διατήρηση της ισχύος κάτω από το κατώφλι SRS και η διάδοση σε ένα μη-μηδενικής διασποράς.

Στην αυτοδιαμόρφωση φάσης SPM, διαμόρφωση του δείκτη διάθλασης της οπτικής ίνας οδηγεί σε διαμόρφωση της φάσης του διαδιδόμενου σήματος. Συνεπώς, επιβάλλονται στιγμιαίες μεταβολές της κεντρικής συχνότητας (frequency chirping), διευρύνεται το φάσμα του διαδιδόμενου σήματος και γίνεται πιο ευάλωτο στη χρωματική διασπορά. Στην ετεροδιαμόρφωση φάσης XPM, ο δείκτης διάθλασης που συναντά ένα κύμα εξαρτάται και από την ισχύ των άλλων καναλιών που βρίσκονται μέσα στην ίνα. Στην μίξη τεσσάρων κυμάτων FWM, η μίξη των τεσσάρων κυμάτων μετατρέπει φωτόνια από ένα ή δύο κύματα σε δύο νέες συχνότητες. Η επίδραση του FWM είναι ισχυρή για μεγάλες τιμές ισχύος σήματος, για μικρή διασπορά και για μικρή απόσταση μεταξύ των καναλιών. Το φαινόμενο του FWM είναι κάποιες φορές επιθυμητό και βρίσκει εφαρμογές όπως παραμετρική ενίσχυση, αποπολυπλεξία OTDM καναλιών, μετατροπή μήκους κύματος και γένεση υπερσυνεχούς φάσματος – φασματοσκοπία.

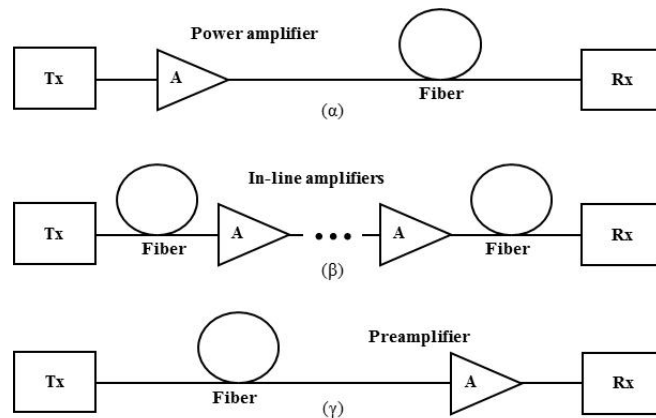
6. Οπτικοί Ενισχυτές

Στα μέχρι πρότινος επίγεια και υποθαλάσσια τηλεπικοινωνιακά συστήματα οπτικών ινών μεγάλων αποστάσεων, για την περιοδική ενίσχυση του σήματος χρησιμοποιούνταν επαναλήπτες – αναγεννητές σήματος οι οποίοι μετατρέπουν το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό, το ενισχύουν ηλεκτρονικά και στη συνέχεια το αναμεταδίδουν σε οπτική μορφή. Η χρήση όμως αυτών των επαναληπτών – αναγεννητών είχε κάποιους περιορισμούς. Η ηλεκτρονική ενίσχυση προσθέτει θόρυβο στο σήμα, το κόστος και το μέγεθος των αναγεννητών είναι μεγάλο, υπάρχει συχνή ανάγκη για συντήρησή τους και τέλος αδυναμία ταυτόχρονης ενίσχυσης πολλών μηκών κύματος μέσα στην ίδια ίνα. Ο μόνος τρόπος για να ξεπεραστούν όλες οι παραπάνω αδυναμίες ήταν να διατηρηθεί το σήμα σε οπτική μορφή σε όλο το μήκος της διαδρομής, κάτι που συνεπάγεται ότι θα πρέπει να γίνεται απευθείας ενίσχυση του οπτικού σήματος από καθαρά οπτικούς ενισχυτές.

Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας οπτικός ενισχυτής, όπως φαίνεται στο σχήμα 11:

- α) ως ενισχυτής ισχύος (power amplifier), αν τοποθετηθεί αμέσως μετά από το laser εκπομπής για να υψώσει το σήμα εξόδου σε μια υψηλή στάθμη,
- β) ως ενισχυτής γραμμής (in-line amplifier), για να ενισχύει το σήμα περιοδικά κατά μήκος της διαδρομής όπου παίζει το ρόλο αναγεννητή,
- γ) ως προενισχυτής (preamplifier), για να βελτιώσει την ευαισθησία του δέκτη ενισχύοντας το σήμα ακριβώς πριν τον δέκτη.

