

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΠΟΛΥΜΕΣΩΝ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Σύγχρονα Τηλεπικοινωνιακά Δίκτυα επί Οπτικής Ύλης –
Τεχνολογία WDM/Πρωτόκολλο SDH**

Εισηγητές: Λογκάκη Μαρία, Μαλάμος Αθανάσιος

**Σπουδαστές : Σφενδυλάκης Ιωάννης Α.Μ.: 1256
Βενιαμάκης Ανδρέας Α.Μ.: 1558**



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα Πτυχιακή εργασία γίνεται εκτενής αναφορά στις οπτικές ίνες, στην τεχνολογία WDM και στο πρωτόκολλο SDH/SONET, που βρίσκουν εφαρμογή στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Πιο συγκεκριμένα και για την πληρέστερη κατανόηση των εννοιών και του αντικειμένου που πραγματεύεται η εργασία αυτή, θα μελετήσουμε αρχικά τα χαρακτηριστικά, τον τρόπο λειτουργίας των οπτικών ινών και τις εφαρμογές τους σήμερα. Στην συνέχεια θα επεκταθούμε στις οπτικές πηγές μετάδοσης και ανίχνευσης φωτός έτσι ώστε να υπάρξει μια πιο δομημένη προσέγγιση στον τρόπο μετάδοσης του οπτικού σήματος μέσα σε ένα οπτικό δίκτυο. Ακολούθως θα αναλύσουμε τις τεχνολογίες πολυπλεξίας και θα εστιάσουμε στην πολυπλεξία μήκους κύματος (WDM) αναφέροντας τον τρόπο λειτουργίας της και τα στοιχεία που απαρτίζουν ένα τέτοιο σύστημα. Τέλος παρουσιάζουμε το πρωτόκολλο SDH/SONET όπως συναντάται σήμερα σε διάφορες αρχιτεκτονικές δικτύων και συγκρίνουμε την εφαρμογή του σε σχέση με του WDM στο πρωτόκολλο επικοινωνίας IP (Internet Protocol).

ABSTRACT

At this dissertation we have an extensive reference in optical fiber technology, WDM technology and SDH/SONET protocol, which applied in modern telecommunications networks. More specifically and to understand more about the subject matter referred to this project, we will consider first the characteristics, operational mode of optical fibers and their use today. Then we expand on the optical sources and optical detectors to provide a more structured approach to transmission of the optical signal into an optical network. Then we will analyze the multiplexing technologies and we will focus on wavelength division multiplexing (WDM) mentioning the way it works and the parts that compose such a system. Finally we present SDH/SONET protocol as it is today in various network architectures and we present its application compared to WDM's use at communication protocol IP (Internet Protocol).



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τις οικογένειές μας που μας στήριξαν καθ'όλη την διάρκεια αυτής της προσπάθειάς μας για την αποπεράτωση αυτής της εργασίας καθώς και τους επιβλέποντες καθηγητές για τη βοήθεια τους και τη σωστή τους καθοδήγηση. Επίσης ευχαριστούμε τον ΟΤΕ Α.Ε. για την συνεργασία του και τις χρήσιμες και αναγκαίες πληροφορίες που μας παρείχε πάνω στον τομέα των τηλεπικοινωνιών σε οπτικές ίνες.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1^ο – Εισαγωγή

- Ιστορική Αναδρομή.....σελ.8
- Το μέλλον των Οπτικών Ινών.....σελ.10

Κεφάλαιο 2^ο - Οπτικές Ίνες

- Γενικά περί οπτικών ινών.....σελ.11
 - *Τι είναι*.....σελ.11
 - *Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Ίνας*.....σελ.11
 - *Είδη Οπτικών Ινών*.....σελ.13
 - *Χαρακτηριστικά και Επιδόσεις*.....σελ.15
 - *Κατασκευή Οπτικής Ίνας*.....σελ.16
- Πώς λειτουργούν - Ινοοπτική - Επικοινωνία.....σελ.18
 - *Ινοοπτική*.....σελ.18
- Καλώδια Οπτικών Ινών.....σελ.21
- Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα.....σελ.33
- Εφαρμογές.....σελ.35

Κεφάλαιο 3^ο – Ανάλυση Τεχνολογίας Οπτικών Ινών

- Βασικές Αρχές Λειτουργίας.....σελ.37
 - *Κυματοδήγηση*.....σελ.37
- Τρόποι Μετάδοσης.....σελ.40
- Κανονικοποιημένη Συχνότητα.....σελ.41
- Αριθμητικό Άνοιγμα.....σελ.43
- Χαρακτηριστικά Οπτικών Ινών.....σελ.43
 - *Εξασθένηση*.....σελ.44
 - *Διασπορά*.....σελ.45
 - *Μη γραμμικά φαινόμενα*.....σελ.53



Κεφάλαιο 4^ο – Οπτικές πηγές μετάδοσης και Ανιχνευτές

- LED - LASER.....σελ.58
- Οπτικός Πομπός.....σελ.59
 - Οπτικές Μεταπτώσεις.....σελ.59
 - Ημιαγωγοί.....σελ.60
 - Επαφή p-n.....σελ.62
- Δίοδος Φωτοεκπομπής LED.....σελ.66
 - Τι είναι.....σελ.66
 - Αρχή Λειτουργίας.....σελ.67
 - Δομή LED.....σελ.68
 - Σύνδεση σε κύκλωμα.....σελ.70
 - Χαρακτηριστικά διόδων LED.....σελ.71
 - Εφαρμογές των διόδων LED.....σελ.72
- Δίοδος LASER.....σελ.73
 - Τι είναι.....σελ.73
 - Αρχή Λειτουργίας.....σελ.74
 - Τύποι διόδων LASER.....σελ.76
 - Εφαρμογές των LASER.....σελ.79
 - Σύγκριση των LEDS και των LASERS.....σελ.80
- Οπτικοί Δέκτες.....σελ.83
 - Φωτοανιχνευτής τύπου P-N.....σελ.85
 - Φωτοανιχνευτής PIN.....σελ.87
 - Φωτοανιχνευτής Χιονοστιβάδας.....σελ.89
- Σημαντικοί παράμετροι φωτοανιχνευτών.....σελ.90
 - Παραμόρφωση του παλμού φωτός.....σελ.90
 - Ευαισθησία δέκτη.....σελ.91
 - Απώλειες Οπτικής Ζεύξης.....σελ.94
 - Έλεγχος Απόδοσης ζεύξης.....σελ.99
- Οπτικοί Ενισχυτές.....σελ.100
 - Εισαγωγή.....σελ.100
 - Οπτικός Ενισχυτής Ημιαγωγού (SOA).....σελ.102
 - Ενισχυτής Ίνας με προσμείξεις Ερβίου (EDFA).....σελ.104
 - Βασικές Παράμετροι.....σελ.106



Κεφάλαιο 5^ο – Τεχνικές Πολυπλεξίας

- ΓΕΝΙΚΑ.....σελ.108
- ΕΙΔΗ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑΣ.....σελ.109
 - Πολυπλεξία με Διαίρεση μήκους Κύματος.....σελ.109
 - Πολυπλεξία με Διαίρεση Χρόνου.....σελ.111
 - Πολυπλεξία με Διαίρεση Συχνότητας.....σελ.112

Κεφάλαιο 6^ο –WDM και Σύγχρονα Οπτικά Δίκτυα

- Η ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑΣ WDM.....σελ.114
- ΒΑΣΙΚΗ ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ WDM.....σελ.118
 - Αρχή Λειτουργίας WDM.....σελ.118
 - Τεχνολογία DWDM.....σελ.120
 - Τεχνολογία CWDM.....σελ.122
- ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ WDM.....σελ.123
 - Συσκευές Πολυπλεξίας – Αποπολυπλεξίας.....σελ.124
 - Οπτικοί Πολυπλέκτες Προσθαφαίρεσης(OADM).....σελ.127
 - Οπτικοί Διασταυρωτές.....σελ.129
 - Οπτικά Φίλτρα.....σελ.131
 - Δρομολογητές Μήκους Κύματος.....σελ.132
 - Μετατροπείς Μήκους Κύματος.....σελ.133
- ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ.....σελ.134
 - Εισαγωγή.....σελ.134
 - Κατηγορίες Οπτικών Δικτύων.....σελ.135
- ΕΦΑΡΜΟΓΗ WDM ΣΤΑ ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ.....σελ.136
 - Δίκτυα οπτικών συνδέσμων.....σελ.136
 - Δίκτυα WDM Συνδέσμων από σημείο σε σημείο.....σελ.137
 - Δίκτυα Ευρείας και Μητροπολιτικής Ζώνης.....σελ.138
 - Δίκτυα Πολλαπλής Πρόσβασης.....σελ.139
- ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ WDM ΣΗΜΕΡΑ.....σελ.140
 - PMA32 της Marconi.....σελ.140
 - TransXpress Waveline EL1 της Siemens A.G.....σελ.141
 - Optinex 1686 WM της Alcatel.....σελ.142



- ΜΕΛΛΟΝ ΤΟΥ WDM.....σελ.143
 - *Κόστος Υλοποίησης*.....σελ.143
 - *Πλεονεκτήματα*.....σελ.144
 - *Το μέλλον του WDM*.....σελ.145

Κεφάλαιο 7^ο – SONET/SDH

- ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ SONET/SDH.....σελ.147
 - *Μορφή πλαισίου του πρωτόκολλου SDH*σελ.149
 - *Διαφορές SONET - SDH*σελ.150
 - *Πλεονεκτήματα τεχνολογίας SONET/SDH*.....σελ.150
 - *Δομοστοιχεία τεχνολογίας SONET/SDH*.....σελ.151
- ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ SONET/SDH.....σελ.155
- WDM ΔΙΚΤΥΩΣΗ.....σελ.159
 - *Η τεχνολογία «IP over SONET/SDH» και «IP over SONET/SDH over WDM»*.....σελ.159
 - *Η τεχνολογία IP over WDM*.....σελ.162
 - *Σύγκριση IP over WDM και IP over SONET/SDH over WDM τεχνολογίας*.....σελ.164
- ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....σελ.166
 - *Έντυπη*.....σελ.166
 - *Ηλεκτρονική*.....σελ.167
- ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....σελ.168



Κεφάλαιο 1^ο

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η καθοδήγηση του φωτός από τη διάθλαση, η αρχή που καθιστά την λειτουργία των οπτική ινών πιθανή, καταδείχθηκε αρχικά στο Λονδίνο το 1870, με τον ιρλανδό εφευρέτη John Tyndall που χρησιμοποιώντας μια υδάτινη φλέβα, που έρεε από ένα δοχείο προς ένα άλλο και μια δέσμη φωτός, απέδειξε ότι το φως ανακλάται εσωτερικά για να ακολουθήσει τη συγκεκριμένη διαδρομή της υδάτινης φλέβας. Όπως απεικονίζει και η παρακάτω εικόνα, το απλό αυτό πείραμα ήταν το πρώτο βήμα της έρευνας για την κατευθυνόμενη εκπομπή φωτός.



Εικόνα 1.1. Πείραμα JOHN TYNDALL.

Ο William Wheeling κατοχύρωσε την μέθοδο μεταφοράς φωτός με την ονομασία «Φως διαμέσου σωλήνων» το 1880. Στη συνέχεια, 50 χρόνια αργότερα, ακολούθησε ο Heinrich Lamm κατασκευάζοντας την πρώτη δέσμη φωτός από διάφανες ίνες για να μεταφέρει μια ανάκλαση από νήμα λάμπας.

Το 1952, ο φυσικός Narinder Singh Kapany πραγματοποίησε πειράματα που οδήγησαν στην εφεύρεση της οπτικής ίνας, βασισμένη στις πρώτες μελέτες του Tyndall, όπου η ίνα γυαλιού είναι ντυμένη με μια διαφανή επένδυση για να προσφέρει έναν καταλληλότερο δείκτη διάθλασης.



Το 1965, Charles K. Kao και George A. Hockham της βρετανικής επιχείρησης Τυποποιημένα τηλέφωνα και καλώδια ήταν οι πρώτοι για να προτείνουν ότι η μειωμένη απόδοση των σύγχρονων ινών προκλήθηκε από τις προσμίξεις, οι οποίες θα μπορούσαν να αφαιρεθούν. Σκέφτηκαν ότι η οπτική ίνα θα μπορούσε να είναι ένα πρακτικό μέσο για την επικοινωνία, εάν οι απώλειες θα μπορούσαν να μειωθούν κάτω από 20 dB ανά χιλιόμετρο.

Αυτό το επίπεδο μείωσης επιτεύχθηκε αρχικά το 1970, από τους ερευνητές Robert D. Maurer, Donald Keck, Peter C. Schultz, και Frank Zimar που εργάζονταν για τα αμερικανικά εργοστάσια γυαλιού Corning. Κατέδειξαν μια ίνα με οπτική απώλεια 17 dB ανά χιλιόμετρο, με προσμίξεις γυαλιού πυριτίου και τιτάνιο.

Μερικά έτη αργότερα παρήγαγαν μια ίνα χρησιμοποιώντας οξείδιο γερμανίου σαν υλικό πρόσμιξης πυρήνων και πέτυχαν απώλειες της τάξης των 4dB/Km. Σήμερα, οι μειώσεις στα οπτικά καλώδια είναι πολύ λιγότερες από εκείνες στα ηλεκτρικά χάλκινα καλώδια και οδηγούν στις μεγάλης απόστασης συνδέσεις ινών και στην ραγδαία ανάπτυξη του Διαδικτύου.

Η πιο ανθεκτική οπτική ίνα που χρησιμοποιείται σήμερα κατασκευάζεται από γυαλί και για τον πυρήνα και για τη θήκη και είναι επομένως λιγότερο επιρρεπής σε διαδικασίες φθοράς. Εφευρέθηκε από το Gerhard Bernsee το 1973 κοντά στη Γερμανία.

Η ραγδαία ανάπτυξη των οπτικών ινών φάνηκε με το πέρασμα του χρόνου όπου πολλοί ερευνητές προσπάθησαν να εξελίξουν την νέα αυτή τεχνολογία καθώς πίστευαν στις δυνατότητες της, όπως μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων με μικρές απώλειες σε μεγάλες αποστάσεις με μία πιο γρήγορη και αποτελεσματική μέθοδο^[1]. Οι προσπάθειες και τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :

Έτος	Μήκος κύματος (nm)	Ίνα	Ρυθμός μετάδοσης	Σχόλια
1976	800 nm	Πολύτροπη	45 Mbps	Αναμεταδότες ανά 10 Km
1980	1300 nm	Μονότροπη	1.7 Gbps	Αναμεταδότες ανά 50 Km
1989	1550 nm	Μονότροπη	10 Gbps	Αναμεταδότες ανά 80 Km Μονότροπο laser Ίνες ολισθημένης διασποράς
1990	1550 nm	Μονότροπη	N x 20 Gbps	Οπτικοί ενισχυτές Πολυπλεξία
2004			101 Gbps	Πολυπλεξία
2006			2,56 Tbps	160 km
Επόμενα 10-20 χρόνια			50-100 Tbps	

Εικόνα 1.2. Πίνακας εξέλιξης οπτικών ινών.



ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ

Τα δίκτυα πρώτης και δεύτερης γενιάς είναι οι δύο κατηγορίες των οπτικών δικτύων. Στην πρώτη κατηγορία η οπτική ίνα χρησιμοποιούνταν ως φυσικό μέσο μετάδοσης και παροχής χωρητικότητας ενώ τα ηλεκτρονικά κυκλώματα ήταν υπεύθυνα για τις πιο εξελιγμένες δικτυακές διεργασίες όπως δρομολόγηση, μεταγωγή κτλ. Τα δίκτυα δεύτερης γενιάς διαμορφώνονται και υλοποιούνται σταδιακά ενώ ζωντανά παραδείγματα της πρώτης κατηγορίας οπτικών δικτύων είναι το Σύγχρονο Οπτικό Δίκτυο (*Synchronous Optical NETWORK-SONET*) και το SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) τα οποία αποτελούν τη βασική δομή τηλεπικοινωνιακών συστημάτων της Ευρώπης, Ασίας και Βόρειας Αμερικής.

Λόγω των τεράστιων δυνατοτήτων της τεχνολογίας των οπτικών επικοινωνιών υπάρχουν εξαιρετικές δυνατότητες εφαρμογών για τις οπτικές ίνες στο μέλλον. Και με τα εκατομμύρια χιλιόμετρα καλωδίων οπτικών ινών που έχουν ήδη εγκατασταθεί φαίνεται ότι θα είναι εύκολη η μεταφορά των υπηρεσιών ευρείας ζώνης στο σπίτι. Η δυνατότητα προσφοράς μαζικών υπηρεσιών σε μια τεράστια αγορά θα προσφέρει μια ποικιλία από ελκυστικές επικοινωνίες για τους καταναλωτές και τις επιχειρήσεις, όπως δίκτυα υπολογιστών, τραπεζικές συναλλαγές, αγορές από το σπίτι, ακόμη και μάθηση εξ αποστάσεως.

Προβλέπεται ότι τα δίκτυα ευρείας ζώνης θα είναι προσιτά στο ευρύ κοινό στις αρχές του 21^{ου} αιώνα. Σαν αποτέλεσμα οι πωλήσεις καλωδίων οπτικών ινών, συνδετήρων αλλά και συγγενών εξαρτημάτων αναμένεται να παρουσιάσουν αύξηση τα επόμενα χρόνια. Οπωσδήποτε ο καθοριστικός παράγοντας για τη διάδοση των συστημάτων ευρείας ζώνης θα είναι το τελικό κόστος και οι ευκολίες προς τον καταναλωτή. Οι ερευνητές της τεχνολογίας των οπτικών επικοινωνιών θα πρέπει να είναι σε θέση να συμπληρώσουν την υπάρχουσα τεχνολογία και τα εξαρτήματα που την απαρτίζουν με νέα τεχνολογία και νέα εξαρτήματα χωρίς αύξηση του κόστους.

Η βιομηχανία συνεχίζει να ωριμάζει και το μέλλον υπόσχεται πολλά για τις οπτικές ίνες. Τηλεδιάσκεψη, εκμάθηση από απόσταση, ασφάλεια και εποπτεία, υψηλές ταχύτητες μετάδοσης – ανταλλαγής πληροφοριών, ψηφιακό βίντεο, καλωδιακή τηλεόραση είναι μερικές από τις εφαρμογές που προσφέρονται καθώς η τεχνολογία των οπτικών ινών εξελίσσεται μέρα με τη μέρα.

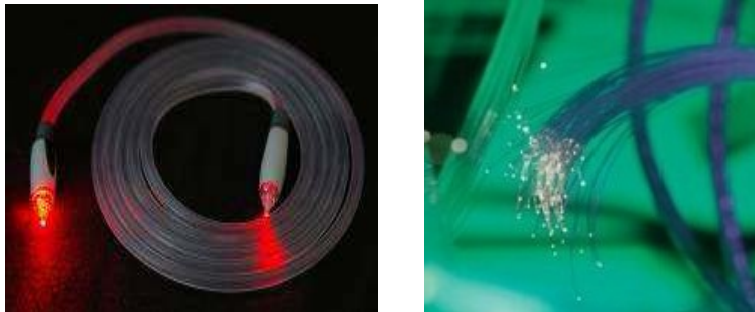


Κεφάλαιο 2^ο

ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

Τι είναι

Οι οπτικές ίνες, είναι ειδικά νήματα που έχουν κατασκευαστεί από γυαλί και με διάμετρο περίπου όσο μια ανθρώπινη τρίχα. Το υλικό από το οποίο έχουν κατασκευαστεί επιτρέπει τη μετάδοση φωτός (ταχύτητα εκπομπής ίση με τα 2/3 της ταχύτητας του φωτός στο κενό) από το εσωτερικό τους, ενώ συνήθως τις συναντάμε συγκεντρωμένες κατά χιλιάδες σε δέσμες, που σχηματίζουν τα λεγόμενα οπτικά καλώδια. Αυτά τα σήματα φωτός αντιπροσωπεύουν τα ηλεκτρικά σήματα τα οποία εμπεριέχουν ήχο, βίντεο ή πληροφορίες δεδομένων σε οποιονδήποτε συνδυασμό. Η οπτική ίνα απεικονίζεται στις παρακάτω φωτογραφίες:



Εικόνα 2.1. Οπτική ίνα.

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ίνας

Η δομή ενός καλωδίου οπτικών ινών είναι τέτοια, ώστε να αποτρέπει τις εξωτερικές φθορές, αλλά και την απώλεια σήματος, που θα προέκυπτε κατά τη διαρροή της φωτεινής ακτινοβολίας στο εξωτερικό του. Αν κόψουμε στη μέση ένα οπτικό καλώδιο, θα συναντήσουμε, από το κέντρο προς το εξωτερικό του, τα εξής τμήματα:



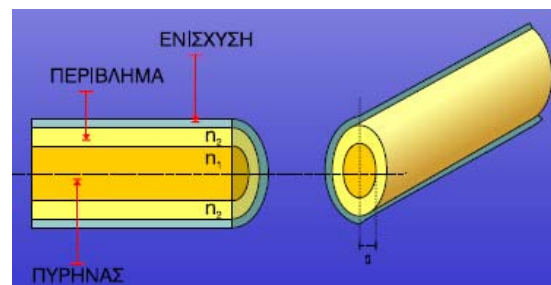
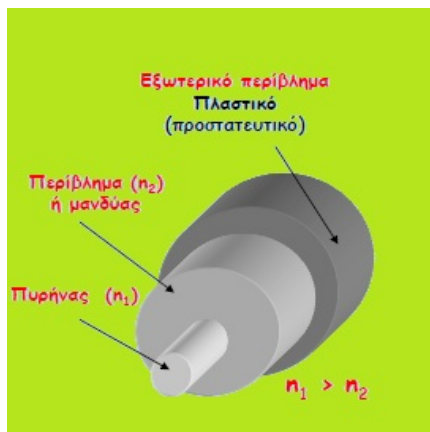
- **Πυρήνας:** Η δέσμη των οπτικών ινών, που αναλαμβάνουν τη μετάδοση των φωτεινών σημάτων. Βρίσκεται τοποθετημένη ακριβώς στο κέντρο του καλωδίου.

Η διάμετρος του κυμαίνεται από 9 μm έως 100 μm στις ίνες που χρησιμοποιούνται περισσότερο.

- **Περίβλημα:** Είναι το υλικό που αντανακλά εσωτερικά το φως, εκμηδενίζοντας παράλληλα το ποσοστό διαφυγής του στο εξωτερικό του καλωδίου. Περιβάλλει πλήρως την περιοχή του πυρήνα και τυπικά έχει διάμετρο 125 μm ή 140 μm .

- **Εξωτερικό περίβλημα – Μανδύας:** Ανθεκτικό υλικό, που αποτελείται από καουτσούκ για μικρά καλώδια οικιακής χρήσης, ή από ατσάλι για μεγαλύτερα, που χρησιμοποιούν οι εταιρείες σε εξωτερικό περιβάλλον. Προστατεύει το καλώδιο από ζημιές που θα προέκυπταν από τους διάφορους εξωτερικούς παράγοντες. Διάμετροι του μανδύα είναι 250 μm , 500 μm και 900 μm .

Η εγκάρσια τομή της φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 2.2. Εγκάρσια τομή οπτικής ίνας.



Είδη οπτικών ινών

Διαχωρίζουμε τις οπτικές ίνες σε δυο κατηγορίες ανάλογα με τη διάμετρό τους:

- Οι **πολυτροπικές ίνες** (multimodefiber) έχουν διαστάσεις από 50 – 100 μm. Εξαιτίας της μεγάλης διαμέτρου, το αριθμητικό άνοιγμα της ίνας NA (Numerical Aperture) είναι επίσης μεγάλο, επιτρέποντας εκατοντάδες ή χιλιάδες φωτεινές ακτίνες να μετακινούνται μέσα στον πυρήνα.

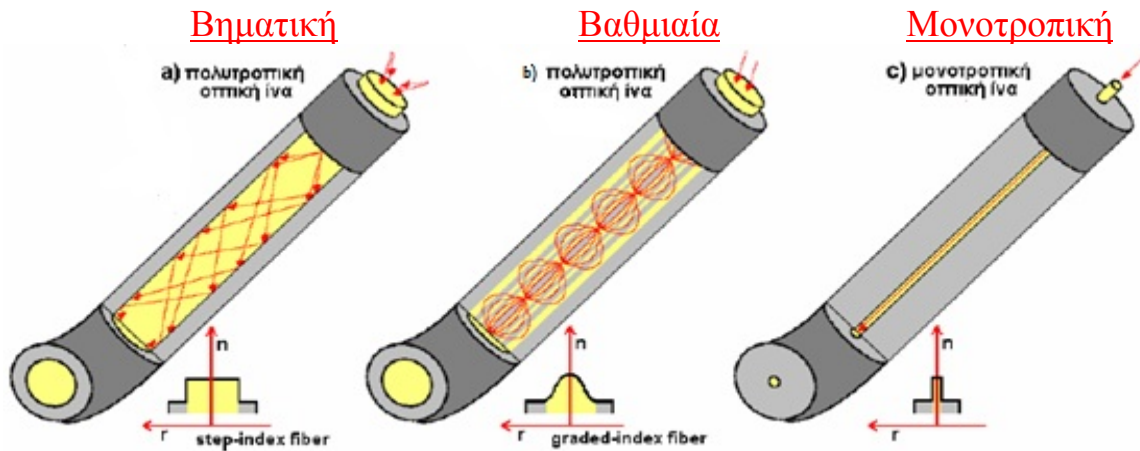
Η αρχή μετάδοσης σε πολύτροπη οπτική ίνα είναι ότι οι διάφορες ακτίνες του οπτικού σήματος ανάλογα με την είσοδο τους στην οπτική ίνα ταξιδεύουν ανακλώμενες υπό διαφορετικές γωνίες.

Αυτός ο τρόπος μετάδοσης ονομάζεται πολύτροπος (multimode), επειδή έχουμε πολλούς δρόμους μετάδοσης, που αντιστοιχούν στις διαφορετικές γωνίες ανάκλασης.

Χωρίζονται σε ίνες **βηματικού** (step index multimode) και **διαβαθμισμένου** (gradual index multimode) δείκτη διάθλασης. Στην περίπτωση που έχουμε μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης το δείκτη του πυρήνα από του περιβλήματος τότε έχουμε την κατηγορία του βηματικού δείκτη διάθλασης. Στην ίνα διαβαθμισμένου δείκτη μειώνεται η τιμή του δείκτη διάθλασης σταδιακά στο εσωτερικό του πυρήνα.

- Οι **μονοτροπικές ίνες** (singlemodefiber) έχουν πολύ μικρότερο πυρήνα διαστάσεων μέχρι 10 μm. Η μικρή αυτή διάμετρος του πυρήνα επιτρέπει τη διέλευση σε ένα περιορισμένο πλήθος ακτινών, ουσιαστικά μόνο σε ακτίνες που προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνεια της διατομής τους.

Οι κατηγορίες των ινών και ο τρόπος διάδοσής τους στο εσωτερικό τους φαίνονται παρακάτω :



Εικόνα 2.3. Κατηγορίες οπτικών ινών και τρόποι διάδοσης τους.

Σαφώς και υπάρχουν μεγάλες και σημαντικές διαφορές ανάμεσα στα είδη ινών.

Οι διαφορές τους φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

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



Χαρακτηριστικά και επιδόσεις

Οι επιδόσεις μιας οπτικής ίνας συνδέονται με τον τρόπο μετάδοσης του σήματος στην ίνα, με το αν, δηλαδή, η ίνα είναι πολύτροπη ή μονότροπη και με το μήκος κύματος του φωτός, που εκπέμπεται από την πηγή. Στις μονότροπες οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται μήκη κύματος μεταξύ των 1310 nm και των 1550 nm. Στις πολύτροπες οπτικές ίνες έχουμε μήκη κύματος από 850 nm έως 1300 nm. Θα πρέπει να τονίσουμε, ότι για δεδομένη εγκατάσταση, θα πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο ένας τρόπος μετάδοσης και μόνο ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος από τις πηγές σε όλη την έκταση της εγκατάστασης.

Οι οπτικές ίνες μπορούν να μεταφέρουν σήματα με πολύ μεγάλο εύρος ζώνης σε μεγάλες αποστάσεις με πολύ μικρή εξασθένιση του σήματος. Οι πολύτροπες οπτικές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αποστάσεις, που υπερβαίνουν τα 3Km, ενώ οι μονότροπες οπτικές ίνες μπορούν να υπερβούν τα 10 Km.

Υπάρχουν, όμως, και άλλοι παράγοντες, οι οποίοι περιορίζουν τις παραπάνω αποστάσεις μετάδοσης. Τέτοιοι παράγοντες είναι το εύρος ζώνης της πηγής και του δέκτη των σημάτων σε μια οπτική ίνα, και η χρωματική διασπορά του μεταδιδόμενου σήματος μέσα στην οπτική ίνα, η οποία διασπορά αυξάνεται με την απόσταση και εξασθενίζει το σήμα.

Επίσης, επιβαρυντικός παράγων είναι η χρήση συνδέσμων και διακλαδωτών στην πορεία των οπτικών ινών. Θα πρέπει να σημειώσουμε, ότι στις πολύτροπες οπτικές ίνες είναι πιο ανεκτό να χρησιμοποιήσουμε συνδετήρες και διακλαδωτές απ'ότι στις μονότροπες.

Επίσης, στις πολύτροπες οπτικές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν χαμηλού κόστους πηγές **LED**, ενώ οι μονότροπες οδηγούνται συνήθως από πηγή **LASER**. Τυπική τιμή εξασθένισης σήματος για μια 62,5/125 πολύτροπη οπτική ίνα είναι 3,5 dB/Km για σήμα με μήκος κύματος 850 nm και 1.0 dB/Km για μήκος κύματος 1300nm. Τυπικό μέγεθος εξασθένισης σήματος για μονότροπη οπτική ίνα είναι 0,5 dB/Km στα 1310 nm και 0,4 dB/Km στα 1550nm.



Κατασκευή Οπτικής Ίνας

Μπορεί μεν οι οπτικές ίνες να δημιουργούνται από γυαλί, θα πρέπει να τονιστεί όμως ότι το γυαλί αυτό δεν μπορεί να συγκριθεί, ως προς την καθαρότητά του, με το κοινό γυαλί που συναντάμε σε διάφορα αντικείμενα γύρω μας.

Η φύση των δεδομένων που μεταδίδονται, καθώς και οι μεγάλες αποστάσεις που καλύπτουν τα καλώδια αυτά, απαιτούν το υλικό κατασκευής τους να είναι απολύτως διαφανές. Φυσικά αυτό δεν είναι εφικτό σε ποσοστό 100% και αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η ισχύς του φωτεινού σήματος μειώνεται σταδιακά.

Η δημιουργία μιας οπτικής ίνας πραγματοποιείται σε τρία βήματα, που είναι ο σχηματισμός ενός αρχικού υάλινου κυλίνδρου, η τομή των ινών από τον κύλινδρο αυτό, καθώς και η δοκιμή για την αντοχή τους, αλλά και για την σωστή λειτουργία τους.

Στο πρώτο στάδιο, γίνονται όλες οι απαραίτητες χημικές διαδικασίες για τον σχηματισμό του καθαρού γυαλιού, ενώ ειδικός εξοπλισμός αναλαμβάνει να απομακρύνει από τον υάλινο κύλινδρο όλα τα ξένα σώματα, που θα είχαν ως αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης της οπτικής ίνας. Όπως αντιλαμβάνεται εύκολα κανείς, πρόκειται για το κυριότερο βήμα για τη δημιουργία των οπτικών ινών.

Αφού δημιουργηθεί ο αρχικός κύλινδρος, στη συνέχεια τοποθετείται σε μια συσκευή η οποία έχει το σχήμα πύργου και αναλαμβάνει τη δημιουργία των μικροσκοπικών ινών. Ο πύργος αυτός λιώνει το γυαλί σε θερμοκρασία περίπου 2.300 βαθμών Κελσίου και στη συνέχεια αυτό ρέει κατακόρυφα από μικρές οπές, οπότε και ψύχεται σταδιακά, ώστε να πάρει την τελική μορφή οπτικής ίνας. Ειδικοί μηχανισμοί ελέγχουν τον σωστό της σχηματισμό, ενώ εξασφαλίζουν ότι η διάμετρός της δεν θα ξεπεράσει το φυσιολογικό όριο. Στο κάτω μέρος του πύργου, συναντάμε μια τροχαλία που αναλαμβάνει την περιέλιξη της οπτικής ίνας σε κυλίνδρους.

Στο τελικό στάδιο, η οπτική ίνα περνά από ένα σύνολο ελέγχων που εξασφαλίζουν ότι είναι σε θέση να διατεθεί προς χρήση, χωρίς να προξηνηθούν τυχόν προβλήματα κατά τη χρήση της. Στα τεστ αυτά περιλαμβάνεται ο έλεγχος αντοχής κατά ενδεχόμενης θραύσης, το σωστό της σχήμα αλλά και η μέτρηση της διαφάνειας, καθώς από αυτή εξαρτάται η σωστή μετάδοση του φωτεινού σήματος. Καταγράφεται επίσης η μέγιστη ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων, η συμπεριφορά της οπτικής ίνας στα διάφορα μήκη κύματος (χρώματα) του φωτός που μεταδίδει, καθώς και οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος στις οποίες δύναται αυτή να λειτουργήσει σωστά.

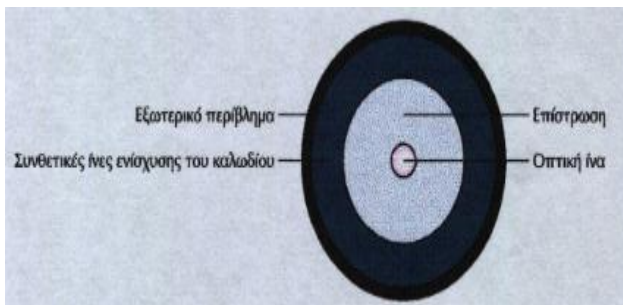
Όταν όλοι αυτοί οι έλεγχοι ολοκληρωθούν επιτυχώς, η οπτική ίνα πλέον διατίθεται στο εμπόριο για χρήση από τις εταιρείες παροχής τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών.



Αναλυτικότερα η κατασκευή της οπτικής ίνας:

Η βασική κατασκευή μιας οπτικής ίνας φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Στο κέντρο του καλωδίου υπάρχει η οπτική ίνα, η οποία κατασκευάζεται από γυαλί ικανό να μεταφέρει φωτεινή δέσμη συγκεκριμένου μήκους κύματος με πολύ λίγες απώλειες. Την οπτική ίνα περιβάλλει ειδική επίστρωση υλικού με μικρότερο δείκτη διάθλασης από το υλικό της ίνας, το οποίο ονομάζεται *cladding* ή *buffer* (έχει αναφερθεί παραπάνω). Το υλικό αυτό βοηθά στη συνεχή ανάκλαση της φωτεινής δέσμης, η οποία θα πέσει μέσα στην οπτική ίνα, εφόσον η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη της οριακής διότι σε άλλη περίπτωση θα έχουμε διάθλαση στην εξωτερική επίστρωση (αναλύεται παρακάτω). Με αυτό τον τρόπο η οπτική ίνα εγκλωβίζει τη δέσμη του φωτός και την οδηγεί στην άκρη της.

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



Εικόνα 2.4. Κατασκευή καλωδίου οπτικής ίνας.

Την επίστρωση περιβάλλει δέσμη συνθετικών ινών, οι οποίες έχουν στόχο την προστασία τα ίνας από πιθανά τραβήγματα, όπου είναι επικίνδυνο να σπάσει το γυαλί, το οποίο αποτελεί και τον πυρήνα τα ίνας. Όλα τα παραπάνω περικλείονται σε εξωτερικό πλαστικό περίβλημα όμοιο με αυτό των καλωδίων συνεστραμμένων ζευγών.

Υπάρχουν οπτικές ίνες, οι οποίες κατασκευάζονται από πλαστικό. Τα το παρόν δεν είναι μέσα τα προδιαγραφές, που καθορίζονται από τα διεθνή πρότυπα.

Οφείλουμε, τα, να σημειώσουμε, ότι καταβάλλονται προσπάθειες για να βελτιωθούν τα χαρακτηριστικά τα και ειδικά η πολύτροπη, *graded index* πλαστική ίνα ενδέχεται να αποτελέσει αξιόπιστο μέσο μετάδοσης εφάμιλλο τα γυάλινης ίνας^{[1][18][19][20]}.



ΠΩΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΟΥΝ

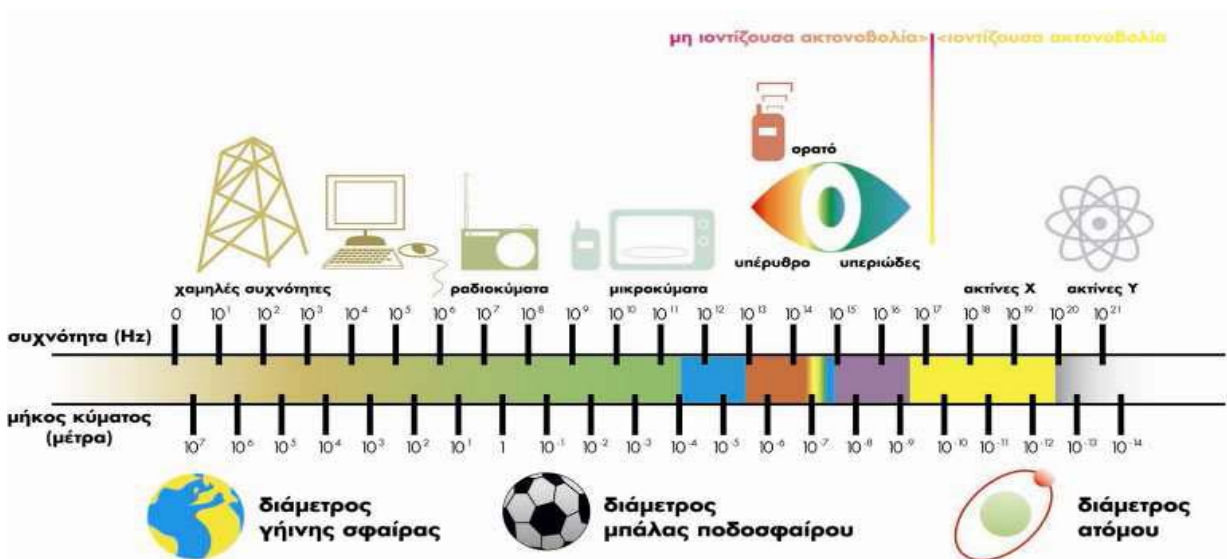
Ινοοπτική

➤ Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα

Είναι πολύ σημαντικό για τη μελέτη τα να αναλύσουμε τα διαφορετικούς τρόπους συμπεριφοράς του φωτός σε διάφορες συνθήκες. Ξεκινάμε αναφέροντας γενικά για τη σχέση που έχει το φως με το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το φως συμπεριφέρεται σαν ηλεκτρομαγνητικό κύμα με τρόπο διάδοσης τα οι ακτινοβολίες X και γ ή και τα ραδιοκύματα.

Έχουμε την ταχύτητα του φωτός στο κενό ίση με 300.000 Km/sec που τα δίνεται από τον τύπο $c = \lambda * f$, όπου λ το μήκος κύματος και f η συχνότητά του. Στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα έχουμε ένα μικρό κομμάτι ορατού φωτός που βρίσκεται ανάμεσα στα μήκη κύματος 390 nm με 760 nm.

Όλο το υπόλοιπο φάσμα αποτελείται από ακτινοβολίες μη ορατές από το ανθρώπινο μάτι τα υπεριώδεις, υπέρυθρες (που με τη χρήση τα πρισμάτων και άλλων οργάνων μπορούμε να τα δούμε) και από κύματα τα ραδιοκύματα, μικροκύματα κ.τ.λ. Παρακάτω έχουμε μια ολοκληρωμένη εικόνα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος κατηγοριοποιημένα βάσει συχνότητας και μήκος κύματος εκπομπής.



Εικόνα 2.5. Οπτικό φάσμα.



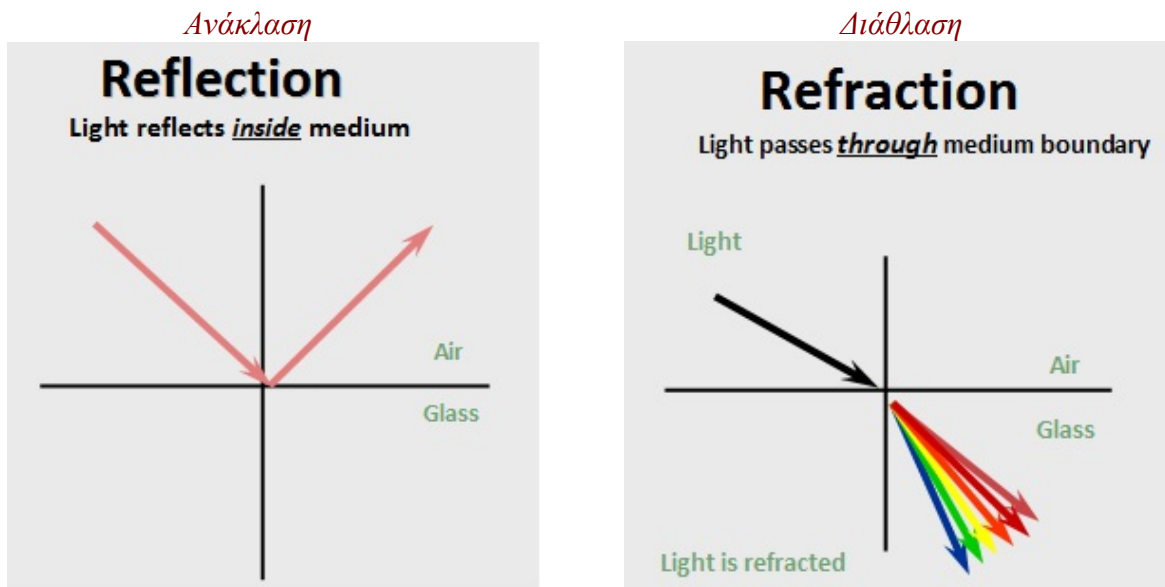
➤ Γεωμετρική Οπτική

Το φως έχει κάποιες ιδιότητες οι οποίες μπορούν να περιγραφούν απλά με έννοιες της γεωμετρικής οπτικής. Δύο από τις πιο σημαντικές όπου πρέπει να δώσουμε ιδιαίτερη προσοχή είναι η *Ανάκλαση* και η *Διάθλαση* έτσι ώστε να δούμε πώς πραγματικά δουλεύουν οι οπτικές επικοινωνίες.

Όταν έχουμε για παράδειγμα μια εκπομπή φωτός ανάμεσα σε δύο ενδιάμεσα, π.χ. τον αέρα και το γυαλί, μπορούν να συμβούν δύο καταστάσεις:

- Το φως μπορεί να ανακλαστεί στο γυαλί, ή
- Να διαθλαστεί, δηλαδή να περάσει μέσα από το γυαλί.

Έτσι το φως που ανακλάται μένει μόνο στην μία επιφάνεια (αέρας) και το φως που διαθλάται περνάει από την μία επιφάνεια στην άλλη. Οι παρακάτω εικόνες αναπαριστούν τα φαινόμενα αυτά.

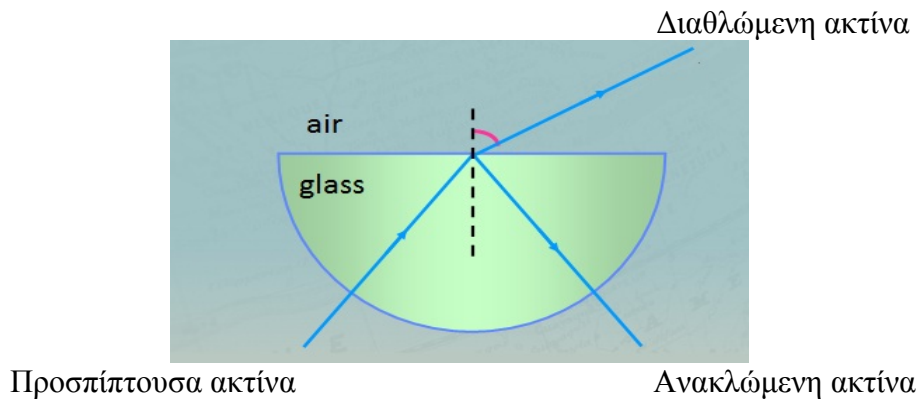


Εικόνα 2.6. Ιδιότητες φωτός.

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).



Όταν η γωνία που σχηματίζεται από την προσπίπτουσα ακτίνα είναι μικρή, τότε χωρίζεται σε δύο ακτίνες (διαθλώμενη και ανακλώμενη) με την γωνία διάθλασης να είναι μεγαλύτερη από 90 μοίρες όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 2.7. Περίπτωση προσπίπτουσας ακτίνας $< 90^\circ$.

Κατά την επινόηση των καλωδίων οπτικών ινών, οι κατασκευαστές τους είχαν έναν σημαντικό στόχο: να μην υπάρχει διαρροή φωτός στο εξωτερικό ενός καλωδίου, κάτι που θα είχε ως αποτέλεσμα την απώλεια δεδομένων και πολλά ακόμη προβλήματα.

Για το λόγο αυτό έπρεπε να βρεθεί ένας τρόπος ώστε όλη η φωτεινή ενέργεια να παραμένει στο εσωτερικό του καλωδίου και να φτάνει δίχως εξασθένηση στον προορισμό της. Η αρχή λειτουργίας ενός οπτικού καλωδίου είναι η ολική εσωτερική αντανάκλαση (TIR - Total Internal Reflection) και βασίζεται στο γεγονός ότι όταν το φως αντανακλάται εξολοκλήρου σε έναν κλειστό εσωτερικό χώρο, μπορεί να ταξιδεύσει σε μεγάλες αποστάσεις, χωρίς να μειωθεί η έντασή του.

Ως εκ τούτου, σε ένα οπτικό καλώδιο, η δεσμίδα των οπτικών ινών περικλείεται σε ειδικό υλικό που αντανακλά εσωτερικά όλο το φως, εξασφαλίζοντας έτσι δύο πράγματα:

- 1) Την ολική εσωτερική αντανάκλαση, που θα επιτρέψει στην πληροφορία να φθάσει αναλλοίωτη σε μεγάλες αποστάσεις,
- 2) Την αποφυγή διαρροής φωτός στο εξωτερικό του καλωδίου.

Για τον λόγο αυτό, το φως διοχετεύεται στο εσωτερικό της οπτικής ίνας υπό συγκεκριμένη γωνία, ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη αντανάκλαση που θα αποτρέψει την διαρροή φωτεινής ενέργειας. Μέχρι να φθάσει στον προορισμό της, η φωτεινή δέσμη συνήθως πραγματοποιεί χιλιάδες ή και εκατομμύρια αντανάκλασεις στο εσωτερικό της οπτικής ίνας^[14].



Κατασκευή Καλωδίων Οπτικής Ίνας

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

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

● Η ίνα δεν είναι αρκετά λυγισμένη, γιατί :

- 1) μπορεί εύκολα να σπάσει,
- 2) μπορεί να μετατραπεί σε χαμηλής ποιότητας κυματοδηγό (αύξηση εξασθένησης),
- 3) αυξάνεται το ρίσκο να σπάσει η ίνα αν ασκηθούν στην ίδια διαμήκεις δυνάμεις. Αν η ίνα τεντωθεί θα πρέπει να υπάρχει αρκετά μικρή πιθανότητα να σπάσει.

● Δεν έχουν ασκηθεί στην ίνα ακτινικές δυνάμεις, λόγω του ότι η συμπίεση της ίνας μπορεί να αυξήσει δραματικά την εξασθένηση

● Η ίνα δεν έχει εκτεθεί σε υγρασία. Η έκθεση της ίνας σε υγρασία μπορεί να σπάσει τη χημική της σύνθεση, με αποτέλεσμα να αυξηθεί η εξασθένηση και να ελαττωθεί η διάρκεια ζωής της

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

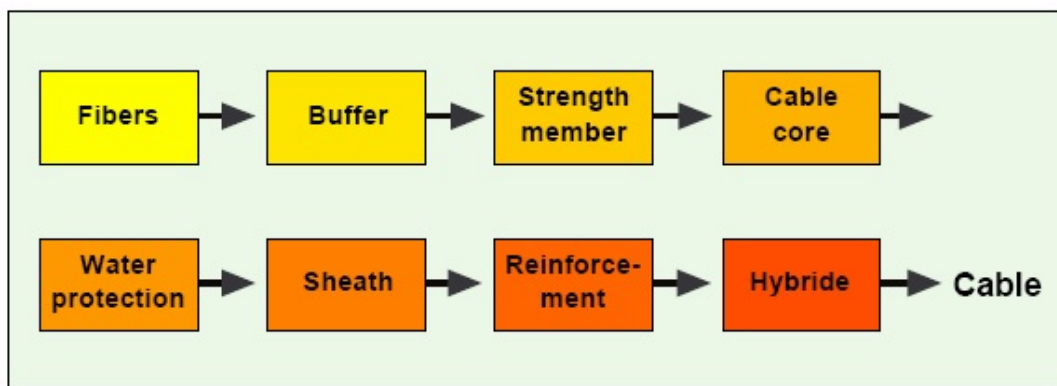
Διάφορες παράμετροι

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει τις διάφορες παραμέτρους που εμπλέκονται στη διαδικασία επιλογής του κατάλληλου καλωδίου οπτικής ίνας. Κάθε μεγάλο



κατασκευαστικό πρόγραμμά έχει τις δικές του ειδικές προδιαγραφές. Το να ικανοποιήσουμε όλες αυτές τις ειδικές παραμέτρους και ταυτόχρονα να παραμείνουμε εντός των standard των διαφόρων κατασκευαστών αποτελεί ένα σχεδόν αδύνατο στόχο. Απαιτείται λοιπόν πολύ στενή συνεργασία μεταξύ πελάτη και κατασκευαστή για έργα μεγάλης κλίμακας.

Έτσι θα ασχοληθούμε με όλα τα βασικά βήματα της διαδικασίας επιλογής του κατάλληλου οπτικού καλωδίου. Συγκεκριμένες παράμετροι που επιλέγονται αρχικά μπορεί να εξαιρέσουν άλλες παραμέτρους.



Εικόνα 2.8. Οι βασικές παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαδικασία επιλογής ενός καλωδίου οπτικής ίνας. [οπτική ίνα, απομονωτής, παράγοντας αντοχής, πυρήνας καλωδίου, προστασία από νερό, θήκη (τελικό κάλυμμα), ενίσχυση, υβριδικά καλώδια].

➤ Πρώτη παράμετρος: η οπτική ίνα

Μια οπτική ίνα είναι τελείως απροστάτευτη για τα πρώτα 1 – 3 δευτερόλεπτα της ζωής της. Πριν αποχωρήσει η ίνα από τον πύργο σχεδιασμού (σε απόλυτα καθαρό εργαστηριακό περιβάλλον) της δίνεται το πρώτο προστατευτικό στρώμα, το πρωτεύον επίστρωμα. Μια τελείως απροστάτευτη ίνα είναι άκρως ευαίσθητη στο λύγισμα και σε διαμήκειες δυνάμεις. Επίσης μια απροστάτευτη ίνα είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στην υγρασία και σε αρκετά χημικά.



▪ Πρωτεύων επίστρωμα

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

➤ Δεύτερη παράμετρος: οι απομονωτές

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

- *Χαλαρός σωλήνας (Loose tube buffer)*
- *Σφικτός Σωλήνας (tight tube buffer)*
- *Κορδέλα Ινών (fiber ribbon)*

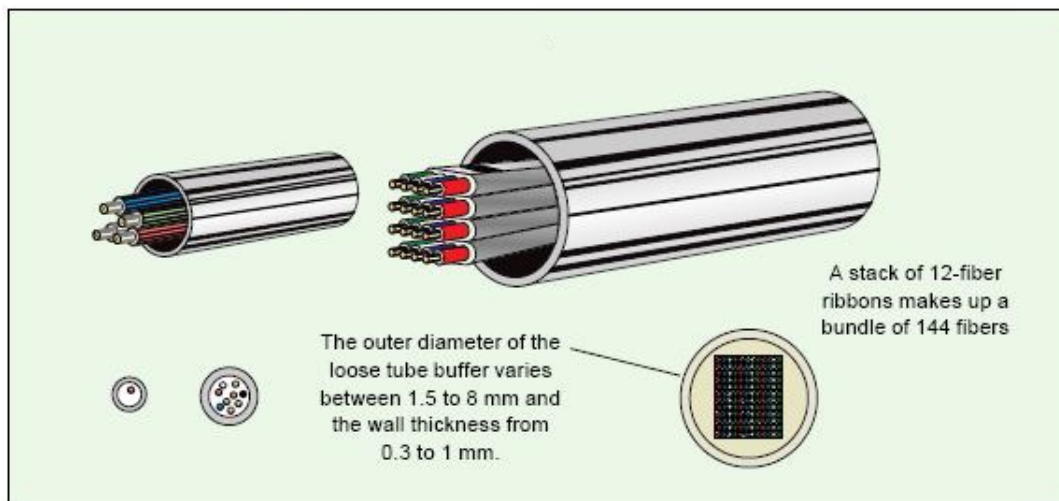
▪ Χαλαρός σωλήνας (Loose tube buffer)

Για να αποφύγουμε αλλαγές στις παραμέτρους μιας ίνας λόγω πίεσης, λυγίσματος, τεντώματος και άλλων όμοιων μηχανικών δυνάμεων, η ίνα (ή μια κορδέλα ινών) με πρωτεύον επίστρωμα τοποθετείται χαλαρά μέσα σε ένα στενό σωλήνα. Η πιο απλή περίπτωση είναι να έχουμε μια μόνο ίνα μέσα σε ένα πλαστικό σωλήνα. Μια πιο περίπλοκη περίπτωση είναι να τοποθετούνται αρκετές ίνες (μέχρι 12) ή κορδέλες ινών μέσα σε ένα χαλαρό πλαστικό σωλήνα. Γενικά τοποθετούνται το πολύ 4 – 6 ίνες/κορδέλες ανά σωλήνα. Ο σωλήνας πρέπει να πληρεί τις παρακάτω προϋποθέσεις :

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



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



Εικόνα 2.9. Ίνες με πρωτεύον επίστρωμα ή κορδέλες ινών μπορεί να τοποθετηθούν χαλαρά μέσα σε σωλήνα, ο οποίος παίζει ρόλο απομονωτή.