Στην πράξη, υπάρχουν δύο τύποι οπτικών ενισχυτών: οι ενισχυτές ημιαγωγού (semiconductor optical amplifiers (SOA)) και οι ενισχυτές με ίνα προσμειξεων ερβίου (erbium doped fiber amplifiers - EDFA).

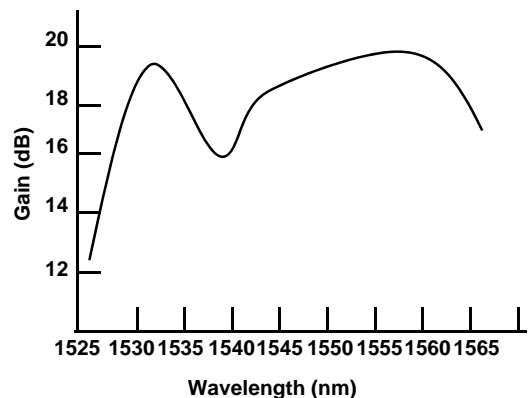


Σχήμα 11 – Θέσεις ενισχυτών

6.1 Ενισχυτές ημιαγωγού

Οι ενισχυτές ημιαγωγού, που κατασκευαστικά μοιάζουν με τα laser ημιαγωγού, έχουν μικρή κατανάλωση και μπορούν να ολοκληρώνονται μονολιθικά με άλλα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Το εύρος ζώνης τους, δηλαδή η περιοχή συχνοτήτων την οποία ενισχύουν, είναι της τάξης των 35nm, αλλά με ειδικές ημιαγωγικές δομές έχει φθάσει σήμερα μέχρι και τα 240nm. Τα μειονεκτήματά τους είναι ότι εισάγουν θόρυβο στο σήμα, έχουν σχετικά μεγάλο κόστος και εμφανίζουν διαφωνία μεταξύ των οπτικών σημάτων που ενισχύονται (μη ομαλό φάσμα ενίσχυσης).

Όπως φαίνεται και από το σχήμα, όταν ένας ενισχυτής δεν έχει ομαλό φάσμα ενίσχυσης, σημαίνει ότι τα κανάλια τα οποία μπορεί να ενισχύσει δεν θα ενισχυθούν το ίδιο αν δεν δουλεύουν στην ίδια συχνότητα. Το κέρδος με άλλα λόγια θα εξαρτάται από την συχνότητα στην οποία δουλεύει το κάθε κανάλι. Αυτό σημαίνει πως αν στην ίνα ταξιδεύουν περισσότερα από ένα κανάλια, ο ενισχυτής δεν θα τα ενισχύσει το ίδιο. Το πρόβλημα γίνεται ακόμα μεγαλύτερο όταν έχουμε περισσότερες από μία ενισχύσεις μεταξύ πομπού και δέκτη.



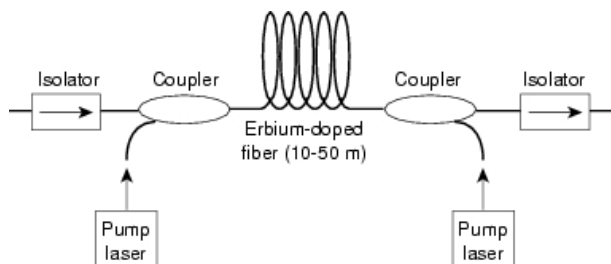
Οι SOAs έχουν χρησιμοποιηθεί σαν ενισχυτές σε συνδέσμους μεγάλων αποστάσεων με μέτρια αποτελέσματα. Δεν είναι ακόμα κατάλληλοι για συστήματα μεγάλης διαδρομής αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μικρής απόστασης WDM συστήματα. Ο οπτικός ενισχυτής ημιαγωγού μπορεί ακόμα να χρησιμοποιηθεί για λόγους διαφορετικούς από την ενίσχυση εκμεταλλευόμενος το πλεονέκτημα της μη γραμμικότητας που υπάρχει στον ημιαγωγό. Τέτοιες χρήσεις είναι η οπτική αποπολυπλεξία (optical demultiplexing), η ανάκτηση ρολογιού (clock recovery) και οι διακόπτες (switching).

6.2 Ενισχυτές ίνας προσμείξεων ερβίου

Οι ενισχυτές EDFA βασίζονται στην αρχή της ενίσχυσης του φωτός μέσα στην ίνα λόγω νόθευσης της με κατάλληλα υλικά (στοιχεία). Τα άτομα των προσμείξεων βρίσκονται στον πυρήνα της ίνας, από τον οποίο διέρχεται και το προς ενίσχυση σήμα εισόδου (με μήκος κύματος π.χ. λ_1). Στον ίδιο πυρήνα διοχετεύεται και φως υψηλής ισχύος από μια πηγή laser, η οποία ονομάζεται laser

άντλησης (pump laser), με μήκος κύματος λ_2 . Η άντληση είναι η διαδικασία με την οποία δίνεται η αναγκαία ενέργεια σε έναν οπτικό ενισχυτή ή μια πηγή laser, για να λειτουργήσει. Η άντληση είναι απαραίτητη για να διεγερθούν τα άτομα του υλικού, ώστε να έχουμε εξαναγκασμένη εκπομπή. Η ενέργεια άντλησης μπορεί να δίνεται είτε με την μορφή ηλεκτρικού ρεύματος (ενισχυτής ή laser ημιαγωγού) είτε με τη μορφή φωτεινής ακτινοβολίας (ενισχυτής ίνας).

Στον ενισχυτή ίνας τα άτομα προσμείξεων έχουν την ιδιότητα να απορροφούν φωτεινή ισχύ στο μήκος κύματος λ_2 και την αποδίδουν στο μήκος κύματος λ_1 . Με αυτόν τον τρόπο, το σήμα ενισχύεται σε οπτική μορφή, καθώς οδεύει μέσα στην ίνα. Οι πιο συνηθισμένοι ενισχυτές ίνας χρησιμοποιούν μερικά μέτρα ίνας με προσμείξεις του στοιχείου ερβίου (Er), σχήμα 12, και ενισχύουν φωτεινά σήματα στην περιοχή μηκών κύματος 1550nm των οπτικών επικοινωνιών.



Σχήμα 12 – Ενισχυτής EDFA

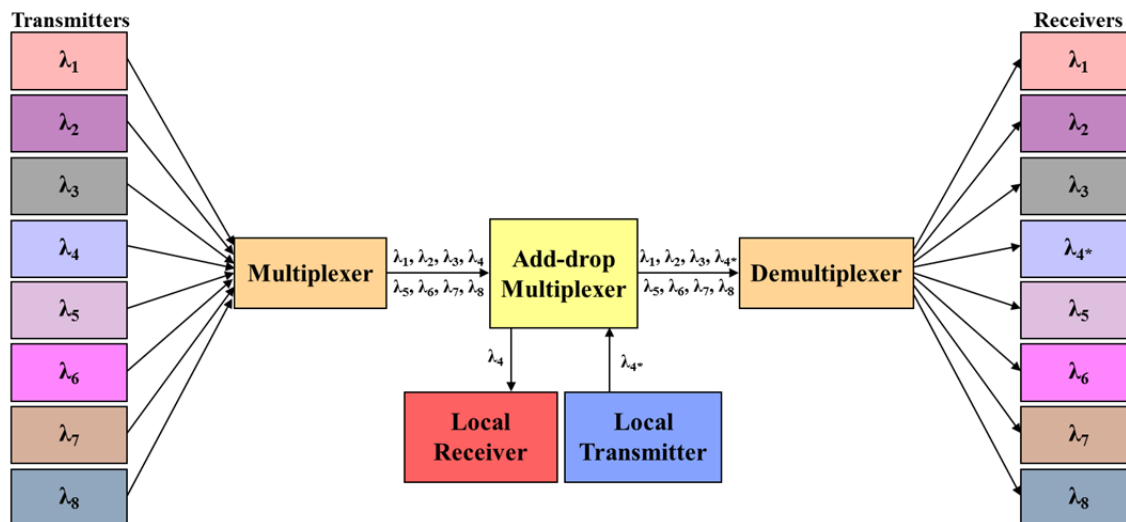
Ως πηγή άντλησης χρησιμοποιείται ένα laser ημιαγωγού, το οποίο εκπέμπει στα 980 ή 1480nm. Τυπικές τιμές της ενίσχυσης (απολαβής) ενός ενισχυτή ίνας φθάνουν τα 30dB με εύρος ζώνης 40nm. Οι ενισχυτές ίνας εμφανίζουν πλεονεκτήματα όπως, απλότητα στην κατασκευή, ευκολία ζεύξης με τη γραμμή οπτικής ίνας με χαμηλές απώλειες και εξάλειψη των φαινομένων διαφωνίας των οπτικών σημάτων που ενισχύονται. Οπτικοί ενισχυτές ίνας προσμείξεων ερβίου έχουν ήδη εγκατασταθεί σε πολλές ζεύξεις, όπως σε υπερατλαντικά υποβρύχια καλώδια, τα οποία συνδέουν την Ευρωπαϊκές χώρες με τις Η.Π.Α. με ρυθμό μετάδοσης 10Gbps.