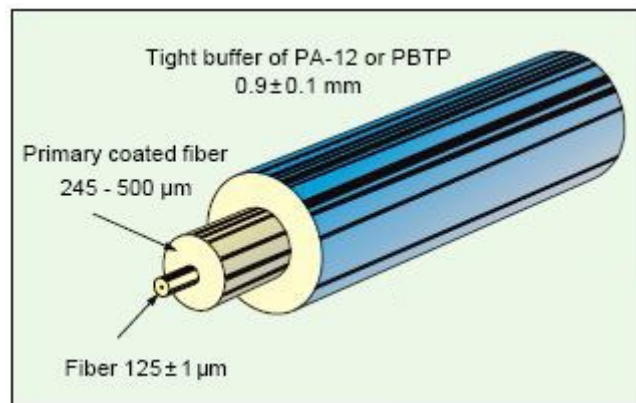
▪ **Σφιγτός σωλήνας (tight tube buffer)**

Ένας άλλος τρόπος προστασίας μιας ίνας με πρωτεύον επίστρωμα είναι η τοποθέτηση ενός λεπτού και στενού στρώματος πλαστικού αμέσως μετά το πρωτεύον επίστρωμα (245 – 500 μm). Σε θερμοκρασία 250 °C τοποθετείται στην ίνα ένα στρώμα πλαστικού (PA ή PBTP), μετατρέποντας τη διάμετρο της σε 0.8 – 1 mm. Κατά την παραπάνω διαδικασία η ίνα χρωματίζεται ώστε να αναγνωρίζεται εύκολα κατά την τοποθέτηση της.

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



Δίκτυα μεγάλων αποστάσεων στα οποία χρησιμοποιούνται καλώδια ιών χαλαρών σωλήνων συνήθως τερματίζονται (για μήκος περίπου 1m) με καλώδια σφικτών σωλήνων. Η διαδικασία αυτή διευκολύνει αρκετά τη σύνδεση καλωδίων μεγάλου μήκους σε καλώδια διασύνδεσης. Προφανώς η ίνα των καλωδίων τερματισμού πρέπει να είναι ίδιου τύπου με την ίνα των καλωδίων του δικτύου (μονότροπη/πολύτροπη).

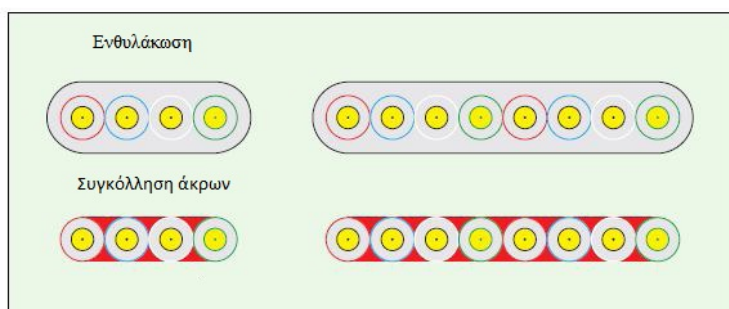


Εικόνα 2.10. Σφικτός σωλήνας.

▪ Κορδέλα ιών (fiber ribbon)

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

- 1) Συγκόλληση άκρων
- 2) Ενθυλάκωση



Εικόνα 2.11. Οι δύο πιο διαδεδομένες διαδικασίες κατασκευής κορδελών ιών.



➤ Τρίτη παράμετρος: παράγοντας αντοχής

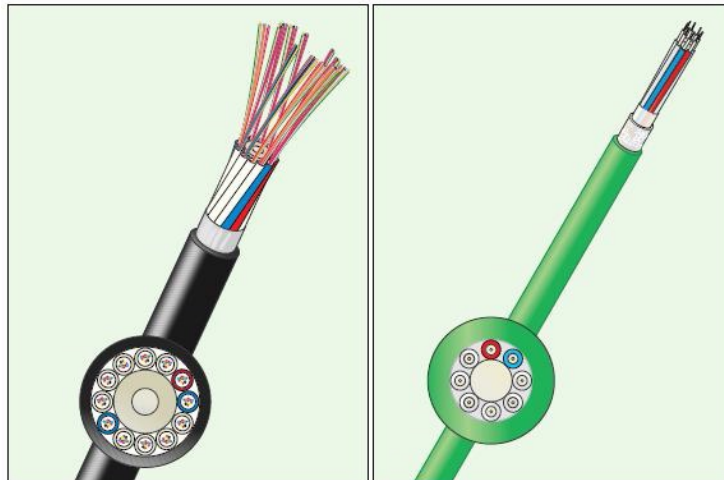
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το ρίσκο να σπάσει μια ίνα είναι αρκετά μεγάλο όταν της ασκούνται διαμήκεις δυνάμεις (π.χ. τέντωμα κατά την εγκατάσταση του καλωδίου). Έτσι όλα τα καλώδια οπτικών ινών, εφοδιάζονται με κάποιο παράγοντα που αυξάνει την αντοχή τους σε τέτοιου είδους δυνάμεις που προκαλούν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

➤ Τέταρτη παράμετρος: ο πυρήνας του καλωδίου

▪ Καλώδια με κυκλικό πυρήνα

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

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

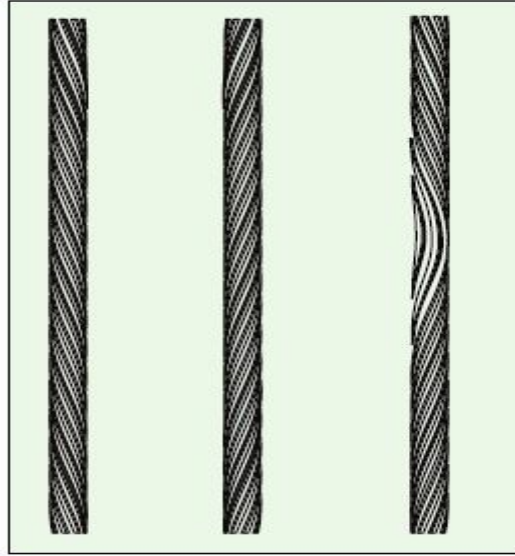


Εικόνα 2.12. Παρατηρούμε δύο οπτικά καλώδια ομόκεντρης κατασκευής. Το πρώτο αποτελείται από ίνες χαλαρού σωλήνα τυλιγμένες γύρω από τον παράγοντα αντοχής (πυρήνα) , ενώ το δεύτερο από ίνες σφικτού σωλήνα.

▪ Καλώδιο με πυρήνα αυλακώσεων

Για καλώδια που αναμένεται να εκτίθενται συνεχώς σε ακτινικές δυνάμεις, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εγκατάστασής τους και όχι μόνο, πρέπει να ληφθούν ειδικά μέτρα για την προστασία των ινών που περιέχουν. Γι' αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι πυρήνων καλωδίου. Οι περισσότεροι από αυτούς κατασκευάζονται σύμφωνα με τη μέθοδο των αυλακώσεων. Κατά την παραπάνω μέθοδο οι ίνες τοποθετούνται σε ειδικά διαμορφωμένες αυλακώσεις του πυρήνα.

Συνήθως ένα υλικό με 3 ως 12 αυλακώσεις τοποθετείται γύρω από τον μεταλλικό ή μη μεταλλικό παράγοντα αντοχής. Οι αυλακώσεις παρουσιάζουν ελικοειδές τύλιγμα S, Z ή τύλιγμα SZ γύρω από τον παράγοντα αντοχής. Οι ελικοειδείς πυρήνες (S, Z) με αυλακώσεις παρουσιάζουν την ίδια κατεύθυνση στρέψης σε όλο το μήκος του καλωδίου, ενώ εκείνοι που ακολουθούν SZ τύλιγμα αλλάζουν κατεύθυνση στρέψης κατά μήκος του κεντρικού άξονα. Το τύλιγμα τύπου SZ έχει απλοποιήσει αρκετά την κατασκευή και την εγκατάσταση τέτοιου τύπου καλωδίων.



Εικόνα 2.13. Τρόποι τυλίγματος πυρήνα αυλακώσεων. Από αριστερά προς τα δεξιά : S, Z και SZ.

➤ Πέμπτη παράμετρος: προστασία από νερό και υγρασία

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

▪ Υλικό γέμισης καλωδίου

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



- **Ταινία διόγκωσης, ως μονωτής υγρασίας**

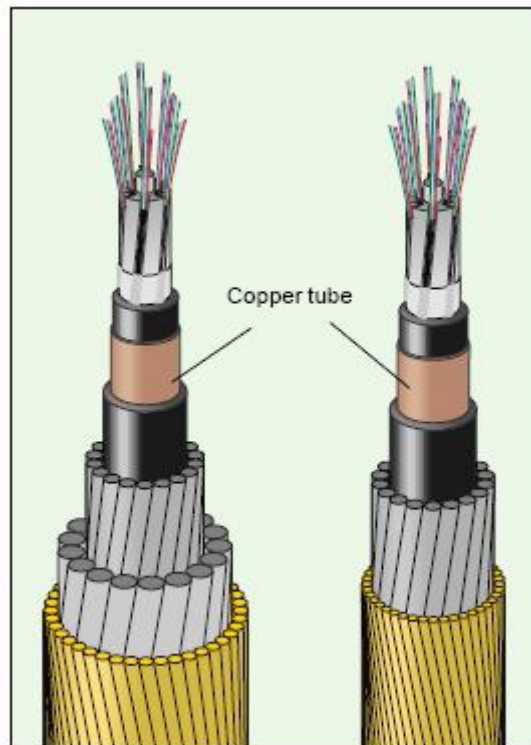
Για εσωτερικά/εξωτερικά καλώδια τελευταία χρησιμοποιείται ένας πιο απλός και ξηρός τρόπος μόνωσης. Μεταξύ των ινών και του τελικού καλύμματος τοποθετείται μια ταινία που διογκώνεται όταν έρθει σε επαφή με νερό. Η ταινία αυτή αποτρέπει τη συσσώρευση νερού κατά μήκος του καλωδίου. Αυτός ο τρόπος μόνωσης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

- **Μεταλλικό κάλυμμα (φύλλο αλουμινίου)**

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

- **Μεταλλικός σωλήνας χαλκού**

Καλώδια τα οποία τοποθετούνται μέσα σε νερό ή σε πολύ υγρό έδαφος πρέπει να καλύπτονται εξολοκλήρου από μεταλλικό κάλυμμα. Σε βάθος χρόνου το νερό διαπερνά κάθε τύπου πλαστικό κάλυμμα. Το υλικό μόνωσης που χρησιμοποιείται σε τέτοιες περιπτώσεις είναι ο χαλκός. Ο χαλκός μορφοποιείται σε σωλήνα που καλύπτει την εξωτερική θήκη του καλωδίου. Στη συνέχεια τοποθετούνται αρκετά καλύμματα μεταλλικών νημάτων που κάνουν το καλώδιο πολύ ανθεκτικό σε παραμορφώσεις που προκαλούνται από εξωτερικές δυνάμεις. Παλιότερα αντί για το σωλήνα χαλκού οι κατασκευαστές χρησιμοποιούσαν σωλήνα μόλυβδου. Κυρίως για περιβαλλοντικούς λόγους όμως μεθοδεύτηκε η παραπάνω αντικατάσταση.



Εικόνα 2.14. Καλώδια που χρησιμοποιούνται σε υποβρύχιες τοποθετήσεις. Παρατηρούμε το σωλήνα χαλκού και τα διάφορα στρώματα μεταλλικών νημάτων που χρησιμοποιούνται σαν μονωτές, όπως και το τελικό αντισκωρικό κάλυμμα.

➤ Έκτη παράμετρος: τελικό κάλυμμα (θήκη καλωδίου)

▪ Τοποθετώντας το τελικό κάλυμμα

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

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

Η τεχνική τοποθέτησης του τελικού καλύμματος σε ένα οπτικό καλώδιο είναι πανομοιότυπη με εκείνη που χρησιμοποιείται για ένα συνηθισμένο καλώδιο χαλκού.



Το τελικό κάλυμμα αποτελείται από ένα ή δύο πλαστικά υλικά, με ή χωρίς περεταίρω κάλυμμα αλουμινίου και μονωτικό υγρασίας. Τα πλαστικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του τελικού καλύμματος είναι τα παρακάτω :

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

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

➤ Εβδομη παράμετρος: ενίσχυση

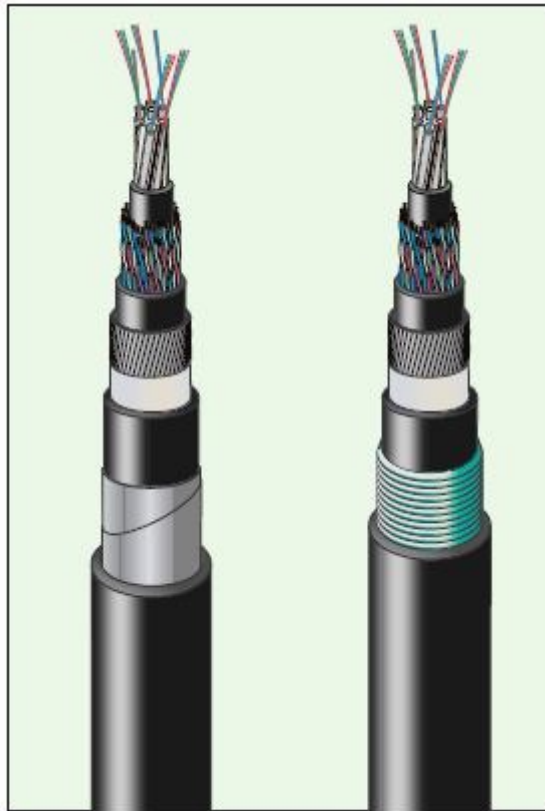
Στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι απαραίτητο να τοποθετηθεί σε ένα οπτικό καλώδιο περαιτέρω ενίσχυση από αυτές που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τα οπτικά καλώδια που δεν έχουν extra ενίσχυση μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε όλες τις indoor όπως και στις περισσότερες outdoor εφαρμογές. Καλώδια που πρόκειται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

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



➤ Υβριδικά καλώδια

Πολλές εγκαταστάσεις απαιτούν το συνδυασμό οπτικών καλωδίων και συνηθισμένων χάλκινων καλωδίων. Τα χάλκινα καλώδια υποστηρίζουν τηλεφωνικά συστήματα χαμηλών συχνοτήτων, ενώ οι οπτικές ίνες συστήματα μετάδοσης υψηλής ποιότητας. Τα υβριδικά καλώδια χρησιμοποιούνται κυρίως σε εγκαταστάσεις σιδηροδρόμων για επικοινωνία μεταξύ μεγάλων σταθμών. Τα καλώδια αυτά ενισχύονται με μεταλλικά νήματα ή μεταλλικές ταινίες^{[1][19]}.



Εικόνα 2.15. Δοο παραδείγματα υβριδικών καλωδίων που χρησιμοποιούνται σε σιδηροδρομικές εγκαταστάσεις.



ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ - ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Η πληροφορία ήταν πάντοτε αναγκαία στην καθημερινή ζωή του ανθρώπου. Οι εποχές άλλαζαν και οι τρόποι μετάδοσης της διέφεραν από καιρό σε καιρό. Το τηλέφωνο, η τηλεόραση, το ραδιόφωνο, το ίντερνετ κ. α. είναι μερικές από τις πολλές δυνατότητες επικοινωνίας και μεταφοράς πληροφορίας που πλαισιώνουν την καθημερινότητα μας.

Με το πέρασμα του χρόνου έχει αυξηθεί η ανάγκη για γρήγορη και συνεχή πληροφόρηση βάσει των συνεχών και ραγδαίων αλλαγών που υπάρχουν στα μέσα μετάδοσης της πληροφορίας. Οι οπτικές ίνες φαίνεται να είναι σήμερα η καλύτερη λύση στο πρόβλημα μας και αυτό γιατί τα πλεονεκτήματα, που παρουσιάζουν, σε σχέση με τα άλλα μέσα είναι ιδιαίτερα σημαντικά. Ορισμένα από αυτά είναι τα παρακάτω όπως και κάποια από τα μειονεκτήματα τους.

- **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 παρόχους 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).
- Ασφάλεια μεταδόσεων: Οι ίνες δεν ακτινοβολούν ήλεκτρο-μαγνητικούς παλμούς, ακτινοβολία ή κάποια άλλη ενέργεια που μπορεί να ανιχνευθεί άρα είναι δύσκολο να υποκλαπεί το σήμα
- Δεν αχρηστεύονται : Οι μεγάλες δυνατότητες αναβάθμισης τις κάνουν ικανές να είναι πάντα χρήσιμες.
- Πρώτες ύλες: Το υλικό που χρειάζεται για την παρασκευή των ινών (silica glass-διοξείδιο του πυριτίου) υπάρχει άφθονο.
- 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. Προκειμένου να πετύχουν όλα αυτά χρειάζεται ειδικευμένο προσωπικό με γνώσεις και εμπειρία πάνω στο αντικείμενο. Τέλος η υλοποίησή τους φαίνεται να κοστίζει αρκετά τόσο ώστε να μην έχει αντικαταστήσει τα προηγούμενα μέσα μετάδοσης πληροφορίας^{[4][14][18]}.

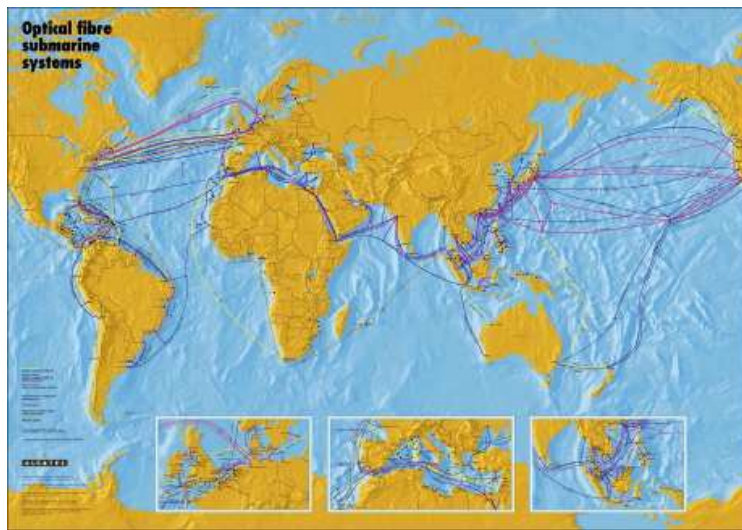
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Τα καλώδια οπτικών ινών, τα οποία, συνήθως περιέχουν δεσμίδες οπτικών ινών, χρησιμοποιούνται, κυρίως, από τους τηλεπικοινωνιακούς οργανισμούς για επίγειες και υποθαλάσσιες συνδέσεις μεγάλων αποστάσεων, αντικαθιστώντας τόσο τις γραμμές ομοαξονικών καλωδίων, όσο και τις επίγειες και δορυφορικές μικροκυματικές ζεύξεις.

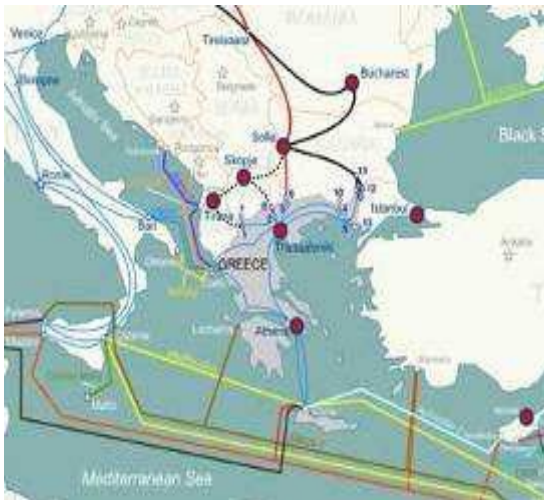
Τα τελευταία χρόνια έχουν ποντισθεί πολλά καλώδια οπτικών ινών, με χωρητικότητα, η οποία ξεπερνά τα 30.000 κυκλώματα φωνής, για τη διασύνδεση ηπείρων. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν το καλώδιο BSFOCS, που εκτείνεται στην περιοχή της Μαύρης θάλασσας και συνδέει τη Βουλγαρία, Ουκρανία και Ρωσία, το καλωδιακό σύστημα SEA - ME - WE 3 (South East Asia - Middle East - West Europe), που ξεκινά από τη Δυτική Ευρώπη (Γερμανία, Μεγ. Βρετανία), περνά από τα στενά του Γιβραλτάρ στη Μεσόγειο (Ιταλία, Ελλάδα, Κύπρο) συνεχίζει από τα στενά του Σουέζ προς την Ασία (Ινδία, Σιγκαπούρη) και χωρίζεται σε δύο μέρη, με το ένα άκρο να καταλήγει στην Ιαπωνία και το άλλο στην Αυστραλία και το καλώδιο ADRIA-1, που συνδέει την Ελλάδα (Κέρκυρα), την Αλβανία (Durrës) και την Κροατία (Dubrovnik).

Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται, επίσης, από ιδιωτικές εταιρίες σε τοπικά δίκτυα, σε πανεπιστημιακά δίκτυα κορμού, σε δίκτυα ευρείας περιοχής, σε δίκτυα καλωδιακής τηλεόρασης, σε εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις σε ασφάλεια μετάδοσης, όπως οι στρατιωτικές, σε κλάδους της ιατρικής και, τέλος, σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπου υπάρχει υψηλός βιομηχανικός θόρυβος, στον οποίο οι οπτικές ίνες παρουσιάζουν ανοσία.

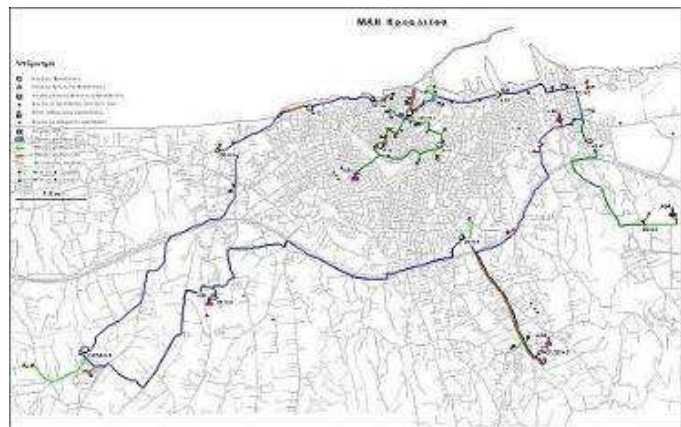
Παρακάτω φαίνονται το παγκόσμιο δίκτυο οπτικών ινών, της Ελλάδας και του Ηρακλείου, με αντίστοιχη σειρά^{[4][18]}.



Εικόνα 2.16. Παγκόσμιο Δίκτυο Οπτικών Ινών.



Εικόνα 2.17. Οπτικό Δίκτυο Ελλάδας.



Εικόνα 2.18. Οπτικό Δίκτυο Ηρακλείου.

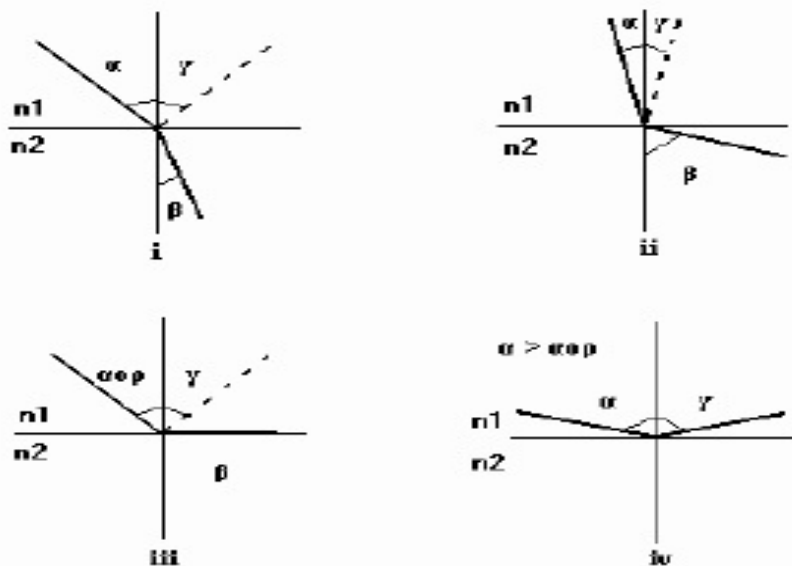


Κεφάλαιο 3^ο

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Κυματοδότηση

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, (όπως έχουμε αναφέρει προηγουμένως) όταν αυτά προσπίπτουν στη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων. Το παρακάτω σχήμα δείχνει τρεις ακτίνες φωτός: προσπίπτουσα, ανακλώμενη, διαθλώμενη. Οι τρεις αυτές ακτίνες βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο και ισχύουν τα εξής:

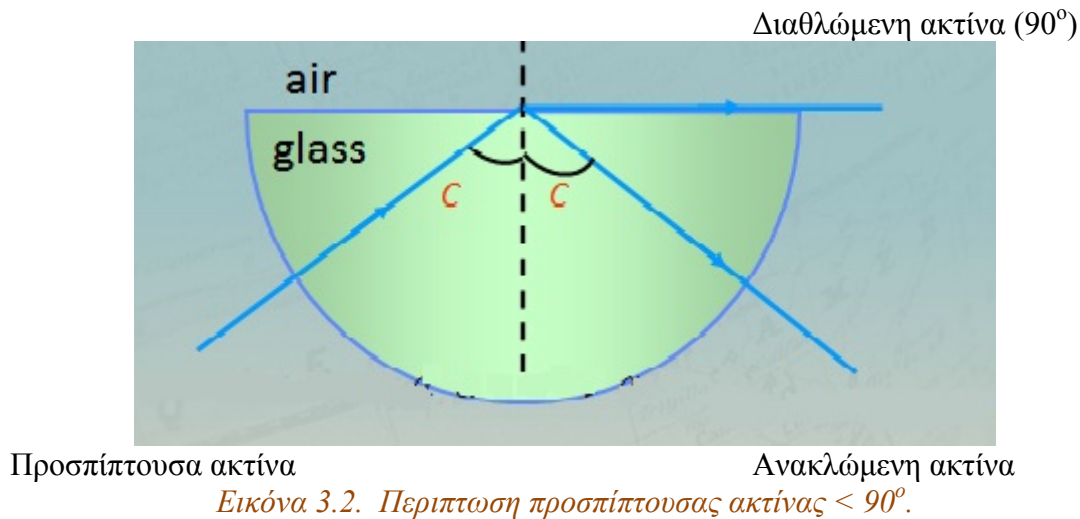


Εικόνα 3.1. Διάφορες περιπτώσεις γωνίας πρόσπτωσης φωτός.

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

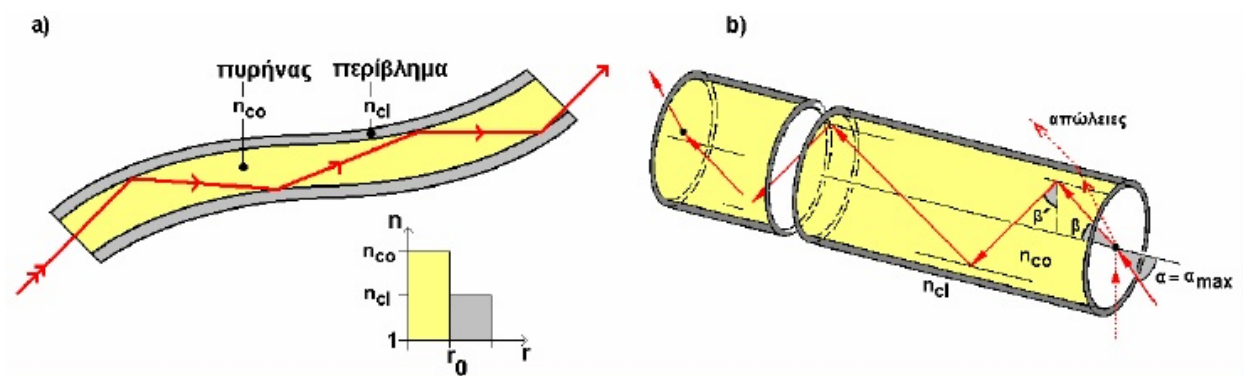


Παρατηρούμε από το παραπάνω σχήμα πως όσο μεγαλώνει η προσπίπτουσα γωνία άλλο τόσο μεγαλώνει και η διαθλώμενη γωνία. Έτσι φτάνουμε σε ένα σημείο όπου η διαθλώμενη γωνία είναι ίση με 90° μοίρες. Τότε η προσπίπτουσα γωνία ονομάζεται *κρίσιμη γωνία*.



Για γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες από την προηγούμενη έχουμε το φαινόμενο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης, δηλαδή η φωτεινή δέσμη ανακλάται εξολοκλήρου χωρίς να υπάρχει καθόλου διαθλώμενη ακτίνα.

Οπότε μιλάμε για το φαινόμενο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης στο οποίο πρέπει να επεξηγήσουμε τι ακριβώς συμβαίνει μέσα στην οπτική ίνα.



Εικόνα 3.3. Φαινόμενο ολικής εσωτερικής ανάκλασης.



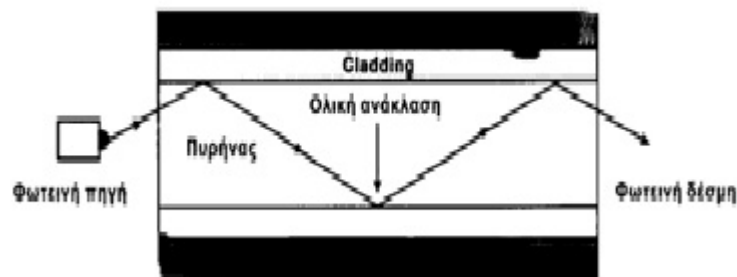
Μια δέσμη φωτός εισέρχεται από την πρώτη μετωπική επιφάνεια και διαδίδεται με πολλαπλές ολικές ανακλάσεις μεταξύ πυρήνα και περιβλήματος. Αυτά είναι τα δύο μέσα διάδοσης με συνηθισμένες τιμές δεικτών διάθλασης $n_1=1.47$ και $n_2=1.46$ αντίστοιχα. Μια δέσμη φωτός, που προσπίπτει σε γωνία α ($\alpha < \alpha_{\max}$) και διαθλάται σε γωνία β , ανακλάται στα τοιχώματα του περιβλήματος σε γωνία $\beta' = 90^\circ - \beta$.

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 ($n_1 < n_2$), 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 παρακάτω σχήμα 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 όπως αναφέραμε. Ο άλλος στόχος που είναι η πρόσπτωση των ακτινών με γωνία μεγαλύτερη της οριακής 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^{[4][10][14]}.



Εικόνα 3.4. Μετάδοση σε πολύτροπη οπτική ίνα.



ΤΡΟΠΟΙ ΔΙΑΔΟΣΗΣ

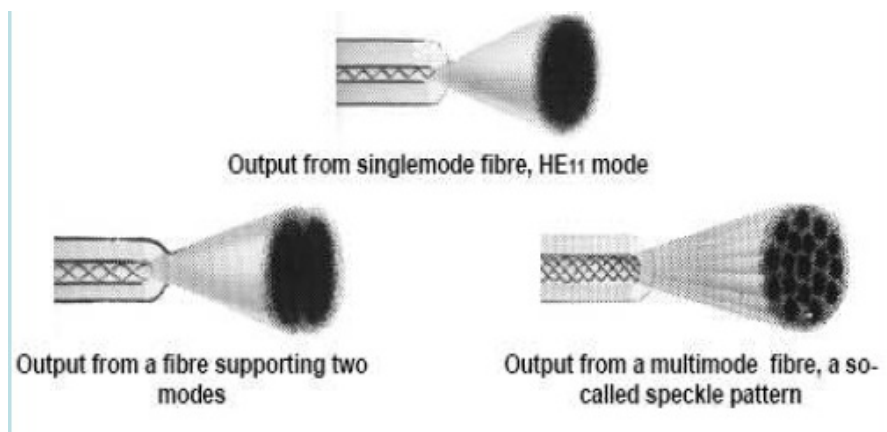
Οι «τρόποι διάδοσης» αποτελούν μαθηματικές και φυσικές μεθόδους περιγραφής της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε ένα αυθαίρετο μέσο. Στη μαθηματική τους μορφή, η θεωρία των ηλεκτρομαγνητικών ρυθμών διάδοσης προέρχεται από τις εξισώσεις Maxwell. Ο James Clark Maxwell ήταν ένας μεγάλος Σκοτσέζος 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 8-10 μm . Αντίστοιχα οπτικές ίνες με περισσότερους από ένα οπτικούς τρόπους μετάδοσης λέγονται πολύτροπες (multi mode) και έχουν τυπικές διαστάσεις πυρήνα (διάμετρος) από 50 μm μέχρι και mm. Ο αριθμός των τρόπων μετάδοσης που υποστηρίζει μια ίνα καθορίζει, ως ένα βαθμό, την δυνατότητά 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^{[4][8]}.



Εικόνα 3.5. Οπτικοί Τρόποι Διάδοσης.

ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ

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 :

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

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].



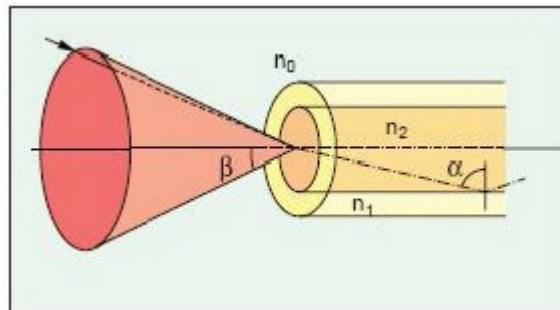
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΑΝΟΙΓΜΑ

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^[3]. Φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.6. Κώνος αποδοχής.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

Ας δούμε τώρα ορισμένα από τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν οι οπτικές ίνες σαν μέσο μετάδοσης πληροφορίας.



Εξασθένηση

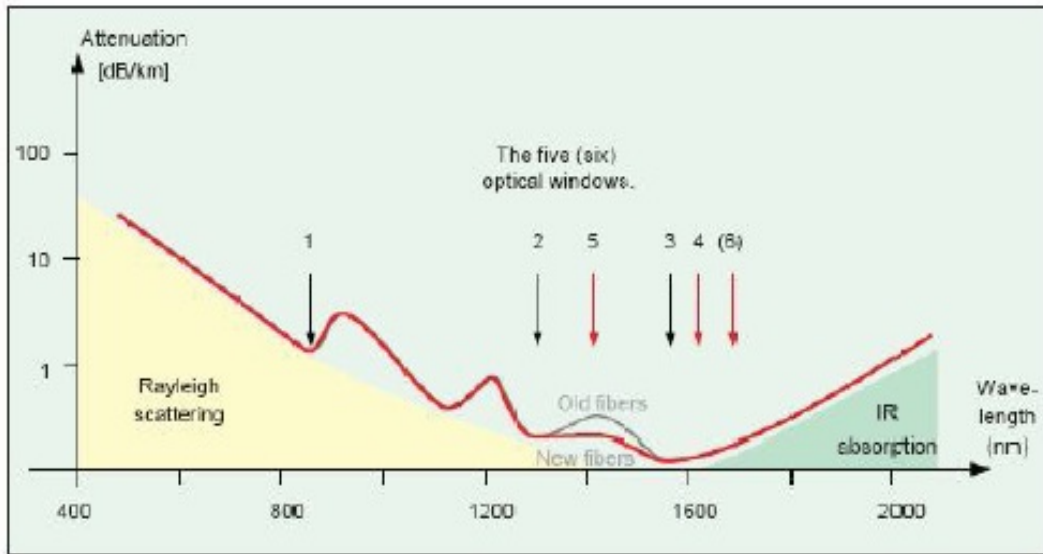
Είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τις απώλειες τις οποίες εισάγει μία οπτική ίνα, αφού μόνο έτσι μπορούμε να καθορίσουμε τη μέγιστη απόσταση μιας ζεύξης χωρίς χρήση επαναλήπτη. Η εξασθένηση οφείλεται κυρίως στην απορρόφηση της φωτεινής ενέργειας λόγω μετατροπής της σε θερμότητα λόγω σκέδασης. Έχουν κατασκευαστεί ίνες των οποίων η εξασθένηση που παρουσιάζουν πλησιάζει το όριο σκέδασης Rayleigh, που οφείλεται στις μοριακές ανομοιογένειες του γυαλιού.

Η **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 $1/\lambda^4$.

Εκτός από τη σκέδαση Rayleigh, οι ξένες προσμίξεις που υπάρχουν στο υλικό της ίνας συμμετέχουν στην εξασθένηση της ίνας. 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 υπέρυθη) 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 .

Ακόμη ένας παράγοντας υπεύθυνος για την εξασθένηση του σήματος είναι οι αναπόφευκτες **κάμψεις** του οπτικού καλωδίου που εμφανίζονται σε μία πρακτική ζεύξη. Το φαινόμενο γίνεται ιδιαίτερα αισθητό όταν η ακτίνα κάμψης είναι μικρότερη από 3 εκατοστά. Είναι σημαντικότερο στα μεγάλα μήκη κύματος.

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 3.7. Η εξασθένιση του φωτός για γυαλί οπτικής ίνας. Παρατηρούμε τα “παράθυρα” στα διάφορα μήκη κύματος.

Διασπορά

Το φως που ταξιδεύει μέσα σε ένα κυματοδηγό θα υποστεί παραμόρφωση. Το εκπεμπόμενο φως θα διευρυνθεί στο πεδίο του χρόνου με αποτέλεσμα ένας παλμός να ενωθεί με τον προηγούμενο. Στον τομέα των οπτικών ινών το παραπάνω φαινόμενο ονομάζεται διασπορά. Η γραμμική φύση της διασποράς δηλώνει ότι ως φαινόμενο δεν εξαρτάται από την ισχύ του σήματος. Επίσης δεν επιφέρει αλλαγή στη φασματική κατανομή του. Υπάρχουν δύο είδη διασποράς που θα αναλύσουμε παρακάτω.

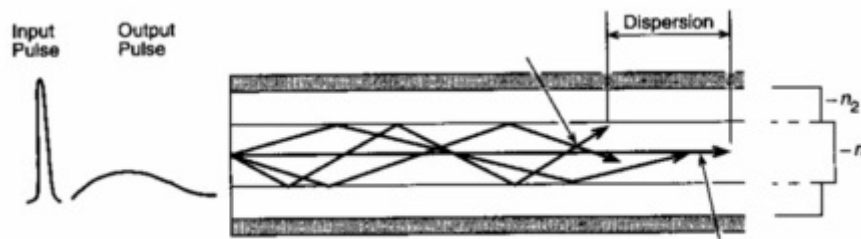
- **Διατροπική:** Οφείλεται στους διαφορετικούς τρόπους διάδοσης που υποστηρίζονται. Εμφανίζεται στις πολύτροπες ίνες.
- **Ενδοτροπική:** Οφείλεται στη μεταβολή του δείκτη διάθλασης n με το μήκος κύματος. Είναι πολύ υψηλή στη μονότροπη ίνα αλλά εμφανίζεται και στις πολύτροπες. Χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, τη Διασπορά Υλικού και τη Διασπορά Κυματοδηγού.



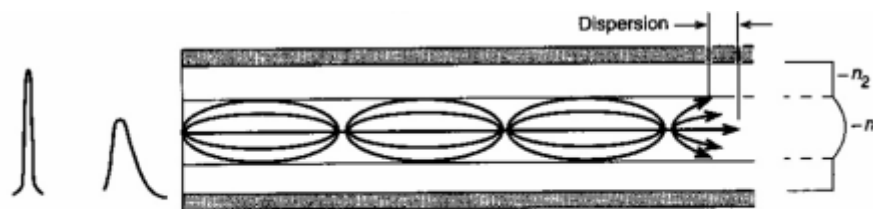
Διατροπική Διασπορά

Ένας παλμός φωτός που διαδίδεται μέσα σε μια πολύτροπη ίνα πρέπει να θεωρείται ως ένας μεγάλος αριθμός υποπαλμών, 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. Η διαφορά που υπάρχει ανάμεσα στο χρόνο άφιξης του γρηγορότερου υποπαλμού και του αργότερου, είναι ανάλογη της απόστασής τους. Το φαινόμενο αυτό περιορίζει αρκετά τις τηλεπικοινωνίες οπτικών ινών.



Εικόνα 3.8. Πολύτροπη Ίνα Βηματικού Δείκτη Διάθλασης



Εικόνα 3.9. Πολύτροπη Ίνα Διαβαθμισμένου Δείκτη Διάθλασης



Εικόνα 3.10. Μονότροπη Ίνα

Στο σχήμα φαίνεται η διαφορά στο χρόνο άφιξης των υπο-παλμών και η διασπορά που υπάρχει ανάλογα το δείκτη διάθλασης.

Η Διατροπική διασπορά προκαλεί τα παρακάτω προβλήματα :

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

Υπάρχει ένας φυσικός τρόπος μείωσης της διατροπικής 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. Οι διαφορετικοί τρόποι μετάδοσης (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 Διατροφική διασπορά αδρανοποιείται πλήρως όταν μειωθεί η διάμετρος του πυρήνα έτσι ώστε να διαδίδεται μέσα στην οπτική ίνα μόνο ένας ρυθμός, ο θεμελιώδης, όπως είδαμε παραπάνω ότι ισχύει στην μονότροπη ίνα.

Ενδοτροπική Διασπορά

Όπως αναφερθήκαμε παραπάνω υπάρχει και άλλο ένα είδος διασποράς, η ενδοτροπική. Έτσι όσο και να αδρανοποιηθεί η διατροφική διασπορά θα υπάρχει αυτή. Η παραμόρφωση αυτού του τύπου ονομάζεται χρωματική διασπορά μαζί με **διασπορά πόλωσης** ρυθμού μετάδοσης που θα αναφέρουμε στη συνέχεια. Ο λόγος ύπαρξης του φαινομένου αυτού είναι η πηγή διάδοσης του φωτός. Η χρωματική διασπορά μέσα σε μια μονότροπη ίνα συνίσταται από τη **διασπορά υλικού** και τη **διασπορά κυματοδηγού**.

Διασπορά Υλικού: Σε ένα οπτικό σήμα, το πλήθος των κυμάτων που αποτελούν την πληροφορία διαδίδονται με διαφορετική ταχύτητα το κάθε ένα με αποτέλεσμα ορισμένα από αυτά να φτάνουν πιο νωρίς από κάποια άλλα. Έτσι προκαλείται το φαινόμενο αυτό.

Είναι ο σημαντικότερος παράγοντας περιορισμού του ρυθμού σηματοδοσίας Rb σε μια οπτική ίνα μήκους L αφού η διεύρυνση των παλμών του σήματος συνεπάγεται αύξηση του ISI και της δυσκολίας στο δέκτη να ξεχωρίσει τους λαμβανόμενους παλμούς. Ένα μέτρο της διαπλάτυνσης των παλμών $\Delta\tau$ δίνεται από τη σχέση:

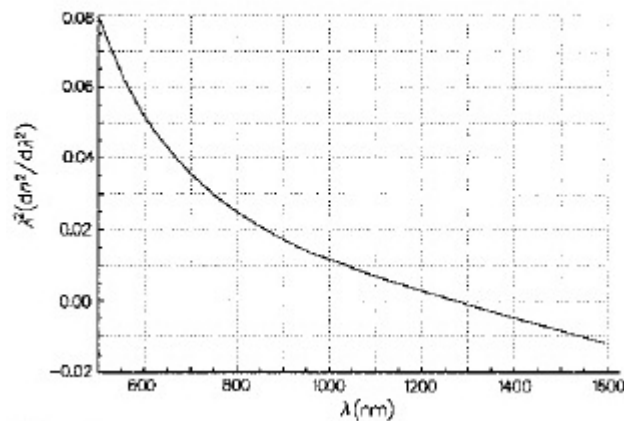
$$\Delta\tau_{\text{ΥΛΙΚΟΥ}} = -L \Delta\lambda \left(\frac{\lambda}{c} \frac{d^2n}{d\lambda^2} \right)$$

Όπου $\Delta\lambda$: Φασματικό εύρος πηγής

Παράμετρος διασποράς υλικού



Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η εξάρτηση αυτής της παραμέτρου από το μήκος κύματος για μια τυπική ίνα. Υπάρχει μια περιοχή μηκών κύματος γύρω στα 1.3 μm όπου η χρωματική διασπορά μηδενίζεται. Συνεπώς το μήκος κύματος αυτό, είναι κατάλληλο με χρήση μονότροπης ίνας για τη μετάδοση υψηλών ρυθμών πληροφορίας σε μεγάλες αποστάσεις. Για μήκη κύματος μικρότερα από 1.3μm η διαφορική χρονική καθυστέρηση Δt έχει αρνητικό πρόσημο, που σημαίνει ότι η διεύρυνση των παλμών οφείλεται στο ότι τα μεγαλύτερα μήκη κύματος διαδίδονται πιο γρήγορα από τα μικρότερα (ομαλή διασπορά). Για μήκη κύματος μεγαλύτερα από 1.3μm το πρόσημο της Δt είναι θετικό που σημαίνει ότι τώρα τα μικρότερα μήκη κύματος «φαίνεται» να διαδίδονται πιο γρήγορα από τα μεγαλύτερα (ανώμαλη διασπορά).



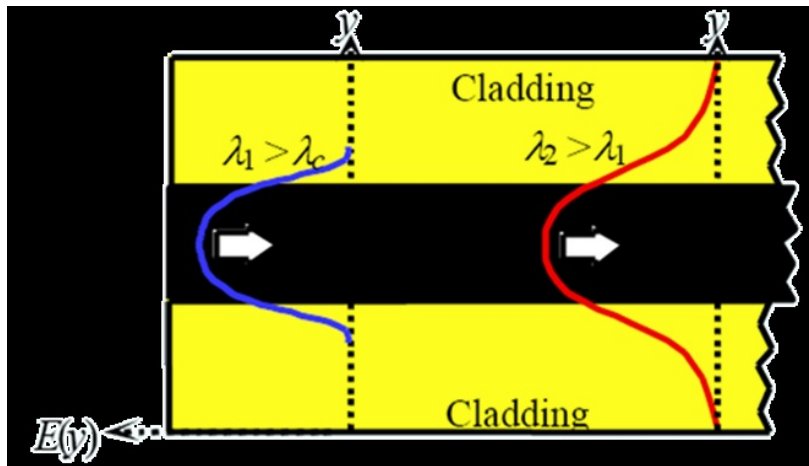
Εικόνα 3.11. Γράφημα εξάρτησης της παραμέτρου από το μήκος κύματος

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.



Διασπορά Κυματοδηγού: Η διασπορά κυματοδηγού στις μονότροπες ίνες σχετίζεται με την κατανομή της ισχύος του διαδιδόμενου παλμού στις περιοχές του μανδύα και του πυρήνα και εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τις ίνας (κυματοδηγού).

Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος, τόσο περισσότερη οπτική ισχύς κυματοδηγείται στο μανδύα αντί για τον πυρήνα. Στα μικρά μήκη κύματος περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό μέσα στον πυρήνα, στα μεσαία μήκη κύματος διαχέεται ελαφρά μέσα στο μανδύα ενώ στα μεγάλα μήκη κύματος διαχέεται σε μεγάλο βαθμό στο μανδύα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου διάδοσης καθώς το μήκος κύματος αυξάνεται αφού ο ενεργός δείκτης διάθλασης της ίνας n θα μεταβάλλεται αντιστοίχως παίρνοντας τιμές από τον δείκτη n του πυρήνα έως τον n του μανδύα.



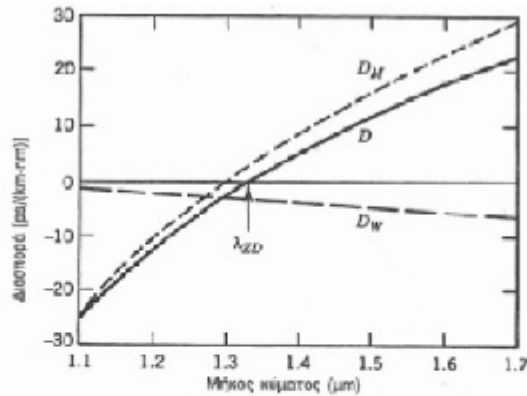
Εικόνα 3.12. Διασπορά κυματοδηγού σε μονότροπη ίνα

Συνεπώς η ενδοτροπική διασπορά είναι άθροισμα της τιμής της διασποράς υλικού και του κυματοδηγού. Στις μονότροπες ίνες κυριαρχεί η διασπορά υλικού παρά η διασπορά κυματοδηγού. Έχουν αντίθετα πρόσημα και γι' αυτό σε ορισμένα μήκη κύματος μπορούν να αλληλοαναιρεθούν. Έτσι η συνολική διασπορά που έχουμε είναι :

$$D = D_{\text{ΥΛΙΚΟΥ}} + D_{\text{ΚΥΜΑΤΟΔΗΓΟΥ}}$$



Παρακάτω φαίνεται στο σχήμα η καμπύλη συνολικής διασποράς μονορρυθμικής ίνας και επιμέρους συνιστωσών της (χωρίς διασπορά τρόπων πόλωσης).



D_M : Διασπορά υλικού

D_W : Διασπορά κυματοδηγού

D : Συνολική διασπορά

λ_{20} : Μήκος κύματος μηδενικής διασποράς

Εικόνα 3.13. Καμπύλη συνολικής διασποράς.

Διασπορά Πόλωσης του ρυθμού μετάδοσης: Η μονότροπη διάδοση δεν είναι ποτέ στην πραγματικότητα μονότροπη, υπάρχουν πάντα δυο ρυθμοί διάδοσης. 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 διαφορετική πόλωση.

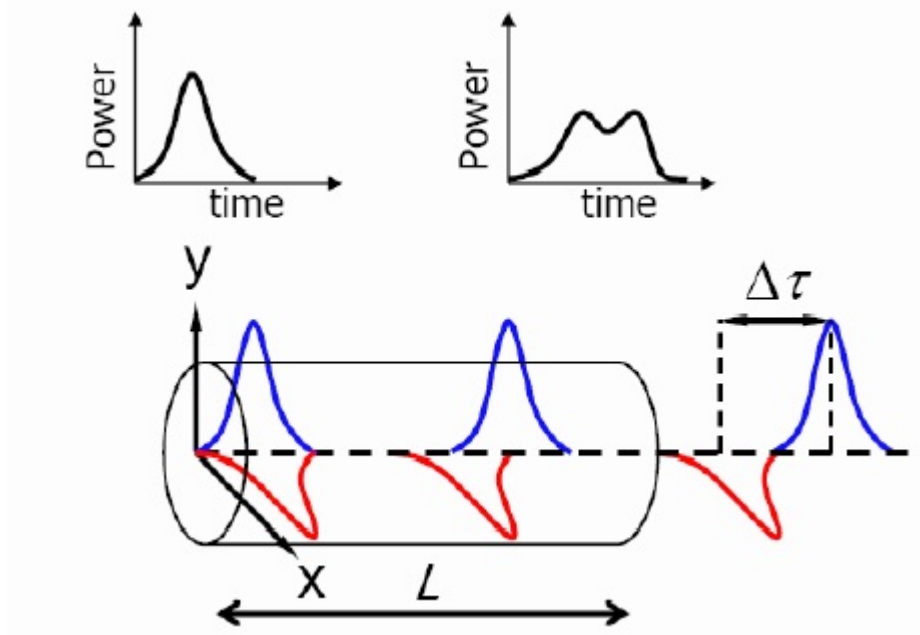
Η διαφορά μεταξύ των χρόνων άφιξης στο τέρμα της ίνας των δυο αυτών ρυθμών διαφορετικής πόλωσης, ονομάζεται διασπορά πόλωσης του ρυθμού μετάδοσης ή PMD και είναι της τάξης των psec. Μετρώντας για ένα χιλιόμετρο ο παράγοντας PMD μιας ίνας έχει μονάδα ps / $\sqrt{\text{km}}$, αυτό συμβαίνει λόγω του mode coupling.

Οι δύο πολωτικές συνιστώσες ταξιδεύουν με διαφορετικές ταχύτητες. Το φαινόμενο ονομάζεται διπλοθλαστικότητα. Ως συνέπεια έχουμε χρονική διαπλάτυνση και παραμόρφωση των παλμών με στοχαστικό τρόπο.