7. Wavelength Division Multiplexing

Στην πολυπλεξία μήκους κύματος (WDM) το φάσμα μετάδοσης της οπτικής ίνας χωρίζεται σε μικρότερες μη επικαλυπτόμενες περιοχές μηκών κύματος και κάθε ένα από αυτά τα μήκη κύματος μεταφέρει ένα κανάλι με ρυθμό μετάδοσης ίδιο με τον ρυθμό μετάδοσης που χρησιμοποιεί ο τερματικός ηλεκτρονικός εξοπλισμός (laser, φωτοδίοδοι). Μεταφέροντας έτσι πολλά WDM κανάλια σε μία μόνο οπτική ίνα επιτυγχάνεται πλήρης αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης που προσφέρει η ίνα. Επίσης είναι ευκολότερο να κατασκευαστούν WDM στοιχεία για ένα τέτοιο δίκτυο γιατί καλούνται να υποστηρίξουν τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης ανά κανάλι με αυτόν που χρησιμοποιούν οι ηλεκτρονικοί πομποδέκτες. Συνεπώς, η πολυπλεξία μήκους κύματος προσφέρει μια συμβατότητα μεταξύ του εύρους ζώνης της οπτικής ίνας και του εύρους ζώνης του τερματικού ηλεκτρονικού εξοπλισμού.

Τα WDM δίκτυα πρώτης γενιάς παρείχαν συνδέσεις σημείο προς σημείο (point-to-point), οι οποίες ήταν είτε στατικές είτε χειρονακτικά ρυθμιζόμενες. Τα WDM δίκτυα δεύτερης γενιάς προσφέρουν οπτικές συνδέσεις από άκρο σε άκρο (οπτικά μονοπάτια) χρησιμοποιώντας εξελιγμένα οπτικά στοιχεία όπως πολυπλέκτες (multiplexer), αποπολυπλέκτες (demultiplexers), οπτικούς πολυπλέκτες προσθήκης-απομάστευσης (optical add-drop multiplexer (OADM)) και οπτικές διασυνδέσεις (optical

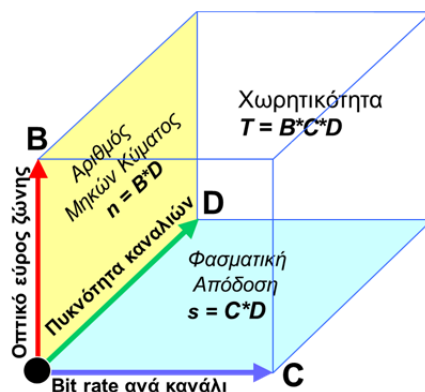
cross-connects (OXC)). Τα οπτικά μονοπάτια δημιουργούν μία ιδεατή τοπολογία και διαδρομή πάνω στην φυσική τοπολογία που δημιουργείται από τα οπτικά στοιχεία (mux, demux, OADM, OXC κτλ) και η οποία έχει την δυνατότητα να αλλάζει δυναμικά ώστε να ανταποκρίνεται συνεχώς στις ανάγκες του δικτύου. Η τοπολογία ενός απλού WDM συστήματος φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 13 – WDM σύστημα

Αριστερά και δεξιά υπάρχουν οι πομποί και οι δέκτες, αντίστοιχα, που μεταδίδουν σε συγκεκριμένο μήκος κύματος ο καθένας. Με αυτό τον τρόπο το κάθε κανάλι έχει την δική του συχνότητα και κινείται αυτόνομα μέσα στο οπτικό δίκτυο. Στην πλευρά των πομπών χρησιμοποιείται ένας πολυπλέκτης ο οποίος ενώνει όλα τα κανάλια και δημιουργεί ένα μοναδικό οπτικό παλμό ο οποίος περιέχει όλα τα μήκη κύματος. Ο παλμός ταξιδεύει προς την πλευρά των δεκτών και ανά πάσα στιγμή υπάρχει η δυνατότητα να διαχωριστεί ένα κανάλι και να οδηγηθεί σε ένα τοπικό χρήστη. Αυτό γίνεται με την χρησιμοποίηση ενός OADM πολυπλέκτη, ο οποίος έχει την δυνατότητα να φιλτράρει ένα μήκος κύματος, όπως το λ_4 στο σχήμα, και να το οδηγήσει στον αντίστοιχο χρήστη. Στο τερματικό άκρο του συστήματος πρέπει να χρησιμοποιηθεί αποπολυπλέκτης ο οποίος διαχωρίζει τα κανάλια και τα προωθεί στους κατάλληλους δέκτες.

Η χωρητικότητα ενός WDM συστήματος καθορίζεται από τρεις παραμέτρους, το οπτικό εύρος ζώνης, τον ρυθμό μετάδοσης του κάθε καναλιού και την πυκνότητα των καναλιών. Όπως φαίνεται και από το σχήμα 14, η φασματική απόδοση του συστήματος εξαρτάται από τον ρυθμό μετάδοσης του κάθε καναλιού και τον αριθμό των καναλιών.

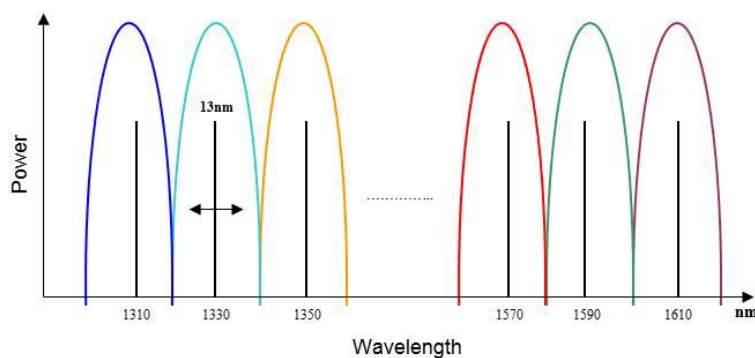


Σχήμα 14 – Χωρητικότητα ενός WDM συστήματος

Υπάρχουν δύο είδη πολυπλεξίας μήκους κύματος που χρησιμοποιούνται στα σημερινά WDM συστήματα, και διαχωρίζονται σύμφωνα με τον αριθμό καναλιών που χρησιμοποιούν και την απόσταση μεταξύ τους.

7.1. Coarse-WDM

Στην τεχνική Coarse Wavelength Division Multiplexing (CWDM) χρησιμοποιούνται λίγα κανάλια για να καλύψουν το οπτικό εύρος της οπτικής ίνας, με μεγάλη απόσταση μεταξύ τους. Τα σύγχρονα CWDM συστήματα χρησιμοποιούν μόλις 18 κανάλια τα οποία βρίσκονται μεταξύ 1270nm και 1610nm με απόσταση μεταξύ καναλιών 20nm. Σαν απόσταση μεταξύ δύο καναλιών ορίζεται η διαφορά των κεντρικών συχνοτήτων των δύο καναλιών, όπως φαίνεται και στο σχήμα 15.