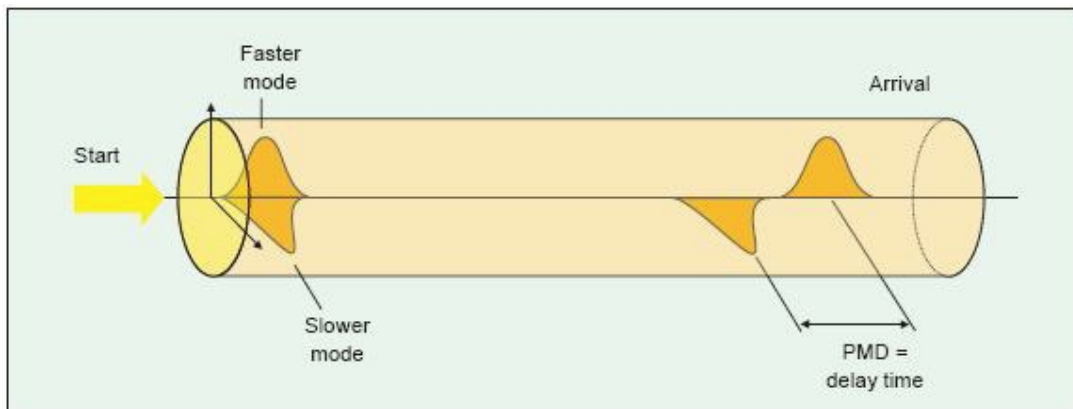
Αν η οπτική ίνα ήταν αμιγώς κυλινδρική οι δύο συνιστώσες πόλωσης θα ταξίδευαν με την ίδια ταχύτητα. Στην πράξη οι εγκατεστημένες οπτικές ίνες δεν είναι απόλυτα κυλινδρικές με αποτέλεσμα την εμφάνιση του φαινομένου.



Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η διαφορική καθυστέρηση της ομάδας, όπου ορίζεται ως η χρονική καθυστέρηση των δύο αξόνων της πόλωσης λόγω της PMD^{[2][4][8]}.



Εικόνα 3.14. Διασπορά Πόλωσης.



Εικόνα 3.15. Διασπορά Πόλωσης μέσα στην οπτική ίνα.



ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

Όταν το φως ταξιδεύει στο κενό, τα μεμονωμένα κύματα από διαφορετικές πηγές δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Ωστόσο, όταν το φως ταξιδεύει μέσα σε ένα υλικό, μπορεί να αλληλεπιδράσει με το υλικό αυτό με διάφορους τρόπους. Αυτή η αλληλεπίδραση μπορεί να προκαλέσει αλλαγές στο κύμα αυτό και αλληλεπιδράσεις μεταξύ διαφορετικών κυμάτων φωτός με το υλικό που ενεργεί ως ενδιάμεσο οι οποίες είναι πολύ μικρές. Ωστόσο, δεδομένου ότι το σήμα ταξιδεύει σε μεγάλες αποστάσεις μέσα στις οπτικές ίνες, υπάρχουν μεγάλες πιθανότητες η επίδρασή του σε αυτό να αυξηθεί λόγω των μη γραμμικών φαινομένων. Σε χαμηλά επίπεδα ισχύος οπτικού σήματος είναι ελάχιστη ή δεν παράγει αποτελέσματα. Όσο η ισχύς αυξάνεται τα αποτελέσματα φαίνονται γίνονται ακόμα πιο αισθητά και μπορεί στη συνέχεια να έχουν αρνητικές επιπτώσεις στα μεταδιδόμενα κύματα.

Αυτά τα αποτελέσματα μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

«Ελαστικές» επιπτώσεις : για τις οποίες αν και το οπτικό κύμα αλληλεπιδρά και επηρεάζεται από την παρουσία της ύλης, δεν υπάρχει ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ των δύο. Τα χαρακτηριστικά παραδείγματα της ελαστικής σκέδασης είναι η **μίξη τεσσάρων κυμάτων** και η **αυτό-διαμόρφωση φάσης (Self phase modulation, SPM)**.

«Ανελαστικές επιπτώσεις» : όταν υπάρχει μεταφορά ενέργειας μεταξύ του οπτικού κύματος και της ύλης. Η **Διεγερόμενη σκέδαση Raman (SRS)** και η **Διεγερόμενη σκέδαση Brillouin (SBC)** είναι δύο παραδείγματα της κατηγορίας αυτής.

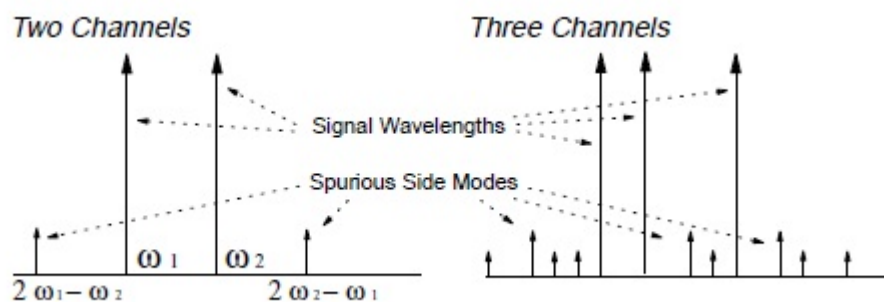
Όσον αφορά τη μετάδοση φωτός σε ίνες, τα μη γραμμικά φαινόμενα είναι σχεδόν πάντα ανεπιθύμητα. Μετά την εξασθένηση και τη διασπορά, αποτελούν τον επόμενο μεγάλο περιορισμό της οπτικής μετάδοσης. Πράγματι, σε ορισμένες περιπτώσεις είναι πιο σημαντική από ότι η εξασθένηση ή η διασπορά. Ωστόσο, πολλές οπτικές συσκευές βασίζονται σε αυτές τις μη γραμμικές επιπτώσεις για τη βασική λειτουργία τους. Πολλή έρευνα γίνεται για την ανάπτυξη ειδικών ινών με αυξημένα επίπεδα μη γραμμικότητας με σκοπό τη δημιουργία πιο αποδοτικών οπτικών συσκευών.

Οι κατηγορίες που αναφέραμε προηγουμένως αναλύονται παρακάτω:



➤ **Μίξη τεσσάρων κυμάτων (Four-Wave Mixing, FWM)**

Ένα από τα πιο σημαντικά μη γραμμικά φαινόμενα είναι η μίξη τεσσάρων κυμάτων. Εμφανίζεται όταν πολλαπλά σήματα μεταδίδονται ταυτόχρονα. Τα σήματα αυτά «αναμειγνύονται» με αποτέλεσμα να παράγουν νέα κανάλια που μπορούν να μειώσουν την ισχύ από τα ήδη υπάρχοντα κανάλια αυξάνοντας τη δική τους με αποτέλεσμα να έχουμε διακαναλική παρεμβολή.

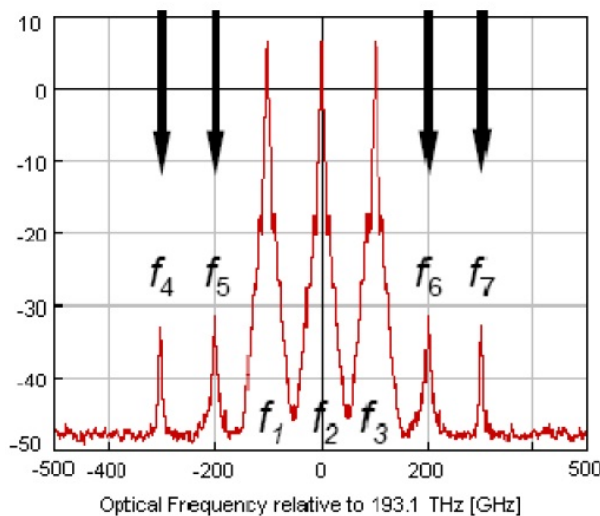


Εικόνα 3.16. Επιδράσεις της Μίξης Τεσσάρων Κυμάτων.

Για παράδειγμα, σε ένα σύστημα με 3 κανάλια σε συχνότητες f_1 , f_2 και f_3 παράγονται σήματα σε συχνότητες:

$$f_n = f_i + f_j - f_k$$

Όπου $f_i, f_j \neq f_k$.



Εικόνα 3.17. Τα παραγόμενα αυτά κανάλια διαδίδονται μαζί με τα αρχικά και αναπτύσσονται «εις βάρος τους».

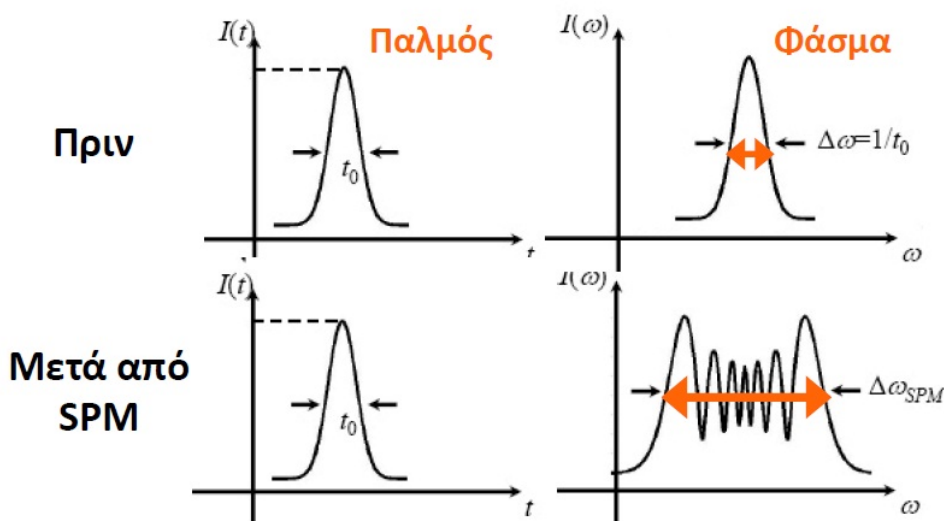


Η διαδικασία μίξης τεσσάρων κυμάτων αποτελεί πολύ σοβαρό ζήτημα για το μήκος κύματος μηδενικής διασποράς, αφού έρχεται σε πλήρη αντίθεση με την προσπάθειά μας να κρατήσουμε τη διασπορά στο ελάχιστο.

➤ Αυτό-διαμόρφωση φάσης (Self phase modulation, SPM)

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 αυτό-διαμόρφωση φάσης είναι ένα αρκετά σύνηθες φαινόμενο στα οπτικά δίκτυα που χρησιμοποιούν μονοτροπικές ίνες. Πέρα από την φασματική διεύρυνση του παλμού η αυτό-διαμόρφωση φάσης μπορεί να προκαλέσει και έντονη παραμόρφωση της μορφής του παλμού. Η επίδραση του φαινομένου της αυτό-διαμόρφωσης γίνεται πιο έντονη καθώς αυξάνεται η ισχύς. Οπότε κρίνεται αναγκαίο κατά την διάδοση ενός παλμού μέσα από την οπτική ίνα τα επίπεδα ισχύος του να μην ξεπερνάνε αυτά στα οποία αρχίζει να εμφανίζεται το φαινόμενο της αυτό-διαμόρφωσης φάσης.

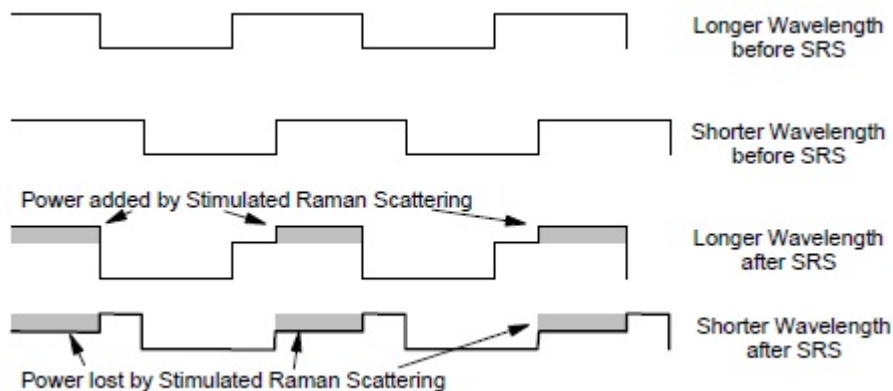


Εικόνα 3.18. Η SPM διευρύνει το φασματικό περιεχόμενο του παλμού δημιουργώντας νέες συχνότητες. Μία συχνότητα αντιστοιχεί σε περισσότερες από μία τιμές της φάσης, και άρα δημιουργούνται «βυθίσματα» στο φάσμα.



➤ **Διεγυρόμενη σκέδαση Raman (SRS)**

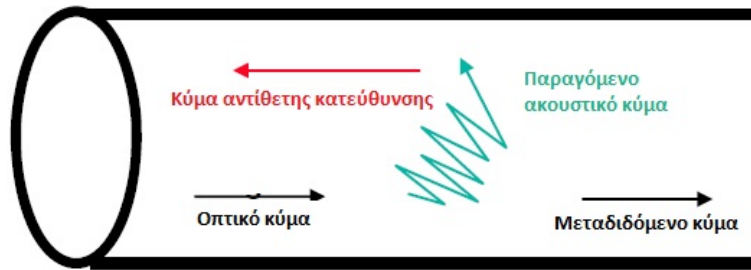
Η διεγυρόμενη σκέδαση Raman είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ του φωτός και των δονήσεων των μορίων της ίνας. Η SRS σκεδάζει φως και προς τα εμπρός και προς τα πίσω. Η μετάδοση ισχύος προς τα πίσω μπορεί να μηδενιστεί χρησιμοποιώντας ένα οπτικό απομονωτή. Η διεγυρόμενη σκέδαση Raman αποτελεί σημαντικότατο πρόβλημα για την μετάδοση μέσω μίας οπτικής ίνας αλλά εμφανίζεται αποκλειστικά όταν η ισχύς εισόδου είναι αρκετά υψηλή. Γι αυτό η διεγυρόμενη 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 επίδρασή της δεν είναι τόσο σημαντική.



Εικόνα 3.19. Διεγυρόμενη Σκέδαση Raman.

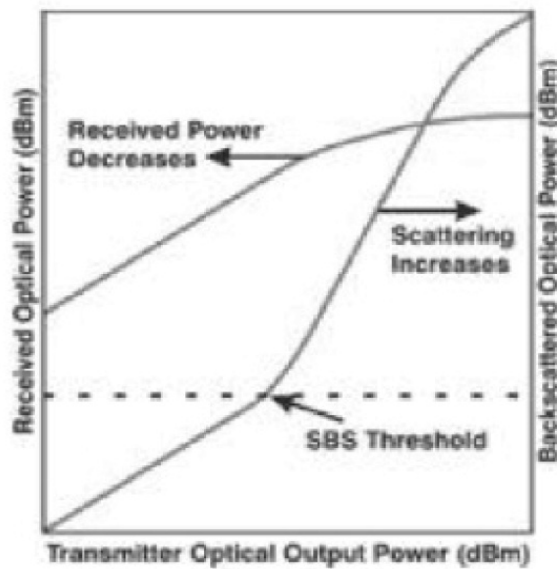
➤ **Διεγυρόμενη σκέδαση Brillouin (SBC)**

Η διεγυρόμενη σκέδαση Brillouin προκύπτει όταν υπάρχουν αλληλεπιδράσεις μεταξύ ενός οπτικού κύματος που ταξιδεύει κατά μήκος μιας ίνας και των ακουστικών κυμάτων. Η αλληλεπίδραση του φωτός με τα παραγόμενα ακουστικά κύματα προκαλεί μεταβολή στο δείκτη διάθλασης της ίνας. Ένα αντίθετα διαδιδόμενο κύμα παράγεται σε συχνότητα μετατοπισμένη από την αρχική και με ενέργεια μικρότερη από την ενέργεια εισόδου.



Εικόνα 3.20. Διεγερόμενη σκέδαση Brillouin (SBC).

Όσο η ισχύς εισόδου αυξάνεται πάνω από το κατώφλι, η ισχύς του αντίθετα σκεδαζόμενου κύματος αυξάνει δραματικά. Αντίθετα η ισχύς του διαδιδόμενου κύματος (και άρα του σήματος που δέχεται ο δέκτης) μειώνεται όπως φαίνεται στο παρακάτω γράφημα. Αυτό συνεπάγεται **υποβάθμιση της απόδοσης του συστήματος**^{[2][6]}.



Εικόνα 3.21. Επίδραση διεγερόμενης σκέδασης Brillouin στην ισχύ του οπτικού σήματος .



Κεφάλαιο 4^ο

LED - LASER

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε για τις πηγές φωτός και τους φωτοανιχνευτές που χρησιμοποιούνται σε οπτικά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Θα παρουσιάσουμε τις δύο κυριότερες οπτικές πηγές, το LED και το LASER, τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά τους καθώς και τους κυριότερους τύπους φωτοανιχνευτών. Θα ασχοληθούμε κυρίως με αυτές τις δύο οπτικές πηγές φωτός γιατί έχουν πέντε βασικά χαρακτηριστικά που μας τραβάνε το ενδιαφέρον. Είναι:

- Μικρό μέγεθος
- Υψηλή ακτινοβολία (π.χ. εκπέμπουν πολύ φως σε μία μικρή περιοχή)
- Μικρή περιοχή εκπομπής (η περιοχή είναι συγκρίσιμη με τις διαστάσεις του πυρήνα της ίνας)
- Μεγάλη διάρκεια ζωής (αξιοπιστία)
- Δυνατότητα διαμόρφωσης με υψηλές ταχύτητες

Θα γίνει λεπτομερή αναφορά για τις παραμέτρους τους και τους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοσή τους.



ΟΠΤΙΚΟΣ ΠΟΜΠΟΣ

Από τη στιγμή που ο πομπός έχει μετατρέψει το εισερχόμενο ηλεκτρικό σήμα σε οποιαδήποτε μορφή διαμορφωμένου φωτός επιθυμεί, το φως πρέπει να διοχετευτεί στην οπτική ίνα. Εκεί είναι που παίρνουν θέση τα LED και τα LASER ώστε να επιτευχθεί το αποτέλεσμα αυτό. Ας αναλύσουμε όμως πως παράγεται η φωτεινή δέσμη που διαδίδεται μέσα στην οπτική ίνα για να έχουμε μια ολοκληρωμένη ιδέα για του τι ακριβώς συμβαίνει.

Οπτικές Μεταπτώσεις

Αρχικά ας το δούμε λίγο γενικά και στη συνέχεια θα προχωρήσουμε σε πιο λεπτομερή ανάλυση της διαδικασίας παραγωγής φωτός.

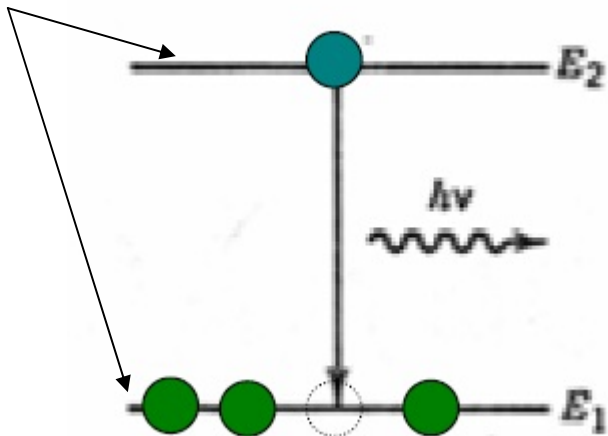
Υπάρχει ένας μονάχα τρόπος να παραχθεί το φως και αυτός είναι από την απότομη ενεργειακή μετάπτωση του ηλεκτρονίου που βρίσκεται σε μία υψηλότερη ενεργειακή στάθμη σε μία χαμηλότερη. Όταν συμβαίνει αυτό το φαινόμενο η ενέργεια πρέπει να «πάει» κάπου και έτσι εκπέμπεται με τη μορφή του φωτός. Αυτή η εκπομπή φωτός (υπό τη μορφή φωτονίου) μπορεί να γίνει είτε *αυθόρμητα* είτε *εξαναγκασμένα* υπό την παρουσία κάποιου άλλου φωτονίου που βρίσκεται στην σωστή ενεργειακή στάθμη.

- *Αυθόρμητη εκπομπή Φωτονίων:* Είναι η συνηθισμένη περίπτωση εκπομπής φωτονίων. Όταν ένα ηλεκτρόνιο «μεταβιβάζεται» σε μία υψηλότερη ενεργειακή στάθμη, αυτή η στάθμη είναι συνήθως ασταθής με αποτέλεσμα αυθόρμητα το ηλεκτρόνιο να επιστρέφει σε μία πιο σταθερή ενεργειακή στάθμη με υψηλή ταχύτητα εκπέμποντας με αυτόν τον τρόπο το φωτόνιο. Η αυθόρμητη αυτή εκπομπή φωτός έχει τυχαία κατεύθυνση και φάση αλλά το μήκος κύματος του φωτονίου εξαρτάται από την ποσότητα ενέργειας που θα εκπέμψει το ηλεκτρόνιο κατά τη μετάπτωση του. Κατ' αυτόν τον τρόπο λειτουργούν και τα LED τα οποία θα αναλύσουμε παρακάτω.
- *Εξαναγκασμένη εκπομπή Φωτονίων:* Αυτή η περίπτωση ισχύει για τα LASER. Κάποιες φορές όταν το ηλεκτρόνιο «μεταβιβάζεται» σε μία υψηλή ενεργειακή στάθμη υπάρχει περίπτωση να παραμείνει εκεί για ένα μικρό χρονικό διάστημα (της τάξης των microseconds) μέχρι να μεταπηδήσει σε άλλη στάθμη αυθόρμητα. Όταν λοιπόν βρίσκεται σε αυτή τη μετασταθή κατάσταση κάποιο φωτόνιο μπορεί να «εξαναγκάσει» την εκπομπή της ενέργειάς του υπό την μορφή άλλου φωτονίου.

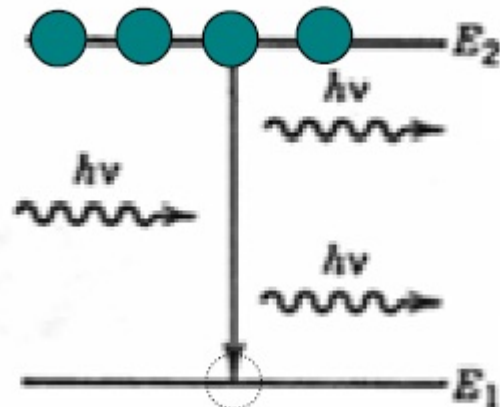


Σε αυτήν την περίπτωση το εκπεμπόμενο φωτόνιο έχει την ίδια κατεύθυνση, φάση και μήκος κύματος με το φωτόνιο που εξανάγκασε την εκπομπή του.

Ενεργειακές στάθμες



Εικόνα 4.1. Αυθόρμητη εκπομπή φωτονίου

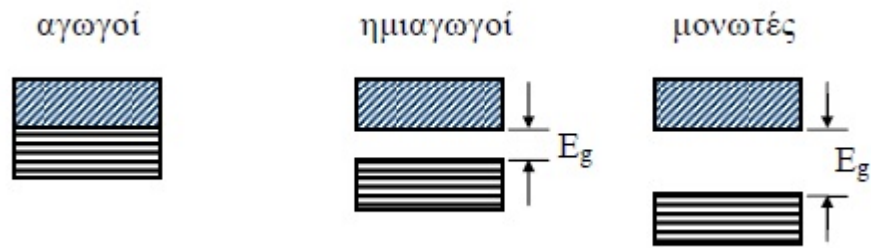


Εξαναγκασμένη εκπομπή φωτονίου

Ημιαγωγοί

Τα ηλεκτρονικά υλικά μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες: τους αγωγούς, τους μονωτές και τους ημιαγωγούς.

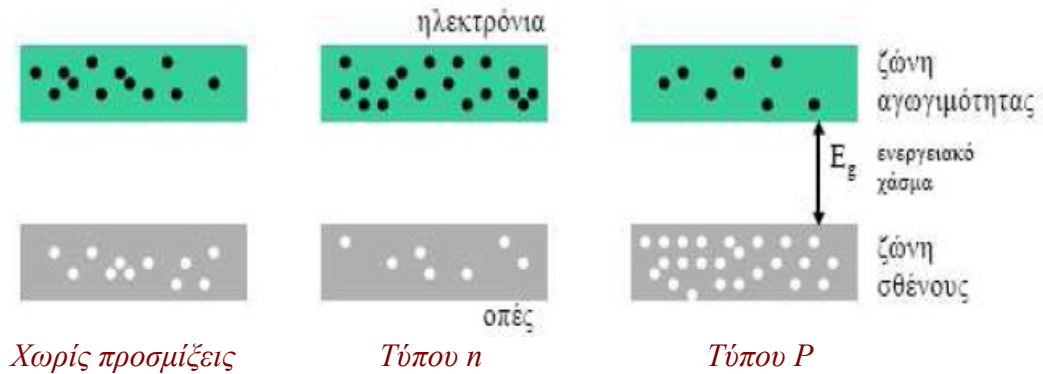
Ημιαγωγοί είναι στερεά σώματα τα οποία από την άποψη της ηλεκτρικής αγωγιμότητάς τους κατατάσσονται μεταξύ των αγωγών (μέταλλα) και των μονωτών. Χαρακτηρίζονται από μικρό αριθμό ελεύθερων ηλεκτρονίων σε αντίθεση με τα μέταλλα που παρουσιάζουν μεγάλο πλήθος ελεύθερων ηλεκτρονίων και τους μονωτές που διαθέτουν ελάχιστα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Επιτρέπουν δηλαδή τη διόδο του ηλεκτρισμού μόνο κάτω από ορισμένες συνθήκες. Από άποψης χρησιμότητας οι ημιαγωγοί έχουν πολύ μεγάλη σημασία, καθώς βρίσκουν μεγάλο πλήθος εφαρμογών.



Εικόνα 4.2. Κατηγορίες στερεών.

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται η σχετική θέση των ζωνών σθένους και αγωγιμότητας για τις τρεις κατηγορίες στερεών. Στους αγωγούς (μηδενικό ενεργειακό χάσμα) είναι εύκολη η μεταπήδηση των από ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Στους μονωτές είναι σχεδόν αδύνατη η μεταπήδηση ενός από τα ηλεκτρόνια σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, λόγω υψηλών τιμών του $E_g \approx 5$ eV (Ενεργειακό χάσμα). Στους αγωγούς όμως, αν τα ηλεκτρόνια σθένους απορροφήσουν ενέργεια με κάποιο τρόπο, είναι δυνατό να ξεπεράσουν το ενεργειακό χάσμα E_g το οποίο δεν έχει πολύ μεγάλες τιμές (≈ 1 eV), να εισέλθουν στη ζώνη αγωγιμότητας και να καταστούν ελεύθερα. Οι κενές θέσεις που αφήνουν στη ζώνη σθένους καλούνται οπές (h^+).

Ένας ημιαγωγός, όπως το πυρίτιο, στην καθαρή κρυσταλλική του μορφή, είναι καλός μονωτής. Ωστόσο, η αγωγιμότητα των ημιαγωγών αυξάνεται με την προσθήκη κατάλληλων προσμείξεων που αυξάνουν τον αριθμό των ηλεκτρονίων ή των οπών του ημιαγωγού (απουσία ηλεκτρονίων). Όταν έστω και ένα άτομο μέσα σε εκατομμύρια αντικατασταθεί από μία πρόσμιξη (φωσφόρο ή αρσενικό) που προσθέτει ένα ηλεκτρόνιο από την κρυσταλλική δομή τότε η αγωγιμότητά τους αυξάνεται θεαματικά. Το ίδιο συμβαίνει αν η πρόσμιξη γίνει με άτομο που αφαιρεί ηλεκτρόνιο (βόριο, αργίλιο ή γάλλιο). Στην πρώτη περίπτωση, προκύπτει ημιαγωγός **τύπου n** (n από negative καθώς έχουμε παραπάνω ηλεκτρόνια άρα και φορείς αρνητικού φορτίου) και στη δεύτερη **τύπου p** (p από positive καθώς έχουμε επιπλέον οπές που δηλώνουν απουσία ηλεκτρονίων άρα ύπαρξη θετικού φορτίου)^[5].



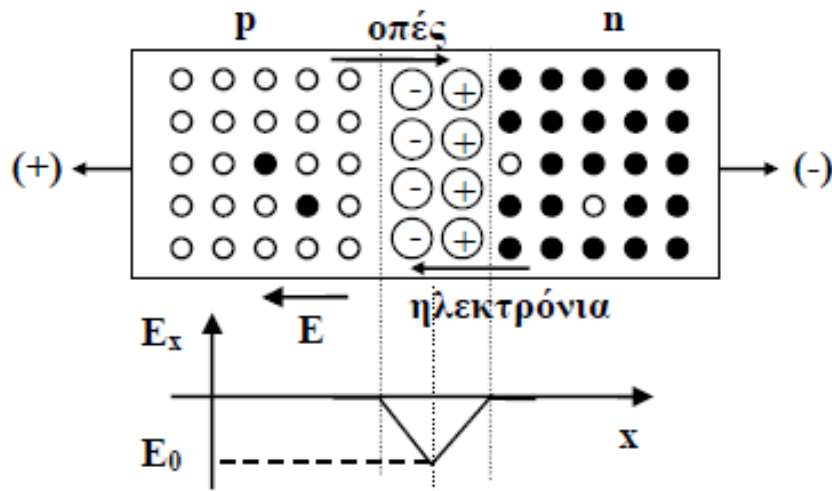
Εικόνα 4.3. Ημιαγωγοί.

Επαφή $p - n$

Η επαφή $p - n$ δημιουργείται από την ένωση ενός ημιαγωγού p με ένα ημιαγωγό n . Αμέσως μετά την ένωση των δυο ημιαγωγών τα ηλεκτρόνια που πλεονάζουν στην περιοχή n αρχίζουν να διαχέονται προς την περιοχή p και αντιστρόφως οι οπές να διαχέονται από την περιοχή p προς την περιοχή n . Τα εισερχόμενα ηλεκτρόνια στην περιοχή p εξουδετερώνουν ένα αριθμό οπών με αποτέλεσμα τη δημιουργία αρνητικών ιόντων.

Το αντίστροφο παρατηρείται στην περιοχή n , όπου οι εισερχόμενες, λόγω διάχυσης, οπές εξουδετερώνονται από τα ηλεκτρόνια αυτού του τμήματος. Έτσι τα άτομα εδώ επειδή χάνουν ηλεκτρόνια μετατρέπονται σε θετικά ιόντα. Με αυτό τον τρόπο σε μια στενή περιοχή γύρω από την επαφή δεν υπάρχουν ούτε ελεύθερα ηλεκτρόνια ούτε οπές. Υπό αυτή την έννοια η περιοχή καλείται περιοχή απογύμνωσης. Η ζώνη απογύμνωσης δημιουργεί φραγμό στη μετακίνηση ηλεκτρονίων διαμέσου αυτής. Το ελάχιστο δυναμικό V_0 που πρέπει να επιβληθεί για να υπερπηδηθεί η ζώνη απογύμνωσης από τα ηλεκτρόνια ονομάζεται δυναμικό φραγμού.

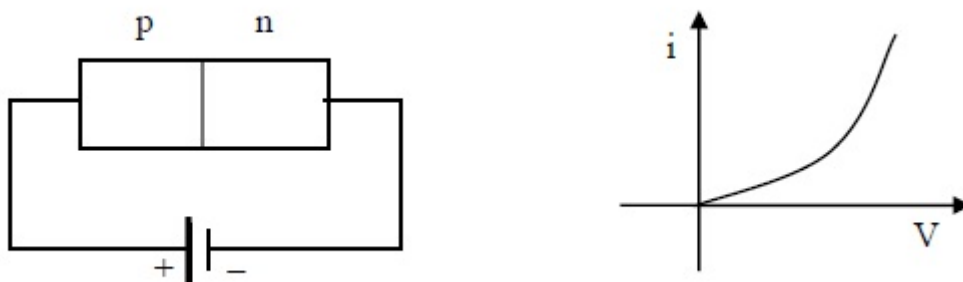
Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται στην περιοχή αυτή κατευθύνεται από την περιοχή n προς την περιοχή p . Όταν η ένταση αυτή αποκτήσει ορισμένη τιμή παύει το φαινόμενο της διάχυσης των ηλεκτρονίων και οπών. Το φαινόμενο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 4.4. Ημιαγωγός τύπου p-n.

Επαφή p-n με ορθή πόλωση

Αν τα άκρα της επαφής συνδεθούν με πηγή συνεχούς ρεύματος, ώστε ο θετικός πόλος της να συνδεθεί με το τμήμα p και ο αρνητικός πόλος της με το τμήμα n, τότε θεωρούμε ότι η επαφή είναι πολωμένη ορθά. Με τον τρόπο αυτό τα ελεύθερα ηλεκτρόνια κινούνται εύκολα από το n στο p και οι οπές, επίσης εύκολα, από το p προς το n. Έτσι δημιουργείται ένα ρεύμα το οποίο αυξάνει όσο αυξάνει η εφαρμοζόμενη στην επαφή τάση όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 4.5. Ορθά πολωμένη επαφή p-n.

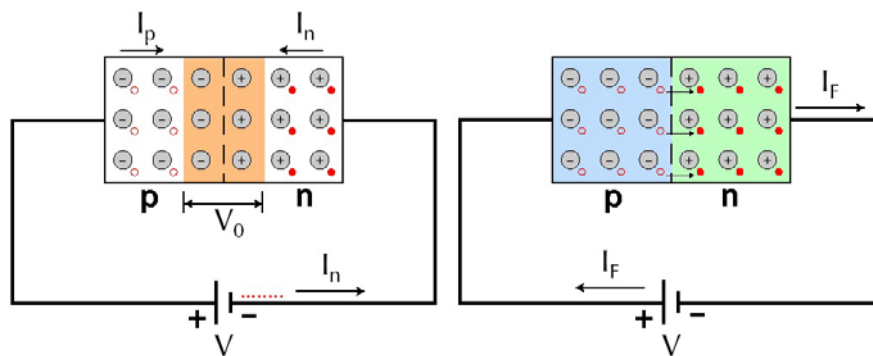
Σημειώνεται κίνηση των φορέων (οπές και ηλεκτρόνια) σε κάθε τμήμα της διόδου προς την επαφή p-n. Με αύξηση της εξωτερικής τάσης, το μήκος της ζώνης απογύμνωσης βαθμιαία μειώνεται μέχρις ότου μηδενιστεί, οπότε ξεκινά ροή ρεύματος στο κύκλωμα προς μία κατεύθυνση.



Κατευθείαν ρεύμα ή *ρεύμα ορθής φοράς* ή *ρεύμα διάχυσης* (I_F): Είναι το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα και σημειώνεται με φορά αντίθετη προς τη φορά κίνησης των ηλεκτρονίων.

Ανάστροφο ρεύμα κόρου (I_0): είναι το ρεύμα που οφείλεται σε θερμική διέγερση του ημιαγωγού και λαμβάνει πολύ χαμηλή τιμή (μερικά μA).

Ρεύμα εξωτερικού κυκλώματος (I_D): $I_D = I_F - I_0$.



Εικόνα 4.6. Ορθή πόλωση διόδου p-n

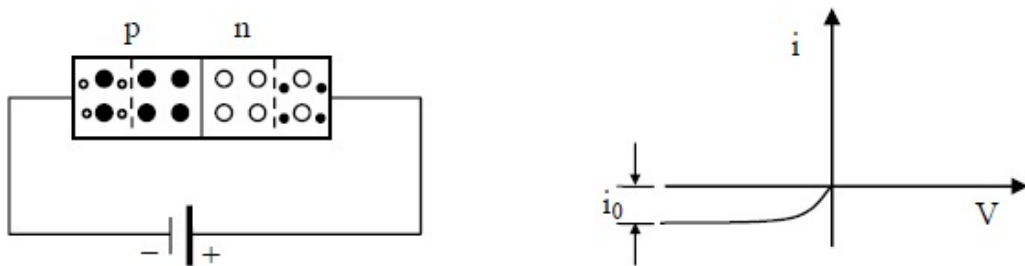
Επαφή p-n με ανάστροφη πόλωση

Ένα πρόβλημα που προκύπτει από την ομοιογενή επαφή p-n (ορθή πόλωση) είναι στην επανασύνδεση ηλεκτρονίου – οπής. Εμφανίζεται σε μία σχετικά μεγάλη περιοχή, η οποία ορίζεται από το μήκος διάχυσης των ηλεκτρονίων και των οπών με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη δυσκολία στη επίτευξη μεγάλης πυκνότητας τους. Λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η ετερογενή επαφή p-n (ανάστροφη πόλωση) όπου εκεί παρεμβάλλεται ένα λεπτό στρώμα με μικρότερο ενεργειακό χάσμα ανάμεσα στους ημιαγωγούς p και n.

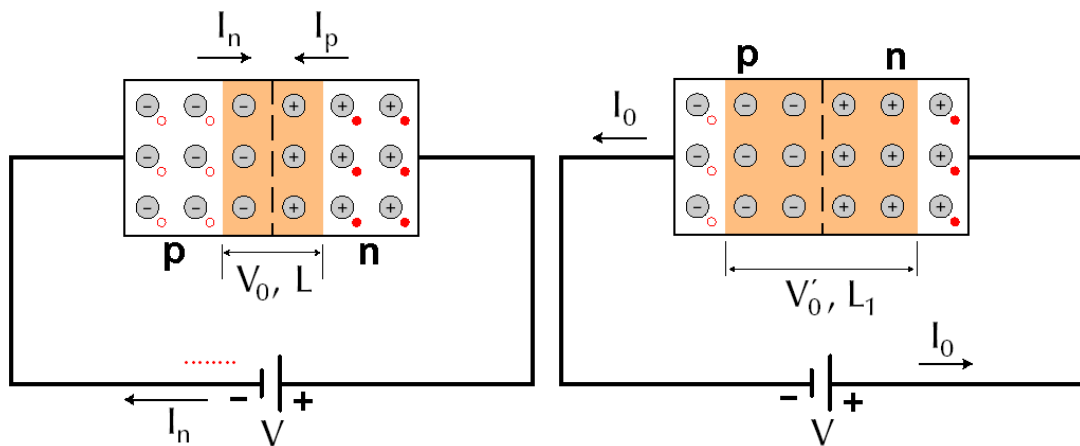
Στην προκειμένη περίπτωση ο αρνητικός πόλος της πηγής συνδέεται με το τμήμα p και ο θετικός με το τμήμα n. Έτσι οι οπές του τμήματος p έλκονται από τον αρνητικό πόλο της πηγής ενώ τα ηλεκτρόνια του τμήματος n από το θετικό πόλο με συνέπεια την αύξηση του εύρους της περιοχής απογύμνωσης.



Η διάχυση των οπών από το τμήμα p προς το n και η διάχυση των ηλεκτρονίων προς την αντίθετη κατεύθυνση τώρα εμποδίζεται. Ένας μικρός μόνο αριθμός φορέων μειονότητας κινείται (οπές από το n στο p και ηλεκτρόνια από το p στο n) σε αντίθετες κατευθύνσεις, γεγονός που συμβαίνει λόγω του μικρού αριθμού θερμικών διασπάσεων στο κρυσταλλικό πλέγμα. Αυτό δικαιολογεί τη μικρή τιμή του ρεύματος κόρου I_0 (βλέπε παρακάτω)^{[4][6][23]}.



Εικόνα 4.7. Ανάστροφα πολωμένη επαφή p-n.



Εικόνα 4.8. Ανάστροφη πόλωση.



ΔΙΟΔΟΣ ΦΩΤΟΕΚΠΟΜΠΗΣ LED

Ένα από τα δύο πιο σημαντικά εξαρτήματα που χρησιμοποιούμε στις οπτικές επικοινωνίες είναι οι φωτοεκπέμπουσες δίοδοι LED (*Light Emitting Diodes*). Τα LED έχουν πολλά κοινά με τα Laser αλλά είναι πολύ πιο απλούστερα από αυτά. Έτσι λοιπόν θα ξεκινήσουμε πρώτα περιγράφοντας τα LED.

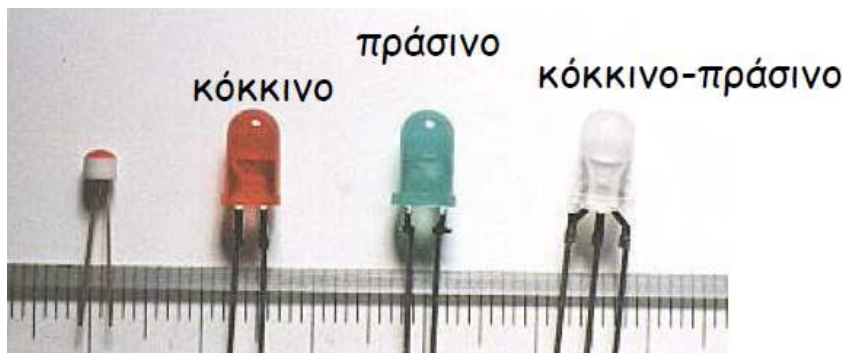
Τι είναι

Μία δίοδος η οποία χρησιμοποιείται ως συσκευή ένδειξης, είναι η δίοδος φωτοεκπομπής (LED). Δίοδος εκπομπής φωτός αποκαλείται ένας ημιαγωγός ο οποίος εκπέμπει φωτεινή ακτινοβολία στενού φάσματος όταν του παρέχεται μία ηλεκτρική τάση κατά τη φορά ορθής πόλωσης.

Τα LED έχουν ένα μη γραμμικό χαρακτήρα. Επιπλέον, δε σχετίζονται άμεσα με τη θερμοκρασία αφού δεν απαιτούν έλεγχο της ενέργειας και της θερμοκρασίας. Ακόμη, είναι πιο αργά και με λιγότερη εκπομπή ενέργειας από τους πομπούς LASER. Το φως που εκπέμπουν είναι ασυνεχές και έχει φάσμα πλάτους της τάξης των 60nm.

Το χρώμα του φωτός που εκπέμπεται εξαρτάται από την χημική σύσταση του ημιαγωγικού υλικού που χρησιμοποιείται, και μπορεί να είναι υπεριώδες, ορατό ή υπέρυθρο.

Μπορεί να κατασκευαστεί από στοιχεία όπως το γάλλιο, το αρσενικό και το φώσφορο και να εκπέμψει κόκκινο, πράσινο, κίτρινο, μπλε, πορτοκαλί και υπέρυθρο φως.



Εικόνα 4.9. LED διαφορετικών χρωμάτων



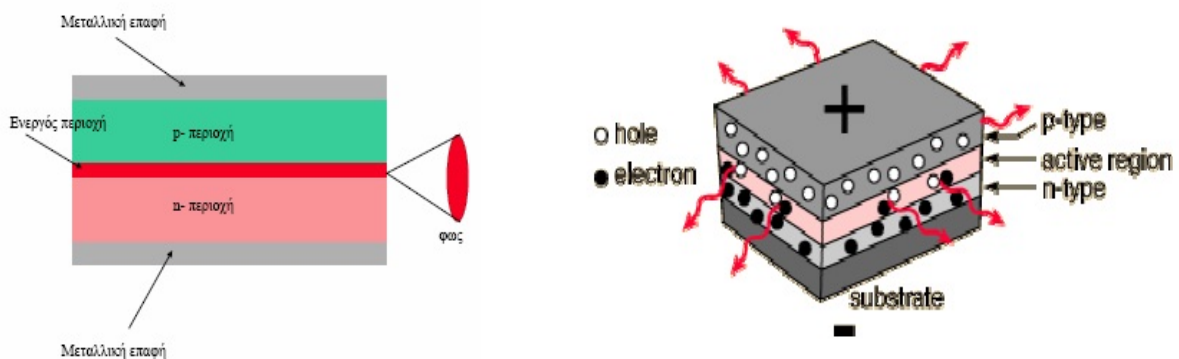
Εικόνα 4.10. Πηγή LED

Η χρήση τους περιορίζεται στις πολύτροπες ίνες με χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης και μικρές αποστάσεις διάδοσης.

Αρχή Λειτουργίας

Τα LED κατασκευάζονται από χωριστά τμήματα ημιαγωγών τύπου p και τύπου n. Μία επαφή p - n δημιουργεί τα φωτόνια, όπως αναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, και διάφορες επαφές p - p και n - n κατευθύνουν το φως, παρέχοντας φραγμούς ενέργειας και αλλαγές στο δείκτη διάθλασης.

Το βασικό LED είναι μία επαφή p - n η οποία πολώνεται ορθά για να εγχεί ηλεκτρόνια και οπές μέσα στις πλευρές p και n αντίστοιχα. Με άλλα λόγια όταν διαρρέεται από ρεύμα εκπέμπει αυθόρμητα φως μέσω της επανασύνδεσης ηλεκτρονίων - οπών στην περιοχή αραίωσης.



Εικόνα 4.11. Δομή LED



Κάποια ποσότητα αυτού του φωτός φεύγει από το εξάρτημα, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, και μπορεί να συζευχθεί σε μία οπτική ίνα.

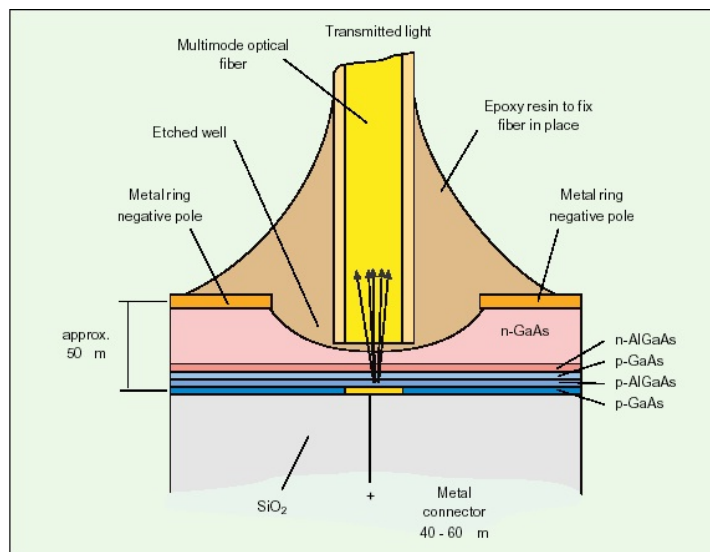
Δομή LED

Ανάλογα με τον τρόπο εκπομπής φωτός του LED χωρίζονται και σε δύο κατηγορίες:

- 1) Εκπομπή επιφάνειας
- 2) Πομπή κορυφής

Εκπομπή επιφάνειας έχουμε αν το LED εκπέμπει φως από μία επιφάνεια παράλληλη προς το επίπεδο της επαφής. Τέτοια LED είναι τύπου *Burrus*. Κατασκευάζονται από στρώματα ημιαγωγικών υλικών που εκπέμπουν φως σε 180° τόξο.

Η περιοχή εκπομπής του εξαρτήματος περιορίζεται σε μια μικρή επιφάνεια. Η ισχύς από το φως που μπορεί να συζευχθεί στην οπτική ίνα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως την απόσταση LED και οπτικής ίνας και το αριθμητικό άνοιγμα (NA) της ίνας.



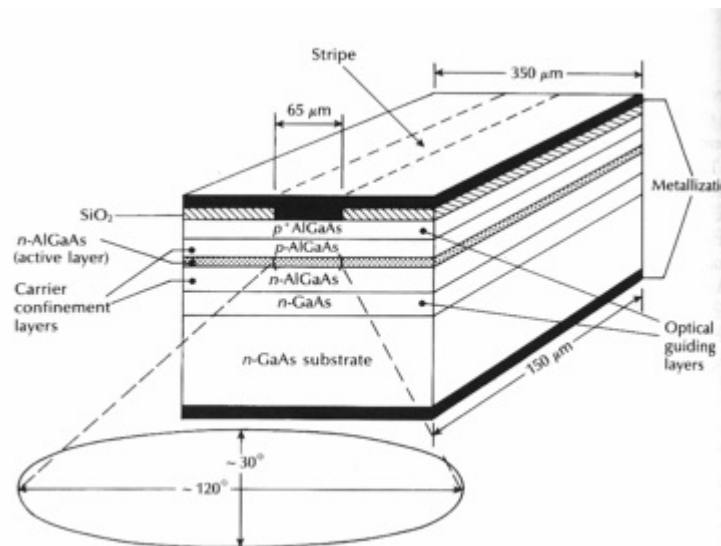
Εικόνα 4.12. LED τύπου Burrus με κατάλληλο σχήμα αύλακος για το περιορισμό της απορρόφησης στο στρώμα τύπου n του GaAs.



Γενικά είναι οι πιο οικονομικοί από τους δύο τύπους LED αλλά η ισχύς εξόδου είναι χαμηλή και γενικά είναι αργές συσκευές.

Οι πομποί κορυφής είναι σχεδιασμένοι κατά τέτοιο τρόπο ώστε να περιορίζουν το φως μέσα σε ένα στενό αυλάκι κατευθυνόμενο στην έξω πλευρά του πομπού. Αυτό το σχέδιο χρησιμοποιείται και για τα LASER ημιαγωγών στα οποία θα αναφερθούμε και παρακάτω.

Το αυλάκι αυτό είναι συγκρίσιμο με το μέγεθος του πυρήνα μιας ίνας και αυτό το κάνει πολύ ωφέλιμο γιατί αυτή η εστίαση του φωτός σημαίνει περισσότερη εκπεμπόμενη ισχύς φωτός.



Εικόνα 4.13. Ο λοβός εκπομπής είναι μια έλλειψη με οριζόντιο άνοιγμα 115-125 μοίρες και κάθετο άνοιγμα 25-35 μοίρες.

Οι πομποί κορυφής εξασφαλίζουν υψηλές στάθμες οπτικής ισχύος και είναι γρηγορότερες συσκευές από ότι τα LED επιφανειακής εκπομπής.

Η διαφορά των δύο τύπων LED οφείλεται στην κυματοδήγηση στο επίπεδο κάθετα της ένωσης. Με τη χρήση διάφανων κυματοδηγών πετυχαίνεται μεγαλύτερη απόδοση οπτικής ισχύος στους πομπούς κορυφής από ότι στους εκπομπούς επιφάνειας.



Σύνδεση LED σε κύκλωμα

Θα αναφερθούμε περιληπτικά για τον τρόπο σύνδεσης των διόδων LED σε κύκλωμα.



Εικόνα 4.14. Στην εικόνα έχουμε μια πραγματική απεικόνιση κοινού led και κυκλωματικού συμβόλου μιας διόδου εκπομπής φωτός led αντίστοιχα.

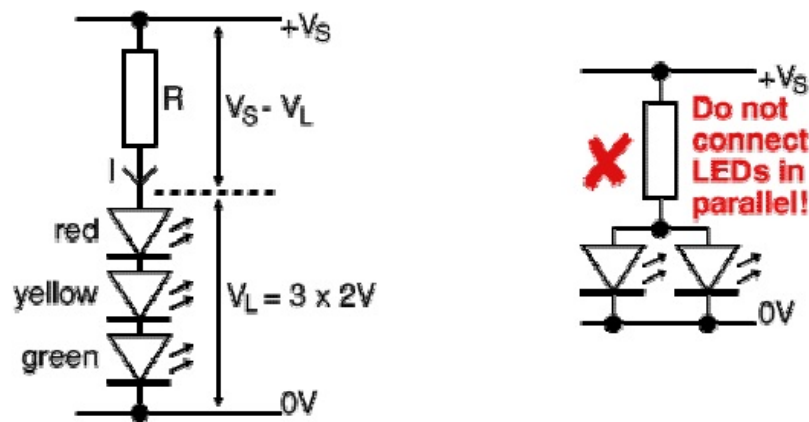
Τα καλώδια που επεκτείνονται κάτω από το LED, δείχνουν πώς πρέπει να συνδεθούν με ένα κύκλωμα. Η αρνητική πλευρά τους είναι υποδειγμένη με δύο τρόπους:

- από την επίπεδη πλευρά του καλύμματος
- από το μικρότερο καλώδιο που επεκτείνεται από το LED

Το αρνητικό του LED πρέπει να συνδεθεί με το αρνητικό άκρο της μπαταρίας. Λειτουργούν σχετικά σε χαμηλές τάσεις 1 - 4 Volt και σε ρεύματα 10 – 40 mA. Τάσεις και ρεύματα μεγαλύτερα από αυτές τις τιμές μπορούν να καταστρέψουν το LED.

Δεν πρέπει να συνδέεται μία διόδος LED απευθείας με μία μπαταρία ή μία παροχή ηλεκτρικού ρεύματος γιατί θα καταστραφεί σχεδόν αμέσως εξαιτίας της μεγάλης ποσότητας ρεύματος που θα περάσει μέσα από αυτήν. Πρέπει να έχουν μία αντίσταση σε σειρά ώστε να περιορίσουν το ρεύμα σε μία ασφαλή τιμή.

Επιπλέον, αν χρειαζόμαστε ταυτόχρονα να συνδέσουμε πολλά LED, επιλέγουμε τη σύνδεση σε σειρά και όχι παράλληλα, όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 4.15. Ορθή σύνδεση LED

Χαρακτηριστικά διόδων LED

Τα παρακάτω χαρακτηριστικά είναι αυτά τα οποία διακρίνουν τα LED από άλλους οπτικούς πομπούς:

- Η αντοχή τους σε ακραίες περιοχές θερμοκρασίας (-55°C έως +125°C) είναι ένας λόγος προτίμησης αντί άλλων πηγών φωτός. Παρόλο αυτά η αυξομείωση της θερμοκρασίας επηρεάζει την οπτική ισχύ εξόδου. Μικρότερου μήκους κύματος LED παρουσιάζουν μεγαλύτερη δυσκολία στο να μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία. Η οπτική ισχύς με τη θερμοκρασία είναι δύο στοιχεία αντιστρόφως ανάλογα μεταξύ τους. Όσο αυξάνει η θερμοκρασία μειώνεται η οπτική ισχύς.
- Έχουν χαμηλό κόστος σε σύγκριση με τα LASER που έχουν πολλά κοινά στον τρόπο κατασκευής τους. Η σύνδεση με μονότροπη ίνα κοστίζει πιο ακριβιά από ότι η σύνδεση με πολύτροπη ίνα και μιας και το LASER χρησιμοποιείται περισσότερο για σύνδεση με μονότροπη ίνα καταλήγουμε στο γεγονός ότι η σύνδεση των LED με πολύτροπη ίνα είναι πιο φθηνή.
- Ακόμη ένα χαρακτηριστικό των LED είναι η μειωμένη οπτική ισχύς τους σε αντίθεση με τα LASER.

Παρακάτω θα αναφερθούμε και στα LASER και θα κάνουμε συγκρίσεις μεταξύ τους.



Εφαρμογές των διόδων LED

- Εφαρμογές οπτικού σήματος, όπου το φως πηγαίνει περισσότερο ή λιγότερο άμεσα από τα LED στο ανθρώπινο μάτι ώστε να μεταφέρει ένα μήνυμα.
- Στο φωτισμό, όπου το φως των LED αντανακλάται στα αντικείμενα για να δώσει μια ενδιαφέρουσα διαφορετική οπτική τους.
- Φώτα βλάστησης με λυχνίες LED για την αύξηση της φωτοσύνθεσης των φυτών.
- Σε τηλεχειριστήρια, όπως για τηλεοράσεις και βίντεο, συχνά χρησιμοποιούν υπέρυθρα LED.
- Αισθητήρες κίνησης, για παράδειγμα στο οπτικό ποντίκι του υπολογιστή του Nintendo Wii χρησιμοποιούνται υπέρυθρα LED.
- Ως αισθητήρες φωτός.
- Σε οπτικές ίνες και Free Space Optics επικοινωνίες.
- Σε οξύμετρα παλμού για τη μέτρηση κορεσμού οξυγόνου.
- Σε φωτοθεραπεία με LED για την ακμή. Χρησιμοποιώντας μπλε ή κόκκινα LED έχει αποδειχθεί ότι μειώνεται σημαντικά η ακμή μετά από τρίμηνη θεραπεία.
- Μερικοί σαρωτές χρησιμοποιούν συστοιχίες των RGB LED και όχι τον τυπικό cold-cathode φθοριούχο λαμπτήρα ως πηγή φωτός. Έχοντας ανεξάρτητο έλεγχο τριών φωτιζόμενων χρωμάτων επιτρέπει στον σαρωτή να αυτοβαθμονομήσει πιο ακριβή ισορροπία χρώματος, και δεν υπάρχει ανάγκη για προθέρμανση. Επιπλέον, οι αισθητήρες που χρειάζεται είναι μονοχρωματικοί, δεδομένου ότι σε οποιοδήποτε χρονικό σημείο η σελίδα που σαρώνεται φωτίζεται από ένα μόνο χρώμα.
- Αποστείρωση του νερού και άλλων ουσιών με χρήση υπεριώδους φωτός.
- Αισθητήρες αφής: Καθώς τα LED μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως φωτοδιόδοι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για την εκπομπή όσο και την ανίχνευση φωτογραφίας. Αυτό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για παράδειγμα, σε μια φωτοευαίσθητη οθόνη που καταγράφει το ανακλώμενο φως από ένα δάκτυλο ή μια γραφίδα.
- Οι οπτικό-μονωτές χρησιμοποιούν ένα LED σε συνδυασμό με μια φωτοδίοδο ή φωτοτρανζίστορ για να παρέχουν μια διαδρομή σήματος με ηλεκτρική μόνωση ανάμεσα σε δύο κυκλώματα. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε ιατρικό εξοπλισμό, όπου τα σήματα από ένα χαμηλής τάσης κύκλωμα (συνήθως με μπαταρίες) ερχόμενα σε επαφή με ένα ζωντανό οργανισμό πρέπει να είναι ηλεκτρικά μονωμένα από τυχόν ηλεκτρική βλάβη της συσκευής καταγραφής ή παρακολούθησης λειτουργίας σε δυνητικά επικίνδυνες τάσεις. Ένας οπτικο-μονωτής επιτρέπει επίσης να μεταφερθούν πληροφορίες μεταξύ κυκλωμάτων που δεν μοιράζονται ένα κοινό ουδέτερο δυναμικό^{[1][3][21][23]}.



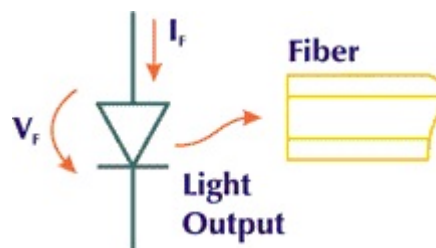
ΔΙΟΔΟΙ LASER

Τι είναι

Προηγουμένως αναφερθήκαμε στους διόδους φωτοεκπομπής LED και τώρα σειρά έχει ο αμέσως επόμενος χρησιμότερος οπτικός πομπός που χρησιμοποιούμε στις οπτικές επικοινωνίες, τα LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) τα οποία έχουν γίνει ευρέως γνωστά από τις εφαρμογές τους.

Όπως ο φακός, μια ηλεκτρική λάμπα ή ο ήλιος έτσι και το LASER είναι μια πηγή φωτός. Παράγει ακτινοβολία σε μία περιοχή συχνοτήτων από το υπέρυθρο μέχρι και το υψηλό υπεριώδες.

Το εξάρτημα αυτό μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα σε ένα αντίστοιχο φωτεινό σήμα το οποίο μπορεί να περάσει μέσα από μία ίνα. Ο εκπομπός φωτός είναι ένα σημαντικό στοιχείο διότι είναι συχνά το πιο δαπανηρό στοιχείο στο σύστημα και τα χαρακτηριστικά του επηρεάζουν τα τελικά όρια της επίδοσης ενός συνδέσμου.



Εικόνα 4.16. Μετατροπή ρεύματος σε φως από δίοδο LASER.

Η διαδικασία μετατροπής είναι πολύ αποδοτική κατά του ότι παράγει πολύ μικρό ποσό θερμότητας σε σχέση με το φως. Ορισμένες ιδιότητες των LASER είναι που τα ξεχωρίζουν από άλλες πηγές φωτός και που δημιουργούν τις απαραίτητες προϋποθέσεις για τις πολλές και ποικίλες εφαρμογές τους. Αυτές είναι:

- Έχουν υψηλή ακτινοβολία (εκπέμπουν πολύ φως σε μικρή περιοχή).



- Φασματική Καθαρότητα ή μονοχρωματικότητα: (τα φωτόνια της δέσμης έχουν όλα την ίδια συχνότητα).
- Συμφωνία φάσης (τα φωτόνια της δέσμης έχουν όλα την ίδια φάση).
- Κατευθυντικότητα (η δέσμη φωτός αποκλίνει πολύ λίγο).
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, προσφέροντας έτσι υψηλή αξιοπιστία.
- Μπορούν να διαμορφωθούν σε υψηλές ταχύτητες.

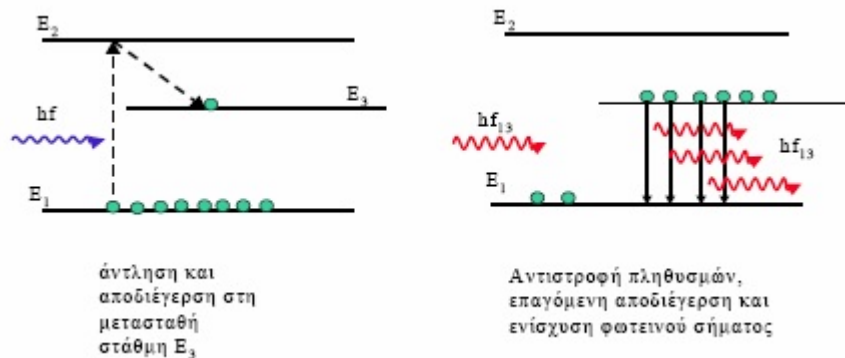
Αρχή Λειτουργίας

Ας εξηγήσουμε την αρχή λειτουργίας των διόδων LASER.

Το φωτόνιο που εκπέμπεται με εξαναγκασμένη εκπομπή, μαζί με το προσπίπτον, μπορούν να υποκινήσουν αποδιέγερση δύο ακόμα διεγερμένων ατόμων, αν υπάρχουν στην περιοχή, αποδίδοντας δύο νέα φωτόνια κοκ., με αποτέλεσμα μια «αλυσιδωτή αντίδραση», όπου το τελικό προϊόν είναι μια δέσμη φωτονίων ίδιας ενέργειας, κατεύθυνσης και φάσης. Η δέσμη αυτή αποτελεί την ακτινοβολία Laser και η διεργασία παραγωγής της λέγεται διεργασία Laser.

Από τα πιο πάνω γίνεται φανερό ότι αν ένα φωτόνιο ενέργειας E_2-E_1 (E_2 : Διεγερμένη κατάσταση, E_1 : Θεμελιώδη) προσκρούσει σε ένα άτομο τότε, αν το τελευταίο είναι σε διεγερμένη κατάσταση θα διεγερθεί προσφέροντας ένα επιπλέον φωτόνιο στο σύστημα, ενώ αν είναι στη θεμελιώδη κατάσταση θα διεγερθεί μέσω της απορρόφησης ενός φωτονίου από το σύστημα. Οι δύο αυτές διεργασίες είναι ισοπίθανες.

Άρα σε ένα σύστημα με λιγότερα από τα μισά άτομα σε διεγερμένη κατάσταση θα έχουμε περισσότερο απορρόφηση παρά εκπομπή φωτονίων και άρα μη δυνατότητα δημιουργίας ακτινοβολίας Laser. Αντίθετα, αν το μεγαλύτερο ποσοστό των ατόμων είναι σε διεγερμένη κατάσταση θα έχουμε κυρίως εξαναγκασμένη εκπομπή και άρα δυνατότητα δημιουργίας ακτινοβολίας Laser. Η κατάσταση στην οποία το μεγαλύτερο ποσοστό των ατόμων ενός συστήματος βρίσκεται σε διεγερμένη στάθμη λέγεται *αναστροφή πληθυσμού*.

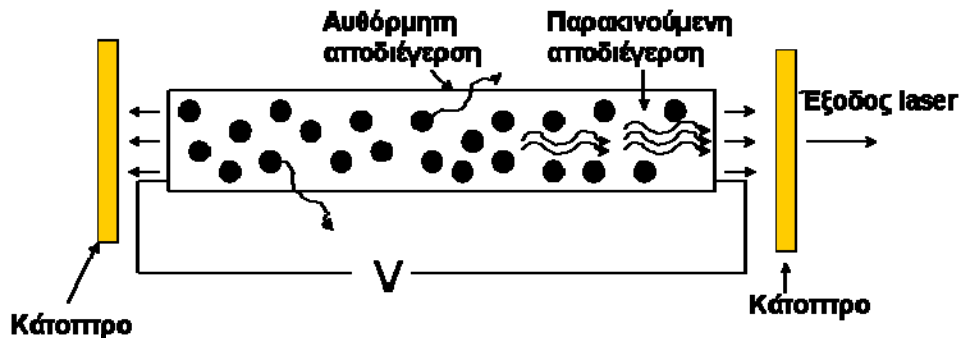


Εικόνα 4.17. Αρχή λειτουργίας και αναστροφή πληθυσμού.

Συγκεκριμένα, για τη δημιουργία ακτινοβολίας Laser θα πρέπει να πληρούνται οι ακόλουθες προϋποθέσεις:

- **Αναστροφή πληθυσμού στο σύστημα:** Αυτό επιτυγχάνεται διεγείροντας τα άτομα είτε με κρούσεις με άλλα άτομα ή ιόντα (ηλεκτρονική άντληση) είτε με απορρόφηση ακτινοβολίας από εξωτερική πηγή (οπτική άντληση).
- Η διεγερμένη κατάσταση του συστήματος πρέπει να είναι **μετασταθής**: Δηλαδή ο χρόνος ζωής της (ο μέσος χρόνος που χρειάζεται για να αποδιεγερθεί αυθόρμητα ένα άτομο που βρίσκεται σε αυτήν) πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος ώστε το άτομο να μην αποδιεγερθεί αυθόρμητα προτού συμβεί η εξαναγκασμένη αποδιέγερσή του.
- **Περιορισμός των εκπεμπόμενων φωτονίων** σε μικρό χώρο, ώστε να αλληλεπιδράσουν με όσο το δυνατόν περισσότερα άτομα του συστήματος και να τα "εξαναγκάσουν" σε εκπομπή φωτονίων. Αυτό γίνεται τοποθετώντας κάτοπτρα στα δύο άκρα του σωλήνα (οπτικής κοιλότητας) που περιέχει το σύστημα (το ένα από τα κάτοπτρα είναι ημιδιαφανές, ώστε να μπορούν να διαφεύγουν από αυτό τα φωτόνια Laser).

Ένα παράδειγμα διάταξης Laser παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Τα άτομα διεγείρονται μέσω κρούσεων με φορτισμένα σωματίδια (τα οποία επιταχύνονται στο δυναμικό V) ενώ το όλο σύστημα είναι περιορισμένο σε γυάλινο σωλήνα (οπτική κοιλότητα) στα άκρα του οποίου υπάρχουν κάτοπτρα που επανακατευθύνουν τα εκπεμπόμενα φωτόνια μέσα στον σωλήνα ώστε να αλληλεπιδράσουν με περισσότερα άτομα, προκαλώντας έτσι ενίσχυση της δέσμης. Τα φωτόνια που εκπέμπονται με αυθόρμητη αποδιέγερση διαφεύγουν από τον σωλήνα.



Εικόνα 4.18. Σχηματική αναπαράσταση διάταξης laser

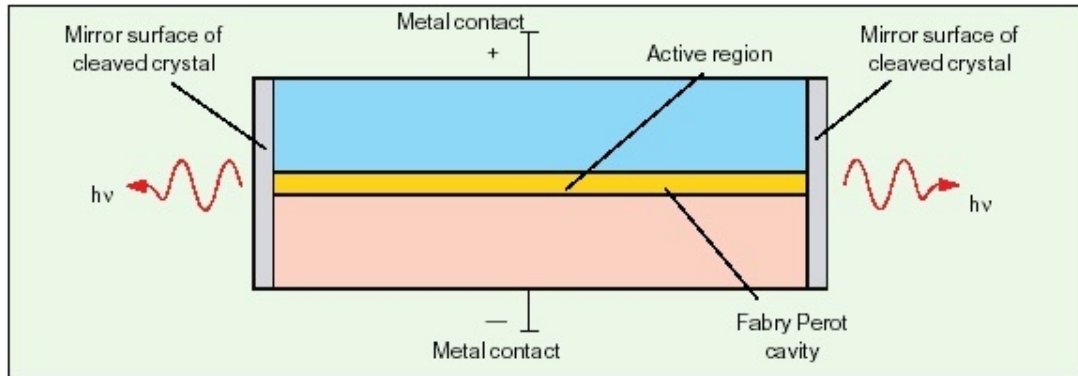
Τύποι διόδου LASER

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι διόδων LASER, το Fabry – Perot (FP) και το laser κατανεμημένης ανάδρασης (DFB). Έχουν αρκετές διαφορές μεταξύ τους, τις οποίες θα παρουσιάσουμε παρακάτω, και θα δούμε και τους λόγους που είναι πιο ευρέως γνωστά.

- **Fabry – Perot (FB)**

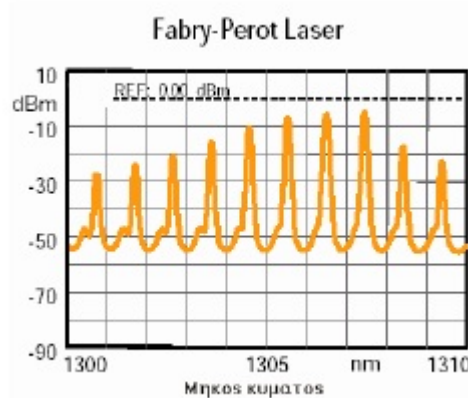
Στην προσπάθεια να βελτιώσουν την απόδοση της οπτικής ισχύς των LASER, κατάφεραν να αναπτύξουν διάφορους τύπους διοδικών LASER. Ο απλούστερος τύπος είναι το «broadstripe Fabry-Perot». Ο χαρακτηρισμός broadstripe προκύπτει από το σχετικά μεγάλο πλάτος ($>10\mu\text{m}$) της μεταλλικής επαφής κατά μήκος του laser (Fabry-Perot είναι το όνομα της οπτικής κοιλότητας).

Ο τρόπος υλοποίησης του είναι με τοποθέτηση ενός ζεύγους κατόπτρων στα άκρα του ενεργού στρώματος της διόδου LASER και το σχηματισμό της κοιλότητας Fabry – Perot. Τα κάτοπτρα τοποθετούνται στην εμπρός και πίσω πλευρά της επαφής με γυάλισμα και προκαλούν πολλαπλές ανακλάσεις των παραγόμενων φωτονίων.



Εικόνα 4.19. LASER Fabry – Perot

Μειονέκτημα αυτής της δομής είναι ότι επιτρέπει την ταυτόχρονη ταλάντωση σε πολλές συχνότητες και έτσι το εκπεμπόμενο φάσμα αποτελείται από πλήθος γραμμών (πολύτροπη λειτουργία), όπως απεικονίζεται και παρακάτω.



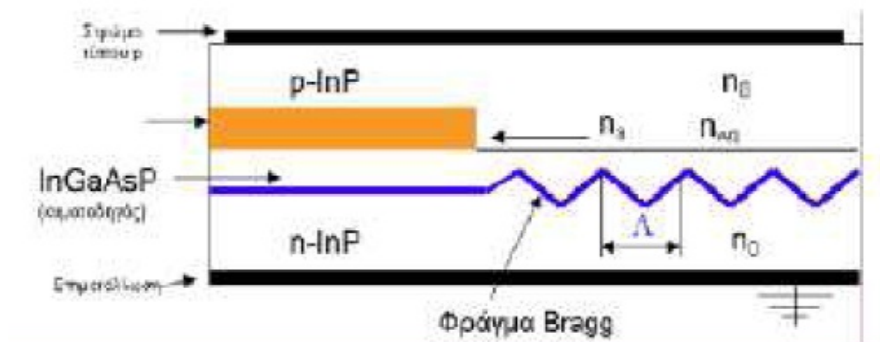
Εικόνα 4.20. Φάσμα εκπομπής LASER Fabry – Perot

Ένα LASER FP δεν είναι αυστηρά μονοχρωματικό και το εύρος γραμμής εκπομπής κυμαίνεται από 3 – 20 nm. Προτάθηκαν πολλοί τρόποι για την επίλυση αυτού του προβλήματος και η επικρατέστερη ήταν η ενσωμάτωση στην γραμμή ενός φράγματος περίθλασης Bragg. Έτσι δημιουργείται επιλεκτική ανατροφοδότηση κατά το διαμήκη άξονα και εξασφαλίζεται μονότροπη λειτουργία, δηλαδή εκπομπή σε μία μόνο φασματικά στενή περιοχή.



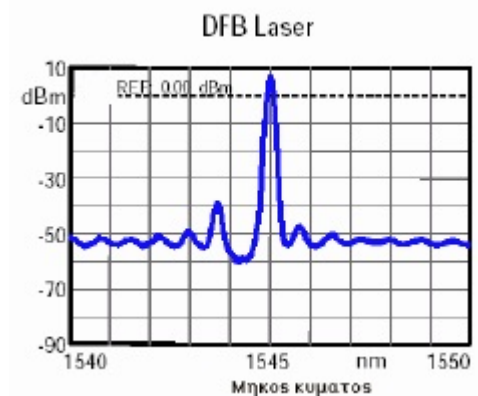
- **LASER κατανομής ανάδρασης (DFB)**

Στα LASER αυτού του τύπου το φράγμα (οπτικό φίλτρο) ενσωματώνεται στη δομή, συνήθως πάνω και κατά μήκος της ενεργού περιοχής (Κατανομημένη ανατροφοδότηση – *Distributed Feed Back*). Η περίοδος του φράγματος είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται η ενισχυτική συμβολή της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας στο επιθυμητό μήκος κύματος.



Εικόνα 4.21. Δομή LASER DFB

Το εύρος γραμμής στα LASER DFB κυμαίνεται από 0,08 – 0,8 pm, δηλαδή μία τέτοια πηγή φωτός μπορεί να θεωρηθεί μονοχρωματική.



Εικόνα 4.22. Φάσμα εκπομπής LASER DFB



Τα laser DFB προσφέρουν τα υψηλότερα επίπεδα απόδοσης και την μεγαλύτερη δαπάνη από τους δύο τύπους. Τείνουν να χρησιμοποιούνται σε ψηφιακές εφαρμογές υψηλής ταχύτητας και στις περισσότερες αναλογικές εφαρμογές εξαιτίας της υψηλής ταχύτητας τους, του χαμηλού θορύβου και της καλύτερης γραμμικότητας. Σε αντίθεση με τα laser FP είναι πιο ήσυχες συσκευές και συνήθως γρηγορότερες.

Εφαρμογές των LASER

Οι τέσσερις ιδιότητες της ακτινοβολίας Laser την καθιστούν μοναδική σε μια πληθώρα εφαρμογών, καθώς δίνουν τη δυνατότητα ελεγχόμενης συμβολής (λόγω της καθορισμένης φάσης) και μεγάλης συγκέντρωσης ενέργειας σε μικρό χώρο. Ορισμένοι από τους τομείς όπου τα Laser χρησιμοποιούνται σήμερα είναι^{[3][9][11][12][23]}:

- Ιατρική (με εκμετάλλευση του γεγονότος ότι τα διαφορετικά μήκη κύματος απορροφώνται διαφορετικά από τους διάφορους ιστούς), για θεραπεία γλαυκώματος, κοπή και καυτηρίαση ιστών κοκ.
- Βιομηχανία, για μεγάλης ακρίβειας κατεργασία επιφανειών κλπ.
- Ευθυγράμμιση.
- Τηλεμετρία (επίγεια και μη).
- Τηλεπικοινωνίες.
- Μετεωρολογία και προστασία περιβάλλοντος (ανίχνευση ατμοσφαιρικών ρύπων).
- Ολογραφία (τρισεδιάστατη απεικόνιση).
- Πολεμική βιομηχανία.



Σύγκριση των LEDS και των LASERS

Ο παρακάτω πίνακας προσφέρει μία γρήγορη σύγκριση μερικών από τα χαρακτηριστικά των LEDS και των LASERS.

Χαρακτηριστικά	LEDs	Lasers
Ισχύς εξόδου	Γραμμικά ανάλογη προς το ρεύμα κατωφλίου	Ανάλογη του ρεύματος πάνω από το κατώφλι
Ρεύμα	Ρεύμα κατωφλίου: 50 - 100 mA	Ρεύμα κατωφλίου: 5 - 40 mA
Συζευγμένη ισχύς	Μέτρια	Υψηλή
Ταχύτητα	Αργότερη	Γρηγορότερη
Τύπος εξόδου	Υψηλότερη	Μικρότερη
Εύρος ζώνης	Μέτριο	Υψηλό
Διαθέσιμα μήκη κύματος	0.66 - 1.65 μm	0.78 - 1.65 μm
Φασματικό εύρος	Ευρύτερο (40-190 nm FWHM)	Στενότερο (0.00001 nm - 10 nm FWHM)
Fiber Type	Multimode Only	SM, MM
Ευκολία στη χρήση	Ευκολότερη	Δυσκολότερη
Διάρκεια ζωής	Μεγαλύτερη	Μεγάλη
Κόστος	Χαμηλό	Υψηλό

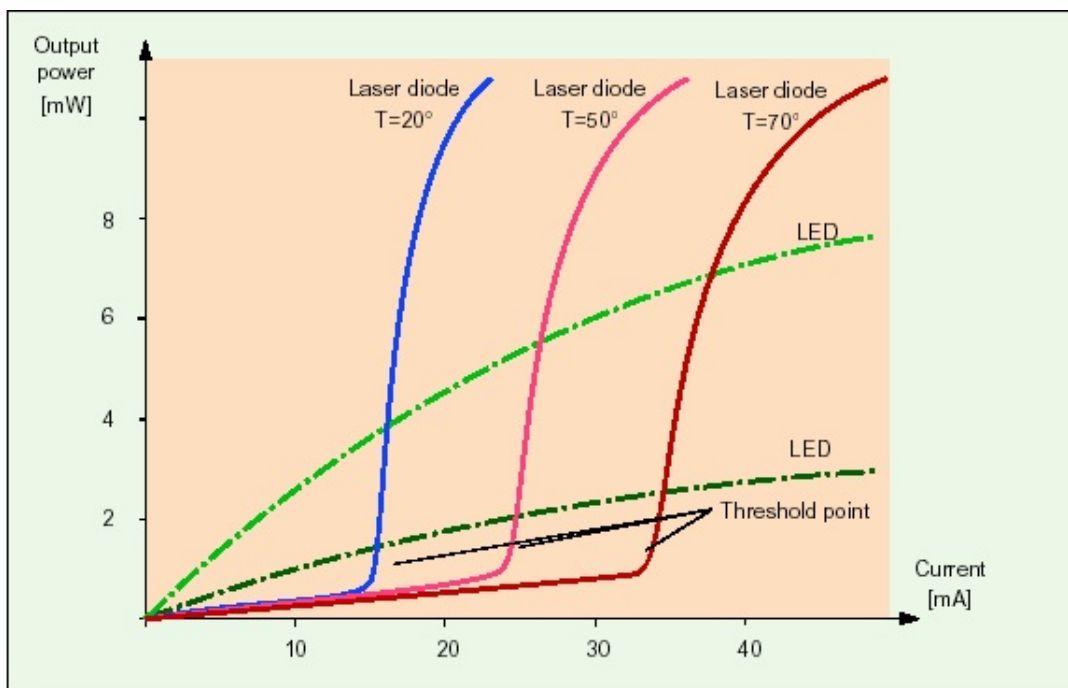
Εικόνα 4.23. Συγκριτικός πίνακας LED και LASER.

Θα αναφερθούμε στα κυριότερα από αυτά και θα τα αναλύσουμε. Αυτά είναι:



■ Ισχύς Εξόδου

Η διαφορά μιας διόδου LED με ένα LASER φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα ρεύματος – ισχύος όπου παρατηρούμε ότι η πορεία που ακολουθεί το LED είναι παρόμοια με του LASER μέχρι το σημείο που το ρεύμα κατωφλίου εξαναγκάζει την δίοδο να εκπέμπει φως.



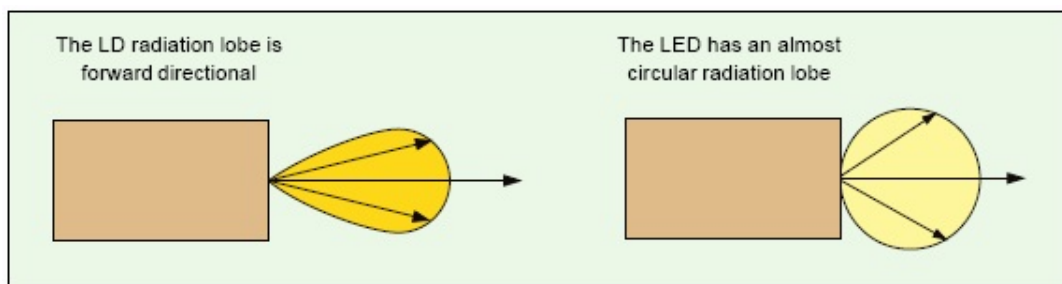
Εικόνα 4.24. Το διάγραμμα δείχνει τη σχέση μεταξύ του ρεύματος οδήγησης και της ισχύος εξόδου. Η δίοδος laser λειτουργεί ως κοινό LED μέχρι το σημείο κατωφλίου.

Από το σημείο αυτό και έπειτα, η ισχύς εξόδου του LASER αυξάνεται ραγδαία σε αντίθεση με την ισχύ εξόδου του LED που είναι ανάλογη της αύξησης του ρεύματος. Αυτό οφείλεται προφανώς στο γεγονός ότι το LED βασίζεται στην αυθόρμητη εκπομπή και δεν έχει σημείο κατωφλίου.



- Λοβός ακτινοβολίας

Οι λοβοί ακτινοβολίας των LED και των LASER είναι αρκετά διαφορετικοί μεταξύ τους, δηλαδή ο λοβός ακτινοβολίας του LASER παρουσιάζει κατευθυντικότητα ενώ ο λοβός του LED είναι σχεδόν κυκλικός. Αυτό οφείλεται στο ότι η δέσμη φωτός που εκπέμπει το LASER είναι κατευθυντική σε αντίθεση με του LED.



Εικόνα 4.25. Λοβός ακτινοβολίας LASER και LED αντίστοιχα.

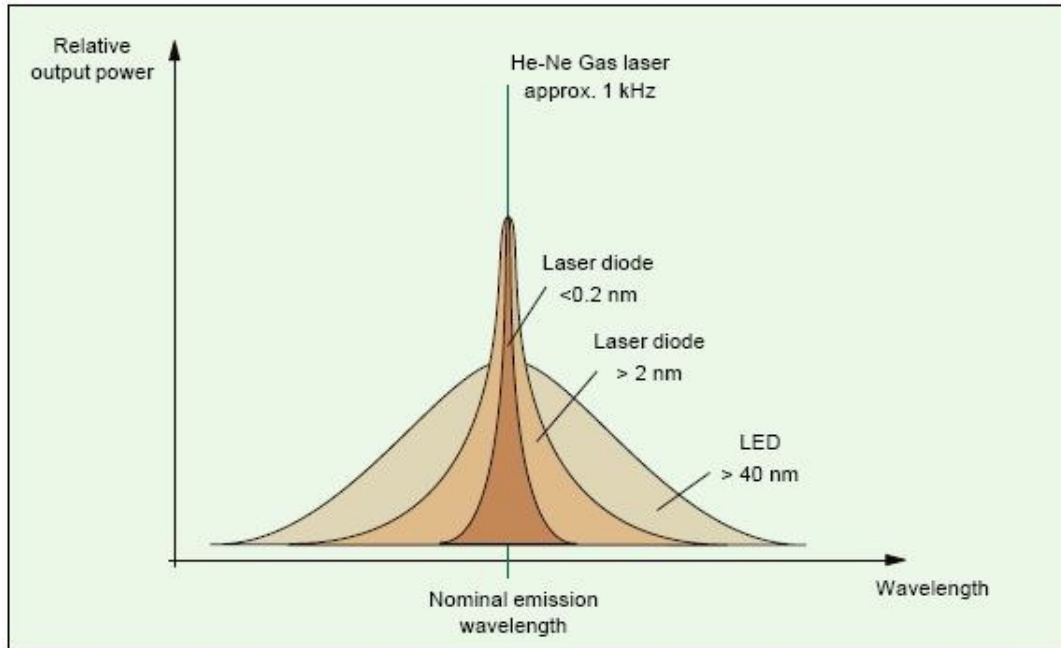
- Φασματικό εύρος των LDs και LEDs

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 δυο μεριές του φορέα (περιέχονται επίσης στο οπτικό φάσμα), όπως συμβαίνει σε κάθε πομπό. Αυτές οι πλευρικές ζώνες είναι συμβατές με το ηλεκτρικά διαμορφωμένο εύρος ζώνης.

Η καθαρότητα της συχνότητας του σήματος των LDs/LEDs δεν είναι τόσο μεγάλη. Έτσι οι πλευρικές ζώνες είναι συχνά «κρυμμένες» σε ένα ευρύ και περίπλοκο οπτικό φάσμα, του οποίου οι παράγοντες σήματος είναι αδύνατο να διακριθούν^{[3][12]}.



Το σχήμα αναπαριστά το φασματικό εύρος και των δύο.



Εικόνα 4.26. Οπτικά φάσματα ενός LED, LASER και gas LASER.

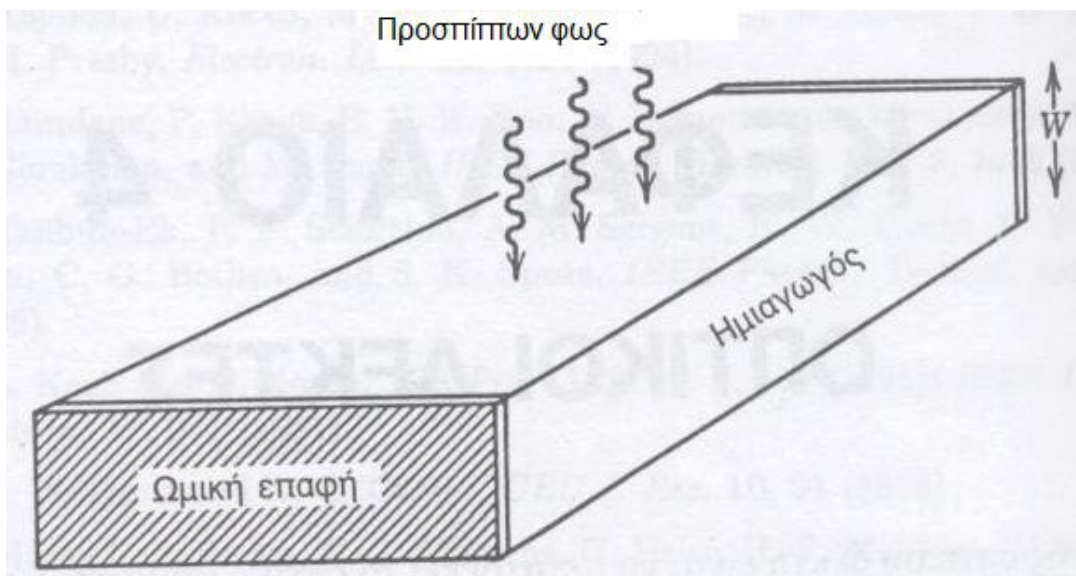
ΟΠΤΙΚΟΙ ΔΕΚΤΕΣ

Εισαγωγή

Οι δέκτες λαμβάνουν το σήμα από την οπτική ίνα και το μετατρέπουν σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω ενός φωτοανιχνευτή. Δουλεύουν δηλαδή αντίστροφα από ότι τα LED και τα LASER που αναλύσαμε τόση ώρα. Οι φωτοανιχνευτές κατασκευάζονται από υλικά όπως το γερμάνιο, το πυρίτιο, το αρσενιούχο γάλλιο και το ίνδιο αρσενικό γάλλιο. Απαιτείται να έχουν:



- Ευαισθησία
- Γρήγορη απόκριση
- Χαμηλό θόρυβο
- Αντίστοιχο μέγεθος με οπτικές ίνες
- Χαμηλό κόστος
- Μεγάλη αξιοπιστία



Εικόνα 4.27. Φωτοαγώγιμος ανιχνευτής

Αν η ενέργεια $h\nu$ των προσπιπόντων φωτονίων υπερβεί το ενεργειακό χάσμα, ένα ζεύγος ηλεκτρονίων - οπής δημιουργείται κάθε φορά που ένα φωτόνιο απορροφάται από τον ημιαγωγό. Κάτω από την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου που καθορίζεται από την εφαρμοσμένη τάση, τα ηλεκτρόνια και οι οπές σαρώνονται στα άκρα του ημιαγωγού, με αποτέλεσμα τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος.

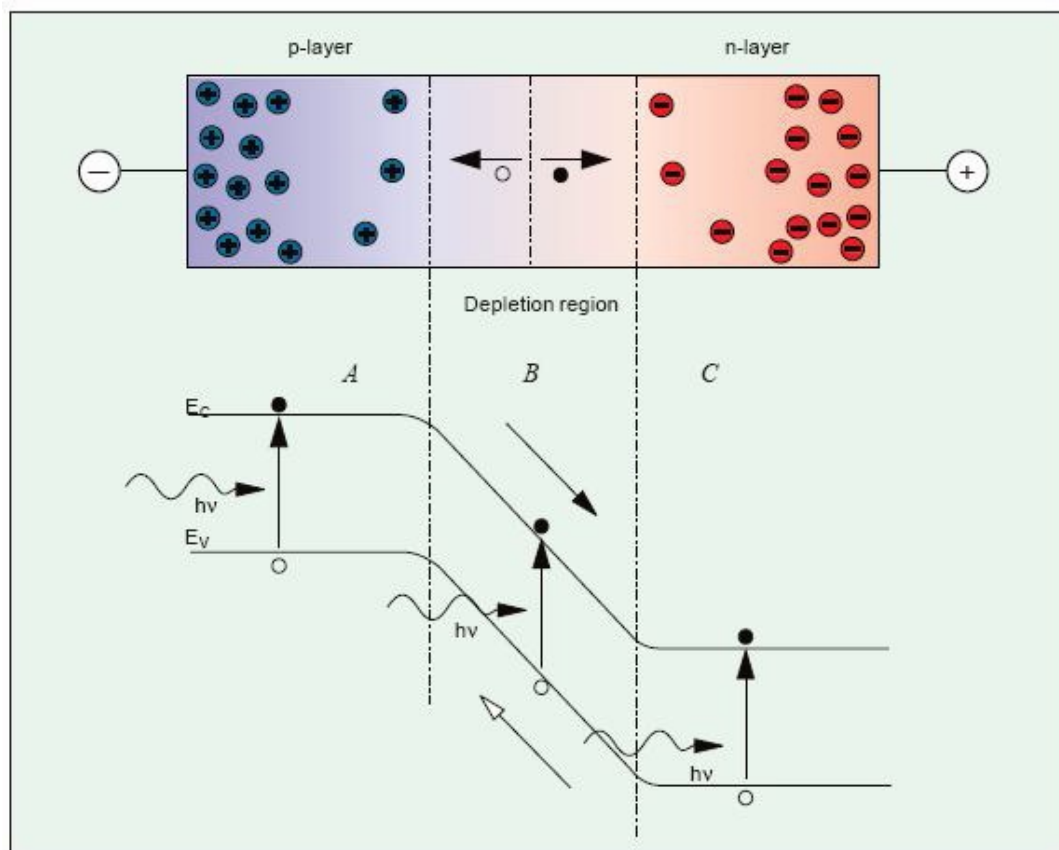
Οι ανιχνευτές που κατασκευάζονται από ημιαγωγούς χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στα οπτικά συστήματα. Οι τρεις τύποι φωτοανιχνευτών που θα παρουσιάσουμε είναι οι εξής :

- Ημιαγωγών τύπου P - N
- PIN
- Χιονοστιβάδας



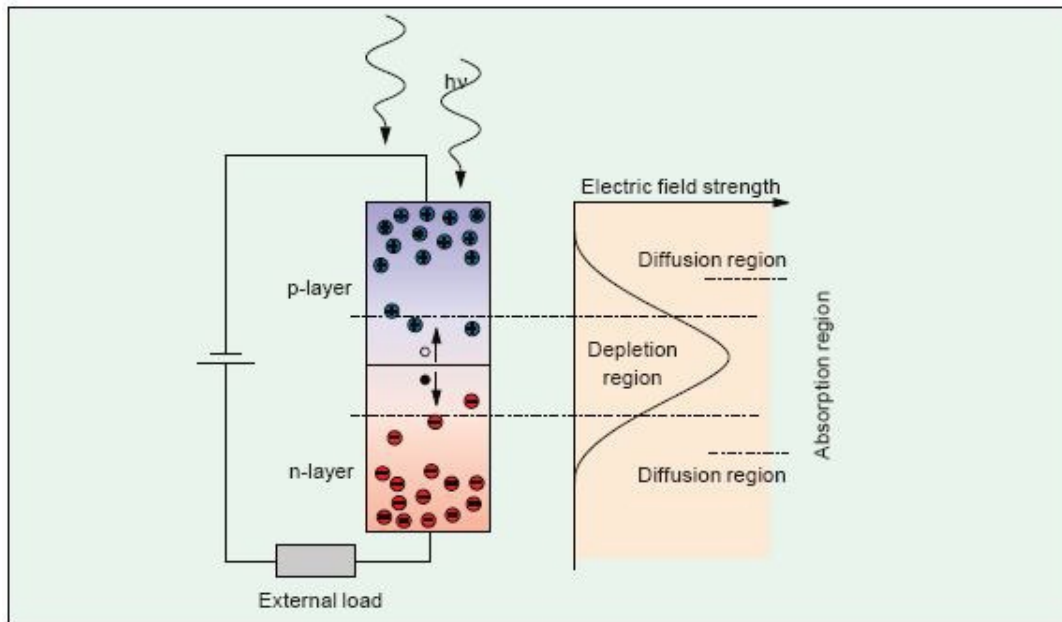
Φωτοανιχνευτής τύπου P – N

Οι επαφές p – n είναι οι πιο δημοφιλείς συσκευές ανίχνευσης της οπτικής ακτινοβολίας. Ο μηχανισμός ανίχνευσης της ακτινοβολίας απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 4.28. Ένα φωτόνιο μπορεί να δημιουργήσει ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών σε τρεις διαφορετικές περιοχές της διόδου (A, B και C). Μόνο στην περιοχή αραίωσης (B) παρατηρείται άμεση ανίχνευση αυτών των ζευγών.

Το φωτόνιο προσπίπτει στο σημείο A του σχήματος (περιοχή p) και δημιουργεί ένα ζεύγος ελεύθερου ηλεκτρονίου και οπής. Οι δύο αυτοί φορείς υπό την επίδραση της εξωτερικής πόλωσης, κινούνται τα μεν ελεύθερα ηλεκτρόνια προς την περιοχή n ενώ οι οπές στην περιοχή p αυξάνοντας έτσι το ρεύμα που διαρρέει το εξωτερικό κύκλωμα.



Εικόνα 4.29. Σχηματικό διάγραμμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε μια p-n δίοδο

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

Παρόλο που οι φωτοανιχνευτές P – N χρησιμοποιούνται στις οπτικές επικοινωνίες παρουσιάζουν τρεις ανεπιθύμητες ιδιότητες:

- Δεν έχουν μεγάλη ευαισθησία
- Παρουσιάζουν θόρυβο
- Δεν αποκρίνονται, συνήθως, ικανοποιητικά στις γρήγορες μεταβολές της φωτεινής ροής και ως εκ τούτου δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οπτικές επικοινωνίες για τη μεταφορά μεγάλης συχνότητας σημάτων.

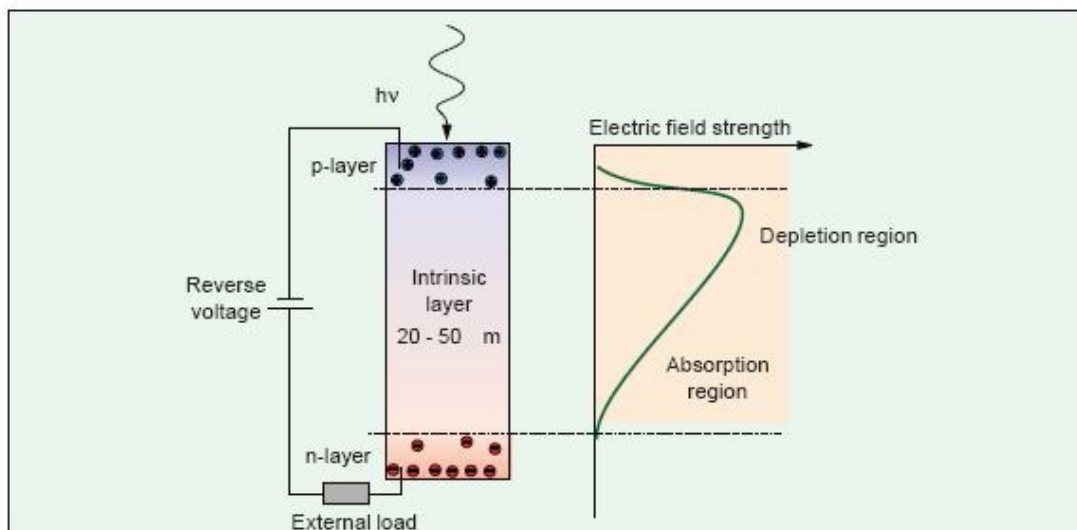


Φωτοανιχνευτής PIN

Με τον παραπάνω τρόπο που μόλις αναφέραμε κατασκευάζεται μία φωτοδιόδος PIN. Στην κατασκευή της μας οδήγησαν κάποια προβλήματα του φωτοανιχνευτή p-n.

Η διαδικασία τους είναι αρκετά αργή και οι διόδοι p-n δεν είναι αρκετά γρήγοροι για τις σημερινές εφαρμογές τηλεπικοινωνιών καθώς επίσης ανιχνεύουν μόνο το ορατό φως. Με αυτόν τον τρόπο καταλήγουμε πως για ανίχνευση υπέρυθρης ακτινοβολίας, που συνεπάγεται και μεγαλύτερα μήκη κύματος, και ταχύτερες διαδικασίες χρησιμοποιούμε φωτοδιόδους PIN.

Με την τοποθέτηση λοιπόν ενός σχετικά λεπτού στρώματος ημιαγωγού νοθευμένου με p παράγοντες, ανάμεσα στα στρώματα p - n, η αγωγιμότητα της ενδιάμεσης αυτής περιοχής είναι μικρότερη από την αγωγιμότητα των ημιαγωγών p και n και η περιοχή αυτή i της διάταξης είναι και περιοχή απογύμνωσης. Το εύρος της μπορεί να επιλεγεί κατά την διαδικασία κατασκευής της φωτοδιόδου, έτσι ώστε όλα πλέον τα φωτόνια να απορροφούνται μέσα σε αυτήν με τελικό αποτέλεσμα όλοι οι φωτοηλεκτρικοί φορείς να διαχωρίζονται και να κινούνται ταυτόχρονα υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου.



*Εικόνα 4.30. Δομή μιας φωτοδιόδου PIN.
Τοποθετώντας το λεπτό στρώμα intrinsic μεγαλώνει πολύ η περιοχή απορρόφησης.*

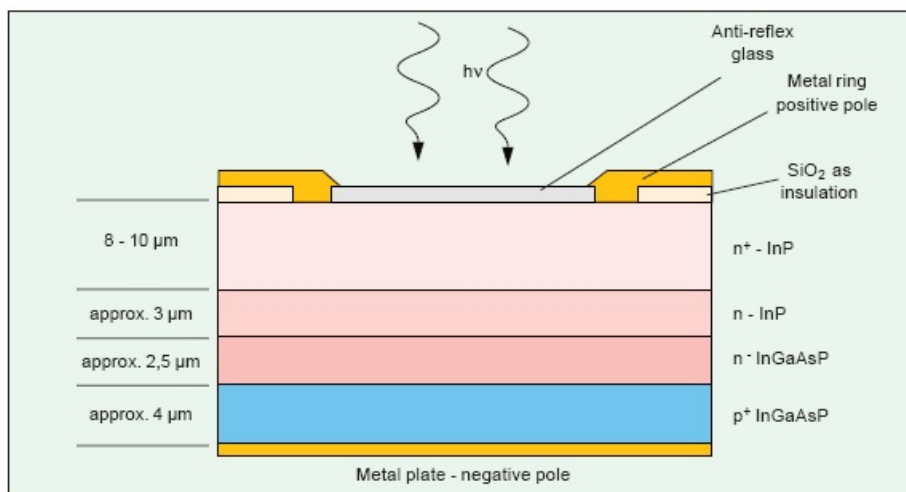


Υπάρχουν κάποια αξιοσημείωτα πλεονεκτήματα των φωτοδιόδων PIN τα οποία πρέπει να αναφέρουμε:

- Αυξάνεται ο διαθέσιμος όγκος για την «αιχμαλώτιση» φωτονίων, αυξάνοντας κατά συνέπεια το πλάτος του στρώματος εκκένωσης προκειμένου να πετύχουν μεγαλύτερη απόδοση.
- Ένα ευρύτερο στρώμα εκκένωσης μειώνει τη χωρητικότητα επαφής ώστε να υπάρξει γρηγορότερη απόκριση. Ωστόσο, ταυτόχρονα αυξάνεται ο χρόνος μετάδοσης και έτσι είναι απαραίτητο να γίνει μία αντιστάθμιση.
- Παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας της συσκευής καθώς υπάρχει μείωση της αναλογίας ανάμεσα στον αριθμό των φορτίων που παράγονται στα γύρω από την περιοχή και στον αριθμό των φορτίων που παράγονται στα μέσα της περιοχής εκκένωσης.

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 με τους οποίους αυξάνεται και η επίδοση της φωτοδιόδου PIN.

Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει την κατασκευή μιας φωτοδιόδου PIN σύμφωνα με τον πρώτο συνδυασμό.



Εικόνα 4.31. Φωτοδίοδος PIN σε συνδυασμό με InP και InGaAsP



Φωτοανιχνευτής Χιονοστιβάδας

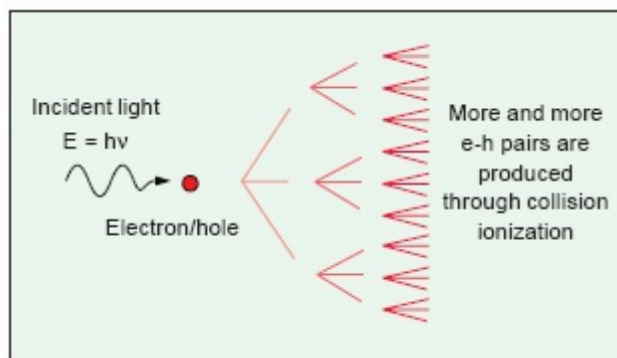
Σε μια ιδανική PIN φωτοδίοδο, κάθε προσπίπτον φωτόνιο δημιουργεί ένα ζεύγος e-h, γεγονός που σημαίνει ότι το ηλεκτρόνιο θα κινηθεί από το θετικό προς τον αρνητικό πόλο. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι η PIN δίοδος είναι το αντίστροφο του LED (σχεδόν κάθε ηλεκτρόνιο αντιδρά σε προσπίπτον φωτόνιο). Κατά παρόμοιο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

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

Με τον παραπάνω τρόπο πετυχαίνουμε τον πολλαπλασιασμό της έντασης, που δημιουργείται από τα κινούμενα ηλεκτρόνια. Λόγω αυτού του φαινομένου «χιονοστιβάδας» η δίοδος ονομάστηκε avalanche.

Κάτω από την ανάστροφη πόλωση, υπάρχει ένα υψηλό ηλεκτρικό πεδίο στο στρώμα τύπου - p που βρίσκεται μεταξύ των στρωμάτων τύπου - i και τύπου n+. Το στρώμα αυτό ονομάζεται στρώμα πολλαπλασιασμού, αφού δημιουργούνται εδώ δευτερογενή ζεύγη ηλεκτρονίου - οπής, μέσω ιονισμού με κρούση. Το στρώμα i λειτουργεί ακόμη σαν περιοχή αραίωσης, στην οποία τα περισσότερα από τα προσπίπτοντα φωτόνια απορροφώνται, ενώ παράλληλα δημιουργούνται αρχικά ζευγάρια ηλεκτρονίου - οπής.

Ο συντελεστής πολλαπλασιασμού εξαρτάται κατά μεγάλο βαθμό από την ανάστροφη πόλωση. Συνηθίζεται ο συντελεστής πολλαπλασιασμού να έχει τιμές μέσα στο διάστημα (70-100). Αυτό σημαίνει ότι ένα φωτόνιο δημιουργεί ροή 70 με 100 ηλεκτρονίων στο εξωτερικό κύκλωμα. Ο SNR (αναλύεται παρακάτω) βελτιώνεται αρκετά λόγω του φωτοπολλαπλασιασμού.

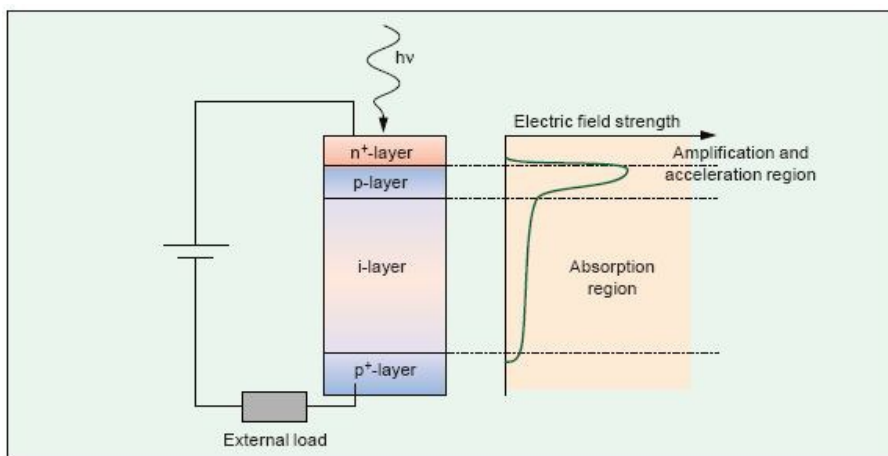


Εικόνα 4.32. Υψηλή ανάστροφη πόλωση της τάξης των 100-300 V δίνει στα ηλεκτρόνια αρκετή κινητική ενέργεια ώστε να λάβει χώρα το φαινόμενο «χιονοστιβάδας».



Η ανάστροφη πόλωση καθορίζει το συντελεστή πολλαπλασιασμού, διότι πρέπει να δημιουργηθεί αρκετά ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο ώστε να εμφανιστεί το φαινόμενο «χιονοστιβάδας». Για μια τιμή αρκετών εκατοντάδων Volts (threshold) τα ζεύγη e-h θα δημιουργούνται χωρίς να είναι απαραίτητη η πρόσπτωση φωτός.

Για κυκλώματα με APD λοιπόν, πρέπει η τιμή της ανάστροφης πόλωσης να είναι λίγο μικρότερη από το threshold, ώστε να επιτυγχάνεται ανίχνευση και της πιο αδύναμης φωτεινής ακτινοβολίας^{[1][6][10][23]}.



Εικόνα 4.33. Παρουσίαση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τα διάφορα στρώματα μιας APD διόδου.

ΣΗΜΑΝΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΦΩΤΟΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ

Διάφορες παράμετροι επηρεάζουν την ανίχνευση φωτός οι οποίες σημαντικότερες είναι οι παρακάτω:

Παραμόρφωση του παλμού φωτός

Ο παλμός δεν αλλοιώνεται μόνο εξαιτίας της εξασθένησης μέσα στην ίνα αλλά και από διάφορα φαινόμενα που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της μετάδοσης, όπως η διασπορά (είχαμε αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο) που διευρύνει τον παλμό στο πεδίο του



χρόνου (διαφορετικά μήκη κύματος που διαδίδονται με διαφορετικές ταχύτητες μέσα στην ίνα).

Ευαισθησία δέκτη

Η ευαισθησία του δέκτη εξαρτάται από κάποιους παράγοντες τους οποίους θα αναλύσουμε παρακάτω :

Αποκρισιμότητα: Η αποκρισιμότητα (ρ) ενός φωτοανιχνευτή είναι ο λόγος του ρεύματος εξόδου προς το φως εισόδου. Όσο μεγαλύτερη η αποκρισιμότητα του ανιχνευτή, τόσο καλύτερη η ευαισθησία του δέκτη. Αφού η αποκρισιμότητα ποικίλει σε σχέση με το μήκος κύματος, καθορίζεται είτε στο μμήκος κύματος της μέγιστης αποκρισιμότητας είτε στο μμήκος κύματος που μας ενδιαφέρει.

Η τιμή I_ϕ ονομάζεται φωτορεύμα διότι είναι ρεύμα που προκαλείται από το προσπίπτον φως το οποίο πέφτει στην επιφάνεια της φωτοδιόδου. Υπάρχει αναλογία της οπτικής ισχύος και του ρεύματος που παράγεται. Δίνεται ότι $I_\phi = \rho * P_{in}$, όπου P_{in} η οπτική ισχύς που ανιχνεύεται.

Για τις περισσότερες εφαρμογές, η αποκρισιμότητα είναι το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό ενός ανιχνευτή επειδή καθορίζει τη σχέση μεταξύ της οπτικής εισόδου και της ηλεκτρικής εξόδου. Η μέγιστη θεωρητική αποκρισιμότητα είναι περίπου 1,05 A/W σε ένα μήκος κύματος των 1300 nm.

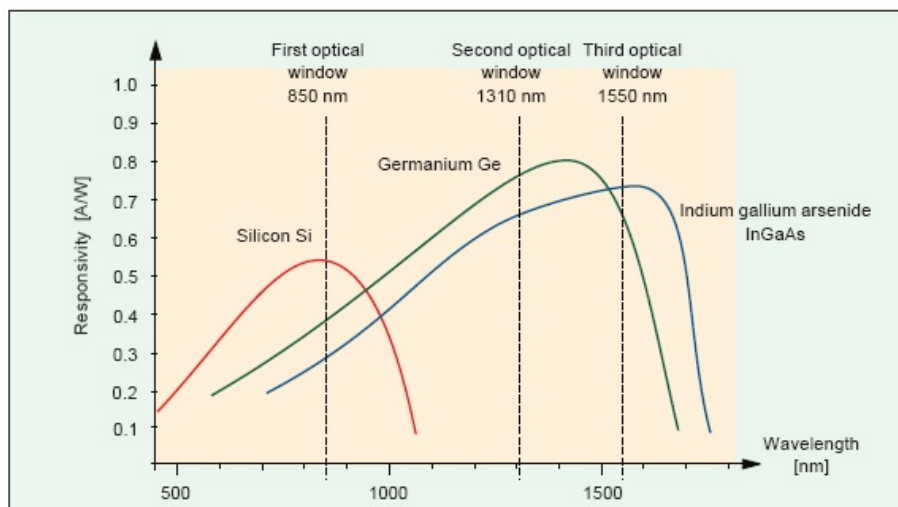
Οι ανιχνευτές InGaAs του εμπορίου προσφέρουν τυπική αποκρισιμότητα από 0,8 - 0,9 A/W σε ένα μήκος κύματος των 1300 nm. Η μέγιστη θεωρητική αποκρισιμότητα ενός ανιχνευτή προκύπτει όταν η κβαντική απόδοση του ανιχνευτή είναι 100%. Αποκρισιμότητα και κβαντική απόδοση (η) συνδέονται με τη σχέση:

$$R = \eta * e * \lambda / h * c$$

όπου R = μέγιστη θεωρητική αποκρισιμότητα (A/W),



η = κβαντική απόδοση,
 e = το φορτίο του ηλεκτρονίου,
 λ = μήκος κύματος σε nm,
 h = η σταθερά του Planck,
 c = η ταχύτητα του φωτός.



Εικόνα 4.34. Απόκριση μιας φωτοδιόδου σε σχέση με το μήκος κύματος του φωτός και το υλικό κατασκευής της.

Συνεπώς ένας ανιχνευτής στα 1310 nm θα έχει μέγιστη θεωρητική αποκρισιμότητα 0,83 A/W και ένας ανιχνευτής στα 850 nm θα έχει 0,58 A/W.

Κβαντική απόδοση: Η κβαντική απόδοση είναι ο λόγος των αρχικών ζευγών ηλεκτρονίων - οπών που δημιουργούνται όταν προσπίπτουν φωτόνια πάνω στο υλικό μίας διόδου. Μια 100% κβαντική απόδοση σημαίνει ότι κάθε φωτόνιο που απορροφάται δημιουργεί ένα ζεύγος ηλεκτρονίου - οπής.

Η τυπική κβαντική απόδοση για έναν ανιχνευτή του εμπορίου είναι από 70% ως 90%. Αυτό το μέγεθος κβαντικής απόδοσης δείχνει ότι 7 ως 9 από τα 10 φωτόνια θα δημιουργήσουν φορείς. Παράγοντες που εμποδίζουν την κβαντική απόδοση από το να είναι 100% είναι οι απώλειες στη ζεύξη από την ίνα στον ανιχνευτή, η απορρόφηση φωτός στην p ή n περιοχή και οι διαρροές ρευμάτων στον ανιχνευτή.



Θόρυβος δέκτη: Δυστυχώς, το ηλεκτρικό σήμα που παράγεται στο δέκτη, δεν είναι πιστή αναπαράσταση του προσπίπτοντος οπτικού σήματος. Ο δέκτης προσθέτει θόρυβο ο οποίος κατηγοριοποιείται σε *θερμικό* και *θόρυβο βολής*.

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 φωτοδιόδου μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο :

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

όπου k είναι η σταθερά του Boltzman, T η απόλυτη τιμή της θερμοκρασίας σε Kelvin, B ή $f_{3\text{dB}}$ το εύρος ζώνης του δέκτη και R η αντίσταση του φορτίου.

Ο *θόρυβος βολής* προκύπτει από τη διαδικασία δημιουργίας ζευγών ηλεκτρονίων – οπών και επηρεάζεται από τον αριθμό τους. Όσα περισσότερα ή λιγότερα ζεύγη έχουμε, το ρεύμα αυξομειώνεται παράγοντας θόρυβο βολής.

Όταν δεν ανιχνεύεται καθόλου φως, έχουμε θόρυβο βολής γιατί παρόλο αυτά παράγεται θερμικά ένα μικρό ρεύμα $I_{\Sigma\text{K}}$, το ρεύμα σκότους. Όταν υπάρχει μόνο αυτό, η τιμή του θορύβου είναι στο ελάχιστο αλλά αυξάνεται με το ρεύμα που προκύπτει από την οπτική είσοδο. Ο τύπος υπολογισμού του θορύβου βολής είναι :

$$\overline{i_B}^2 = 2e f_{3\text{dB}} (I_\Phi + I_{\Sigma\text{K}})$$

όπου e το φορτίο του ηλεκτρονίου, $f_{3\text{dB}}$ το εύρος ζώνης του δέκτη, I_Φ το φωτορεύμα και $I_{\Sigma\text{K}}$ το ρεύμα σκότους.

Εύρος ζώνης : Εξαρτάται από την ταχύτητα ανταπόκρισης μίας φωτοδιόδου σε οπτικές εισόδους ώστε να παραχθεί το ρεύμα εξόδου. Το μέγεθος αυτό ονομάζεται *χρόνος απόκρισης*. Ο συνδυασμός της χωρητικότητας της φωτοδιόδου και της αντίστασης φόρτου σε συνάρτηση με τη σχεδιάσή της, δίνει το εύρος ζώνης. Έχουμε :



$$f_{3db} = 1 / (2 * \pi * R * C)$$

R = σύνθετη αντίσταση με την οποία λειτουργεί ο ανιχνευτής

C = χωρητικότητα ανιχνευτή

Υπολογίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να περάσουμε από το 10% στο 90% ποσοστών πλάτους ταλάντωσης.

Επηρεάζεται από τη σχεδίαση της φωτοδιόδου π.χ. το μέγεθος ενός ανιχνευτή (ενεργός επιφάνεια) επηρεάζει τη χωρητικότητά του καθώς και από τις παραμέτρους της εφαρμογής, όπως είναι ο χρόνος διάχυσης για τα κύματα έντασης που δημιουργούνται στις p-n περιοχές και ο χρόνος που χρειάζονται τα κύματα έντασης για να διαπεράσουν την περιοχή αραίωσης.

Μπορεί να υπολογιστεί και σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο :

$$f_{3dB} = \frac{0.35}{\tau}$$

όπου τ = χρόνος ανόδου ή καθόδου ανιχνευτή (χρόνος απόκρισης)^[4].

Απώλειες οπτικής ζεύξης

Σαφώς και κατά τη μετάδοση του φωτός μέσα στην οπτική ίνα υπάρχουν απώλειες. Η παράμετρος αυτή θα καθορίσει το αν και που θα χρειαστούν οπτικοί ενισχυτές, καθώς επίσης και τι ισχύ θα παρέχουν, ώστε η τελική μέση ισχύς του σήματος που καταφθάνει στον δέκτη να είναι αρκετή για να το αναγνωρίσει πλήρως.

Στην πραγματικότητα η εφαρμογή των οπτικών ινών στις τηλεπικοινωνίες έγινε για πρώτη φορά δυνατή, μόνο όταν μειώθηκαν αρκετά οι απώλειες τις ίνας. Οι απώλειες οφείλονται σε πολλούς παράγοντες αλλά οι σημαντικότεροι είναι οι παρακάτω :

- **Απώλειες εντός της ίνας [dB/km]**



- Απώλειες λόγω κολλήσεων [dB]
- Απώλειες λόγω συνδέσεων [dB]

Είχαμε αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο επιγραμματικά αλλά ας αναφερθούμε πιο συγκεκριμένα στους λόγους που μία οπτική ζεύξη έχει απώλειες.

- **Εξασθένηση – Attenuation** : Ως εξασθένηση ορίζεται η απώλεια οπτικής ισχύος κατά την κυματοδότηση και ανέρχεται σε 150 dB/km για τις πλαστικές ίνες ενώ μόνο 0,21dB/km σε μονότροπες ίνες. Στο πίνακα παρακάτω δίνονται χαρακτηριστικές τιμές εξασθένησης για μερικά είδη οπτικών ινών.

Είδος Ίνας	Διαστάσεις Πυρήνα/Μανδύα	Εξασθένηση (dB/km)
Μονότροπη	9/125	2 - 5 για $\lambda = 850$ nm 0,35 για $\lambda = 1300$ nm 0 2,1 για $\lambda = 1550$ nm
Πολύτροπη (βαθμιαίας μεταβολής)	50/125	4,00 για $\lambda = 850$ nm 2,50 για $\lambda = 1300$ nm
	62,5/125	6,00 για $\lambda = 850$ nm
	85/125	7,00 για $\lambda = 850$ nm
Πολύτροπη (βηματικής μεταβολής)	200/380	6,00 για $\lambda = 850$ nm
	300/440	6,00 για $\lambda = 850$ nm
PCS (γυάλινου πυρήνα με πλαστικό μανδύα)	200/350	10,00 για $\lambda = 790$ nm
	400/550	10,00 για $\lambda = 790$ nm
	600/900	6,00 για $\lambda = 790$ nm
Πλαστική	750	150 για $\lambda = 650$ nm
	1000	200 για $\lambda = 650$ nm

Εικόνα 4.35. Εξασθένηση οπτικού σήματος συναρτήσει μήκους κύματος.



Οι απώλειες μπορούν να υπολογιστούν σε dB από τον εξής τύπο:

$$\text{Απώλειες (dB)} = 10 \log_{10} \frac{P_{in}}{P_{out}}$$

P_{in} η οπτική ισχύς στην είσοδο της οπτικής ίνας,

P_{out} η οπτική ισχύς στην έξοδο της οπτικής ίνας.

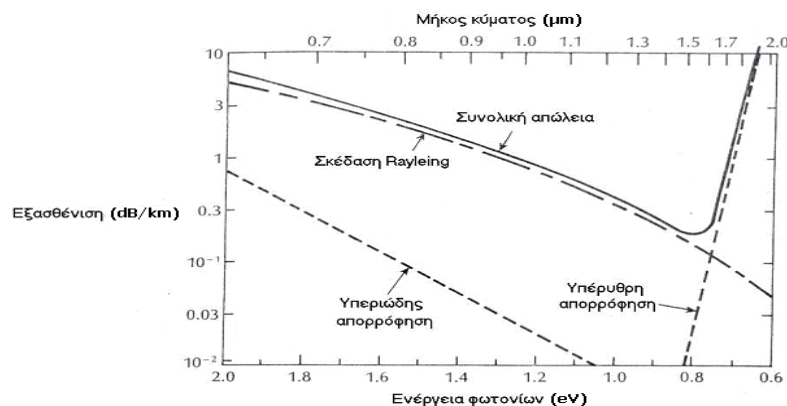
Στα συστήματα επικοινωνιών με οπτικές ίνες, η εξασθένιση εκφράζεται συνήθως σε decibel ανά μονάδα μήκους (π.χ. dB/km), ως εξής:

$$\alpha_{dB} l = 10 \log_{10} \frac{P_{in}}{P_{out}}$$

όπου α_{dB} είναι η εξασθένιση του σήματος ανά μονάδα μήκους σε dB και l το μήκος της ίνας.

▪ **Απώλειες λόγω απορρόφησης από το υλικό της ίνας** : Οι απώλειες λόγω απορρόφησης του φωτός από το υλικό της ίνας, είναι ένας μηχανισμός που σχετίζεται με τη σύνθεση του υλικού και τη διαδικασία κατασκευής της ίνας και έχει ως αποτέλεσμα την κατανάλωση μέρους της μεταδιδόμενης οπτικής ισχύος υπό μορφή θερμότητας. Η απορρόφηση του φωτός μπορεί να είναι **ενδογενής** (προκαλείται από την αλληλεπίδραση του φωτός με ένα ή περισσότερα συστατικά του γυαλιού της ίνας) ή **εξωγενής** (προκαλείται από ξένα σώματα που υπάρχουν μέσα στο γυαλί, κυρίως μέταλλα).

Για μία απολύτως «καθαρή» ίνα (χωρίς ξένες προσμίξεις) από ύαλο πυριτίου, η ενδογενής απορρόφηση παριστάνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 4.36. Το φάσμα εξασθένισης λόγω ενδογενούς απορρόφησης και λόγω σκέδασης Rayleigh σε μία «καθαρή» ίνα από γυαλί $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$.

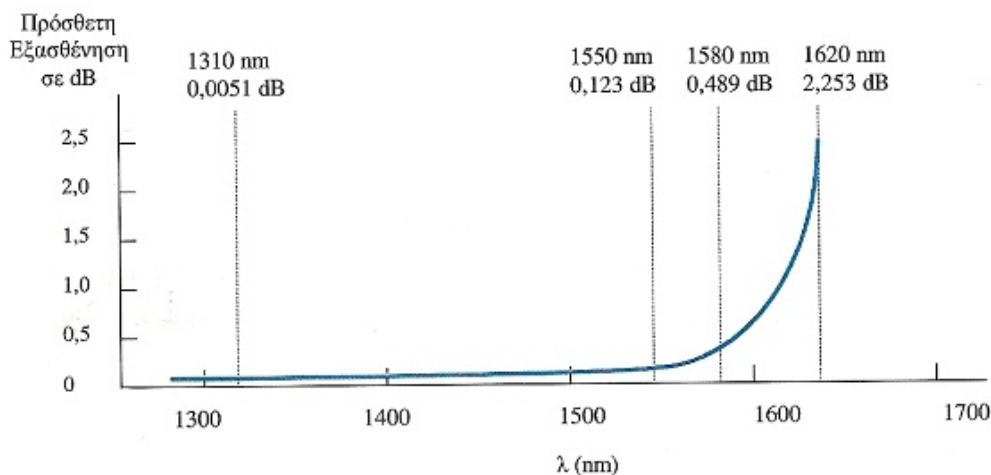


Στο σχήμα αυτό παρατηρούμε ότι η εξασθένηση λόγω ενδογενούς απορρόφησης φθίνει στην περιοχή του υπεριώδους (0,6-1,15 μm) και αυξάνει απότομα στην περιοχή του υπερύθρου (1,5-2 μm), ενώ υπάρχει ένα «παράθυρο» χαμηλής ενδογενούς απορρόφησης από τα 1,15 ως τα 1,5 μm . Επίσης, στο σχήμα παριστάνεται και η εξασθένηση λόγω σκέδασης Rayleigh και η συνολική εξασθένηση.

Η εξασθένηση που προκαλείται από ξένα σώματα που υπάρχουν μέσα στο γυαλί (εξωγενής απορρόφηση) είναι σχεδόν σταθερή, με τιμή περίπου 0,03 dB/km, για την περιοχή φάσματος του υπεριώδους και του υπερύθρου φωτός.

▪ **Απώλειες λόγω κάμψης – Bending** : Αν και οι οπτικές ίνες αποθηκεύονται τυλιγμένες σε ειδικά στροφεία μια ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας πέραν την οποίας μπορεί να προκαλέσει το σπάσιμο της ίνας. Οι κάμψεις έχουν δύο βασικές επιπτώσεις στις μονότροπες οπτικές ίνες:

1) **Μικρή αύξηση των απωλειών**. Για μια δεδομένη ακτίνα καμπυλότητας η απώλεια από κάμψη εξαρτάται από το μήκος κύματος και αυξάνει για μακρύτερα μήκη κύματος όπως δείχνει το γράφημα.

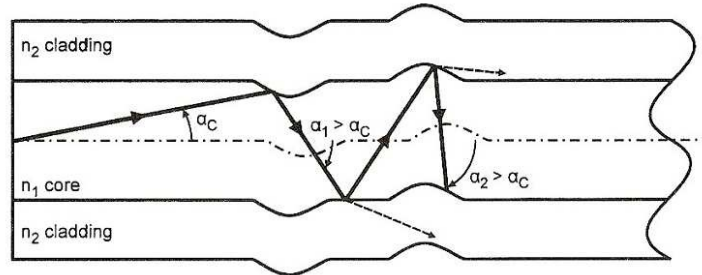


Εικόνα 4.37. Απώλεια από κάμψη σε συνάρτηση του μήκους κύματος.

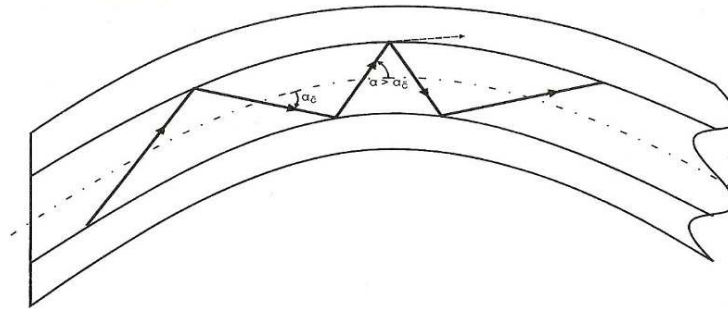
2) **Μείωση της αντοχής της ίνας σε εφελκυσμό**. Σε καλώδια, που υφίστανται εφελκυσμό, η ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας πρέπει να είναι δεκαπλάσια της διαμέτρου του καλωδίου. Οι απώλειες λόγω κάμψης της ίνας οφείλονται είτε σε κατασκευαστική ατέλεια είτε στην κάμψη της ίνας κατά την τοποθέτησή της. Και στις δύο περιπτώσεις



προκαλείται διάθλαση κύματος εντός του μανδύα με αποτέλεσμα να έχω απώλεια οπτικής ισχύος.



Εικόνα 4.38. Απώλειες λόγω μικρό κάμψης της ίνας (κατασκευαστική ατέλεια).



Εικόνα 4.39. Απώλειες λόγω κάμψης της ίνας κατά την τοποθέτησή της.

- **Απώλειες που οφείλονται σε κολλήσεις** : Όταν δυο ίνες συνδέονται, η κόλληση θα συνεισφέρει κατά κάποιο τρόπο στην αύξηση της εξασθένησης. Η αύξηση της εξασθένησης λόγω κολλήσεων μειώνεται στο ελάχιστο, όταν οι κολλήσεις πραγματοποιούνται με τη μέθοδο fusion, καθαρίζονται προσεκτικά και κόβονται με ακρίβεια. Σύγχρονα κολλητήρια πετυχαίνουν γωνία κοπής 90° και εξαιρετικό καθαρισμό της ίνας πριν την κόλληση. Αν όλες οι παραπάνω παράμετροι είναι τέλειες τότε μία κόλληση fusion δεν εισάγει περαιτέρω εξασθένηση στο σύστημα.



Οι παρακάτω παράγοντες απωλειών που οφείλονται σε connectors/κολλήσεις αναφέρονται κυρίως σε ημι-μόνιμες και μηχανικές κολλήσεις (και λιγότερο σε fusion κολλήσεις)^{[4][3][23]}:

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

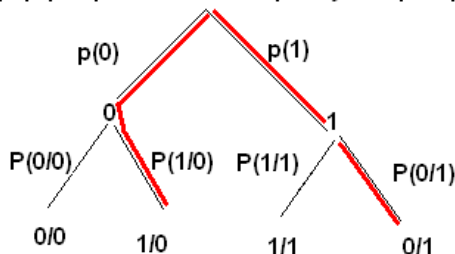
Έλεγχος απόδοσης ζεύξης

Ο υπολογισμός απώλειας οπτικής ζεύξης αναλύει τη ζεύξη για να εξασφαλίσει ότι υπάρχει αρκετή διαθέσιμη ισχύς μέσα της έτσι ώστε να ανταποκρίνεται στις ανάγκες της δεδομένης εφαρμογής που την χρησιμοποιούμε.

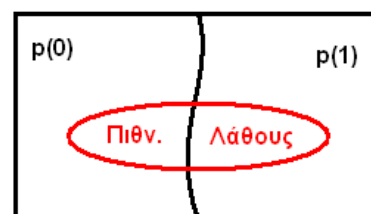
Η ένταση του σήματος σε συνδυασμό με τις πηγές θορύβου μας δίνουν το **SNR (signal to noise ratio)** του αναλογικού σήματος. Σε αντίθεση με ένα ψηφιακό δέκτη, ένα κύκλωμα αποφασίζει αν το σήμα που έχει ληφθεί είναι «1» ή «0». Το τελικό μέτρο ποιότητας του ψηφιακού σήματος είναι το **BER (bit error rate)**.

BER (Bit Error Rate): Αφού η φωτοδίοδος μετατρέψει το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό ρεύμα η διάταξη απόφασης θα πρέπει να επιλέξει σε σχέση με μία οριακή τιμή ρεύματος – threshold current I_D , αν το ρεύμα αντιστοιχεί σε λογικό ένα ή σε λογικό μηδέν. Αρά σύμφωνα με το θεώρημα της ολικής πιθανότητας έχουμε:

Λογική τιμή στην εισόδο κυκλώματος απόφασης



Διάγραμμα Venn



Εικόνα 4.40. Πιθανότητες Bit Error Rate.



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.

SNR (Signal to Noise Ratio): Μια πολύ σημαντική παράμετρος είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο – **Signal to Noise Ratio** ή SNR. Ο λόγος αυτός υπολογίζεται από τη μέση τιμή του παραγόμενου ρεύματος από το εισερχόμενο οπτικό σήμα προς το συνολικό μέσο ρεύμα παραγόμενο από διαφορετικές πηγές θορύβου.

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

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

Το σήμα (S) αντιπροσωπεύει την πληροφορία προς μετάδοση ενώ ο θόρυβος (N) είναι το σύνολο όλων των παραγόντων που συντελούν στο να υπάρχει θόρυβος μέσα στο σύστημα.

Υψηλή τιμή SNR σημαίνει ότι το σήμα δεν επηρεάζεται πολύ από το θόρυβο. 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^{[1][4]}.

ΟΠΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ

Εισαγωγή

Το φαινόμενο της εξασθένησης θέτει άνω όρια στο μήκος της ίνας που μπορεί να καλύψει ένα σήμα χωρίς να υποστεί αλλοιώσεις προτού χρειαστεί να αναγεννηθεί. Πριν ανακαλυφθούν οι οπτικοί ενισχυτές, χρησιμοποιούνταν επαναλήπτες - repeaters για να αναγεννήσουν τα σήματα με ηλεκτρονικά μέσα προκειμένου να αντισταθμίσουν τις απώλειες που προκαλούσαν οι οπτικές συσκευές της γραμμής μετάδοσης. Οι ηλεκτρονικοί αναγεννητές – repeaters έχουν δύο βασικά μειονεκτήματα: έχουν **μεγάλο κόστος** και



εισάγουν **περιορισμούς στην απόδοση** του συστήματος αφού ένας αναγεννητής μπορεί να λειτουργήσει μόνο σε έναν προκαθορισμένο ρυθμό μετάδοσης και αποκλειστικά σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος.

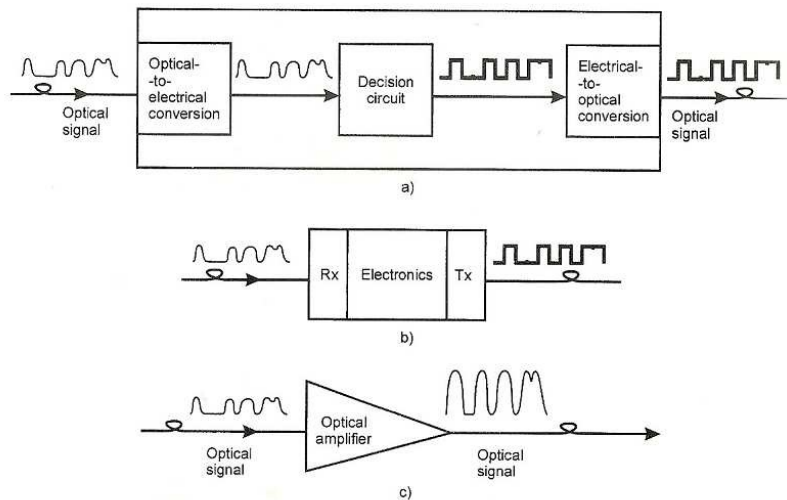


Figure : Repeater and optical amplifiers: (a) Functional block diagram of a repeater; (b) simplified diagram of a repeater; (c) optical amplifier.

Εικόνα 4.41. Οπτικός ενισχυτής / αναγεννητής.

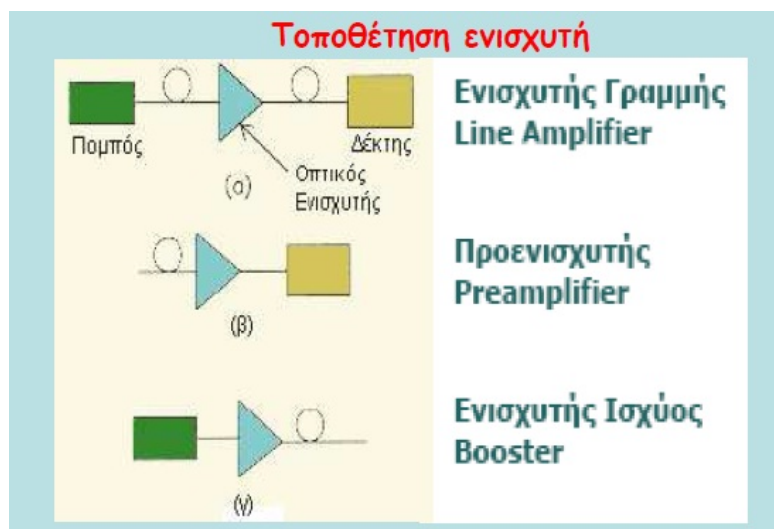
Τα τρία βασικά είδη οπτικών ενισχυτών είναι:

- **Οπτικός Ενισχυτής Ημιαγωγού - Semiconductor Optical Amplifiers (SOA)**
- **Ενισχυτής Ίνας με Πρόσμειξη Ερβίου - Erbium Doped Fiber Amplifiers – EDFA**
- **Οπτικός Ενισχυτής Raman**

Οι οπτικοί ενισχυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με την λειτουργία που έχουν να επιτελέσουν. Ένας οπτικός ενισχυτής μπορεί να ενισχύσει ένα οπτικό σήμα στην αρχή της ίνας γραμμής – *booster* ή *post amplifier* σε απόσταση αρκετά μακριά από τον *μεταδότη* – *line amplifier* και λίγο πριν την έξοδο του οπτικού σήματος από την ίνα γραμμής – *pre amplifier*.



Ο booster ουσιαστικά είναι ενισχυτής οπτικής ισχύος και ουσιαστικά απαλλάσσει τον σχεδιαστή από την επιλογή Laser με υψηλή οπτική ισχύς. Ο line amplifier προσδίδει στο οπτικό σήμα μια ποσότητα ισχύος από εκείνη που χάθηκε λόγω απωλειών. Προφανώς ο ενισχυτής γραμμής θα πρέπει να ενισχύει ομοιόμορφα όλα τα μήκη κύματος σε δίκτυα WDM. Συνήθως σε υπερατλαντικές ζεύξεις ανά 50km και μέχρι 100km θα πρέπει να παρεμβληθεί ένας ενισχυτής γραμμής. Ο pre amplifier ουσιαστικά καλείται να ενισχύσει ένα οπτικό σήμα με χαμηλή ισχύς και θα πρέπει να παρουσιάζει υψηλό κέρδος, χαμηλά επίπεδα θορύβου και υψηλή ευαισθησία.



Εικόνα 4.42. Σημεία τοποθέτησης οπτικού ενισχυτή .

Οπτικός Ενισχυτής Ημιαγωγού (SOA)

Οι SOA ενισχυτές χρησιμοποιούν φακούς σύζευξης τόσο πριν όσο και μετά την ενίσχυση του σήματος. Αυτό γίνεται γιατί η ενεργός διάμετρος την μονότροπης ίνας είναι της τάξης των nm ενώ η ενεργός περιοχή του λέιζερ είναι της τάξης των μm όπως φαίνεται από την πιο κάτω φωτογραφία. Το λέιζερ διεγείρεται από το εισερχόμενο οπτικό σήμα του οποίου τα φωτόνια χτυπούν την ενεργή περιοχή του λέιζερ αλλά και με την πρόσθετη διέγερση από το ρεύμα εισόδου του λέιζερ το οπτικό σήμα ενισχύεται και εξάγεται από τον SOA και με την βοήθεια φακού σύζευξης οδηγείται στην ίνα γραμμής.

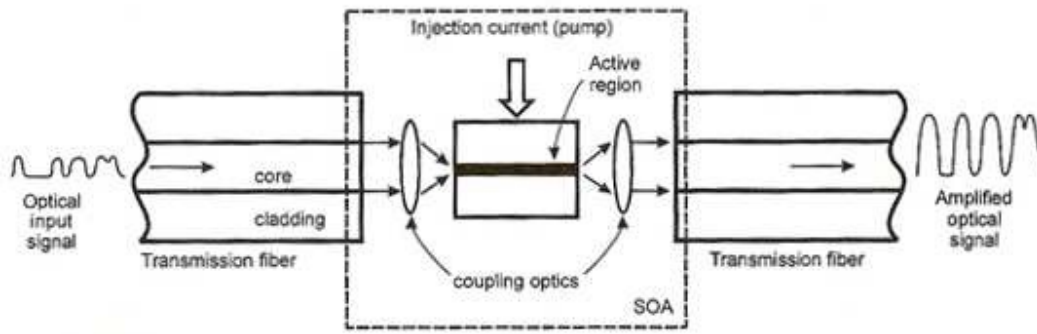
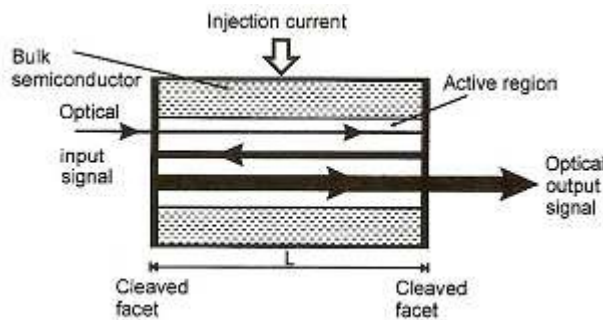


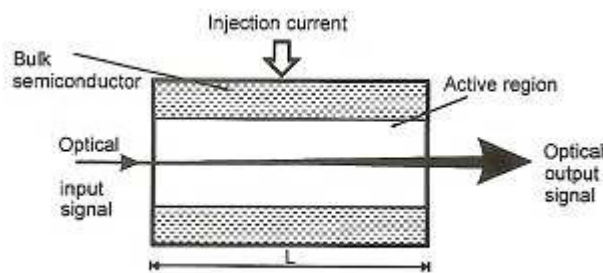
Figure Semiconductor optical amplifier (SOA).

Εικόνα 4.43. Οπτικός Ενισχυτής Ημιαγωγού (SOA)

Οι δύο βασικές κατηγορίες των ενισχυτών SOA είναι ο Fabry – Perot amplifier (FPA) και ο οδηγούμενος κύματος ενισχυτής – TWA. Ο FPA είναι της ίδιας λογικής με το FP laser. Το εισερχόμενο οπτικό σήμα ενισχύεται μέσω διαδοχικών ανακλάσεων με την βοήθεια ειδικών επίπεδων κρυστάλλων δημιουργούνται πολλά περάσματα ή διαδρομές του οπτικού σήματος εντός του laser μέχρι όπου εξέλθει από αυτό. Ο ενισχυτής TWA είναι ενός μόνο περάσματος από την ενεργός περιοχή του λείζερ.



Εικόνα 4.44. Οπτικός ενισχυτής SOA – FPA.



Εικόνα 4.45. Οπτικός ενισχυτής SOA – TWA.

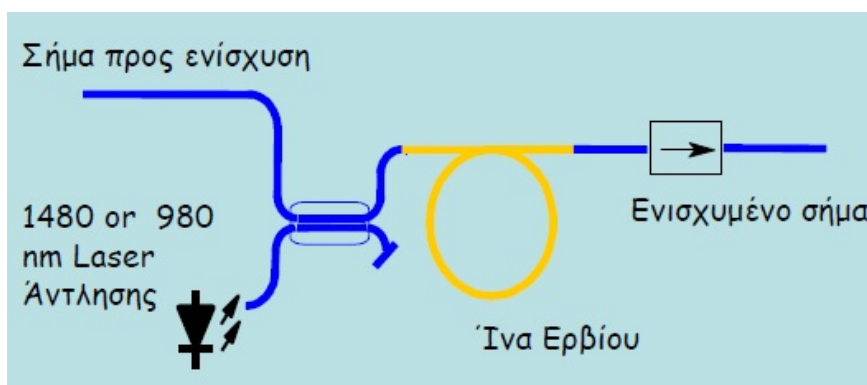


Ενισχυτής Ίνας με Πρόσμειξη Ερβίου - EDFA

Πριν την έλευση των οπτικών ενισχυτών με πρόσμιξη Ερβίου – Erbium Doped Fiber Amplifier – E.D.F.A. δεν υπήρχε αμιγώς οπτικός ενισχυτής με πρακτική χρησιμότητα. Η αναγέννηση των οπτικών σημάτων γινόταν με ηλεκτρονικά μέσα προκειμένου να αντισταθμιστούν οι απώλειες. Ο οπτικός ενισχυτής κατέστησε δυνατή την ενίσχυση όλων των μηκών κύματος ταυτόχρονα και χωρίς μετατροπές από το οπτικό στη ηλεκτρικό πεδίο. Εκτός από το να χρησιμοποιούνται σε γραμμές επικοινωνίας, οι οπτικοί ενισχυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την αύξηση της ισχύος του σήματος μετά την πολύπλεξη ή πριν την αποπολύπλεξη (θα αναφερθούμε λεπτομερώς σε άλλο κεφάλαιο) εκεί όπου υπάρχουν πηγές εξασθένησης σήματος.

Επειδή τα συστήματα D.W.D.M. (πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος) χειρίζονται τα δεδομένα στο οπτικό και στο ηλεκτρικό πεδίο, είναι ιδιαίτερα σημαντική για τις εφαρμογές η άμβλυνση των ανεπιθύμητων παρενεργειών που προκύπτουν από τα φαινόμενα διασποράς και της εξασθένησης. Οι ενισχυτές ίνας με πρόσμιξη Ερβίου επιλύουν αυτά τα προβλήματα.

Οι συσκευές EDFA είναι οπτικές ίνες κατασκευασμένες από διοξείδιο του πυριτίου με προσμίξεις Ερβίου, το οποίο είναι ένα σπάνιο στοιχείο με κατάλληλα ενεργειακά επίπεδα στην ατομική του δομή ώστε να ενισχύει στην περιοχή των 1550 nm. Με χρήση ενός λέιζερ άντλησης, που λειτουργεί στα 980 nm ή στα 1480 nm ή και στα δύο μήκη κύματος αλλά όχι στη περιοχή των μηκών κύματος που προορίζεται να ενισχύσει, εισάγεται επιπλέον ενέργεια στην ίνα με τις προσμίξεις.

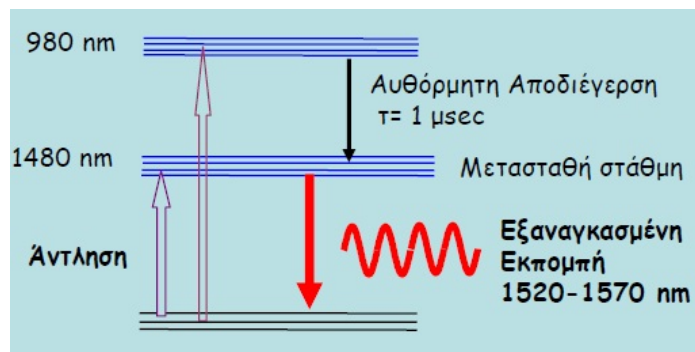


Εικόνα 4.46. Ενισχυτής ίνας με προσμίξεις Ερβίου.



Όταν ένα αδύναμο σήμα στη περιοχή των 1310 ή των 1550 nm εισέρχεται στην ίνα, το φως διεγείρει τα άτομα του Ερβίου τα οποία απελευθερώνουν την ενέργεια τους με τη μορφή επιπλέον φωτός στη περιοχή των 1310 ή των 1550 nm αντίστοιχα. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται κατά τη διέλευση του φωτός από την ίνα και γίνεται προοδευτικά πιο έντονη.

Ένας ενισχυτής EDFA αποτελείται από αρκετά μέτρα ίνας από διοξείδιο του πυριτίου στα οποία έχουν εισαχθεί ιόντα Ερβίου. Όταν τα ιόντα του Ερβίου διεγείρονται και μετατοπισθούν σε μια σταθερή ενεργειακή κατάσταση γίνεται αναστροφή πληθυσμού η οποία μετατρέπει το μέσο σε ενεργό μέσο ενίσχυσης. Τώρα, ο ενισχυτής μπορεί να δεχτεί παράλληλα οπτικά σήματα σε διάφορα μήκη κύματος και να τα ενισχύσει όλα ταυτόχρονα ανεξάρτητα από τους επιμέρους ρυθμούς μετάδοσης, τα είδη διαμόρφωσης και τα επίπεδα ισχύος.



Εικόνα 4.47. Ιόντα Ερβίου σε ενεργειακή στάθμη.

Η τεχνολογία ενισχυτών EDFA έχει τη δυνατότητα να συμβαδίσει με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, τις μεγάλες αποστάσεις και τους υψηλούς φόρτους που χαρακτηρίζουν τα συστήματα *DWDM* (*Πυκνή Πολυπλεξία με Διαίρεση μήκους Κύματος*) και για τους λόγους αυτούς θεωρείται τεχνολογία αιχμής. Παράλληλα, η τεχνολογία αυτή έχει αποτελέσει την κινητήρια δύναμη στην ανάπτυξη και άλλων συσκευών και τεχνολογιών. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυθόρμητες εκπομπές στο εσωτερικό των ενισχυτών EDFA προσθέτουν θόρυβο στο σήμα.



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:** 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.
- **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.
- **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.

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^{[3][4][6][14]}.



Κεφάλαιο 5^ο

ΓΕΝΙΚΑ

Τα οπτικά δίκτυα δείχνουν να είναι η μοναδική λύση στο πρόβλημα της διαρκώς αυξανόμενης ανάγκης για ευρυζωνικότητα. Η ιδιαιτερότητα των οπτικών ινών είναι το τεράστιο εύρος συχνοτήτων που μπορούν να κυματοδηγηθούν και μάλιστα με μικρές απώλειες ισχύος και παραμορφώσεις του σήματος λόγω διασποράς ή μη γραμμικών φαινομένων σε σχέση με άλλους κυματοδηγούς. Ακριβώς επειδή το οπτικό σήμα είναι υψηλής συχνότητας (τάξεως THz) η χωρητικότητα μιας ίνας μπορεί να φτάσει τιμές της τάξεως των Tbps.

Φυσικά, η δημιουργία ενός ηλεκτρικού σήματος με τόσο υψηλή συχνότητα είναι άχρηστο διότι δεν υπάρχουν επεξεργαστές που να μπορούσαν να το διαβάσουν αφού τα ρολόγια των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μπορούν να φτάσουν ταχύτητες μόλις μερικών GHz, διότι σε υψηλότερες συχνότητες η απαγωγή θερμότητας δεν είναι αρκετή με αποτέλεσμα τα τρανζίστορ να περνούν σε κατάσταση θερμικής φυγής και να μην μπορούν να λειτουργήσουν.

Για τη λύση αυτού του προβλήματος δημιουργήθηκαν οι τεχνολογίες διαίρεσης χρόνου και μήκους κύματος γνωστές διεθνώς ως time division multiplexing (TDM) και wavelength division multiplexing (WDM). Το δεύτερο δεν είναι παρά η γνωστή από τα ασύρματα και το χαλκό διαίρεση συχνότητας ή frequency division multiplexing (FDM). Να σημειωθεί ότι έχουν αναπτυχθεί και άλλες τεχνικές πολύπλεξης όπως η πολυπλεξία τρόπων πόλωσης (PM), η πολυπλεξία διαίρεσης κώδικα (OCDM) όπως και η πολυπλεξία τρόπων διάδοσης με τις οποίες όμως δεν θα ασχοληθούμε εκτενώς.



ΕΙΔΗ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑΣ

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, υπάρχουν αρκετά είδη πολυπλεξίας που μπορούν να δώσουν λύση στα προβλήματα των οπτικών συστημάτων αλλά τα βασικότερα και πιο «χρήσιμα» είναι τα παρακάτω:

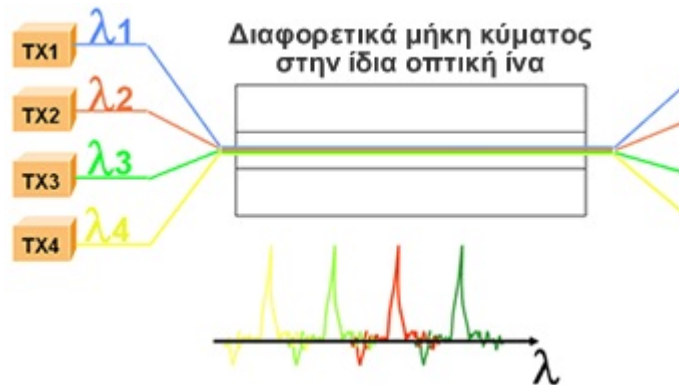
- Πολυπλεξία με Διαίρεση μήκους Κύματος (WDM)
- Πολυπλεξία με Διαίρεση Χρόνου (TDM)
- Πολυπλεξία με Διαίρεση Συχνότητας (FDM)

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 μεταφέρει διαφορετικά δεδομένα.

Τα παραπάνω φαίνονται πολύ παραστατικά στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 5.1. Πολυπλεξία 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** (την οποία θα αναλύσουμε σε άλλο κεφάλαιο λεπτομερώς), 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.

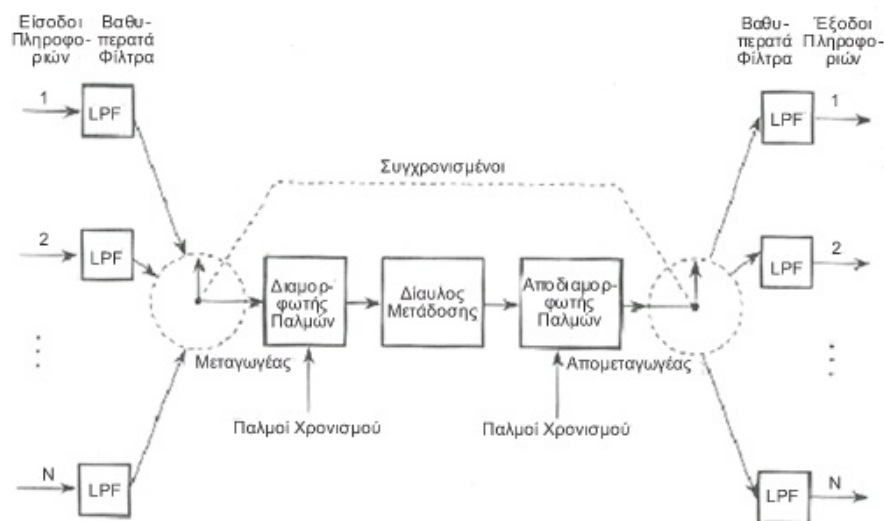
Το προφανέστερο πλεονέκτημα της τεχνολογίας WDM εντοπίζεται στη δυνατότητά της να παρέχει τεράστια αύξηση (πρακτικά απεριόριστη) της χωρητικότητας μετάδοσης. Άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα της WDM συνοψίζονται στα παρακάτω:

- **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 ταχύτατη, 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.



Πολυπλεξία με Διαίρεση Χρόνου (TDM)

Η πολυπλεξία 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 ακολουθεί:



Εικόνα 5.2. 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:



- 1) 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
- 2) 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.

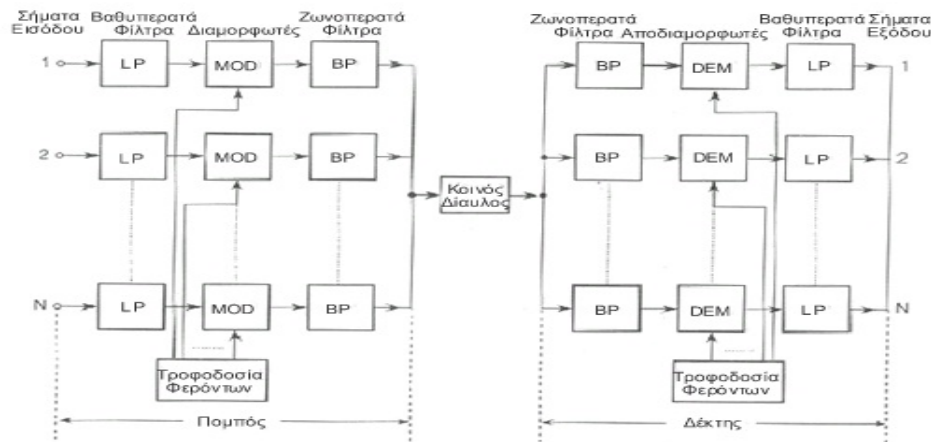
Είναι φανερό ότι η χρήση της πολυπλεξίας με διαίρεση χρόνου αυξάνει σημαντικά το εύρος ζώνης, επειδή η διάταξη πρέπει να διαχειριστεί N δείγματα που προέρχονται από N ανεξάρτητες πηγές πληροφορίας σε χρονική περίοδο ίση με το διάστημα δειγματοληψίας.

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 περιγράφουμε παρακάτω) αποτελούν τις δύο βασικές μορφές πολυπλεξίας που χρησιμοποιούνται στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα που βασίζονται στην μεταγωγή κυκλώματος.

Πολυπλεξία με Διαίρεση Συχνότητας (FDM)

Η τεχνική διαχωρισμού των σημάτων στη συχνότητα αναφέρεται σαν *Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (Frequency Division Multiplexing - FDM)*. Η αρχή της FDM απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Εικόνα 5.3. 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 τα αριστερά^{[3][4][13][14][16]}.



Κεφάλαιο 6^ο

Η ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΟΥ WDM

Την δεκαετία του 1980, μία επανάσταση άρχισε στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, που προκλήθηκε από την χρήση μίας σχετικά καινούργιας τεχνολογίας, των καλωδίων από οπτικές ίνες. Από τότε, η τρομερή μείωση κόστους και η αυξημένη ποιότητα των δικτύων, οδήγησε σε τεράστια πρόοδο στην τεχνολογία που απαιτείται για τα οπτικά δίκτυα, τα οφέλη της οποίας μόλις τώρα αρχίζουν να φαίνονται.

Τα δίκτυα τηλεπικοινωνιών, έχουν εξελιχθεί πάρα πολύ στον σχεδόν ένα αιώνα που υπάρχουν. Τα δίκτυα που κάποτε προσέφεραν βασικές τηλεφωνικές υπηρεσίες, τώρα είναι σε θέση να μεταδίδουν το ισοδύναμο μερικών χιλιάδων εγκυκλοπαιδειών ανά δευτερόλεπτο.

Σε αυτή την πρόοδο τους, τα ψηφιακά δίκτυα εξελίχθηκαν σε τρία θεμελιώδη στάδια. Στα ασύγχρονα, τα σύγχρονα και τα οπτικά.

Αν θελήσουμε να ταξινομήσουμε τα δίκτυα κορμού Ευρωζωνικών Δικτύων θα μπορούσαμε να πούμε ότι τα δίκτυα N-ISDN ανήκουν στην πρώτη γενιά, τα B-ISDN ανήκουν στη δεύτερη ενώ το οπτικό δίκτυο ανήκει στην τρίτη γενιά. Αν και τα δίκτυα αυτά αποτελούσαν αντικείμενο έρευνας από τη δεκαετία του 80 η χρησιμοποίησή τους σε πραγματικές ινοοπτικές ζεύξεις και τηλεπικοινωνιακά δίκτυα άρχισε στις αρχές της δεκαετίας του 90. Παρότι, ως υλοποιήσιμη λύση, η τεχνολογία WDM (μια τεχνολογία οπτικών δικτύων η οποία χρησιμοποιείται για να αυξηθεί η χωρητικότητα του μέσου μεταφοράς των δεδομένων) εμφανίστηκε πριν λιγότερο από 10 χρόνια, η πρόοδος που σημειώθηκε στις επιδόσεις των συστημάτων WDM, ήταν ραγδαία. Ζεύξεις WDM εγκαθίστανται συνεχώς για τον εμπλουτισμό τόσο των εθνικών όσο και των διεθνών ινοοπτικών δικτύων.

Οι λειτουργίες της πολύπλεξης και της αποπολύπλεξης των καναλιών γίνονται στο οπτικό πεδίο χωρίς να είναι αναγκαίο να γίνουν μετατροπές από το οπτικό σε ηλεκτρικό και αντίστροφα. Όπως είναι προφανές, η τεχνική WDM επιτρέπει την υλοποίηση αμιγώς οπτικών δικτύων με ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των πολλών gigabits το δευτερόλεπτο χρησιμοποιώντας οπτική τεχνολογία που είναι αυτή στη στιγμή διαθέσιμη.