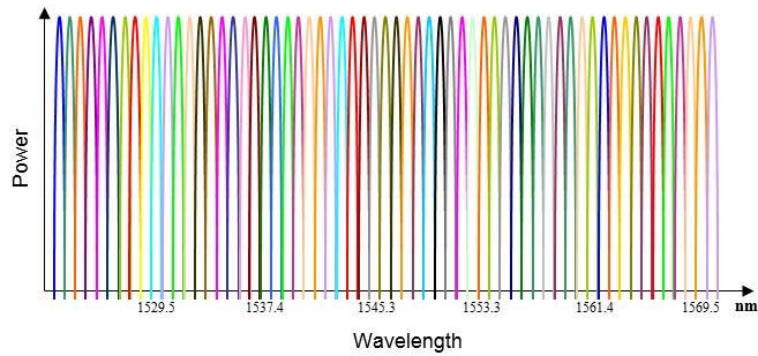
Σχήμα 15 – Κατανομή των CWDM καναλιών

Το κάθε κανάλι έχει εύρος ζώνης 13nm περίπου, το οποίο σε συνδυασμό με την μεγάλη απόσταση που έχουν μεταξύ τους τα κανάλια, προσφέρει ανεξαρτησία στο κάθε κανάλι. Λόγω της απόστασής τους τα κανάλια επηρεάζουν ελάχιστα τα γειτονικά κανάλια, πόσο μάλλον τα υπόλοιπα, δίνοντας έτσι την δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν φθηνά οπτικά στοιχεία (laser, φωτοδίοδοι κτλ). Το βασικότερο μειονέκτημα της CWDM τεχνικής είναι ότι λόγω της μεγάλης απόστασης μεταξύ των καναλιών δεν μπορεί να γίνει μαζική ενίσχυση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα είτε να μην γίνεται ενίσχυση και να περιορίζεται η απόσταση σε μερικές δεκάδες χιλιόμετρα, είτε να ενισχύονται χωριστά τα κανάλια, κάτι που ανεβάζει όμως κατακόρυφα το κόστος του δικτύου.

7.2. Dense-WDM

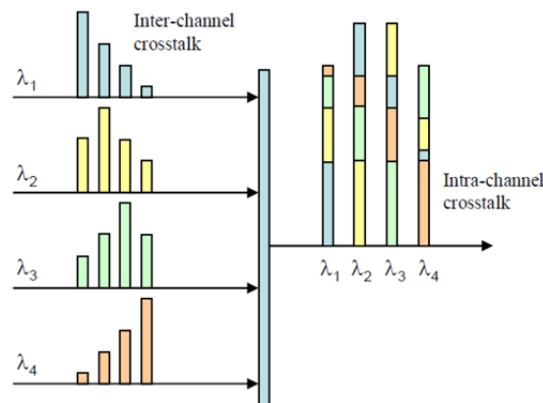
Στην τεχνική Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) χρησιμοποιούνται πολύ περισσότερα κανάλια για να καλύψουν το οπτικό εύρος της ίνας. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται στην περιοχή συχνοτήτων 1550nm, και τα κανάλια έχουν πολύ μικρή απόσταση μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο σχήμα 16. Τυπική απόσταση μεταξύ δύο καναλιών είναι τα 100GHz (0.8nm) αλλά σήμερα έχει αναπτυχθεί εξοπλισμός που λειτουργεί και με αποστάσεις 50GHz και 25GHz.

Το πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ο μεγάλος αριθμός των διαθέσιμων καναλιών, σε μικρό εύρος ζώνης οπτικής ίνας. Επίσης μπορούν να αξιοποιηθούν τους οπτικούς ενισχυτές, αφού βρίσκονται πολύ κοντά τα κανάλια μεταξύ τους και μπορούν να ενισχυθούν μαζικά. Το μειονέκτημα είναι ότι λόγω της μικρής απόστασης μεταξύ τους, τα κανάλια επηρεάζουν όλα τα άλλα DWDM κανάλια του συστήματος και τα γραμμικά (εξασθένηση, διασπορά) και μη γραμμικά φαινόμενα περιορίζουν κατά πολύ την απόσταση μετάδοσης.



Σχήμα 16 – Κατανομή των DWDM καναλιών

Ένα άλλο φαινόμενο που επηρεάζει την μετάδοση σε ένα DWDM σύστημα είναι το crosstalk, το οποίο είναι η επίδραση που έχει το κάθε κανάλι στα γειτονικά και μη του κανάλια. Χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, το inter-channel crosstalk και το intra-channel crosstalk, ανάλογα με τι το προκαλεί, σχήμα 17. Το inter-channel crosstalk προκαλείται από μη καλό φιλτράρισμα των καναλιών, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα να μην φιλτράρονται καλά κάποιες συχνότητες που χρησιμοποιούνται από άλλα κανάλια, όπως φαίνεται στο σχήμα. Το φίλτρο του καναλιού λ_1 δεν κόβει τελείως τις γειτονικές συχνότητες με αποτέλεσμα τα λ_2 , λ_3 και λ_4 να επηρεάζονται.



Σχήμα 17 – Crosstalk μεταξύ DWDM καναλιών

Το intra-channel crosstalk προκαλείται από ατελή πολυπλεξία και αποπολυπλεξία καναλιών κατά την διάρκεια μιας μετάδοσης. Όταν δεν γίνεται σωστή πολυπλεξία ή αποπολυπλεξία, τα intra-channel στοιχεία προστίθενται στην κεντρική συχνότητα, όπως φαίνονται με διαφορετικό χρώμα στο σχήμα παραπάνω. Και καθώς είναι στο ίδιο μήκος κύματος με την κεντρική συχνότητα του καναλιού και δεν μπορούν να αφαιρεθούν, είναι απαραίτητα να μειώνονται πάντοτε στο ελάχιστο.