Τα πλεονεκτήματα των οπτικών δικτύων είναι τα παρακάτω:

- *Μεγαλύτερο εύρος ζώνης*
- *Ευκολία στην εγκατάσταση και τη συντήρηση*
- *Καλύτερη ποιότητα σήματος*
- *Καλύτερα χαρακτηριστικά ασφάλειας*



Τα οπτικά δίκτυα βρίσκουν πολλές εφαρμογές, στις οποίες συμπεριλαμβάνονται τα τοπικά και μητροπολιτικά δίκτυα και τα δίκτυα υψηλών ταχυτήτων. Ανάμεσα στις κύριες εφαρμογές των οπτικών δικτύων είναι οι παρακάτω:

- *Ευρυζωνικές οικιακές εφαρμογές*
- *Ανάκτηση και διανομή ιατρικών εικόνων*
- *Internet και Παγκόσμιος ιστός*
- *Πολυμεσικές διασκέψεις και εκπαίδευση από απόσταση*
- *Γραφικά και οπτικές αναπαραστάσεις*

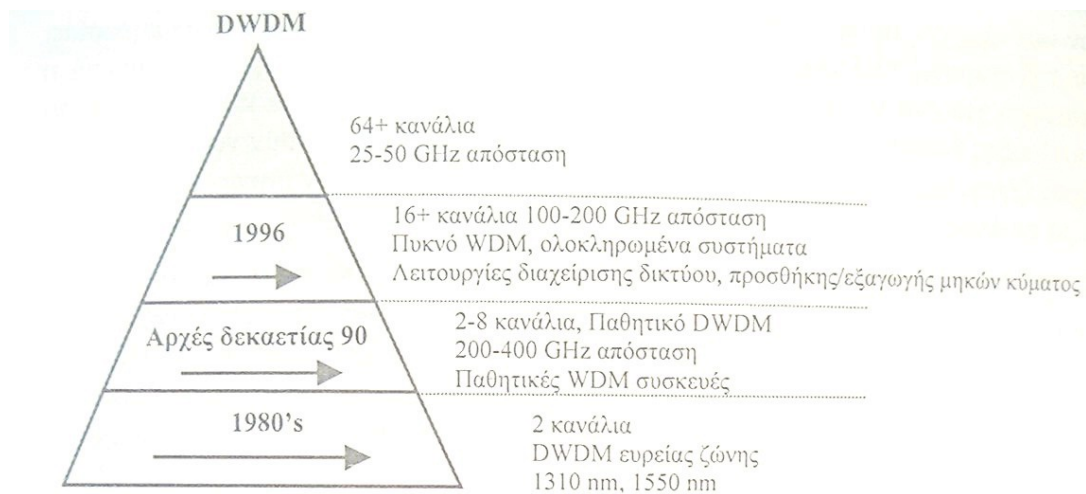
Όταν εμφανίστηκε αρχικά η τεχνολογία WDM, ήταν εφικτή μόνο η παράλληλη μετάδοση δεδομένων σε δυο μήκη κύματος μόνο με μεγάλο διάστημα μεταξύ τους και για σχετικά μικρές αποστάσεις διάδοσης του σήματος. Για να ξεπεραστούν αυτοί οι περιορισμοί, χρειάζονται βελτιώσεις στις υπάρχουσες τεχνολογίες αλλά και εφεύρεση νέων τεχνολογιών. Οι εξελίξεις στις τεχνολογίες των οπτικών φίλτρων αλλά και των κατευθυνόμενων λέιζερ με στενή ζώνη συχνοτήτων έκαναν εφικτή τη πολύπλεξη περισσότερων από δυο μηκών κύματος ανά ίνα και στην συνέχεια την τεχνολογία της πυκνής πολύπλεξης με διαίρεση μήκους κύματος (DWDM). Η ανακάλυψη του οπτικού ενισχυτή σταθερής απολαβής ο οποίος συνδέεται ακριβώς πριν την ίνα εκπομπής για να ενισχύσει το οπτικό σήμα, οδήγησε στην αύξηση των διανυόμενων αποστάσεων και συνεπώς στην αύξηση της βιωσιμότητας του συστήματος DWDM.

Άλλες τεχνολογίες που συνέβαλαν στην εξέλιξη της τεχνικής DWDM είναι οι βελτιωμένες οπτικές ίνες με χαμηλότερες απώλειες και καλύτερα χαρακτηριστικά μετάδοσης και οι συσκευές όπως τα *φράγματα περίθλασης Bragg* (αναλύονται παρακάτω) που χρησιμοποιούνται στους οπτικούς πολυπλέκτες προσθήκης/εξαγωγής μηκών κύματος.

Η εξέλιξη των τεχνολογιών και των εφαρμογών του διαδικτύου και του παγκόσμιου ιστού που συντελείται τα τελευταία χρόνια έχει αυξήσει δραματικά τις απαιτήσεις για εύρος ζώνης από το δίκτυο. Το γεγονός αυτό έχει δώσει ώθηση στην έρευνα στο πεδίο του WDM η οποία έχει επιφέρει σημαντική πρόοδο. Τα αμιγώς οπτικά συστήματα με τεχνολογία WDM και δρομολόγηση κύματος αποτελούν μια εφαρμόσιμη λύση για τα δίκτυα ευρείας και μητροπολιτικής περιοχής του μέλλοντος καθώς και για το διαδίκτυο της επόμενης γενιάς. Τα συγκριτικά πλεονεκτήματα των δικτύων δρομολόγησης μήκους κύματος σε σχέση με αυτά που χρησιμοποιούν ψηφιακούς πίνακες διασύνδεσης (digital cross connects) είναι η διαφάνεια ως προς το πρωτόκολλο και η απλούστερη διαχείριση και επεξεργασία.



Η δεύτερη γενιά συστημάτων WDM εμφανίστηκε στις αρχές της δεκαετίας του 90 και αποκαλείται συχνά WDM στενής ζώνης, αφού χρησιμοποιούνταν από 2 έως 8 κανάλια. Αυτά τα κανάλια απείχαν μεταξύ τους 400GHz και βρισκόταν στο παράθυρο μετάδοσης των 1550 nm. Στα μέσα της δεκαετίας του 90 εμφανίστηκαν συστήματα DWDM με 16 έως 40 κανάλια που απείχαν από 100 μέχρι 200GHz. Μέχρι το τέλος της δεκαετίας του 90, η εξέλιξη των συστημάτων DWDM έκανε εφικτή την πολύπλεξη 64 έως 160 καναλιών με μικρές μεταξύ τους αποστάσεις (διαστήματα των 50 ή και των 25 GHz).



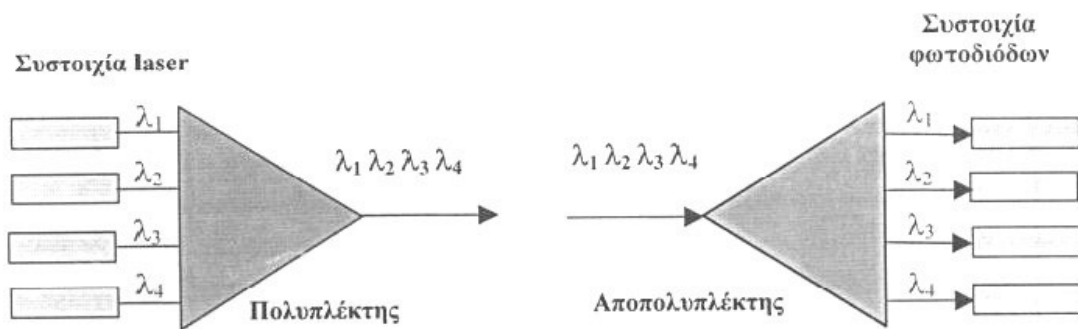
Εικόνα 6.1. Η εξέλιξη των συστημάτων WDM.

Όπως φαίνεται στο σχήμα η αύξηση του πλήθους των μηκών κύματος συνοδεύεται από μείωση των αποστάσεων μεταξύ των μηκών κύματος και αύξηση της πυκνότητάς τους. Επιπλέον υπάρχει βελτίωση στην ευελιξία της διευθέτησης του συστήματος μέσω λειτουργιών προσθήκης/εξαγωγής μηκών κύματος και δυνατοτήτων διαχείρισης.

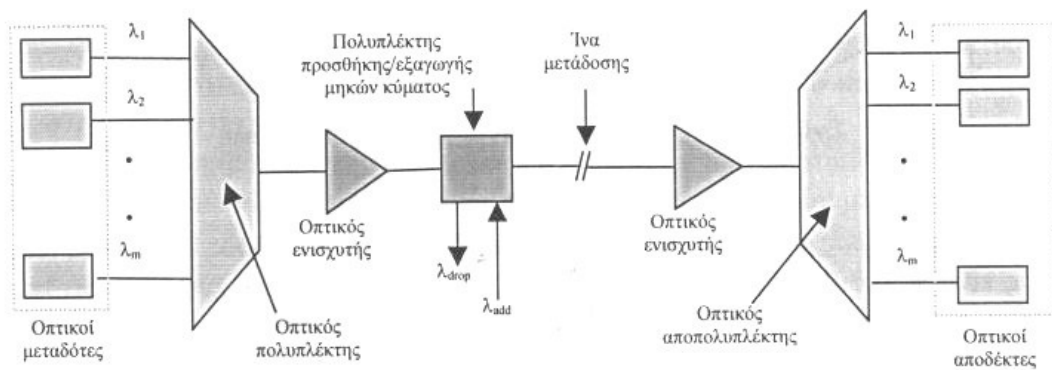
Τα συστατικά στοιχεία ενός οπτικού δικτύου διακρίνονται σε στοιχεία μεταγωγής και σε στοιχεία που δε σχετίζονται με τη μεταγωγή. Τα στοιχεία μεταγωγής είναι προγραμματιζόμενα και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται στη δικτύωση ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία χρησιμοποιούνται σαν οπτικοί σύνδεσμοι. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα λέιζερ, οι δίοδοι εκπομπής φωτός, οι φωτοδίοδοι, τα οπτικά φίλτρα, οι παθητικοί άξενκτες αστέρα, οι πολυπλέκτες/αποπολυπλέκτες WDM, οι δρομολογητές μήκους κύματος, οι συνδυαστές/διαχωριστές, οι μετατροπείς μήκους κύματος και οι κατευθυντικοί συζεύκτες.



Εικόνα 6.2. Βασική δομή δικτύου με μεταδότη και αποδέκτη.



Εικόνα 6.3. Διάγραμμα δομής ενός συστήματος μετάδοσης WDM.



Εικόνα 6.4. Λεπτομερές διάγραμμα δομής ενός συστήματος WDM.

Σύμφωνα με τη μελέτη της αμερικανικής συμβουλευτικής εταιρείας KMI, η αξία των συστημάτων WDM που ήταν εγκαταστημένα ανά τον κόσμο, το 1998, ανερχόταν περίπου σε 2.160.000.000 Ευρώ με εκτιμώμενη αύξηση 28% ανά έτος μέχρι το 2004. Από την αξία αυτή, ποσοστό 61% αφορούσε συστήματα εγκαταστημένα στις ΗΠΑ μέχρι το 2004^{[14][23]}.



ΒΑΣΙΚΗ ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ WDM

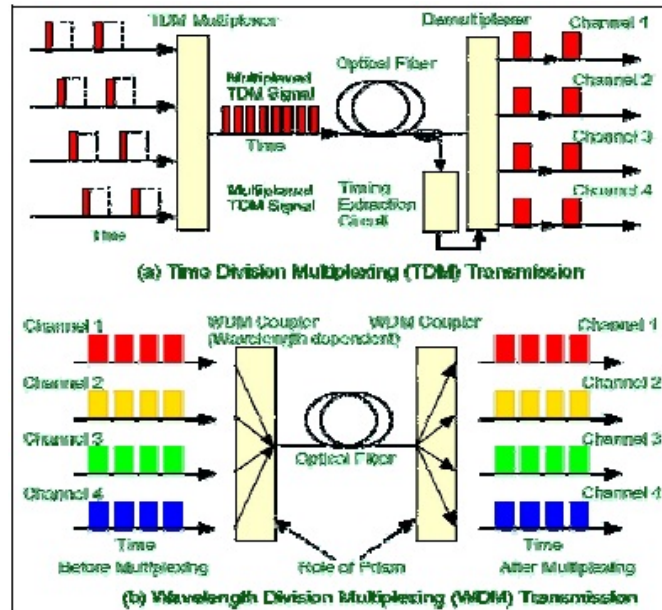
Αρχή Λειτουργίας WDM

Η τεχνική της πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος WDM θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική στην προσπάθεια αξιοποίησης του τεράστιου εύρους ζώνης που διαθέτει ένα σύστημα μονότροπης οπτικής ίνας. Το συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης σε κανάλι οπτικής ίνας ισούται με 30 THz άρα 30 Terabits/sec. Με την τεχνική του WDM είναι εφικτό συνδυασμός πολλών μηκών κύματος στην ίδια ίνα. Η κατασκευή οπτικών ενισχυτών με μεγάλο εύρος επέτρεψε τη χρήση πολυπλεκτών με διαίρεση μήκους κύματος την πολύπλεξη πολλών μηκών κύματος στην ίδια ίνα. Η τεχνική του WDM βελτιώνει τις δυνατότητες του οπτικού συστήματος.

Τα πολύπλοκα ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν για να αυξηθεί ο ρυθμός και η αποτελεσματικότητα της μετάδοσης δεδομένων καθιστούν επιτακτική την εύρεση τεχνικών με καλή σχέση κόστους απόδοσης. Μια λύση, η οποία όμως δεν οδηγεί απαραίτητα στην αποτελεσματικότερη αξιοποίηση εύρους ζώνης είναι η εγκατάσταση επιπλέον καλωδίων οπτικής ίνας. Μία άλλη λύση είναι η χρήση της πολυπλεξίας με διαίρεση χρόνου – Time Division Multiplexing η οποία αυξάνει τη χωρητικότητα της οπτικής ίνας διαιρώντας το χρόνο σε μικρά τμήματα έτσι ώστε να είναι εφικτή η μετάδοση περισσότερων δυαδικών ψηφίων ανά λεπτό. Η λύση αυτή μπορεί να είναι λογική, δεν είναι ωστόσο αποτελεσματική. Η πολύπλεξη με διαίρεση μήκους κύματος – wavelength division multiplexing είναι μια πολύ καλύτερη λύση διότι αυξάνει τη χωρητικότητα της ίνας αναθέτοντας στα εισερχόμενα οπτικά σήματα ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος λ (που ανήκει σε δεδομένη περιοχή) και στη συνέχεια πολυπλέκει τα σήματα που προκύπτουν σε μία ίνα. Τα σήματα που πολυπλέκονται με την τεχνική του WDM μπορούν να ενισχυθούν ταυτόχρονα και να μεταφερθούν σε μεγάλες αποστάσεις, αυξάνοντας έτσι τη χωρητικότητα και την αποδοτικότητα.

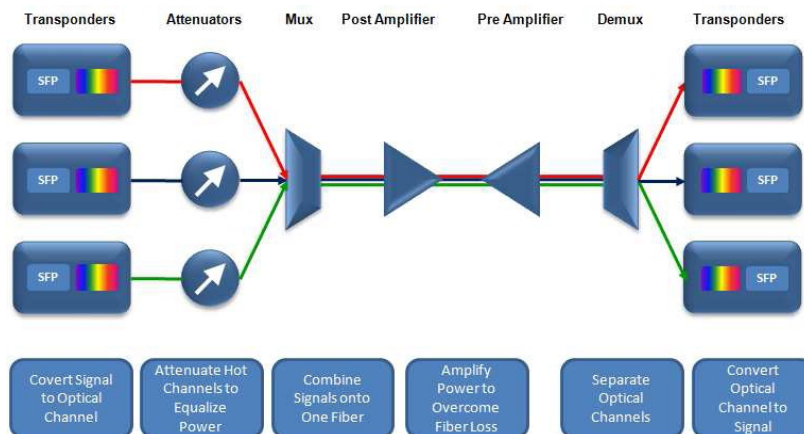
Η ανωτερότητα του WDM σε σχέση με το TDM μπορεί να αναδειχθεί από μια αναλογία στην οποία μια ίνα θεωρείται σαν μία λεωφόρος με πολλές λωρίδες κυκλοφορίας. Τα παραδοσιακά συστήματα TDM αξιοποιούν μόνο μία λωρίδα και αυξάνουν τη χωρητικότητα αυξάνοντας την ταχύτητα κίνησης σε αυτή τη λωρίδα. Η χρήση του WDM είναι το ανάλογο της αξιοποίησης των επιπλέον λωρίδων κυκλοφορίας της λεωφόρου. Επίσης, σε ένα οπτικό δίκτυο, η λεωφόρος δεν έχει επίγνωση του τύπου των οχημάτων που ταξιδεύουν πάνω της.

Συνεπώς, οι ροές δεδομένων όλων των τύπων, όπως ATM – Asynchronous transfer mode, SONET – Synchronous Optical Network και IP – Internet Protocol , μεταφέρονται αποτελεσματικά με WDM.



Εικόνα 6.5. Διαφορές WDM και TDM Πολυπλέκτη.

Στην τεχνική του WDM, οι διακριτές κυματομορφές σχηματίζουν ένα σύνολο ορθογώνιων φερόντων τα οποία μπορούν να διαχωριστούν, να δρομολογηθούν να μεταχθούν χωρίς να υπάρξουν παρεμβολές μεταξύ τους. Αυτό φυσικά ισχύει εφόσον η οπτική ισχύς παραμένει σε αρκετά χαμηλά επίπεδα τα οποία δεν επιτρέπουν την εμφάνιση μη γραμμικών φαινομένων όπως η σκέδαση Brillouin και η μίξη τεσσάρων κυμάτων – four wave mixing FWM . Πολλές ακτίνες φωτός σε διαφορετικά μήκη κύματος οι οποίες μεταφέρουν διαφορετικά διαμορφωμένα δεδομένα μπορούν να ταξιδέψουν παράλληλα μέσα σε μια ίνα. Η πολύπλεξη με διαίρεση μήκους κύματος μπορεί να θεωρηθεί ως ένα είδος πολυπλεξίας συχνότητας FDM – Frequency Division Multiplexing. Στο παρακάτω σχήμα δίνεται μια οπτική περιγραφή της WDM.



Εικόνα 6.6. WDM πολυπλέκτης και ενισχυτικές διατάξεις.



Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση ενός συστήματος WDM είναι:

- η συνολική **διασπορά** της οπτικής ίνας,
- η **έλλειψη ομοιομορφίας** στην απολαβή των οπτικών ενισχυτών EDFA στην επιθυμητή ζώνη μηκών κύματος,
- τα **φαινόμενα σκέδασης**,
- τα **μη γραμμικά φαινόμενα** και
- οι **αντανακλάσεις** από συγκολλήσεις – splices και συνδετήρες – connectors.

Στις πρώτες εφαρμογές WDM, η απόσταση μεταξύ των καναλιών ήταν πολύ μεγάλη. Τα πρώτα συστήματα χρησιμοποιούσαν μόνο δύο μήκη κύματος, στα 1310 και 1550 nm. Η ανακάλυψη των ενισχυτών EDFA επέτρεψε την ανάπτυξη τεχνικών μείωσης των αποστάσεων μεταξύ των μηκών κύματος. Οι συνήθεις αποστάσεις στα συστήματα WDM είναι 1000, 400, 200, 100, και 50 GHz ή 8, 3.2, 1.6, 0.8, και 0.4 nm στη περιοχή των 1550 nm. Τα συστήματα WDM με αποστάσεις μικρότερες ή ίσες των 200 GHz αποκαλούνται συχνά συστήματα πυκνής πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος – Dense WDM.

Τεχνολογία DWDM

Τα συστήματα WDM μπορούν να μεταδώσουν μέχρι 24 κανάλια αλλά στο μέλλον όλα δείχνουν ότι η χωρητικότητα θα αυξηθεί στα 128 και παραπάνω μέσα από μια ίνα. Σήμερα η τεχνική DWDM (Dense Wave Division Multiplexing = Πυκνή Πολυπλεξία στο πεδίο του Μήκους Κύματος) έχει ενταχθεί στην τεχνική WDM. Τεχνικά είναι η ίδια μεθοδολογία αλλά όπως φαίνεται και από το όνομα η DWDM εμπεριέχει περισσότερα κανάλια και μεγαλύτερη χωρητικότητα σε εύρος ζώνης.

Συχνά οι δύο αυτές τεχνικές αναφέρονται σαν μια, WDM, χωρίς να διακρίνεται η ειδοποιός διαφορά. Η τεχνολογία DWDM είναι η περισσότερα υποσχόμενη τεχνολογία για μεταφορά δεδομένων μέσα από οπτικές ίνες και αποτελεί σίγουρα μονόδρομο για την υλοποίηση σχεδίων όπως το Gigabit Internet. Η τεχνολογία αυτή συνίσταται στην πολυπλεξία (multiplexing) σημάτων διαφορετικού μήκους κύματος (wavelength) και στην μετάδοσή τους μέσω μιας μόνο οπτικής ίνας. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η αύξηση του συνολικού ρυθμού μεταφοράς δεδομένων ανά οπτική ίνα, που προκύπτει από την άθροιση των ρυθμών μεταφοράς κάθε σήματος διαφορετικού μήκους κύματος.



Ενδεικτικά, αναφέρουμε ότι με τα σημερινά δεδομένα είναι δυνατή η πολυπλεξία σαράντα τέτοιων σημάτων σε μια και μόνο οπτική ίνα, κάθε ένα από τα οποία μπορεί να μεταφέρει δεδομένα με ρυθμό 10 Gb/s, κάτι που οδηγεί σε συνολικό ρυθμό μεταφοράς δεδομένων ίσο με 400 Gb/s. Σε πειραματικό, μάλιστα, επίπεδο έχουν επιτευχθεί ρυθμοί μεταφοράς δεδομένων της τάξης των Tb/s.

Στα αρχικά στάδια η τεχνολογία αυτή είχε την ονομασία WDM (wavelength division multiplexing) και ήταν δυνατόν να πολυπλεχθούν λιγότερα από σαράντα σήματα διαφορετικού μήκους κύματος. Αργότερα έγινε εφικτή η πολύπλεξη περισσότερων τέτοιων σημάτων. Η παραπάνω διαδικασία μπορεί να θεωρηθεί ως μεταφορά πληροφορίας μέσω οπτικών καναλιών (optical channels), τα οποία έχουν ένα κοινό μέσο μεταφοράς, την οπτική ίνα. Έτσι είναι δυνατή η αύξηση και η καλύτερη διαχείριση της χωρητικότητας των ήδη υπάρχοντων οπτικών ινών, χωρίς να είναι απαραίτητη η εγκατάσταση νέων (που έχει μεγάλο κόστος).

Στα DWDM συστήματα τα μήκη κύματος του φωτός βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους, συνήθως 100GHz ή περίπου 0,75nm χωριστά. Τα DWDM συστήματα, μέσω διεθνών καθορισμένων κριτηρίων, χρησιμοποιούν DFB laser επικεντρωμένα σε συγκεκριμένα μήκη κύματος και διαχωρισμένα μεταξύ τους σε 100, 200 ή 50GHz σχετισμένα στα 1,5nm, 0,75nm ή 0,38nm αντίστοιχα. Το κεντρικό μήκος κύματος μιας τυπικής DFB laser εφαρμογής κατευθύνεται με 0,08nm/°C. Σε διάταξη 100GHz μια αλλαγή της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος λειτουργίας κατά 10°C θα τοποθετούσε το μήκος κύματος του laser σε μια γειτονική μπάντα.

Σε ένα DWDM laser, το chip είναι τοποθετημένο σε ένα θερμοηλεκτρικό ψύκτη ώστε να ελέγχεται η θερμοκρασία και έτσι να ελέγχεται το μήκος του κύματος. Η τεχνολογία WDM αναφέρεται στο physical layer των δικτύων και εδραιώθηκε λόγω της βελτίωσης των φυσικών μέσων που χρησιμοποιούνται στις καλωδιώσεις. Έτσι αρχικά με την βελτίωση της τεχνολογίας των lasers και στη συνέχεια με την εμφάνιση των οπτικών ενισχυτών έγινε δυνατή η παράλληλη μετάδοση σημάτων μέσα από τις ήδη υπάρχουσες οπτικές ίνες.

Επομένως θα μπορούσε να θεωρηθεί εύκολη η μετάβαση σε αυτή την τεχνολογία. Ωστόσο, υπάρχουν παράγοντες που πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη πριν γίνει μια τέτοια αναβάθμιση όπως το κόστος και η ανταγωνιστικότητα απέναντι σε άλλες τεχνολογίες.



Τεχνολογία CWDM

Η τραχύς μήκους κύματος διαίρεση πολυπλεξία (CWDM – Coarse Wevelength Division Multiplexing) είναι μια τεχνολογία μεταφοράς πολυπρωτοκόλλων, που παρουσιάζει σημαντική ανάπτυξη στην αγορά λόγω των ιδιοτήτων χαμηλότερου κόστους και της απλότητας στον σχεδιασμό της. Η CWDM τεχνολογία αντιπροσωπεύει μια τέλεια οικονομική τεχνολογία τόσο σε πρόσβαση όσο και στην αγορά δικτύων κορμού και ειδικά σε σχετικά μικρές αποστάσεις (έως 31 μίλια).

Παραδίδει τα πολλαπλάσια μήκη κύματος μέσω μίας οπτικής ίνας σε ένα μέρος του κόστους και πολυπλοκότητας των συστημάτων DWDM. Ένας ακριβέστερος ορισμός του CWDM είναι, μια μορφή διαίρεσης και πολυπλεξίας μήκους κύματος που έχει ευρύτερα διαστήματα μεταξύ των μηκών κύματος από αυτά που χρησιμοποιούνται στο DWDM. Επίσης, αντίθετα από άλλες μορφές WDM, χρησιμοποιεί ένα πολύ ευρύτερο φωτονιακό φάσμα ζωνών από άλλα τέτοια συστήματα, τα οποία συχνά είναι περιορισμένα σε μια ή δύο ζώνες. (Μέχρι 18 μήκη κύματος μπορούν να σταλούν χρησιμοποιώντας μερικά σχέδια CWDM). Η CWDM μπορεί να χρησιμοποιηθεί πάνω από πολύτροπες και μονότροπες ίνες αν και οι αποστάσεις του σήματος είναι γενικά πιο σύντομες από το DWDM. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι διαφορές μεταξύ των τεχνολογιών CWDM, Wide-WDM και DWDM^{[3][6][14][23]}.

	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

Εικόνα 6.7. Σύγκριση μεταξύ CWDM, WWDM και DWDM.



ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ WDM

Τα βασικά δομοστοιχεία της τεχνολογίας WDM 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.
- *Οπτικοί Πολυπλέκτες/Αποπολυπλέκτες.*
- *Οπτικοί πολυπλέκτες προσθαφαίρεσης (add/drop optical multiplexers)*
- *Οπτικοί διασταυρωτήρες (optical cross-connect components).*
- *Οπτικοί Ενισχυτές.*
- *Οπτικά Φίλτρα.*
- *Δρομολογητές Μήκους Κύματος.*
- *Μετατροπείς Μήκους Κύματος.*

Όλα τα παραπάνω έχουν αναφερθεί και αναλυθεί σε αντίστοιχα κεφάλαια. Θα αναλύσουμε τη λειτουργία των οπτικών πολυπλεκτών/αποπολυπλεκτών και πιο συγκεκριμένα των πολυπλεκτών προσθαφαίρεσης, οπτικών διασταυρωτήρων και οπτικών φίλτρων μιας και είναι απαραίτητα στοιχεία στη σύνθεση ενός συστήματος WDM.

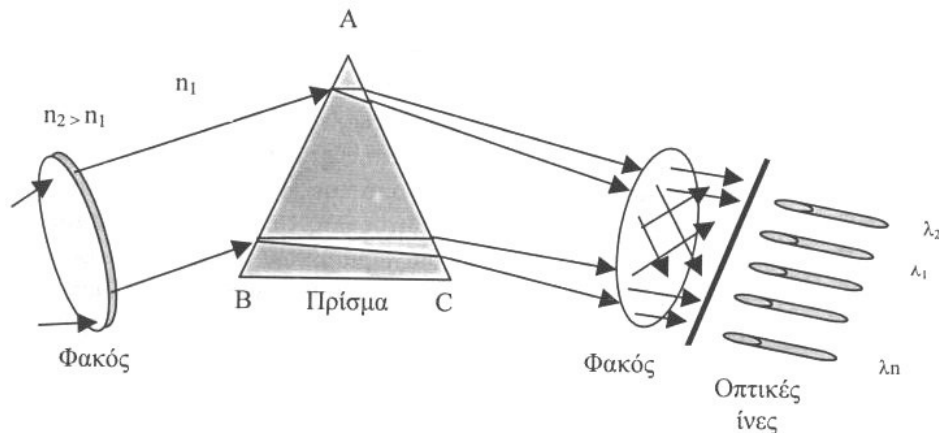


Συσκευές Πολυπλεξίας – Αποπολυπλεξίας

Οι πολυπλέκτες και αποπολυπλέκτες μπορούν να είναι είτε παθητικές είτε ενεργητικές συσκευές στο σχεδιασμό τους. Οι παθητικοί σχεδιασμοί βασίζονται σε πρίσματα, φράγματα περίθλασης ή φίλτρα. Από την άλλη οι ενεργοί σχεδιασμοί συνδυάζουν παθητικές συσκευές με μεταβλητά φίλτρα. Οι κύριες προκλήσεις στο σχεδιασμό αυτών των συσκευών είναι η ελαχιστοποίηση της συνακρόασης και η μεγιστοποίηση της διάκρισης μεταξύ των καναλιών. Το επίπεδο της συνακρόασης είναι ένα μέτρο του πόσο καλά είναι διαχωρίσιμα τα κανάλια, ενώ η διάκριση των καναλιών μετρά την ικανότητα του συστήματος να αναγνωρίζει ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος.

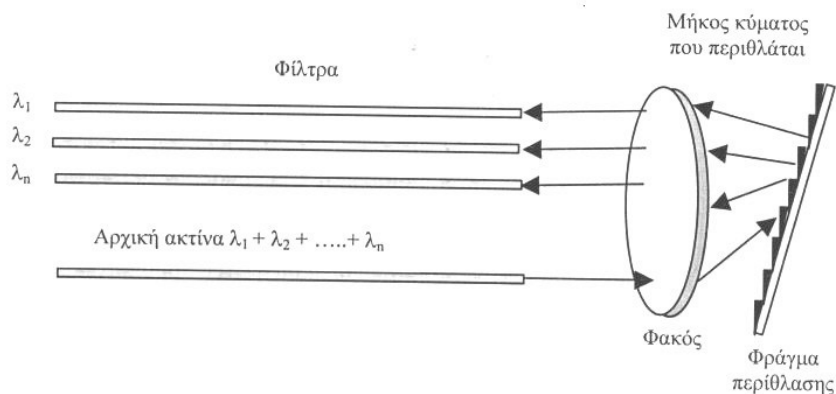
Πολύπλεξη ή αποπολύπλεξη φωτός μπορεί να γίνει σε απλή μορφή με χρήση ενός πρίσματος. Όταν μια παράλληλη ακτίνα πολυχρωματικού φωτός προσπίπτει στην επιφάνεια ενός πρίσματος, κάθε ένα από τα μήκη κύματος που περιέχει διαθλάται διαφορετικά. Αυτό ονομάζεται φαινόμενο του ουρανού τόξου. Στο φως που προκύπτει, κάθε μήκος κύματος απέχει από το επόμενο κατά μια γωνία. Με χρήση ενός φακού, ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος μπορεί να οδηγηθεί στην είσοδο μιας ίνας.

Εάν τα ίδια στοιχεία χρησιμοποιηθούν αντίστροφα, μπορεί να γίνει πολύπλεξη μηκών κύματος σε μία ίνα. Η διαδικασία αποπολύπλεξης μέσω διάθλασης σε πρίσμα εικονίζεται στην παρακάτω εικόνα.



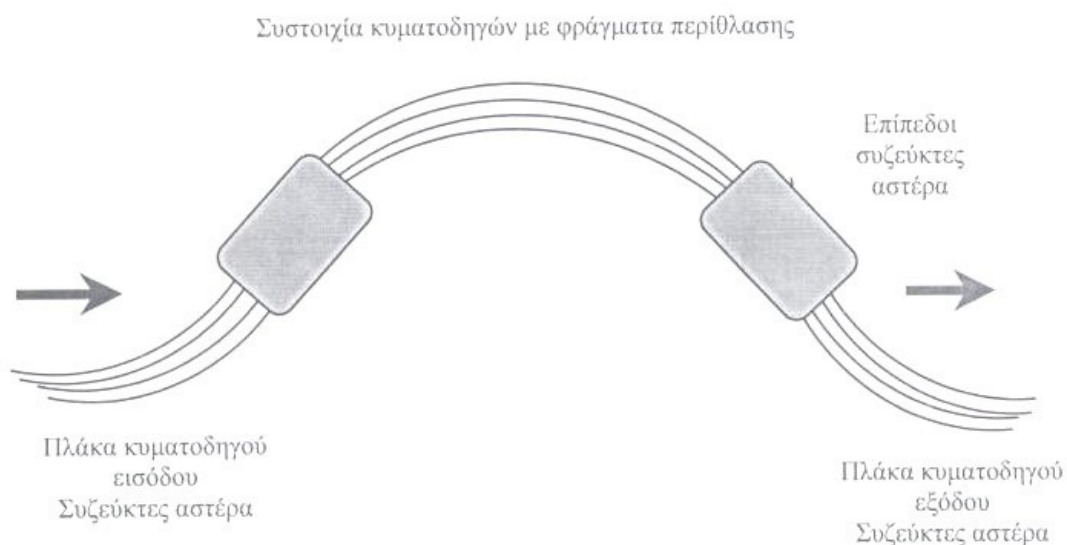
Εικόνα 6.8. Αποπολύπλεξη φωτός με διάθλαση σε πρίσμα.

Μια άλλη τεχνική πολύπλεξης βασίζεται στις αρχές της περίθλασης και της οπτικής παρεμβολής. Όταν πολυχρωματικό φως προσπίπτει σε ένα φράγμα περίθλασης, κάθε μήκος κύματος περιθλάται υπό διαφορετική γωνία και συνεπώς σε άλλο σημείο στο χώρο. Με χρήση ενός φακού κάθε μήκος κύματος μπορεί να εστιαστεί σε διαφορετική οπτική ίνα.



Εικόνα 6.9. Διαδικασία περίθλασης με χρήση φράγματος.

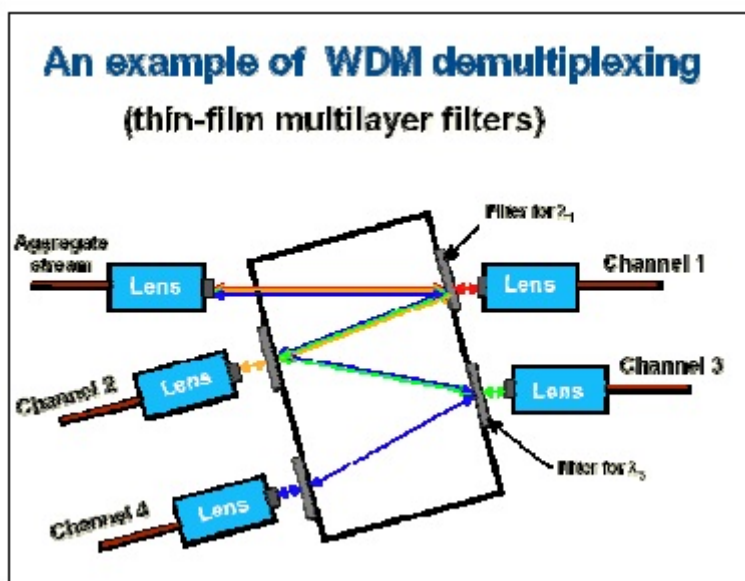
Οι συστοιχίες γραφημάτων περίθλασης (arrayed waveguide gratings-AWGs) βασίζονται επίσης στο φαινόμενο της περίθλασης. Οι συσκευές AWG οι οποίες αποκαλούνται και οπτικοί δρομολογητές κυματοδηγών ή φράγματα κυματοδηγών αποτελούνται από μια διάταξη καμπυλών κυματοδηγών στους οποίους η διαφορά στο μήκος διαδρομής μεταξύ γειτονικών καναλιών είναι σταθερή. Οι κυματοδηγοί συνδέονται με κοιλότητες στην είσοδο και την έξοδο. Όταν το φως εισέρχεται στην κοιλότητα εισόδου περιθλάται και εισέρχεται στη διάταξη των κυματοδηγών. Οι διαφορές στα μήκη των κυματοδηγών εισάγουν καθυστερήσεις φάσης στην κοιλότητα εξόδου όπου γίνεται σύζευξη με έναν πίνακα οπτικών ινών. Ως παράδειγμα η παρεμβολή μεταξύ συγκεκριμένων μηκών κύματος μεγιστοποιείται σε συγκεκριμένα σημεία τα οποία αντιστοιχούν στις πύλες εξόδου.



Εικόνα 6.10. Συστοιχία κυματοδηγών με φράγματα περίθλασης.



Μία τρίτη τεχνική πολυπλεξίας χρησιμοποιεί συσκευές με φίλτρα παρεμβολής που ονομάζονται φίλτρα λεπτού φιλμ – thin film filters ή φίλτρα παρεμβολής πολλαπλών επιπέδων – multilayer interference filters. Η αποπολύπλεξη των μηκών κύματος μπορεί να γίνει με τοποθέτηση φίλτρων που αποτελούνται από λεπτά φιλμ στην οπτική διαδρομή. Κάθε ένα από τα φίλτρα επιτρέπει τη διέλευση ενός μήκους κύματος και αντανακλά τα υπόλοιπα. Με παράταξη τέτοιων συσκευών μπορεί να γίνει αποπολύπλεξη τέτοιων μηκών κύματος.



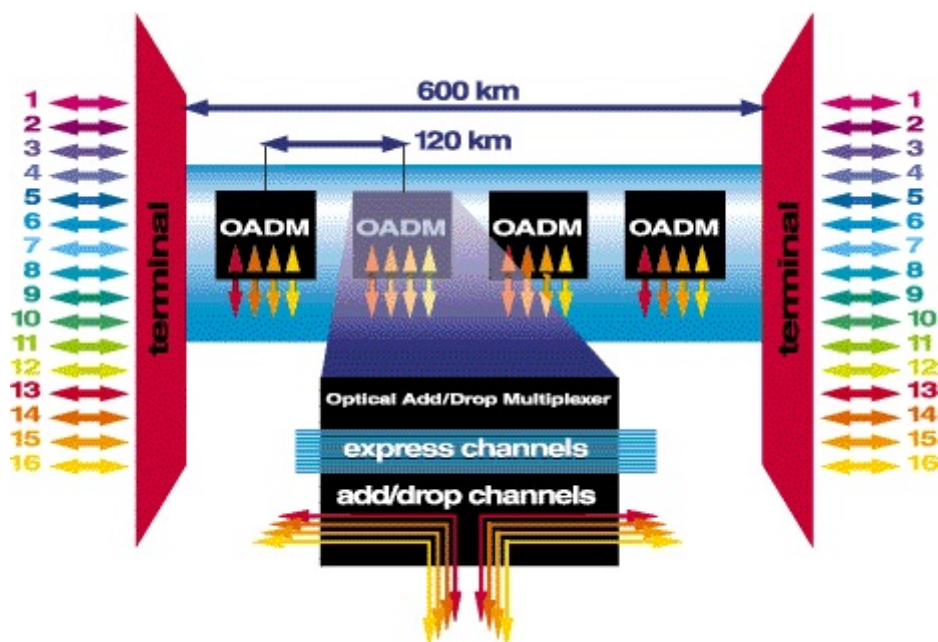
Εικόνα 6.11. Τεχνική αποπολύπλεξης με την τεχνική thin film.

Από τις τεχνικές που περιγράφηκαν παραπάνω, οι συσκευές AWG και τα φίλτρα παρεμβολής λεπτού φιλμ είναι οι πιο δημοφιλείς. Τα φίλτρα προσφέρουν σταθερότητα και απομόνωση μεταξύ των καναλιών σε λογικό κόστος αλλά έχουν υψηλές απώλειες εισαγωγής. Οι συσκευές AWG έχουν εξάρτηση από την πολικότητα, πράγμα που πρέπει να αντισταθμιστεί, ενώ έχουν ομοιόμορφη φασματική απόκριση και χαμηλές απώλειες εισαγωγής. Ένα πιθανό μειονέκτημα των AWG είναι η ευαισθησία τους στη θερμοκρασία, η οποία μπορεί να περιορίσει τη χρήση τους σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι μπορούν να σχεδιαστούν έτσι ώστε να εκτελούν λειτουργίες πολύπλεξης και αποπολύπλεξης ταυτόχρονα. Επιπλέον, οι συσκευές AWG εξυπηρετούν καλύτερα όταν ο αριθμός των καναλιών είναι μεγάλος, ενώ η χρήση φίλτρων παρεμβολής δε θεωρείται πρακτική λύση^{[13][14][23]}.



Οπτικοί Πολυπλέκτες Προσθαφαίρεσης(OADM)

Σε ένα σύστημα WDM είναι επιθυμητό να υπάρχει δυνατότητα προσθήκης – ADD και/ή εξαγωγής – DROP μηκών κύματος σε ενδιάμεσα σημεία μιας διαδρομής μεταξύ των σημείων πολύπλεξης και αποπολύπλεξης. Αυτό μπορεί να γίνει με χρήση ενός οπτικού πολυπλέκτη προσθήκης εξαγωγής μηκών κύματος – Optical Add Drop Multiplexer (OADM).



Εικόνα 6.12. Οπτικός Πολυπλέκτης Προσθαφαίρεσης OADM.

Ο OADM έχει την δυνατότητα να ανεβάσει στη γραμμή ζεύξης ένα μήκος κύματος ή και περισσότερα αλλά μπορεί και να κατεβάσει κατά αντίστοιχο τρόπο ένα ή περισσότερα μήκη κύματος χωρίς να επηρεάσει τα υπόλοιπα. Οι OADM αποτελούν τον κορμό για την δημιουργία οπτικών δικτύων υψηλών ταχυτήτων.

Οι συσκευές OADM παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες με τις συσκευές ADM. Η διαφορά τους είναι η εξής. Ο ADM – Add Drop Multiplexer πολυπλέκει χρονικά ψηφιακά σήματα με την μέθοδο TDM – Time Division Multiplexing και την ροή των bits την μετατρέπει σε οπτικό διαμορφωμένο σήμα με συγκεκριμένο μήκος κύματος. Από την άλλη ο πολυπλέκτης OADM συναθροίζει διαφορετικά μήκη κύματος με τη μέθοδο WDM προεργασμένα από τα ADM.

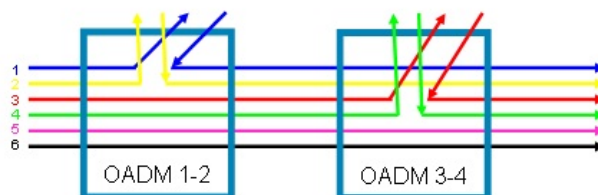


Ο πολυπλέκτης OADM μπορεί να περιλαμβάνει και τη λειτουργία της ενίσχυσης οπτικού σήματος. Υπάρχουν δύο γενικοί τύποι πολυπλεκτών OADM:

- (α) οι σταθεροί – *Fixed* οι οποίοι είναι ρυθμισμένοι (από φυσικής άποψης) να προσθέτουν συγκεκριμένα μήκη και να εξάγουν κάποια άλλα, και
- (β) οι πολυπλέκτες δεύτερης γενιάς με δυνατότητα ρύθμισης – *Reconfigurable ROADM* και δυναμικής επιλογής των μηκών κύματος που θα προστεθούν ή θα εξαχθούν.

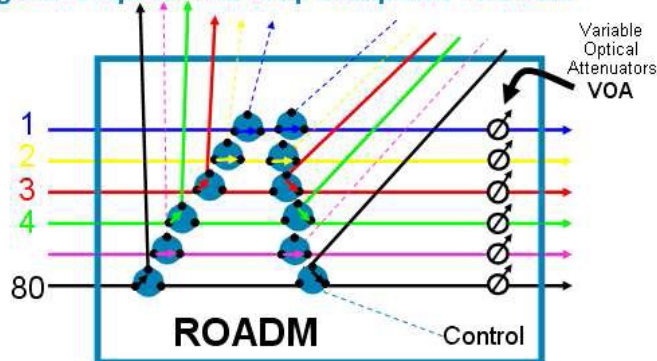
Στα περισσότερα σύγχρονα μητροπολιτικά συστήματα DWDM, η τεχνολογία που προτιμάται για την υλοποίηση των συσκευών OADM είναι τα φίλτρα λεπτού φιλμ λόγω του πλεονεκτήματος που παρουσιάζουν ως προς το χαμηλό τους κόστος και στη σταθερότητα τους. Για την πολλά υποσχόμενη δεύτερη γενιά συσκευών OADM αναμένεται να ξεχωρίσουν άλλες τεχνολογίες, όπως τα μεταβλητά φράγματα περίθλασης και οι κυκλοφορητές. Στις εικόνες που ακολουθούν, δομικά στοιχεία που αποτελούν στοιχεία ενός OADM είναι τα ρυθμιζόμενα οπτικά φίλτρα και οι οπτικοί μετατροπείς, τα οποία δρομολογούν τα μήκη κύματος στις επιθυμητές κατευθύνσεις^{[3][6][16]}.

Fixed Optical Add Drop Multiplexer - OADM

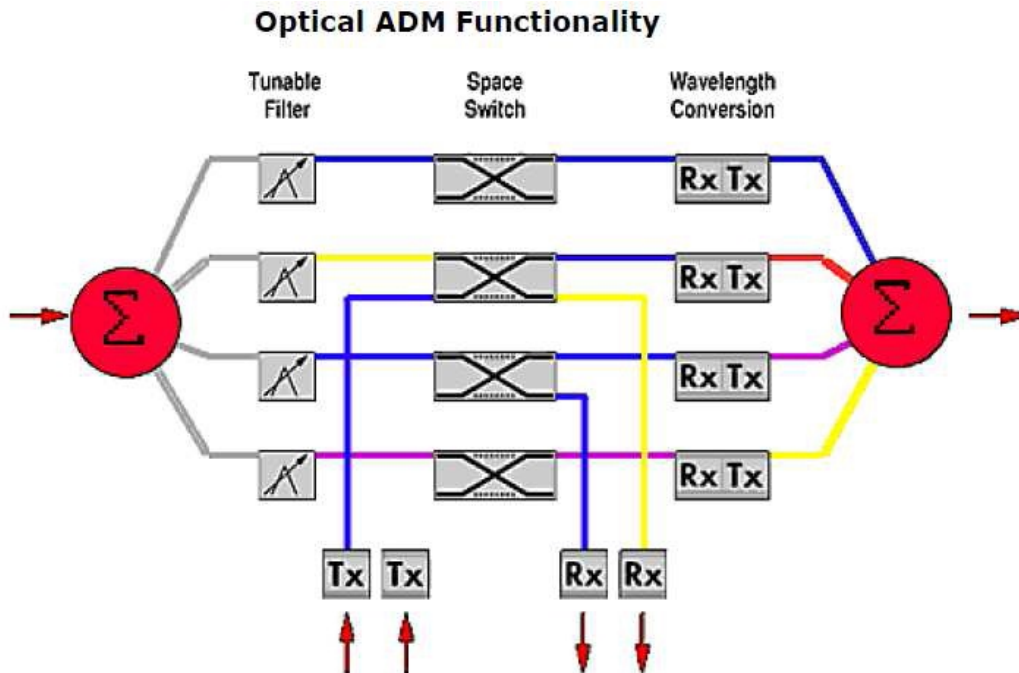


Εικόνα 6.13. Σταθερός Πολυπλέκτης OADM.

Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer - ROADM



Εικόνα 6.14. Πολυπλέκτης Δεύτερης Γενιάς OADM.

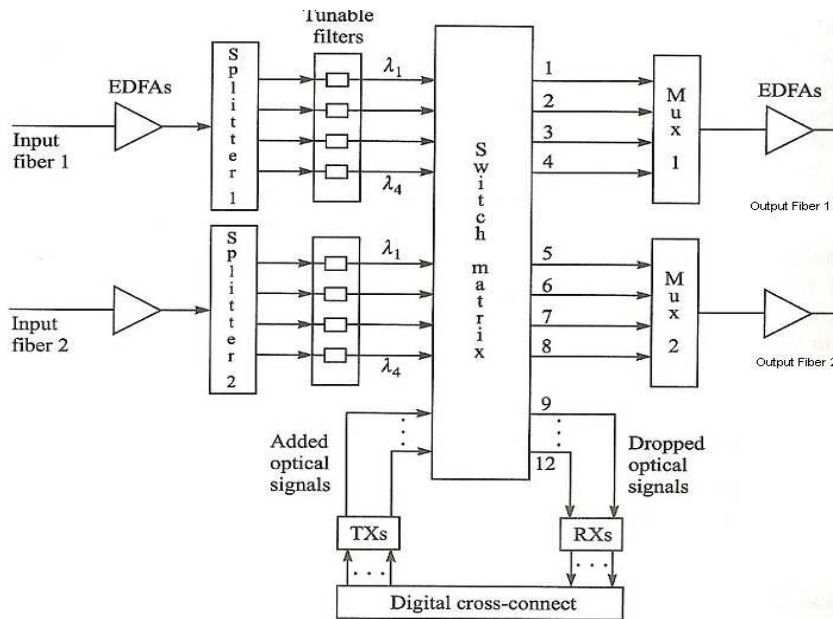


Εικόνα 6.15. Σχεδιάγραμμα λειτουργίας ενός πολυπλέκτη OADM.

Οπτικοί Διασταυρωτές

Ο οπτικός διασταυρωτήρας (Optical Cross Connect – OXC) είναι μια οπτική μονάδα η οποία έχει πολλές εισόδους οπτικών ινών και επίσης πολλές εξόδους πολλών ινών. Κάθε μία από αυτές τις ίνες πιθανόν να φέρει πέραν του ενός μήκους κύματος. Αν υποθέσουμε ότι N είναι το πλήθος των εισερχομένων μηκών κύματος και M των εξερχομένων τότε ο OXC είναι $N \times M$. Το πλεονέκτημά του είναι ότι μπορεί να προγραμματιστεί να δρομολογεί οποιοδήποτε μήκος κύματος εισόδου σε οποιαδήποτε έξοδο.

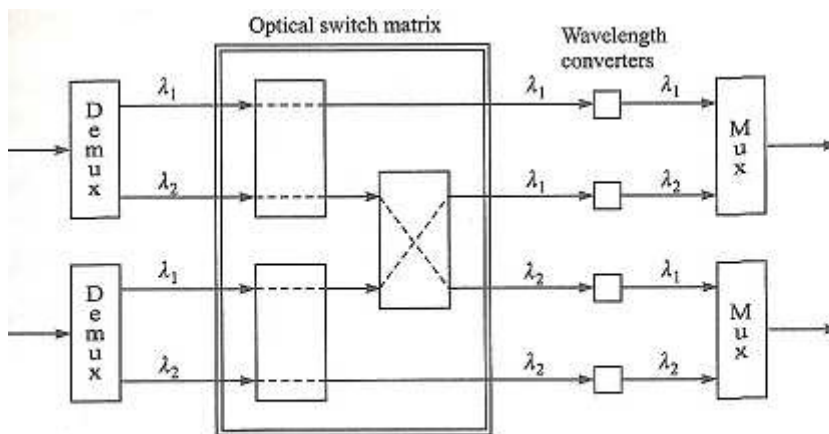
Επίσης σημαντικό είναι η αναδρομολόγηση. Δεν απαιτεί την μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό και ξανά σε οπτικό – Optical Electrical Optical OEO. Η μεταγωγή γίνεται απ' ευθείας χωρίς καμία παρέμβαση από ηλεκτρονική διάταξη μετατροπής του σήματος σε ηλεκτρικό.



Optical cross-connect architecture using optical space switches and no wavelength converters.

Εικόνα 6.16. Οπτικός διασταυρωτήρας OXC.

Στην παρακάτω εικόνα δίνεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα δρομολόγησης 4 μηκών κύματος από δύο οπτικές ίνες εισόδου σε δύο οπτικές ίνες εξόδου. Κάθε μία οπτική ίνα φέρει 2 μήκη κύματος^{[3][6][13]}.



4x4 Optical Cross Connect architecture using optical space switches and wavelengths converters

Εικόνα 6.17. Οπτικός διασταυρωτήρας OXC.



Οπτικά Φίλτρα

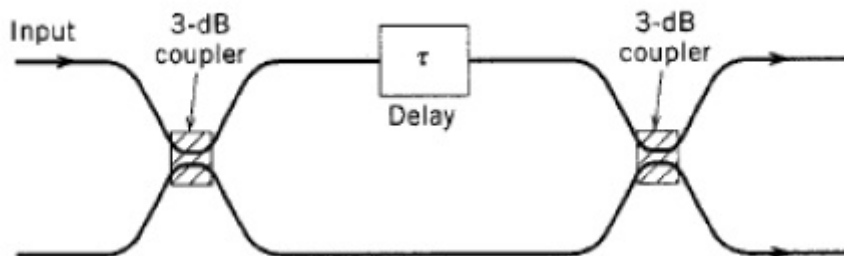
Η χρησιμότητα των οπτικών φίλτρων – συμβολόμετρων είναι τεράστια στην σύγχρονη οπτική τεχνολογία λειτουργώντας είτε σαν φίλτρα, είτε σαν δομικά στοιχεία για την υλοποίηση κυκλωμάτων αμιγούς οπτικής λογικής, ειδικά για Αμιγώς Οπτική Μεταγωγή (all optical switching). Τα στοιχεία αυτά μπορούν να είναι συντονισμένα σε κάποιες συχνότητες ή να έχουν προκαθορισμένο φάσμα. Μερικά από αυτά παρουσιάζονται σύντομα παρακάτω:

- [Συμβολόμετρο Fabry – Perot](#)

Το Συμβολόμετρο *Fabry – Perot* είναι από τα πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενα συντονισμένα οπτικά φίλτρα, όπως και τα Συμβολόμετρα *Mach – Zehnder*, και αποτελείται από μια κοιλότητα στα άκρα της οποίας βρίσκονται δύο ανακλαστικές επιφάνειες.

- [Συμβολόμετρο Mach – Zehnder](#)

Μια άλλη διάταξη που έχει χρησιμοποιηθεί είναι το Συμβολόμετρο *Mach – Zehnder*. Η συγκεκριμένη διάταξη μπορεί να κατασκευαστεί πολύ εύκολα με δύο συζεύκτες 3-dB σε σειρά και την παρεμβολή μιας γραμμής καθυστέρησης στον ένα βραχίονα της διάταξης όπως φαίνεται και στο σχήμα παρακάτω:



Εικόνα 6.18. Σχηματική αναπαράσταση του συμβολόμετρου *Mach – Zehnder*.



■ Οπτικά φίλτρα τύπου Bragg (Φράγματος Μεταγωγής)

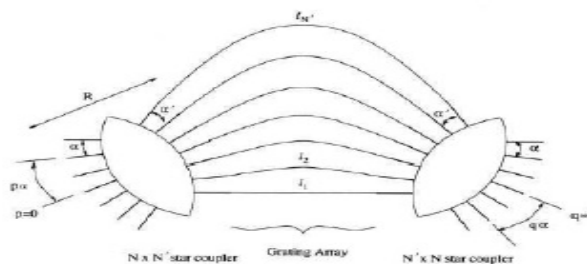
Τα φίλτρα αυτού του τύπου βασίζονται στην φωτοεπαγόμενη μεταβολή του δείκτη διάθλασης με τη βοήθεια προσμίξεων Ge. Τα φράγματα αυτά ανακλούν πίσω στην πηγή όλα τα ανεπιθύμητα μήκη κύματος ή ένα συγκεκριμένο επιτρέποντας την διέλευση όλων των άλλων. Χαρακτηριστικά των φίλτρων αυτών είναι η ανακλαστικότητα και το εύρος ζώνης και έχουν ιδιαίτερη εφαρμογή σε δίκτυα DWDM στην πολυπλεξία και αποπολυπλεξία των διαφόρων μηκών κύματος.

■ Φίλτρα Διηλεκτρικών Επιστροφών

Τα διηλεκτρικά φίλτρα βασίζουν τη λειτουργία τους σε φαινόμενα συμβολής και αποτελούνται από μια συστοιχία διηλεκτρικών στρωμάτων. Η κατασκευή τους γίνεται με την εναλλάξ εναπόθεση διηλεκτρικών στρωμάτων με μικρό και μεγάλο δείκτη διάθλασης αντίστοιχα. Τα φίλτρα αυτά χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές Πολυπλεξίας Διαίρεσης Μήκους Κύματος αλλά περισσότερο ως ζωνοπερατά φίλτρα για την απομόνωση συγκεκριμένων καναλιών^{[1][3][6]}.

Δρομολογητές Μήκους Κύματος

Μια άλλη διάταξη που είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε δίκτυα Πολυπλεξίας Διαίρεσης Μήκους Κύματος είναι οι Δρομολογητές Μήκους Κύματος (**Wavelength Routers**).



Εικόνα 6.19. Δρομολογητής Μήκους Κύματος.

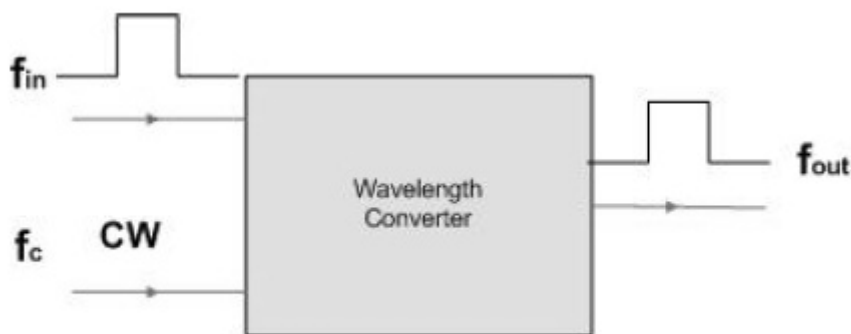


Οι διατάξεις αυτές παρά το ότι είναι στατικές μπορούν να είναι ιδιαίτερα χρήσιμες ως αποπολυπλέκτες μηκών κύματος. Συγκεκριμένα, τα οπτικά σήματα που εισέρχονται στις N εισόδους της διάταξης αποπολυπλέκονται σε ανεξάρτητα κανάλια και κατευθύνονται στις N θύρες εξόδου.

Μετατροπείς Μήκους Κύματος

Η αρχιτεκτονική που έχει ως τώρα διαμορφωθεί στα δίκτυα WDM απαιτεί για την λειτουργία τους την Μετατροπή Μήκους Κύματος (**Wavelength Conversion**) σε ορισμένους κόμβους. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί διατάξεις που πραγματοποιούν μετατροπή μήκους κύματος. Η λειτουργία των διατάξεων αυτών είναι η μετατροπή μιας ροής δεδομένων, που είναι διαμορφωμένη σε ένα φέρον μήκος κύματος λ_1 , σε ένα άλλο μήκος κύματος λ_2 χωρίς καμιά αλλαγή στην πληροφορία.

Για την υλοποίηση τέτοιων διατάξεων έχουν προταθεί πολλές μέθοδοι. Μερικές από αυτές τις μεθόδους στηρίζονται στο φαινόμενο της Μίξης Τεσσάρων Φωτονίων (FWM) αλλά και σε άλλες μη – γραμμικότητες που συναντώνται σε οπτικά συστήματα, όπως η Ετεροδιαμόρφωση Κέρδους (Cross – Gain Modulation) και Ετεροδιαμόρφωση Φάσης (Cross – Phase Modulation), ιδιαίτερα σε Ημιαγώγιμους Οπτικούς Ενισχυτές^{[1][3][6][13][16][23]}.



Εικόνα 6.20. Γενική αρχή λειτουργίας Μετατροπέα Μήκους Κύματος.



ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

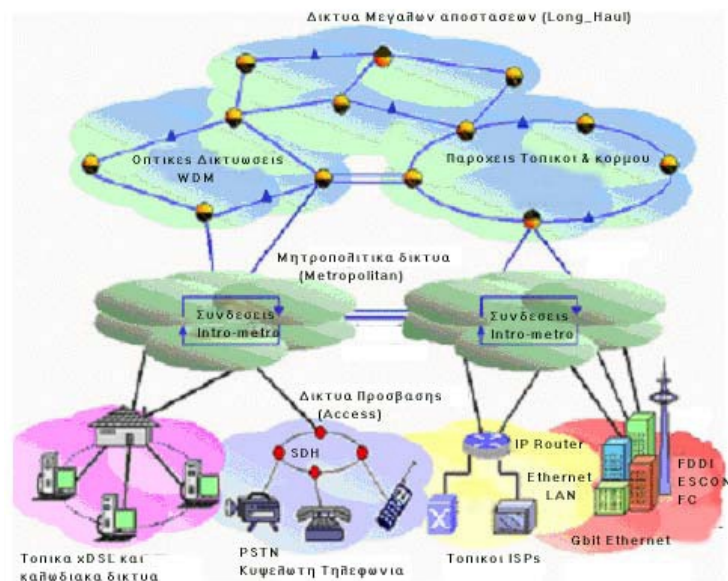
Εισαγωγή

Τα δίκτυα οπτικών ινών με την εμφάνισή τους δεν έκαναν άμεσα αισθητή διαφορά στο τηλεπικοινωνιακό τοπίο αλλά χρειάστηκαν να αναπτυχθούν διάφορες τεχνικές για την εξέλιξή τους και την ολοένα και περισσότερο καλύτερη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων τους.

Η τεχνολογία Πυκνής Πολυπλεξίας Διαίρεσης Μήκους Κύματος DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), με την οποία επιτυγχάνεται σε μεγάλο βαθμό η εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης της οπτικής ίνας, προσέφερε νέες λύσεις στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα.

Σήμερα, μετά την επιτυχημένη εγκατάσταση και λειτουργία DWDM δικτύων μεγάλων αποστάσεων (Long-Haul Networks), η τεχνολογία DWDM αρχίζει να επεκτείνεται στην περιοχή των μητροπολιτικών δικτύων (Metropolitan Networks) και των δικτύων πρόσβασης (Access Networks), με στόχο να επωφεληθούν οι τελικοί χρήστες από τα πλεονεκτήματα κόστους και απόδοσης που προσφέρει.

Τα μητροπολιτικά δίκτυα γεφυρώνουν το χάσμα μεταξύ των Long-Haul δικτύων και των δικτύων πρόσβασης. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή κάθε μίας από τις τρεις κατηγορίες των δικτύων^[7].



Εικόνα 6.21. Συνολική ιεραρχία στη δομή των τηλεπικοινωνιακών δικτύων.



Κατηγορίες Οπτικών Δικτύων

Τα σημερινά οπτικά δίκτυα κατηγοριοποιούνται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα την περιοχή κάλυψης: **Δίκτυα Long-Haul**, **Δίκτυα πρόσβασης (Access Networks)** και **Μητροπολιτικά δίκτυα (Metropolitan Networks)**.

- **Δίκτυα Long-Haul**

Αυτά τα δίκτυα εκτείνονται σε μεγάλες γεωγραφικές αποστάσεις της τάξης των χιλιάδων χιλιομέτρων και εξυπηρετούν μεγάλους διεθνείς φορείς. Συνδέονται τόσο με τα μητροπολιτικά δίκτυα όσο και μεταξύ τους, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα. Η βασική προτεραιότητα σε αυτά τα δίκτυα είναι η χωρητικότητα μεταφοράς (transport capacity).

Η εφαρμογή τους είναι η μεταφορά και το αρχικό ενδιαφέρον τους είναι η χωρητικότητα. Σε πολλές περιπτώσεις, αυτά τα δίκτυα που έχουν βασιστεί παραδοσιακά στο σύγχρονο οπτικό δίκτυο στη **Σύγχρονη Ψηφιακή Ιεραρχία (Synchronous Digital Hierarchy, SDH)** τεχνολογίας, πειραματίζονται την εξαγωγή ινών ως αποτέλεσμα της υψηλής ζήτησης εύρους ζώνης.

- **Δίκτυα Μητροπολιτικής Περιοχής**

Αυτά τα δίκτυα διοχετεύουν την κυκλοφορία μέσα στη μητροπολιτική δικτυακή περιοχή (μεταξύ των επιχειρήσεων, των γραφείων και των μητροπολιτικών περιοχών) και μεταξύ των κεντρικών σημείων μεγάλης απόστασης (POPs).

Τα MANs έχουν πολλά ίδια χαρακτηριστικά με τα δίκτυα πρόσβασης, όπως είναι τα διαφορετικά πρωτόκολλα δικτύωσης και οι ταχύτητες καναλιών. Όπως τα δίκτυα πρόσβασης έτσι και τα MANs είναι παραδοσιακά βασισμένα στο SDH, χρησιμοποιώντας σημείο σε σημείο (point-to-point) ή οι τοπολογίες δαχτυλιδιών (ring topologies) με add/drop στους πολυπλέκτες (ADMs).

Το MAN βρίσκεται σε μια κρίσιμη συμβολή. Αφ' ενός, πρέπει να ικανοποιήσει τις ανάγκες που δημιουργούνται από τη δυναμική του συνεχώς αυξανόμενου διαθέσιμου εύρους ζώνης στα δίκτυα μεγάλης απόστασης μεταφορών. Αφ' ετέρου, πρέπει να εξετάσει τις αυξανόμενες απαιτήσεις συνδεσιμότητας και τις τεχνολογίες πρόσβασης που είναι αποτέλεσμα της απαίτησης για υψηλή ταχύτητα σε προσαρμοσμένες υπηρεσίες στοιχείων.



▪ Δίκτυα Πρόσβασης

Αυτά τα δίκτυα είναι πιο κοντά στους τελικούς χρήστες, στο άκρο του MAN. Χαρακτηρίζονται από τα διαφορετικά πρωτόκολλα και τις υποδομές και εκτείνονται σε ένα ευρύ φάσμα ρυθμών.

Οι πελάτες κυμαίνονται από τους εγκαταστημένους χρήστες Διαδικτύου έως τις μεγάλες εταιρίες και τα ιδρύματα.

Η επικράτηση της κυκλοφορίας IP με την ενυπάρχουσα έκρηξη, την ασυμμετρική και απρόβλεπτη φύση της, παρουσιάζει πολλές προκλήσεις, ειδικά με νέες εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο^{[7][15]}.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ WDM ΣΤΑ ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

Δίκτυα οπτικών συνδέσμων

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οπτικά δίκτυα που αποτελούνται από συνδέσμους από **σημείο-προς-σημείο** (αποκλειστικής χρήσης) ή από οπτικούς συνδέσμους **διαμοιραζόμενου μέσου**. Στην περίπτωση των συνδέσμων από σημείο-προς-σημείο και στις δυο άκρες του οπτικού συνδέσμου χρησιμοποιούνται πολυπλέκτες/αποπολυπλέκτες, ενώ στη περίπτωση του διαμοιραζόμενου μέσου χρησιμοποιούνται WDM συζεύκτες αστέρα. Οι συσκευές αυτές δεν είναι επαναπρογραμματιζόμενες, συνεπώς δεν μπορεί να γίνει αναδιευθέτηση (reconfiguration) του δικτύου. Οι μεταγωγείς του δικτύου ενώνονται σε οπτικούς συνδέσμους αλλά είναι καθαρά ηλεκτρονικές συσκευές, συνεπώς σε ένα τέτοιο δίκτυο δεν υπάρχουν ούτε οπτικοί πολυπλέκτες προσθήκης/εξαγωγής μηκών κύματος ούτε οπτικοί διασταυρωτές (OXC). Η μεταγωγή σε ένα δίκτυο οπτικών συνδέσμων μπορεί να είναι είτε συνδεσμική είτε ασυνδεσμική μεταγωγή πακέτου. Είναι πιθανό επίσης να γίνεται μεταγωγή κυκλώματος ή ένας συνδυασμός μεταγωγής πακέτου και κυκλώματος.



Δίκτυα WDM Συνδέσεων από σημείο σε σημείο

Το πρώτο βήμα προς τη διεύρυνση της τεχνολογίας WDM στην υπάρχουσα υποδομή πρώτης γενιάς είναι φυσικά η αναβάθμιση των απλών μεμονωμένων συνδέσεων σε WDM συνδέσεις από σημείο σε σημείο (WDM point to point link). Ωστόσο σε αυτή τη κατηγορία οι WDM σύνδεσμοι διασυνδέονται μέσω μη οπτικού δηλαδή ηλεκτρονικού εξοπλισμού.

Εξαιτίας της τεχνικής WDM οι δυο κόμβοι που επικοινωνούν μέσω κάθε συνδέσμου WDM είναι ικανοί να ανταλλάξουν δεδομένα χρησιμοποιώντας πολλαπλά διαφορετικά κανάλια (μήκη κύματος) ταυτόχρονα. Αυτό επιτρέπει σε κάθε κόμβο να έχει πολλές θύρες εισόδου/εξόδου. Η επικοινωνία μέσω της οπτικής ίνας θα μπορούσε να είναι διπλής κατεύθυνσης ή εναλλακτικά θα μπορούσαμε να έχουμε έναν WDM από σημείο σε σημείο σύνδεσμο διπλής οπτικής ίνας όπου η κάθε ίνα θα χρησιμοποιούνταν αποκλειστικά για τη ροή δεδομένων σε μια κατεύθυνση.

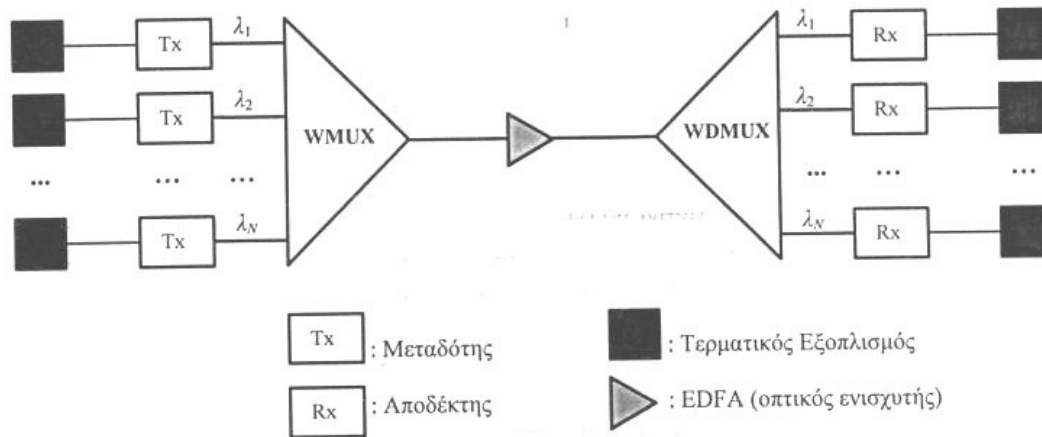
Εδώ και κάποια χρόνια οι περισσότεροι από τους κορυφαίους φορείς παροχής υπηρεσιών δικτύου στην Βόρεια Αμερική, την Ευρώπη και την Ιαπωνία έχουν αρχίσει να επενδύουν πολλά χρήματα για να ακολουθήσουν αυτή τη τάση αναβάθμισης σε WDM συνδέσμοι. Τα κυριότερα γεγονότα που οδηγούν σε αυτή την επιλογή είναι οι διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης από τους πελάτες τους και το ότι οι WDM σύνδεσμοι από σημείο σε σημείο φαίνεται να αποτελούν την πιο οικονομικά αποδοτική λύση σε σύγκριση με άλλες επιλογές για την επιθυμητή αύξηση της χωρητικότητας.

Γενικά ένας WDM σύνδεσμος αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία τα περισσότερα από τα οποία φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί.

- **Δύο κόμβους**, στα δυο άκρα του συνδέσμου που έχουν πολλές θύρες εισόδου/εξόδου.
- Διαφορετικά **interfaces διασυνδέσεις** ανά θύρα που επιτρέπουν την επικοινωνία μέσω διαφόρων πρωτοκόλλων πάνω από το σύνδεσμο.
- **Ηλεκτρο-οπτικές μετατροπείς** οι οποίοι παραλαμβάνουν λέιζερ στα δύο άκρα του συνδέσμου για μετάδοση σε διαφορετικά μήκη κύματος (κανάλια).
- Τους κατάλληλους **αποδέκτες** για κάθε μήκος κύματος, οι οποίοι μετατρέπουν το σήμα σε ηλεκτρονική μορφή στα άκρα του συνδέσμου.
- **WDM πολυπλέκτες/αποπολυπλέκτες** (WMUXs/WDMUXs) τοποθετημένους αμέσως μετά τους μεταδότες, για WDM πολύπλεξη, και αμέσως πριν το οπτικό σήμα φτάσει στους αποδέκτες, για WDM αποπολύπλεξη.



Ενισχυτές που εξασφαλίζουν επαρκή ισχύ σήματος κατά τη διαδρομή του από το ένα άκρο στο άλλο.



Εικόνα 6.22. Παράδειγμα WDM συνδέσμου από σημείο σε σημείο.

Δίκτυα Ευρείας και Μητροπολιτικής Ζώνης

Πέρα από αυτού του τύπου τις ζεύξεις η τεχνολογία WDM επεκτείνεται σε δίκτυα Ευρείας (WAN), Μητροπολιτικής (MAN) και Τοπικής Ζώνης (LAN) όπου όλα βασίζονται, τουλάχιστον σε πρώτη φάση, σε δρομολόγηση μήκους κύματος. Τα WAN παραδοσιακά καλύπτουν περιοχές ευρείας κλίμακας, συνήθως σε εθνικό επίπεδο, και αφορούν είτε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα είτε δίκτυα δεδομένων. Τα δίκτυα αυτά συνήθως είναι σε τοπολογίες μερικώς διασυνδεδεμένες (*mesh networks*). Οι κόμβοι που τα αποτελούν διασυνδέονται είτε με εικονικά κυκλώματα, είτε με μεταγωγή πακέτου υιοθετώντας κάποια από τα γνωστά πρωτόκολλα μεταγωγής πακέτου όπως IP, ATM κτλ.

Η τεχνολογία WDM συνέβαλε καθοριστικά στην μετατροπή αυτών των ζεύξεων σε υψηλής χωρητικότητας. Ωστόσο η τεχνολογία αυτή αναμένεται να προσδώσει και κάποιου είδους ευφυΐα στο φυσικό στρώμα του δικτύου αφού πραγματοποιείται μεταγωγή μήκους κύματος σε αμιγώς οπτικό επίπεδο.



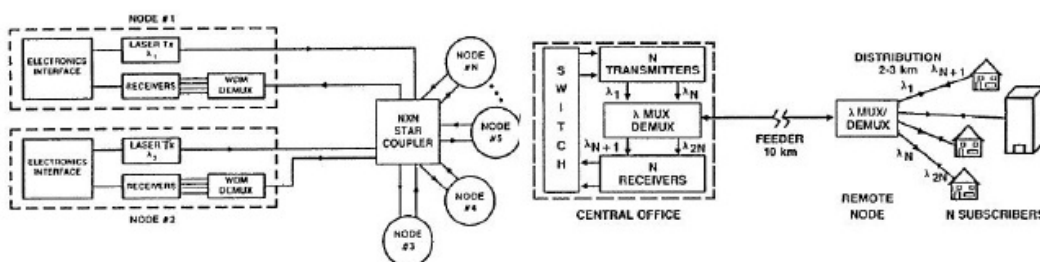
Μια άλλη προσέγγιση ακολουθεί τη λογική της τοπολογίας πολλών διασυνδεδεμένων δακτυλιδιών (interconnected rings). Τα δίκτυα Μητροπολιτικής Ζώνης διασυνδέουν κόμβους σε μια περιοχή περιορισμένη στη γεωγραφική έκταση μιας μεγάλης πόλης. Στα δίκτυα αυτά συνήθως ακολουθείται η αρχιτεκτονική δακτυλιδιού με πολυπλεξία CWDM.

Επιπρόσθετα, δύο οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται (η μία από αυτές σε περιπτώσεις εφεδρική). Αυτά τα δίκτυα ως πρόσφατα χρησιμοποιούσαν ηλεκτρονική επεξεργασία του οπτικού σήματος αν και έχει δειχθεί με ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα ένα αμιγώς οπτικό μητροπολιτικό δίκτυο, το **MONET**. Τα κανάλια του δικτύου αυτού απέχουν μεταξύ τους 200 GHz στην περιοχή των 1550 nm και μπορεί να υποστηρίξει διάφορα πρωτόκολλα ανωτέρου επιπέδου (ATM, SDH).

Δίκτυα Πολλαπλής Πρόσβασης

Τα δίκτυα πολλαπλής πρόσβασης παρέχουν στους χρήστες τους την ικανότητα αμφίδρομης επικοινωνίας μεταξύ δύο οποιωνδήποτε ή και περισσότερων χρηστών που ανήκουν στο δίκτυο αυτό. Σε πολλές περιπτώσεις ακόμη η πρόσβαση στο δίκτυο ενός παρόχου γίνεται μέσω ηλεκτρονικού εξοπλισμού όπως για παράδειγμα στον ενσύρματο τοπικό βρόχο που συνδέει τον οικιακό χρήστη με το δίκτυο του παρόχου ή σε τοπικά δίκτυα (LAN) όπως για παράδειγμα το Ethernet. Λόγω της χρήσης ηλεκτρονικού εξοπλισμού οι ταχύτητες πρόσβασης δεν μπορούν να ξεπεράσουν τα ανώτατα όρια που είναι της τάξης των μερικών Gbps.

Η πολλαπλή πρόσβαση μέσω WDM δίνει τη δυνατότητα για δρομολόγηση μήκους κύματος και διαμοιρασμό των καναλιών στους χρήστες του δικτύου. Οι πλέον συνηθισμένες τοπολογίες δεν διαφέρουν σημαντικά από ότι σε άλλες περιπτώσεις και έτσι μπορούμε να έχουμε ένα δακτυλίδι WDM, ένα μερικώς διασυνδεδεμένο δίκτυο ή τέλος μια τοπολογία αστέρα. Μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων δικτύων είναι το **Lambdanet** αλλά και ο **Παθητικός Οπτικός Τοπικός Βρόχος** (passive optical loop)^{[3][6][13][14]}.



Εικόνα 6.23. Αρχιτεκτονικές Lambdanet και Παθητικού Οπτικού Τοπικού βρόχου.



ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ WDM ΣΗΜΕΡΑ

Η ραγδαία χρήση της τεχνολογίας WDM σε μητροπολιτικά δίκτυα έχει οδηγήσει πολλές εταιρίες τηλεπικοινωνιών και συστημάτων πληροφορικής στην ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων. Παρακάτω θα γίνει μία αναφορά σε τρία συστήματα μητροπολιτικών δικτύων εταιριών παγκοσμίου φήμης με μεγάλη τεχνογνωσία στο χώρο των οπτικών τηλεπικοινωνιών. Θα ασχοληθούμε με τα συστήματα *PMA32 της Marconi*, *TransXpress Waveline EL1 της Siemens A.G.* και *Optinex 1686 WM της Alcatel*.

PMA32 της Marconi

Το σύστημα *PMA32* είναι ένας πολυπλέκτης προσθαφαίρεσης 32 καναλιών που φέρνει ένα νέο επίπεδο ευελιξίας στη λειτουργία των WDM δικτύων. Η κύρια εφαρμογή του είναι σε μητροπολιτικά και περιφερειακά δίκτυα αρχιτεκτονικής τύπου δακτυλίου (ring). Σε αυτές τις αρχιτεκτονικές το σύστημα *PMA32* παρέχει τις βέλτιστες λύσεις και υποστηρίζει αποστάσεις έως και 80km. Το *PMA32* χρησιμοποιεί προηγμένες πηγές laser και οπτικά φίλτρα, όπου μαζί με την τεχνολογία της οπτικής μεταγωγής παρέχει την απόλυτη και από απόσταση ελεγχόμενη δρομολόγηση της κυκλοφορίας.



Εικόνα 6.27. Το σύστημα PMA32 της Marconi.



Χαρακτηριστικά:

- Συμβατότητα με διαφορετικών ειδών οπτικές ίνες.
- Τεχνολογίες μετάδοσης SDH, SONET, PDH, IP, ATM, Gigabit Ethernet, Fast Ethernet, Fibre Channel, FDDI, ESCON.
- Υποστήριξη έως 32 κανάλια μέσα από ένα ζευγάρι οπτικών ινών.
- 32 x 2.5Gbit/s χωρητικότητα καναλιών.
- Τοπολογίες δικτύων σημείο-σημειακή, δακτυλίου, πλέγματος.
- QoS-Quality of Service, παροχή υπηρεσιών εγγυημένης ποιότητας.

TransXpress Waveline EL1 της Siemens A.G.

Το *TransXpress WaveLine EL1* της Siemens A.G. είναι ένα σύστημα WDM σημάτων, που σχεδιάστηκε για χρήση σε δίκτυα επιχειρήσεων και μεταφοράς δεδομένων. Το *WaveLine EL1* αποτελείται από οπτικούς τερματικούς πολυπλέκτες, που υποστηρίζουν τις από σημείο-σημειακή τοπολογίες με την ικανότητα μετάδοσης μέχρι τεσσάρων προστατευμένων καναλιών σε δύο ζευγάρια ινών ή οκτώ μη προστατευμένων καναλιών σε δύο ζευγάρια ινών. Το *TransXpress WaveLine EL1* αποτελεί μια εύχρηστη λύση, παρέχοντας απομακρυσμένη διαχείριση συστημάτων, δοκιμή υπηρεσιών και έλεγχο σφαλμάτων. Είναι μια ιδανική, οικονομικά αποδοτική λύση για υψηλές ταχύτητες δεδομένων, αποθήκευσης, μετάδοσης φωνής και εφαρμογών τοπικών δικτύων.



Εικόνα 6.28. Το σύστημα TransXpress WaveLine EL1 της Siemens A.G.

Χαρακτηριστικά:

- Μετατροπή μήκους κύματος (αναμεταδότες-transponders) από 850nm σε 1310nm ή από 1310nm σε 1550nm.



- Ρυθμός μεταφοράς δεδομένων από 1.5 Gbps έως 2.5 Gbps σε μονότροπη οπτική ίνα.
- Τεχνολογίες μετάδοσης SDH, SONET, ATM, Gigabit Ethernet, Fast Ethernet, Fibre Channel.
- Υπηρεσίες Σύγχρονης Μετάδοσης, STM-1, STM-4, STM-16.
- ATM 155, 622 Mbit/s και 2,488 Mbit/s.
- E1/T1
- Πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος (WDM).
- Μέχρι 4 κανάλια για τοπολογίες σημείο-σημειακή.
- Τοπολογίες δικτύων σημείο-σημειακή, δακτυλίου.
- QoS-Quality of Service, παροχή υπηρεσιών εγγυημένης ποιότητας.
- 99,999% αξιοπιστία.

Optinex 1686 WM της Alcatel

Το *Optinex 1686 WM* της Alcatel είναι ένα σύστημα 32-καναλιών WDM, το οποίο παρέχει μια εξελικτική και οικονομικώς αποδοτική λύση για τα περιφερειακά και μητροπολιτικά οπτικά δίκτυα. Είναι ιδανικό για χρήση ως οπτικού τερματικού πολυπλέκτη για τα από σημείο-σημειακή περιφερειακά και μητροπολιτικά δίκτυα, αλλά και ως οπτικού πολυπλέκτη προσθαφαίρεσης (OADM).



Εικόνα 6.29. Το σύστημα Optinex 1686 WM της Alcatel.

Χαρακτηριστικά:

- Συμβατότητα με τη σύσταση G.692 της ITU-T.
- Υποστήριξη 32 καναλιών STM-64 (10 Gbit/s).



- Συμβατότητα με διαφορετικών ειδών οπτικές ίνες.
- Τεχνολογίες μετάδοσης SDH, SONET, IP, ATM.
- Πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος (WDM).
- Τοπολογίες δικτύων σημείο-σημειακή, δακτυλίου.
- QoS-Quality of Service, παροχή υπηρεσιών εγγυημένης ποιότητας.

Η αναβάθμιση του δικτύου SDH-DWDM έχει υλοποιηθεί εδώ και μερικά χρόνια με 700 νέους δακτυλίους σε όλη την Ελλάδα με μηχανήματα τύπου Marconi-Ericsson, Siemens και Alcatel υψηλής τεχνολογίας και 10πλάσιου bandwidth από την προηγούμενη κατάσταση^{[13][15][23]}.

ΜΕΛΛΟΝ ΤΟΥ WDM

Η τεχνολογία WDM αναφέρεται στο φυσικό επίπεδο των δικτύων και προέκυψε κυρίως λόγω τις βελτίωσης των φυσικών ενσύρματων μέσων, που χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες. Έτσι αρχικά με την βελτίωση της τεχνολογίας των *laser* και στη συνέχεια με την εμφάνιση των *οπτικών ενισχυτών* έγινε δυνατή η παράλληλη μετάδοση σημάτων μέσα από τις υφιστάμενες οπτικές ίνες. Επομένως η μετάβαση σε αυτή την τεχνολογία θα μπορούσε να θεωρηθεί εύκολη.

Ωστόσο υπάρχουν παράγοντες που πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη πριν γίνει μια τέτοια αναβάθμιση. Είναι το κόστος και η ανταγωνιστικότητα απέναντι σε άλλες επιλογές. Ισοσταθμίζοντας τις ανάγκες και τις δυνατότητες κάθε εφαρμογής μπορούμε να κρίνουμε αν είναι συμφέρουσα μια τέτοια επιλογή.

Κόστος Υλοποίησης

Κάθε νέα τεχνολογία για να επιτύχει θα πρέπει συγκριτικά να χαρακτηρίζεται σαν πληρέστερη από πλευράς δυνατοτήτων, χαμηλότερου κόστους σχετικά με το συντελεστή απόδοσης/κόστους και πιο γρήγορη. Σε ερευνητικό επίπεδο, η τεχνολογία WDM αναπτύχθηκε πριν αρκετά χρόνια και σαν πλεονέκτημά της είχε το γεγονός ότι έδινε τη δυνατότητα για τη μεταφορά περισσότερων δεδομένων ταχύτερα και σε χαμηλότερο κόστος.

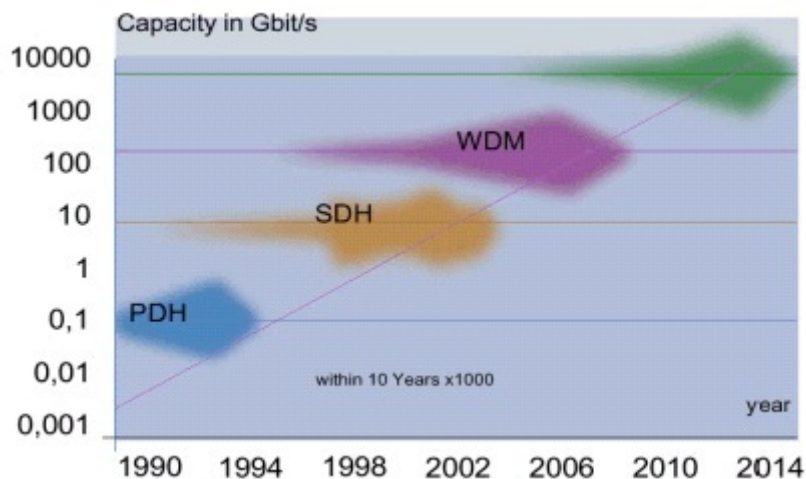


Σήμερα πια η υλοποίηση της είναι γεγονός και προσφέρει τη δυνατότητα να αναβαθμιστούν οι οπτικές συνδέσεις με κόστος μόλις το 1/3 σε σχέση με την κλασική μέθοδο εγκατάστασης νέων οπτικών ινών. Το κόστος μάλιστα αυτό αναμένεται να μειωθεί και άλλο καθώς η τεχνολογία των Laser και των οπτικών ενισχυτών είναι ακόμα νέα και συνεχώς θα βελτιώνεται, με αποτέλεσμα να υποχωρούν οι τιμές των συστημάτων της προτελευταίας γενιάς.

Πλεονεκτήματα

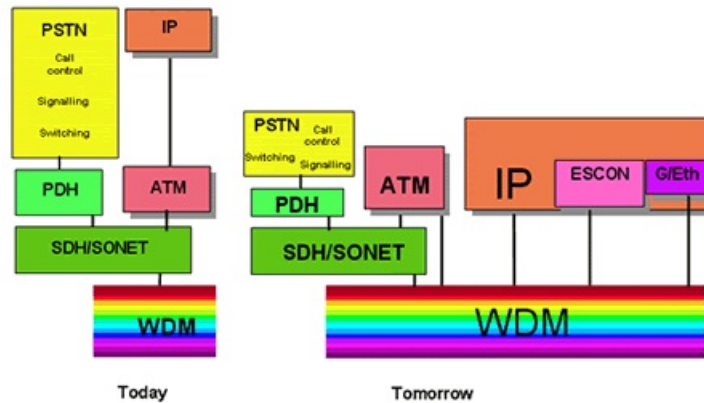
Συμπερασματικά, από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω η τεχνολογία πολυπλεξίας μήκους κύματος εισάγει πολλά νέα δεδομένα στην αξιοποίηση των οπτικών δικτύων. Ας δούμε όμως πιο συγκεκριμένα τα συγκριτικά πλεονεκτήματα που προσφέρει.

Το αδιαμφισβήτητο πλεονέκτημα της νέας τεχνολογίας είναι η δυνατότητα για πολλαπλασιασμό του εύρους ζώνης, που παρέχεται από μια οπτική ίνα. Πραγματικά τα μεγέθη είναι εντυπωσιακά, τα 2.5 Gbps που ήταν μέχρι τώρα ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης που μπορούσε να μεταδοθεί μέσα από μία εγκατεστημένη οπτική ίνα πολλαπλασιάζεται με έναν παράγοντα μέχρι 100, ο οποίος μάλιστα αναμένεται να αυξηθεί. Έχουν γίνει εργαστηριακές επιδείξεις που φτάνουν μέχρι κάποια Terabit/sec.



Εικόνα 6.24. Αύξηση εύρους ζώνης.

Ένα άλλο πλεονέκτημα της τεχνολογίας WDM είναι ότι υποστηρίζει μεγάλο πλήθος διαφορετικών τεχνολογιών μετάδοσης και πρωτοκόλλων, πάνω από το οπτικό επίπεδο.



Εικόνα 6.25. Τεχνολογίες Μετάδοσης και Πρωτόκολλα πάνω από WDM.

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό που κάνει την WDM ιδιαίτερα ελκυστική για τους μεγάλους παροχείς είναι το γεγονός ότι για την ενίσχυση του οπτικού σήματος, προκειμένου αυτό να διανύσει αποστάσεις μεγαλύτερες από 65-70 km, δεν απαιτούνται πλέον οι κλασικές οπτικοηλεκτρονικές διατάξεις, που μετατρέπουν το σήμα σε ηλεκτρικό, προκειμένου να το ενισχύσουν, αλλά γίνεται χρήση του οπτικού ενισχυτή, ο οποίος λειτουργεί, ανεξάρτητα από το πλήθος των διαφορετικών μηκών κύματος και ρυθμού μετάδοσης των σημάτων.

Τέλος, η χρήση της τεχνολογίας WDM προσφέρει την δυνατότητα για εύκολη αναβάθμιση της υφιστάμενης υποδομής, αφού η ενεργοποίηση μιας νέας εικονικής ίνας μπορεί να γίνει άμεσα και χωρίς ιδιαίτερο κόστος. Πέραν αυτού, η τεχνολογία είναι εντελώς διαφανής και στο ρυθμό μετάδοσης, αλλά και στα πρωτόκολλα που έχουν εφαρμοστεί.

Το μέλλον του WDM

Η τεχνολογία WDM θα συνεχίσει να παρέχει εύρος ζώνης για μεγάλες ταχύτητες μετάδοσης για μεταφορά δεδομένων. Επίσης, η ανάπτυξη υπερταχέων εξ' ολοκλήρου οπτικών δικτύων WDM, στα οποία όλες οι απαραίτητες λειτουργίες (ενίσχυση, αναγέννηση, μεταγωγή, δρομολόγηση κλπ.) θα γίνονται στο οπτικό επίπεδο χωρίς ενδιάμεσες ηλεκτροοπτικές μετατροπές, θα οδηγήσει στην επέκταση της εφαρμογής του WDM σε όλους τους τύπους δικτύων.

Τέλος κρίνεται απαραίτητο να αναφερθούμε σε κάποιες από τις έρευνες που διεξάγονται σε ερευνητικά και πανεπιστημιακά ιδρύματα, οι οποίες θα οδηγήσουν σε αναβαθμισμένα συστήματα WDM. Πιο συγκεκριμένα η έρευνα έχει στραφεί στις εξής κατευθύνσεις^{[3][13][16]}:



- **Εξ' ολοκλήρου οπτική λειτουργία** : Αναφέρονται ενδεικτικά οι λειτουργίες της μετατροπής μήκους κύματος, της αναγέννησης (3R), της μεταγωγής και της επιτήρησης που θα επιδιωχθεί να γίνονται στο οπτικό επίπεδο. Η εξ' ολοκλήρου οπτική λειτουργία είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάπτυξη εξ' ολοκλήρου οπτικών δικτύων.
- **Ανάπτυξη νέων τεχνολογιών**: Αναφέρεται ενδεικτικά η μετάδοση σολιτονίων. Τα σολιτόνια είναι παλμοί ειδικής μορφής, που δεν επηρεάζονται από τη διασπορά. Ένα σολιτόνιο μπορεί να διαδοθεί σε μεγάλες αποστάσεις (της τάξης των 10.000 km), χωρίς ουσιαστική χρονική διεύρυνση.
- **Βελτίωση των δομοστοιχείων του συστήματος**: Αφορά την ανάπτυξη μεταβαλλόμενου μήκους κύματος λειτουργίας (tunable) lasers κατανεμημένης ανάδρασης (έχει ήδη ανακοινωθεί), ενισχυτικών διατάξεων με ίνα Ερβίου με περιοχή λειτουργίας 1525-1605 nm (έχει ήδη ανακοινωθεί), διατάξεων οπτικής προσθαφαίρεσης OADMs (αρχικά στατικά και, στο απώτερο μέλλον, δυναμικά) και οπτικών διασταυρωτήρων (OXC's).
- **Αναβάθμιση συστημάτων**: Αφορά τη χρήση συστημάτων 10 Gbps (STM-64) και 40 Gbps (STM-256) και την πολυπλεξία 128 ή και περισσότερων καναλιών.
- **Νέες αρχιτεκτονικές δικτύων**: Αξιοσημείωτο είναι και το γεγονός ότι αναπτύσσονται προσπάθειες, με την εκμετάλλευση των χαρακτηριστικών της τεχνολογίας WDM για την κατασκευή νέων αρχιτεκτονικών δικτύων, που θα στηρίζονται στην οπτική μεταγωγή. Σίγουρα αυτό θα ήταν και το τελευταίο βήμα για να ολοκληρωθεί η εικόνα ενός δικτυακού μοντέλου με τέλεια συνδυασμένα, για τα δεδομένα της εποχής, την ομοιομορφία και την ταχύτητα.



Κεφάλαιο 7^ο

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ SONET/SDH

Η τεχνολογία αυτή παρουσιάστηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και αφορούσε μία μεγάλη ομάδα προτύπων που άπτονται των οπτικών επικοινωνιών. Στις Ηνωμένες Πολιτείες και στην Ιαπωνία, οι τυποποιήσεις αυτές είναι γνωστές ως **SONET** (*Synchronous Optical Network*). Αντίθετα, στη Ευρώπη ονομάζονται **SDH** (*Synchronous Digital Hierarchy*). Το πρότυπο SONET δημιουργήθηκε από τη Bellcore ενώ το SDH αρχικά τυποποιήθηκε από τον ETSI και στη συνέχεια έγινε διεθνές πρότυπο με κάποιες τροποποιήσεις από την Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union, ITU).

Το πρότυπο SONET (και στη συνέχεια το SDH), προσπάθησε να αποτελέσει πρότυπο οπτικής διασύνδεσης με στόχο τη διαλειτουργικότητα συστημάτων διαφορετικών κατασκευαστών. Χωρίς το SONET, η διασύνδεση γίνεται μόνο με αποπολυπλεξία στο ηλεκτρικό επίπεδο, κάτι που επιβαρύνει πολύ τη μεταφορά δεδομένων μιας και η μετατροπή του σήματος από οπτικό σε ηλεκτρικό και το αντίστροφο είναι μία χρονοβόρα διαδικασία. Τα πρότυπα SONET/SDH ορίζουν μια νέα ψηφιακή ιεραρχία πολυπλεξίας που είναι κατάλληλη για τον χειρισμό σημάτων που βασίζουν τη μεταφορά τους σε οπτικές ίνες, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπουν την εύκολη εξαγωγή από ένα πολυπλεγμένο σήμα των διαφόρων σημάτων χαμηλότερων ρυθμών.

Το βασικό δομικό στοιχείο του SONET είναι ένα πλαίσιο 810 bytes, διάρκειας 125 μsec. Αποτελείται από μια περιοχή με μέγεθος 774 bytes στην οποία μεταφέρεται το payload (ωφέλιμο φορτίο) και μια περιοχή overhead (επιβάρυνσης μετάδοσης). Η περιοχή ωφέλιμου φορτίου ορίζεται και σαν «Φάκελος Σύγχρονου Φορτίου» (SPE – Synchronous Payload Envelope) και περιλαμβάνει και την επιβάρυνση μονοπατιού/διαδρομής (path overhead - POH). Το overhead έχει μέγεθος 36 bytes και χωρίζεται σε δύο τμήματα, την επιβάρυνση τμήματος και την επιβάρυνση γραμμής που αναφέρονται σαν SOH (Section Overhead) και LOH (Line Overhead) αντίστοιχα.

Το πλαίσιο του SONET μεταδίδεται σχηματίζοντας ένα σήμα 51,840 Mbps, γνωστό ως «Σήμα Σύγχρονης Μεταφοράς -1ου επιπέδου» (*STS-1 Synchronous Transport Signal-level 1*). Η λειτουργικότητα του SONET επιτυγχάνεται ορίζοντας το βασικό STS-1 σήμα και δημιουργώντας στη συνέχεια μια πολλαπλάσια δομή η οποία προκύπτει από την πολυπλεξία σημάτων STS-1 με τη μέθοδο της παρεμβολής οκτάδων. Έτσι ανάλογα με το βαθμό πολυπλεξίας δημιουργούνται σήματα με ρυθμούς N φορές μεγαλύτερους από το βασικό ρυθμό του STS -1 που είναι 51,840 Mbps. Επί του παρόντος οι τιμές του N είναι 1, 3, 9, 12, 18, 24, 36, 48.



SONET (ANSI)	Οπτικός φορέας (OC)	SDH	Ρυθμός δεδομένων (Mbps)
STS-1	OC-1		51,84
STS-3	OC-3	STM-1	155,52
STS-9	OC-9	STM-3	466,56
STS-12	OC-12	STM-4	622,08
STS-18	OC-18	STM-6	933,12
STS-24	OC-24	STM-8	1244,16
STS-36	OC-36	STM-12	1866,24
STS-48	OC-48	STM-16	2488,32
STS-96	OC-96	STM-32	4976,64
STS-192	OC-192	STM-64	9953,28
STS-768	OC-768	STM-256	39813,12

Εικόνα 7.1. Πρότυπα ρυθμών μεταφοράς.

Όταν η μετάδοση γίνεται χρησιμοποιώντας οπτική ίνα, ορίζεται ένα οπτικό αντίστοιχο του σήματος STS-1 που ονομάζεται «Οπτικός Φορέας – 1ου επιπέδου» (*OC-1 Optical Carrier-level 1*). Το OC-1 είναι το σήμα που λαμβάνεται στη ν έξοδο ενός ηλεκτρικό-οπτικού μετατροπέα, όταν στην είσοδό του εισάγεται το σήμα STS -1.

Το OC-1 αποτελεί το βασικό δομικό στοιχείο μετάδοσης στο SONET και από αυτό μπορούν να παραχθούν σήματα υψηλότερης ιεραρχίας. Για παράδειγμα το OC-3 μεταφέρει πληροφορία με ρυθμό 3x51,84 δηλαδή 155,42 Mbps. Ο αριθμός που συνοδεύει το πρόθεμα OC δείχνει το πλήθος των σημάτων ψηφιακού ρεύματος (DS3), που το τοπικό σήμα μπορεί να μεταφέρει. Έτσι έχουν δημιουργηθεί διάφορα πρότυπα ρυθμών μεταφοράς δεδομένων πάνω από οπτικές ίνες τα οποία αντιστοιχίζονται με τους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων από ηλεκτρικά σήματα. Απεικονίζονται στον παραπάνω πίνακα.

Για την μεταφορά μικρότερων ρυθμών δεδομένων από το βασικό STS-1 ο Φάκελος Σύγχρονου Φορτίου (SPE) ενός πλαισίου STS-1 μπορεί να διαιρεθεί σε συνιστώσες χαμηλότερων ρυθμών. Αυτές οι συνιστώσες είναι ειδικές δομές που ονομάζονται «νοητές μερικές ροές» (VT-Virtual Tributary) και επιτρέπουν τη μεταφορά ωφέλιμων φορτίων, που είναι μικρότερα από το ωφέλιμο φορτίο του STS-1. Για παράδειγμα, η νοητή ροή VT1.5 μπορεί να μεταφέρει σήμα 1,544 Mbps (T1)^{[7][15][22]}.

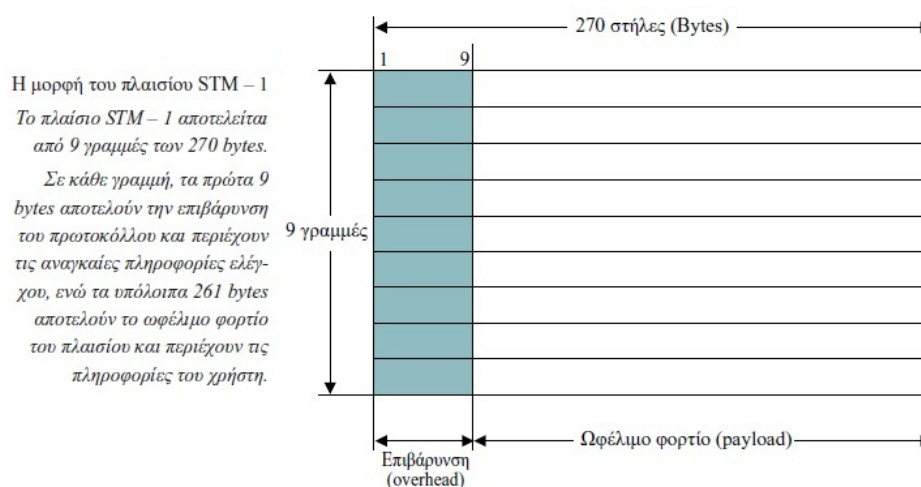


Μορφή πλαισίου του πρωτόκολλου SDH

Στη σύσταση G.707 της ITU – T ορίζεται η «μονάδα σύγχρονης μεταφοράς» (Synchronous Transport Module), που αναφέρεται συνοπτικά ως STM – 1 και η οποία αποτελεί το πλαίσιο μεταφοράς δεδομένων σε συνδέσμους SDH με ρυθμό μετάδοσης ίσο με 155,52 Mbps. Το πλαίσιο STM – 1 μπορούμε να το θεωρήσουμε ως έναν πίνακα από bytes, μεγέθους 9 γραμμών x 270 στηλών. Η μετάδοσή του γίνεται γραμμή γραμμή, αρχίζοντας από την πάνω αριστερά γωνία και τελειώνοντας στην κάτω δεξιά γωνία. Η μετάδοση του πλαισίου εκτελείται σε 125 μsec, δίνοντας έτσι ένα συνολικό ρυθμό μετάδοσης ίσο με 9 γραμμές x 270 στήλες x 8 bits/byte x 8000 πλαίσια/sec = 155,52 Mbps.

Τα πρώτα 9 bytes από κάθε γραμμή περιέχουν τις αναγκαίες πληροφορίες ελέγχου του πρωτοκόλλου, ενώ τα υπόλοιπα 261 bytes περιέχουν τα δεδομένα του χρήστη του πρωτοκόλλου SDH. Έτσι, αν παρομοιάσουμε το πλαίσιο με ένα κιβώτιο μεταφοράς αγαθών, τότε το ωφέλιμο φορτίο του είναι ίσο με $9 \times 261 = 2.349$ bytes, ενώ το απόβαρό του, ή αλλιώς η επιβάρυνσή του, είναι ίσο με 81 bytes. Οι όροι «ωφέλιμο φορτίο» (payload) και «επιβάρυνση» (overhead) χρησιμοποιούνται στο πρωτόκολλο SDH για να δηλώσουν τις αντίστοιχες ποσότητες.

Τα πρώτα 6 bytes του πλαισίου περιέχουν μια ειδική ακολουθία από bits, η οποία υποδηλώνει την αρχή του. Το τέλος του πλαισίου είναι, εκ κατασκευής, γνωστό ότι βρίσκεται σε απόσταση ίση με 2.430 bytes από την αρχή του. Οπότε, η σκιαγράφιση του πλαισίου μπορεί να γίνει εύκολα με τη χρήση ενός απλού αριθμητή, αρκεί να έχουμε εντοπίσει την αρχή του. Η μορφή του πλαισίου STM – 1 απεικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί^[22].



Εικόνα 7.2. Μορφή Πλαισίου STM-1.



Διαφορές SONET – SDH

Το πρότυπο SDH βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στο SONET και μάλιστα επεκτείνει κάποια στοιχεία του έτσι ώστε να μπορέσει να γίνει διεθνές standard. Παρά τη μεγάλη ομοιότητα που έχουν, υπάρχουν κάποιες διαφορές μεταξύ τους. Η πιο βασική είναι η διαφορά στον βασικό ρυθμό. Στο SDH ο ρυθμός αυτός είναι περίπου 150Mbps, ενώ στο SONET είναι 50Mbps. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται η συνένωση (concatenation) τριών βασικών σημάτων STS-1 του SONET για να προκύψει το STM-1 του SDH.

Επίσης τα SONET και SDH διαφέρουν στο πλήθος και την πυκνότητα των ρυθμών μετάδοσης που υποστηρίζουν. Επειδή η τιμή του βασικού πλαισίου του SDH είναι 155,520 Mbps, με την πολυπλεξία π.χ. τεσσάρων καναλιών θα προκύψει ροή πληροφορίας με ρυθμό 622,080Mbps (STM-4) και αν πολυπλεχθούν 16, ο ρυθμός που θα προκύψει ισούται με 2488,320 (STM-16).

Επιπλέον, όσον αφορά το πλαίσιο μετάδοσης, το πλαίσιο του SONET μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι το ένα τρίτο του SDH. Το πλαίσιο του SDH αποτελείται από 9 γραμμές των 270 bytes, ενώ του SONET από 9 γραμμές των 90 bytes.

Τέλος, επειδή στο SDH ορίζεται πολύ υψηλός βασικός ρυθμός, υπάρχει μια μεγαλύτερη δυσκολία για τη μεταφορά των σημάτων μικρότερου ρυθμού. Έτσι ορίζονται επιπλέον ρεύματα μικρότερου ρυθμού από τα VT όπως π.χ. τα C (container) και TU (tributary unit)^{[14][15]}.

Πλεονεκτήματα τεχνολογίας SONET/SDH

Τα πιο 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.

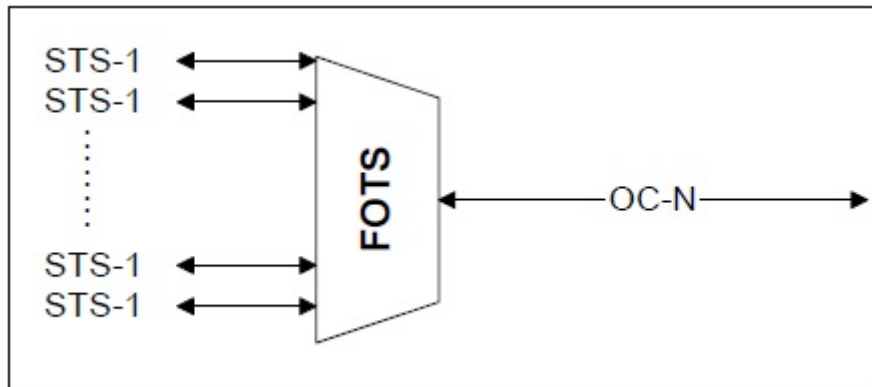


- Εξασφαλίζει ενσωματωμένη χωρητικότητα σήματος, για προηγμένη διαχείριση και συντήρηση δικτύου. Ικανότητες για προηγμένη διαχείριση και συντήρηση δικτύου έτσι ώστε να είναι δραστικά διαχειρίσιμη η ευελιξία του. Περίπου 5% της δομής SONET/SDH σήματος χρησιμοποιείται για υποστήριξη διαδικασιών και πρακτικών 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 διαφόρους 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, καθιστά δυνατή την ύπαρξη ενοποιημένης δομής δικτύου τηλεπικοινωνιών. Το γεγονός ότι το SONET/SDH βασίζεται σε κοινά δικτυακά πρότυπα, σημαίνει ότι μπορούν να διασυνδεθούν χωρίς προβλήματα συσκευές από διαφορετικούς κατασκευαστές^{[13][15]}.

Δομοστοιχεία τεχνολογίας SONET/SDH

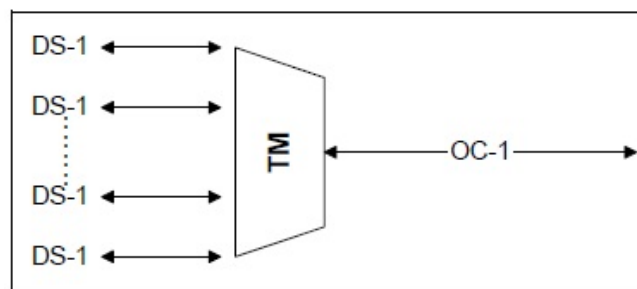
Τα βασικά δομοστοιχεία ενός δικτύου που χρησιμοποιεί την τεχνολογία SONET/SDH περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω:

- Συστήματα μετατροπής ηλεκτρικού σε οπτικό σήμα (FOTS – Fiber Optic Transmission Systems): Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή N ηλεκτρικών σημάτων STS-1 σε ένα ηλεκτρικό σήμα STS-N και στη συνέχεια με τα κατάλληλα κυκλώματα μετατρέπουν αυτό το σήμα σε οπτικό σήμα OC-N. Σε ένα τέτοιο σύστημα εκτός από σήματα STS-1 μπορούν να τερματίσουν και σήματα DS3.



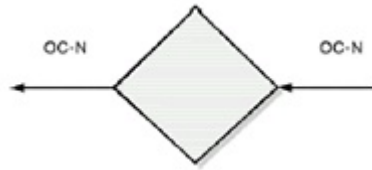
Εικόνα 7.3. Μετατροπέας ηλεκτρικού σε οπτικό σήμα.

- **Τερματικοί Πολυπλέκτες (TM – Terminal Multiplexers):** Οι τερματικοί πολυπλέκτες (TM) τοποθετούνται στην αρχή μιας γραμμής και χρησιμοποιούνται για να κατασκευαστεί ένα σήμα STS-1 από ένα σύνολο 28 σημάτων DS1. Συνήθως διαθέτουν και κυκλώματα μετατροπής ηλεκτρικού σήματος σε οπτικό και μετατρέπουν το ηλεκτρικό σήμα STS-1 σε οπτικό σήμα OC-1. Λειτουργούν επίσης και σαν αποπολυπλέκτες, οπότε και εκτελούν την αντίστροφη διαδικασία λαμβάνοντας σαν είσοδο ένα σήμα OC-1 (ή STS-1) και δίνοντας στην έξοδο τα σήματα μικρότερης ταχύτητας. Υπάρχουν επίσης και TM τα οποία δέχονται σαν είσοδο 84 σήματα DS-1 και δημιουργούν στην έξοδο ένα σήμα OC-3.



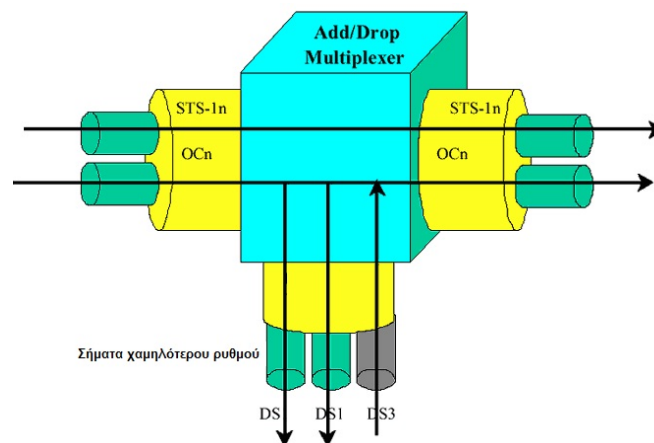
Εικόνα 7.4. Τερματικός Πολυπλέκτης TM.

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



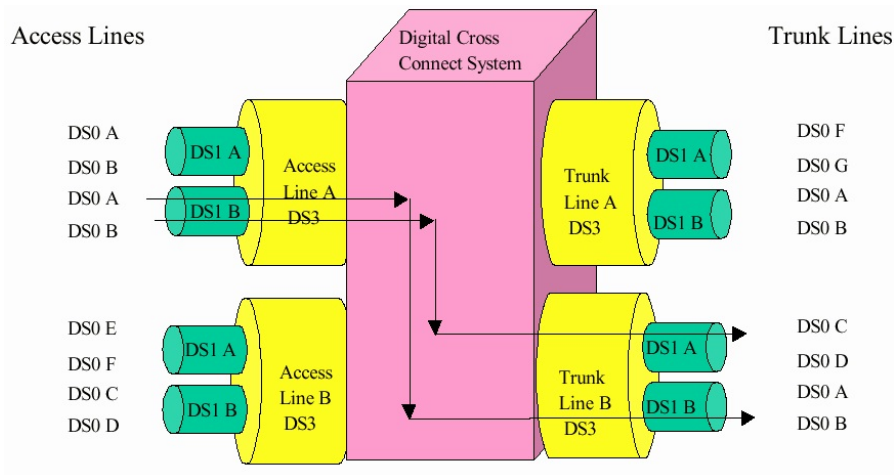
Εικόνα 7.5. Αναγεννητής Σήματος.

- **Πολυπλέκτες Προσθήκης/Αφαίρεσης (ADM – Add-Drop Multiplexers)**: (Έχουμε αναφερθεί σε αυτούς παραπάνω). Συνοπτικά, οι πολυπλέκτες αυτοί, σε αντίθεση με τους TM, μπορούν να τοποθετηθούν σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου και παρέχουν τη δυνατότητα άμεσης εισαγωγής σε ένα σήμα STS ενός ή περισσοτέρων σημάτων DS χαμηλότερου ρυθμού. Λειτουργούν επίσης και σαν αποπολυπλέκτες οπότε και δίνουν τη δυνατότητα για άμεση εξαγωγή από ένα σήμα STS του σήματος χαμηλότερου ρυθμού, χωρίς να χρειάζονται διαδοχικές αποπολυπλεξίες. Αυτό γίνεται γιατί τα σήματα χαμηλότερης ταχύτητας είναι άμεσα διακριτά στα σήματα των δικτύων SONET/SDH.



Εικόνα 7.6. Πολυπλέκτης Προσθήκης/Αφαίρεσης.

- **Ψηφιακές Διατάξεις Ευρυζωνικής Διασύνδεσης (WDCS – Wideband Digital Cross-connect Systems)**: Τα συστήματα αυτά επιτρέπουν το switching της κυκλοφορίας που υπάρχει σε ένα SONET/SDH δίκτυο στο επίπεδο των ρευμάτων που περιέχονται στα VTs ενός STS σήματος. Αυτό προσφέρει το πλεονέκτημα ότι το switching της πληροφορίας γίνεται πολύ απλούστερα και χωρίς διαδικασίες πολυπλεξίας και αποπολυπλεξίας που ήταν απαραίτητες πριν την εισαγωγή της ιεραρχίας SONET.



Εικόνα 7.7. Ένα WDCS σύστημα.

Ένα WDCS συνήθως διαχειρίζεται κυκλοφορία στην κλίμακα από 1,5 Mbps έως και 50Mbps, δηλαδή διαχειρίζεται ρεύματα μικρότερης τάξης από STS-1. Στο φαίνεται ένα WDCS το οποίο δέχεται σαν εισόδους DS-3 σήματα και κάνει switching των επιμέρους DS-1 σημάτων για να δημιουργήσει στην έξοδο διαφορετικά σήματα DS-3.

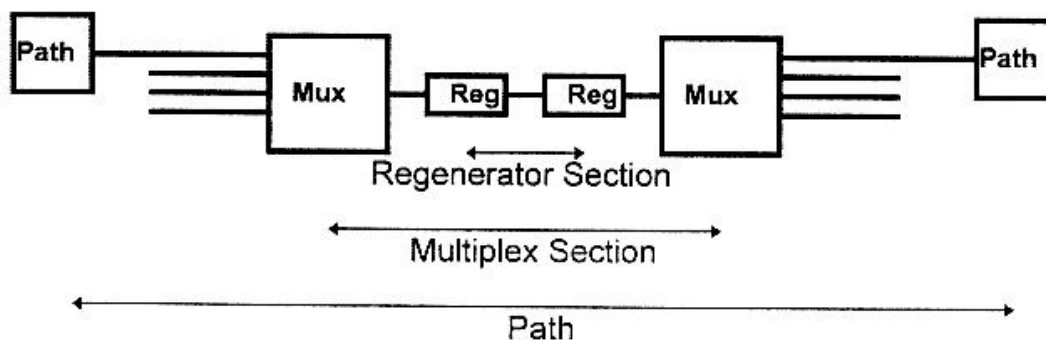
- **Broadband συστήματα ψηφιακής διασύνδεσης (BDCS – Broadband Digital Cross-connect Systems)**: Τα συστήματα αυτά εκτελούν πάλι διαδικασίες switching, αλλά σε αντίθεση με τα WDCSs εδώ το switching γίνεται σε σήματα με ρυθμούς της τάξης από 50Mbps έως 600Mbps. Τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται για να συγκεντρώνεται η κίνηση από πολλά μέρη και να μεταδίδεται με καλωδιώσεις που υποστηρίζουν μεγάλες ταχύτητες μεταφοράς, μειώνοντας έτσι το απαιτούμενο κόστος καλωδίωσης. Παράλληλα επιτυγχάνεται και μείωση του κόστους στην περίπτωση όπου μεταφέρονται ταυτόχρονα πολλά σήματα STS πάνω από τον ίδιο φυσικό φορέα, καθώς το κόστος πολυπλεξίας και αποπολυπλεξίας είναι μικρό σε συστήματα SONET/SDH^{[3][15][22][23]}.



ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ SONET/SDH

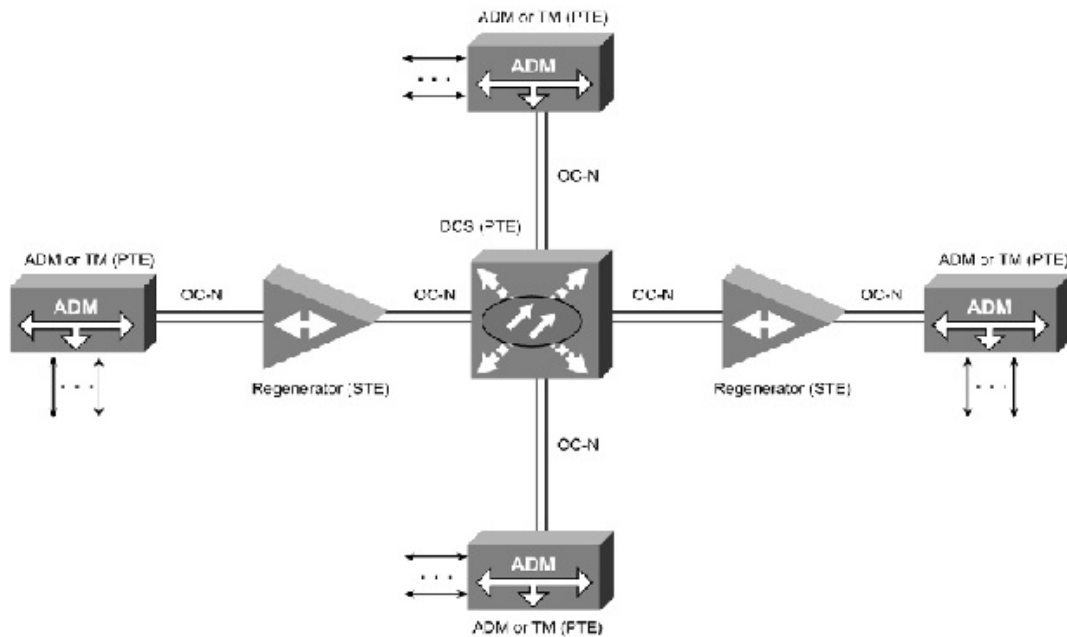
Μετά τη μελέτη των στοιχείων που απαρτίζουν ένα δίκτυο τεχνολογίας SONET/SDH φθάσαμε στο σημείο να περιγράψουμε και τις αρχιτεκτονικές δικτύων που υποστηρίζονται από αυτήν την τεχνολογία. Οι αρχιτεκτονικές αυτές βασίζονται σε πολλούς παράγοντες, όπως το είδος των εφαρμογών και πρωτοκόλλων, οι αποστάσεις, οι τρόποι χρήσης και πρόσβασης κ.α. Οι βασικές αρχιτεκτονικές που θα αναφέρουμε είναι τέσσερις:

Σημείο – Σημειακή τοπολογία (Point-to-Point topology): Αυτή είναι η πιο απλή αρχιτεκτονική δικτυακής μετάδοσης. Η υλοποίηση που δημιουργεί και τερματίζει το SONET path-level σήμα αναφέρεται σαν υλοποίηση τερματισμού μονοπατιού. Η προστασία της διάταξης από αστοχίες επιτυγχάνεται με τον πλεονασμό ηλεκτρονικού εξοπλισμού και οπτικών ινών. Τα πιο συστήματα χρησιμοποιούν πλήρως διπλότυπα ηλεκτρονικά και ποικίλες διαδρομές για την λειτουργία και την προστασία των καλωδιώσεων.



Εικόνα 7.8. Σύνθεση point-to-point SONET συνδέσεων μετάδοσης.

Δίκτυο κεντρικού σημείου (Hub Network): Στη συγκεκριμένη τοπολογία μπορούμε να εξυπηρετήσουμε πολλούς τερματικούς σταθμούς οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους. Ο κεντρικός κόμβος ουσιαστικά είναι ο ρυθμιστής – controller. Οι ζεύξεις – Links οι οποίες ενώνουν τους τερματικούς σταθμούς περνούν μέσα από το DCS – Distributed Control System το οποίο είτε είναι DXC – Digital Cross Connect ή OXC – Optical Cross Connect.



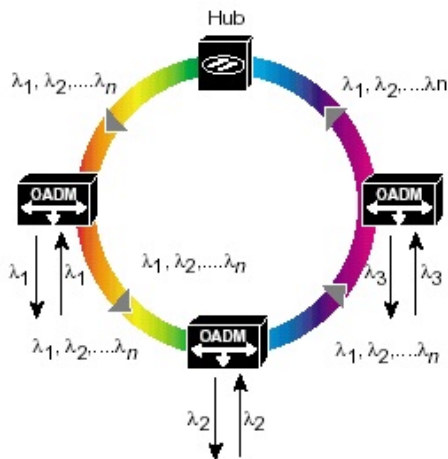
Εικόνα 7.9. Αρχιτεκτονική Κομβικού Σημείου (Hub).

Στην πιο πάνω τοπολογία της εικόνας 3.9 βλέπουμε 4 ζευκτικές γραμμές με το DCS. Μεταξύ αυτών των γραμμών κάποιες μπορεί να υλοποιούνται με οπτικές ίνες και κάποιες με ομοαξονικό καλώδιο. Πιθανόν σε μια οπτική ζεύξη να υπάρχουν πέραν του ενός μήκος κύματος WDM – Wavelength Division Multiplexing. Ένα άλλο σενάριο που μπορεί να συμβεί είναι μια οπτική γραμμή να φορτώνεται με οπτικό σήμα 1550 nm ενώ κάποια άλλη με τα 1310 nm. Κατά συνέπεια το DCS θα πρέπει να αποτελείται από εκείνες τις οπτικό ηλεκτρονικές διατάξεις οι οποίες θα μπορούν να φιλτράρουν να ενισχύουν να εξασθενούν να πολυπλέκουν και να αποπολυπλέκουν μήκη κύματος επίσης θα πρέπει να μετατρέπουν το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό και αντίστροφα και τέλος να μεταβιβάσουν το σήμα στην σωστή κατεύθυνση με την χρήση ειδικών καρτών – switch matrix cards.

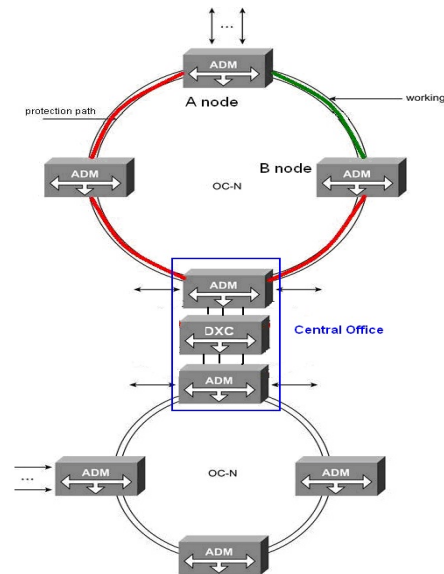
Αρχιτεκτονική Δακτυλίου (Ring Architecture) : Η τοπολογία δακτυλίου είναι η τοπολογία η οποία είναι ταυτισμένη με τα οπτικά δίκτυα. Και παρέχει πολλά είδη προστασίας – protection της ροής των δεδομένων. Αναφορικά θα πούμε ότι με την χρήση του δακτυλίου δημιουργούνται δύο εναλλακτικές διαδρομές – paths επικοινωνίας για τον αποστολέα και τον δέκτη με αποτέλεσμα η ροή δεδομένων να προστατεύεται από την ίδια την ύπαρξη του δακτυλίου. Αυτό και είναι το βασικό πλεονέκτημα ενός δακτυλίου. Στην ορολογία των οπτικών δικτύων γίνεται λόγος για το κύριο ή πρωτεύον μονοπάτι – working path και το προσωρινό ή δευτερεύον μονοπάτι – Protection path.



Οι σχηματισμοί της τοπολογίας δακτυλίου μπορούν να επεκταθούν με ένα ή περισσότερα συστήματα WDM, που υποστηρίζουν κίνηση όλων προς όλους (any-to-any traffic), ή μπορούν να έχουν έναν κεντρικό σταθμό συγκέντρωσης (hub) και έναν ή περισσότερους κόμβους οπτικών πολυπλεκτών προσθαφαίρεσης OADM.



Εικόνα 7.10. Τοπολογία Δακτυλίου.



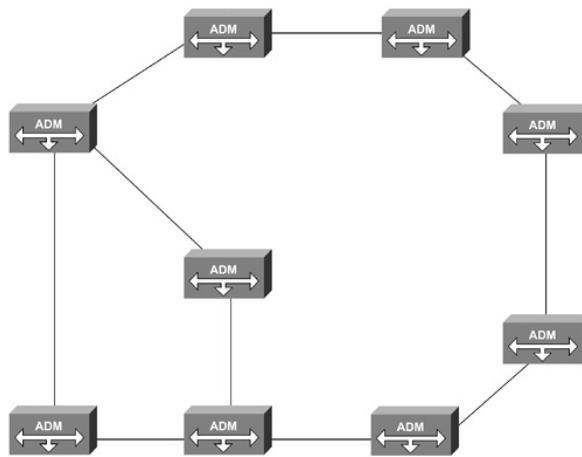
Εικόνα 7.11. DXC και αρχιτεκτονική Δακτυλίου.

Στην περίπτωση που διακοπεί ο κύριος δρόμος (πράσινη γραμμή) αμέσως τίθεται σε λειτουργία ο δευτερεύον δρόμος (κόκκινη γραμμή). Κάτι επίσης ενδιαφέρον που πρέπει να παρατηρήσουμε στη πιο πάνω τοπολογία βλέπουμε δύο δακτυλίους έναν μεγάλο και έναν μικρότερο να ενώνονται μέσω ενός κεντρικού πολυπλέκτη. Η σύνδεση δύο δικτύων είτε είναι δύο δακτύλιοι είτε οποιαδήποτε άλλης τοπολογίας γίνεται πάντοτε με ενδιάμεσο ζευκτικό σταθμό – DXC – Digital Cross connect (για ηλεκτρική ζεύξη των δακτυλίων) ή με τη χρήση OXC – Optical cross Connect (για οπτική ζεύξη των δακτυλίων) όπως φαίνεται στη παραπάνω εικόνα.

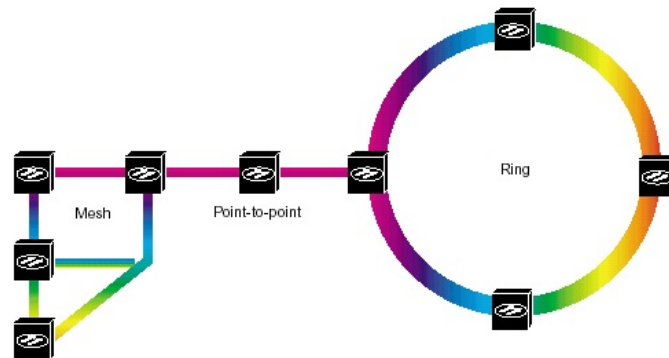
Αρχιτεκτονική Πλέγματος (Mesh Architecture): Οι τοπολογίες πλέγματος (Mesh Topologies) αποτελούν το μέλλον των οπτικών δικτύων. Δεδομένου ότι τα δίκτυα εξελίσσονται, οι τοπολογίες δακτυλίου και οι από σημείο-σημειακή θα αντικατασταθούν μερικά από μία καλύτερα αναπτυσσόμενη τοπολογία, αυτή του πλέγματος. Η ανάπτυξη οφείλεται στην εισαγωγή διαμορφωμένων οπτικών διασταυρωτήρων (Optical Cross Connects) που σε μερικές περιπτώσεις αντικαθιστούν άλλες σταθερές συμπληρωματικές συσκευές WDM.



Από τη σκοπιά σχεδίασης, υπάρχει η δυνατότητα μετάβασης από σημείο-σε-σημείο τοπολογίες σε πλέγματος χωρίς να χρειάζεται επανασχεδίαση του δικτύου. Έτσι αρχίζοντας με σημείο-σημειακή συνδέσεις, με κόμβους OADM (για περισσότερη ευελιξία), στη συνέχεια η διασύνδεσή τους οδηγεί σε τοπολογίες πλέγματος. Επιπλέον, οι τοπολογίες πλέγματος και δακτυλίου μπορούν να ενωθούν με από σημείο-σημειακή συνδέσεις.



Εικόνα 7.12. Αρχιτεκτονική Πλέγματος (Mesh).



Εικόνα 7.13. Πλέγματος, Σημείο-σε-Σημείο και Δακτυλίου Τοπολογίες.

Η τοπολογία πλέγματος μπορεί να θεωρηθεί ως τοπολογία «υψηλής νοημοσύνης» γιατί μπορεί και εκτελεί λειτουργίες προστασίας και διαχείρισης του εύρους ζώνης καθώς και δυνατότητες εναλλαγής οπτικής ίνας (fiber switching) και δρομολόγηση μήκους κύματος (wavelength switching). Τα σημαντικά οφέλη της τοπολογίας πλέγματος είναι ευελιξία και αποδοτικότητα, απαιτείται όμως τεχνολογική ωρίμανση των υφιστάμενων διατάξεων^{[15][16][22]}.



WDM ΔΙΚΤΥΩΣΗ

Η ενότητα αυτή παρουσιάζει την τεχνική με την οποία συνδυάζεται η τεχνολογία WDM με αρχιτεκτονικές δικτύου υψηλότερων επιπέδων ώστε να καταστεί δυνατή η χρήση των μεγάλων ρυθμών μετάδοσης. Αυτή η «συνεργασία» του WDM με τις αρχιτεκτονικές υψηλότερων επιπέδων δημιουργεί προβλήματα λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητας που χαρακτηρίζει τα οπτικά δίκτυα. Τα προβλήματα αυτά συνίστανται κυρίως στο μεγάλο κόστος υλοποίησης και στην δυσκολία επέκτασης ενός οπτικού δικτύου.

Η χρήση της οπτικής μετάδοσης σε backbone δίκτυα στα οποία συνδέονται πελάτες με διαφορετικές ανάγκες σε ταχύτητες πρόσβασης και διαφορετικού τύπου εξοπλισμό ήταν ένας από τους λόγους που οδήγησαν στην δημιουργία προτύπων περιγραφής του τρόπου μεταφοράς δεδομένων πάνω από ένα οπτικό δίκτυο και κυρίως του τρόπου διασύνδεσης πάνω σε ένα οπτικό δίκτυο. Έτσι δημιουργήθηκαν οι αρχιτεκτονικές SONET και SDH που καθορίζουν πρότυπα για τους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων πάνω από οπτικά δίκτυα καθώς και τους τρόπους ομαδοποίησης και μετάδοσης των δεδομένων σε πλαίσια.

Πριν την εφαρμογή του WDM, οι αρχιτεκτονικές SONET/SDH υπέθεταν ότι η μετάδοση των δεδομένων γίνεται με χρήση ενός μόνο μήκους κύματος πάνω από μια οπτική ίνα. Τα πρότυπά τους όμως μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς αλλαγές και για μετάδοση πάνω από ένα σύστημα WDM. Ουσιαστικά οι αρχιτεκτονικές SONET/SDH αποτελούν ένα επίπεδο που βρίσκεται πάνω από το επίπεδο των οπτικών ινών και του ακριβούς τρόπου μετάδοσης του οπτικού σήματος μέσα από αυτές. Παρόλα αυτά όμως τον τελευταίο καιρό αρχίζει μια έντονη αμφισβήτηση της χρησιμότητας ύπαρξης του επιπέδου SONET/SDH η οποία έχει οδηγήσει στην υλοποίηση συστημάτων WDM που δεν απαιτούν την ύπαρξη συστήματος SONET/SDH για την παροχή υπηρεσιών σε αρχιτεκτονικές υψηλότερων επιπέδων^[14].

Η τεχνολογία «IP over SONET/SDH» και «IP over SONET/SDH over WDM»

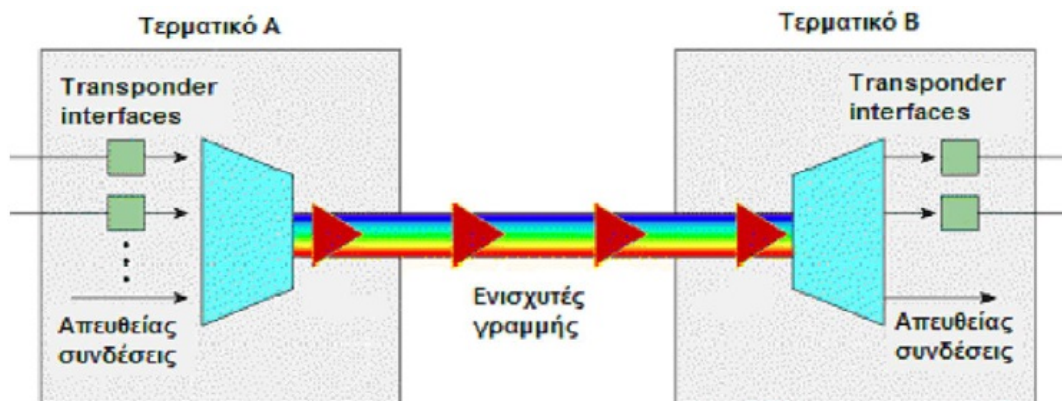
Ο όρος «IP over SONET/SDH», ή αλλιώς «Packet over SONET/SDH», αναφέρεται ουσιαστικά στην προσθήκη SONET/SDH διασυνδέσεων με κάποιον δρομολογητή που αποτελεί τερματικό στοιχείο για τη διακίνηση δεδομένων μέσω του πρωτοκόλλου από-σημείο-σε-σημείο (Point-to-Point Protocol-PPP). Το πρωτόκολλο PPP αποτελεί το ευρύτερα αποδεκτό πρωτόκολλο μορφοποίησης για την κυκλοφορία δεδομένων στο διαδίκτυο (Internet Protocol - IP traffic). Στην πραγματικότητα, η IP κυκλοφορία μέσω ενός



SONET/SDH δρομολογητή προσομοιάζεται ως μια σειριακή ροή δεδομένων (datastream) που μετακινείται κατά μήκος του δικτύου, χρησιμοποιώντας το PPP πρωτόκολλο για τις λειτουργίες μορφοποίησης και συμπύκνωσης της. Αυτές οι ροές δεδομένων χαρτογραφούνται σε καθορισμένα STS πλαίσια, όπως προβλέπεται από το RFC 1619.

Τα πλαίσια μπορούν να έχουν τυπικό ρυθμό μετάδοσης OC-3/STM-1, OC-12/STM-4 και OC-48/STM-16. Σε κάθε κόμβο του δικτύου το IP πακέτο δεδομένων απομονώνεται από το PPP πλαίσιο του, εξετάζεται η διεύθυνση προορισμού του και τελικά αυτό εντάσσεται σε ένα νέο PPP πλαίσιο για να συνεχιστεί η μεταφορά του. Τα βασικά πλεονεκτήματα που προσέφερε η τεχνολογία «IP over SONET/SDH» συνοψίζονται στα εξής:

- Η αποτελεσματική από-σημείο-σε-σημείο μεταφορά της IP κυκλοφορίας.
- Η πρόβλεψη σχετικά υψηλών ευρών ζώνης για την παροχή μη διαφοροποιημένων υπηρεσιών (nondifferentiated services). Ωστόσο, κατά τα τελευταία χρόνια, η αύξηση της κυκλοφορίας δεδομένων στο διαδίκτυο είναι εκρηκτική. Κάθε χρόνο ο όγκος της διακινουμένης πληροφορίας υπερδιπλασιάζεται και αυτό αναμένεται να διατηρηθεί και κατά τα επόμενα έτη.

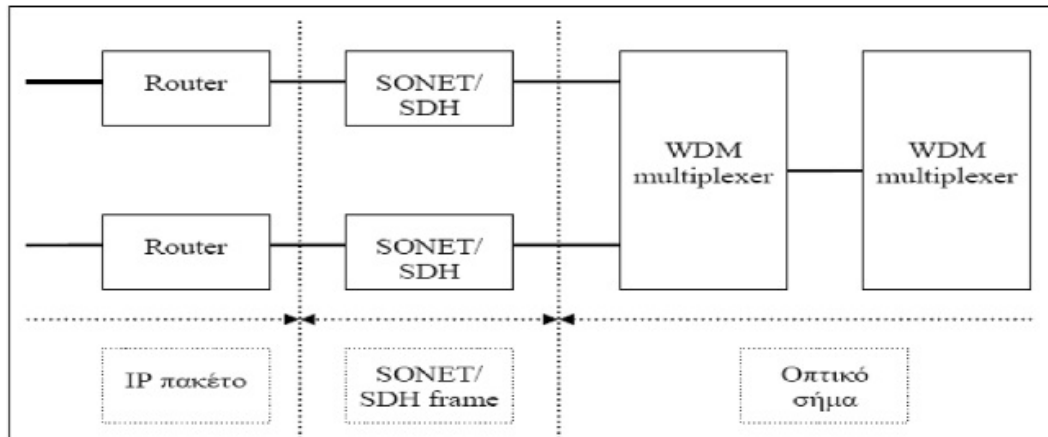


Εικόνα 7.14. Η αρχή λειτουργίας του transponder.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος της έλλειψης εύρους ζώνης, κρίθηκε αναγκαία η ενσωμάτωση της τεχνολογίας πολυπλεξίας στο πεδίο του μήκους κύματος (WDM) στην υπάρχουσα «IP over SONET/SDH» τεχνολογία. Έτσι, προέκυψε μία νέα βελτιωμένη μέθοδος μετάδοσης IP δεδομένων η οποία αναφέρεται ως «IP over SONET/SDH over WDM». Σε ένα τέτοιο σύστημα, καθοριστικό ρόλο έχει μια εξειδικευμένη διάταξη εκπομπής (transponder - Σχήμα 6), η οποία αναλαμβάνει τη μετατροπή του συμβατού με το



πρότυπο SONET/SDH οπτικού σήματος, που περιέχει τις πληροφορίες του IP πακέτου, σε ηλεκτρικό σήμα.



Εικόνα 7.15. IP over SONET/SDH over WDM.

Αυτό το ηλεκτρικό σήμα χρησιμοποιείται ως οδηγός μιας «WDM laser διάταξης», η οποία είναι εξαιρετικής ακρίβειας και λειτουργεί σε περιοχή μήκους κύματος γύρω από τα 1550nm. Ένα σύστημα «IP over SONET/SDH over WDM» περιλαμβάνει πολλές διατάξεις τύπου transponder, καθεμιά από τις οποίες μετατρέπει τις πληροφορίες του πακέτου που δέχεται σε ένα ελαφρώς διαφορετικό μήκος κύματος. Στη συνέχεια, τα μήκη κύματος όλων των transponders του συστήματος πολυπλέκονται οπτικά και μεταφέρονται διαμέσου της οπτικής ίνας. Στο άκρο λήψης, λαμβάνει χώρα η αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή τα μήκη κύματος διαχωρίζονται (διαδικασία οπτικής αποπολύπλεξης) και καθένα από αυτά τροφοδοτείται σε έναν transponder. Έτσι, το σήμα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό και μέσω μιας προτυποποιημένης SONET/SDH διασύνδεσης, τα IP πακέτα αποκαλύπτονται.

Η προσθήκη της WDM τεχνολογίας στα τυπικά «IP over SONET» συστήματα προσφέρει μια σειρά από σημαντικότερα πλεονεκτήματα όπως:

- Η **αύξηση της χωρητικότητας** της υπάρχουσας οπτικής ίνας, δίχως να απαιτείται η εγκατάσταση επιπλέον οπτικών ινών.
- Η **αντικατάσταση των ηλεκτρικών αναγεννητών** (electrical regenerators), που αποτελούν διατάξεις υψηλού κόστους και είναι πολύπλοκες, με αυτές των οπτικών ενισχυτών (optical amplifiers). Έτσι, δεν απαιτείται η πρότερη μετατροπή του σήματος σε ηλεκτρικό προκειμένου να ενισχυθεί ενώ όλα τα κανάλια ενισχύονται ταυτόχρονα. Επιπλέον, οι οπτικοί ενισχυτές τοποθετούνται κάθε περίπου 1000 km, σε αντίθεση με



τους ηλεκτρικούς αναγεννητές του «IP over SONET» συστήματος που τοποθετούνται κάθε 60-100km.

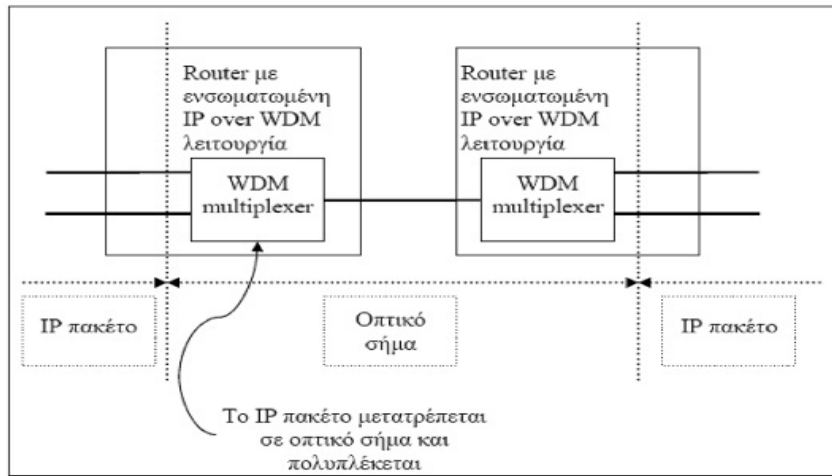
- Η διαδικασία προσθήκης νέων καναλιών στο δίκτυο απλοποιείται σημαντικά. Η μοναδική απαίτηση είναι η εγκατάσταση του κατάλληλου αριθμού transponders στο σύστημα, στα δύο άκρα του WDM υποσυστήματος. Οι οπτικοί ενισχυτές αναλαμβάνουν την ενίσχυση των επιπλέον καναλιών, ταυτόχρονα με τα προϋπάρχοντα, δίχως την απαίτηση επιπλέον αναγεννητών.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα προαναφερθέντα οφέλη για τα WAN δίκτυα υποσκελίζουν, σχεδόν πάντοτε, σε μεγάλο βαθμό το κόστος εγκατάστασης του WDM υποσυστήματος στο υπάρχον «IP over SONET» σύστημα και για αυτό το λόγο η συντριπτική πλειοψηφία των δικτύων αυτής της κατηγορίας έχει ενσωματώσει την τεχνολογία της πολυπλεξίας στο πεδίο του μήκους κύματος^[17].

Η τεχνολογία IP over WDM

Η τεχνολογία μεταφοράς IP πακέτων απευθείας μέσω του WDM οπτικού επιπέδου (IP over WDM), δίχως τη μεσολάβηση κάποιου ενδιάμεσου επιπέδου, αποτελεί τη μελλοντική δικτυακή υλοποίηση που θα εξασφαλίσει την ύπαρξη ενός ουσιαστικά απεριόριστου εύρους ζώνης. Η τεχνολογία αυτή, προχωρώντας ένα βήμα παραπέρα σε σχέση με την IP over SONET/SDH over WDM υλοποίηση και προβλέπει την εξολοκλήρου απαλοιφή του παραδοσιακού SONET/SDH στρώματος. Έτσι, τα IP πακέτα δεδομένων μετατρέπονται απευθείας σε οπτικό σήμα και ακολουθεί η διαδικασία της πολύπλεξης στο πεδίο του μήκους κύματος.

Όπως γίνεται αντιληπτό, η απουσία της ενδιάμεσης μετατροπής των πακέτων σε προτυποποιημένα SONET/SDH πλαίσια απλοποιεί σημαντικά τη διαδικασία. Σημαντικό ρόλο για την επίτευξη μιας τέτοιας υλοποίησης, με τον απλούστερο δυνατό τρόπο, αποτελεί η ύπαρξη ενός καινοτόμου δρομολογητή που θα ενσωματώνει ορισμένες βασικές WDM λειτουργίες.



Εικόνα 7.16. IP over WDM σύστημα.

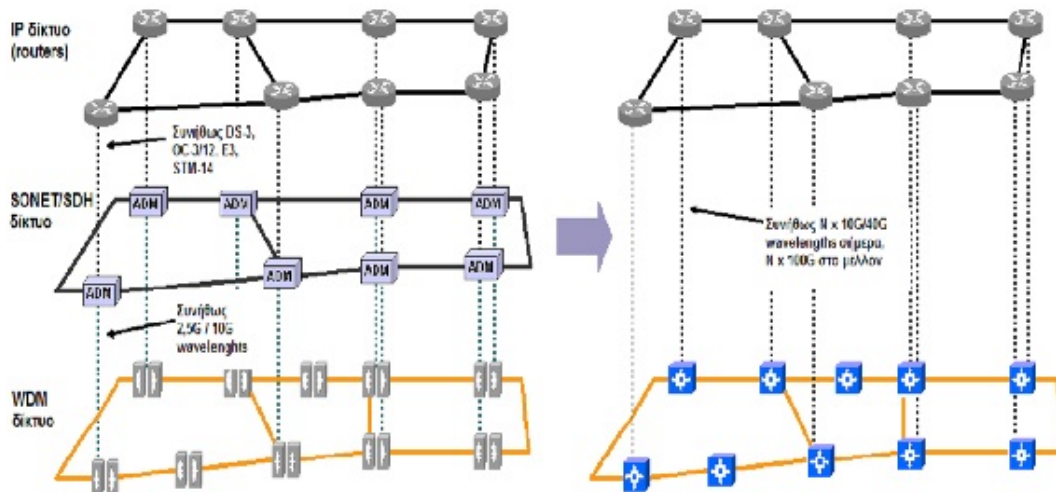
Το σημείο-κλειδί που θα επιτρέψει την αποτελεσματική λειτουργία και την πλήρη εκμετάλλευση των σημαντικών δυνατοτήτων ενός IP over WDM δικτύου είναι ο ξεκάθαρος ορισμός των υπηρεσιών και της λειτουργικότητας που καθένα από τα IP και WDM στρώματα θα προσφέρουν. Είναι σημαντικό να μην υπάρχει σύγκρουση αλλά συμπληρωματικότητα μεταξύ των δύο αυτών στρωμάτων. Ως παράδειγμα αναφέρονται τα θέματα της αλληλεπίδρασης μεταξύ της αναδιαμόρφωσης των οπτικών μονοπατιών και της IP δρομολόγησης ή της αλληλεπίδρασης μεταξύ της IP αποκατάστασης (IP restoration) και της προστασίας στο οπτικό επίπεδο.

Επιπλέον, η διαμόρφωση του IP στρώματος θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η μέγιστη εκμετάλλευση των προσφερόμενων από το WDM στρώμα υπηρεσιών. Για παράδειγμα, εφόσον το IP στρώμα θα μπορούσε να παρέχει υπηρεσίες σε ότι αφορά στον τύπο της κυκλοφορίας και τις απαιτήσεις των πακέτων σε ποιότητα υπηρεσιών (QoS), τότε και το WDM στρώμα θα μπορούσε να δίνει τη δυνατότητα για κατά απαίτηση οπτικά μονοπάτια (on-demand lightpaths) συγκεκριμένης υψηλού όγκου IP κυκλοφορίας.

Η υλοποίηση ενός εξολοκλήρου οπτικού (all-optical) και από-άκρο-σε-άκρο WDM δικτύου έχει προσελκύσει σημαντικότερες ερευνητικές προσπάθειες καθώς πλέον έχουν αντιληφθεί τα σημαντικά πλεονεκτήματα της ολοκλήρωσης μιας τέτοιας υλοποίησης^[17].



Σύγκριση IP over WDM και IP over SONET/SDH over WDM τεχνολογίας



Εικόνα 7.17. Σύγκριση IP over SONET/SDH over WDM – IP over WDM.

Η ενδεχόμενη απαλοιφή του SONET/SDH στρώματος από την όλη διαμόρφωση ενός οπτικού δικτύου θα μπορούσε να προσφέρει μια σειρά από σημαντικότερα πλεονεκτήματα όπως:

- Εννοείται η ταχύτερη κλιμάκωση μεγέθους και ταυτόχρονα υπάρχει μεγάλη μείωση του κόστους υλοποίησης και λειτουργίας.
- Περιορισμός σε υψηλό βαθμό του πλεονασμού που εισάγει η ύπαρξη του επιπλέον SONET/SDH στρώματος. Έτσι, παύει πλέον η αναγκαιότητα χρήσης ενός σοβαρού ποσοστού των πόρων του δικτύου που απορρέουν από τις μη βελτιστοποιημένες λειτουργίες διαχείρισης που διεξάγονται από το SONET/SDH στρώμα.
- Ο χαμηλός βαθμός πολυπλοκότητας της IP over WDM υλοποίησης. Μετά πλέον και τις τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις, πολλοί θεωρούν ότι το SONET/SDH επίπεδο παύει να προσφέρει λειτουργικότητα στο δίκτυο, γεγονός που έως τώρα αποτελούσε το βασικό πλεονέκτημά του.
- Ο υψηλός βαθμός ευελιξίας που προσφέρει η απλή υλοποίηση δύο στρωμάτων, για την υλοποίηση και διαχείριση δικτύων υψηλής χωρητικότητας.



- Παρέχεται η δυνατότητα προσφοράς νέων υπηρεσιών προς τους χρήστες –πελάτες του δικτύου, μέσα σε ένα περιβάλλον αυξανόμενης κυκλοφορίας IP δεδομένων (bandwidth on demand με χρήση lightpaths). Ωστόσο, στα παραπάνω θα πρέπει να συνυπολογιστεί ότι η SONET/SDH τεχνολογία διαθέτει υψηλό επίπεδο ωριμότητας και όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την WDM λύση στο χαμηλότερο στρώμα, μέσω μιας IP over SONET/SDH over WDM υλοποίησης, μπορεί να προσφέρει επιπλέον αξιοπιστία στο δίκτυο^[17].



Βιβλιογραφία

ΕΝΤΥΠΗ

1. *Οπτικές Ίνες* - David R. Goff.
2. *Συστήματα Μετάδοσης & Δίκτυα Οπτικών Ινών* – Σημειώσεις Ηρακλής Αβραμόπουλος (Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών).
3. *Understanding Optical Communications* - Harry J. R. Dutton.
(<http://www.redbooks.ibm.com>)
4. *Οπτικές Επικοινωνίες* – Μαρία Κωνσταντάκη, 2004.
5. *Μελέτη Ημιαγωγών* – Σημειώσεις Ντρίβας Ν.
6. *Συστήματα Επικοινωνιών με Οπτικές ίνες* – Govin P. Agrawal.
7. *Δίκτυα Οπτικών Ινών* - Paul E. Green.
8. *Τηλεπικοινωνίες με Οπτικές Ίνες* - Intracom S.A.
9. *Ηλεκτρομαγνητισμός – Οπτική, ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ ΟΠΤΙΚΗΣ* (Πειραματική μελέτη ιδιοτήτων δέσμης Laser) - Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας.
10. *Οπτοηλεκτρονική* – Α.Αλεξανδρή, 2004.
11. *Αρχές των LASER* – O.Svelto (1986).
12. *LASER* - Π. Λαμπρόπουλος.
13. *Πολυπλεξία Πυκνής Διαίρεσης Μήκους Κύματος* – Σημειώσεις Δρ. Χρ. Βασιλόπουλος (2002).



14. *Πολυπλεξία Πυκνής Διαίρεσης Μήκους Κύματος* – Σημειώσεις Παύλου Γαβρά – Σταμάτη Παπαθανασίου (oteacademy) (2009).
15. *SDH Theory and Networks* – Σημειώσεις Δημ. Μαργιώλης (2009).
16. *SDH Theory* – Σημειώσεις ΟΤΕ Α.Ε.
17. *IP over SONET/SDH over WDM vs. IP over WDM* - Καραγιαννάκης Γεώργιος (Εργασία για το μεταπτυχιακό μάθημα *Τεχνολογίες Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων*, Τμήμα Μεταπτυχιακών σπουδών στα Πληροφοριακά Συστήματα, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας)

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ

18. *Οπτικές Ίνες (Fiber Optics) - Καλώδια Οπτικών Ινών*
http://egnatia.ee.auth.gr/~aalexioy/fiber_op.htm.
19. *Οπτική Ίνα -*
http://el.science.wikia.com/wiki/%CE%9F%CF%80%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%8A%CE%BD%CE%BI.
20. *Χαρακτηριστικά Οπτικής Ίνας -*
http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/el/Optical_fiber#History.
21. *Light Emitting Diodes (LEDs) -* <http://www.kpsec.freeuk.com/components/led.htm>.
22. *Understanding SONET/SDH -* <http://electrosofts.com/sonet/index.html>.
23. *Πληροφορίες για Οπτικές Ίνες - Συστήματα WDM/SONET/SDH -*
<http://www.wikipedia.org> - <http://www.scribd.com>.



Πίνακας Εικόνων

- Εικόνα 1.1.* : Πείραμα JOHN TYNDALL.
- Εικόνα 1.2.* : Πίνακας εξέλιξης οπτικών ινών.
- Εικόνα 2.1.* : Οπτική ίνα.
- Εικόνα 2.2.* : Εγκάρσια τομή οπτικής ίνας.
- Εικόνα 2.3.* : Κατηγορίες οπτικών ινών και τρόποι διάδοσης τους.
- Εικόνα 2.4.* : Κατασκευή καλωδίου οπτικής ίνας.
- Εικόνα 2.5.* : Οπτικό φάσμα.
- Εικόνα 2.6.* : Ιδιότητες φωτός.
- Εικόνα 2.7.* : Περίπτωση προσπίπτουσας ακτίνας $<90^\circ$.
- Εικόνα 2.8.* : Οι βασικές παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαδικασία επιλογής ενός καλωδίου οπτικής ίνας.
- Εικόνα 2.9.* : Ίνες με πρωτεύον επίστρωμα ή κορδέλες ινών μπορεί να τοποθετηθούν χαλαρά μέσα σε σωλήνα, ο οποίος παίζει ρόλο απομονωτή.
- Εικόνα 2.10.* : Σφικτός σωλήνας.
- Εικόνα 2.11.* : Οι δύο πιο διαδεδομένες διαδικασίες κατασκευής κορδελών ινών.
- Εικόνα 2.12.* : Οπτικά καλώδια ομόκεντρης κατασκευής. Το πρώτο αποτελείται από ίνες χαλαρού σωλήνα τυλιγμένες γύρω από τον παράγοντα αντοχής (πυρήνα), ενώ το δεύτερο από ίνες σφικτού σωλήνα.
- Εικόνα 2.13.* : Τρόποι τυλίγματος πυρήνα αυλακώσεων.
- Εικόνα 2.14.* : Καλώδια που χρησιμοποιούνται σε υποβρύχιες τοποθετήσεις.
- Εικόνα 2.15.* : Δυο παραδείγματα υβριδικών καλωδίων που χρησιμοποιούνται σε σιδηροδρομικές εγκαταστάσεις.
- Εικόνα 2.16.* : Παγκόσμιο Δίκτυο Οπτικών Ινών.
- Εικόνα 2.17.* : Οπτικό Δίκτυο Ελλάδας.
- Εικόνα 2.18.* : Οπτικό Δίκτυο Ηρακλείου.
- Εικόνα 3.1.* : Διάφορες περιπτώσεις γωνίας πρόσπτωσης φωτός.
- Εικόνα 3.2.* : Περίπτωση προσπίπτουσας ακτίνας $< 90^\circ$.
- Εικόνα 3.3.* : Φαινόμενο ολικής εσωτερικής ανάκλασης.
- Εικόνα 3.4.* : Μετάδοση σε πολύτροπη οπτική ίνα.
- Εικόνα 3.5.* : Οπτικοί Τρόποι Διάδοσης.
- Εικόνα 3.6.* : Κώνος αποδοχής.
- Εικόνα 3.7.* : Η εξασθένηση του φωτός για γυαλί οπτικής ίνας. Παρατηρούμε τα “παράθυρα” στα διάφορα μήκη κύματος.
- Εικόνα 3.8.* : Πολύτροπη Ίνα Βηματικού Δείκτη Διάθλασης.
- Εικόνα 3.9.* : Πολύτροπη Ίνα Διαβαθμισμένου Δείκτη Διάθλασης.
- Εικόνα 3.10.* : Μονότροπη Ίνα.
- Εικόνα 3.11.* : Γράφημα εξάρτησης της παραμέτρου από το μήκος κύματος.
- Εικόνα 3.12.* : Διασπορά κυματοδηγού σε μονότροπη ίνα.



- Εικόνα 3.13.* : Καμπύλη συνολικής διασποράς.
- Εικόνα 3.14.* : Διασπορά Πόλωσης.
- Εικόνα 3.15.* : Διασπορά Πόλωσης μέσα στην οπτική ίνα.
- Εικόνα 3.16.* : Επιδράσεις της Μίξης Τεσσάρων Κυμάτων.
- Εικόνα 3.17.* : Τα παραγόμενα αυτά κανάλια διαδίδονται μαζί με τα αρχικά και αναπτύσσονται «εις βάρος τους».
- Εικόνα 3.18.* : Η SPM διευρύνει το φασματικό περιεχόμενο του παλμού δημιουργώντας νέες συχνότητες. Μία συχνότητα αντιστοιχεί σε περισσότερες από μία τιμές της φάσης, και άρα δημιουργούνται «βυθίσματα» στο φάσμα.
- Εικόνα 3.19.* : Διεγερόμενη Σκέδαση Raman.
- Εικόνα 3.20.* : Διεγερόμενη σκέδαση Brillouin (SBC).
- Εικόνα 3.21.* : Επίδραση διεγερόμενης σκέδασης Brillouin στην ισχύ του οπτικού σήματος .
- Εικόνα 4.1.* : Αυθόρμητη εκπομπή φωτονίου, Εξαναγκασμένη εκπομπή φωτονίου
- Εικόνα 4.2.* : Κατηγορίες στερεών.
- Εικόνα 4.3.* ; Ημιαγωγοί.
- Εικόνα 4.4.*: Ημιαγωγός τύπου p-n.
- Εικόνα 4.5.* : Ορθά πολωμένη επαφή p-n.
- Εικόνα 4.6.* : Ορθή πόλωση διόδου p-n
- Εικόνα 4.7.* : Ανάστροφα πολωμένη επαφή p-n.
- Εικόνα 4.8.* : Ανάστροφη πόλωση.
- Εικόνα 4.9.* : LED διαφορετικών χρωμάτων
- Εικόνα 4.10.* : Πηγή LED
- Εικόνα 4.11.* : Δομή LED
- Εικόνα 4.12.* : LED τύπου Burrus με κατάλληλο σχήμα αύλακος για το περιορισμό της απορρόφησης στο στρώμα τύπου n του GaAs.
- Εικόνα 4.13.* Ο λοβός εκπομπής είναι μια έλλειψη με οριζόντιο άνοιγμα 115-125 μοίρες και κάθετο άνοιγμα 25-35 μοίρες.
- Εικόνα 4.14.* Στην εικόνα έχουμε μια πραγματική απεικόνιση κοινού led και κυκλωματικού συμβόλου μιας διόδου εκπομπής φωτός led αντίστοιχα.
- Εικόνα 4.15.* : Ορθή σύνδεση LED
- Εικόνα 4.16.* : Μετατροπή ρεύματος σε φως από δίοδο LASER
- Εικόνα 4.17.* : Αρχή λειτουργίας και αναστροφή πληθυσμού.
- Εικόνα 4.18.* : Σχηματική αναπαράσταση διάταξης laser
- Εικόνα 4.19.* : LASER Fabry – Perot
- Εικόνα 4.20.* : Φάσμα εκπομπής LASER Fabry – Perot
- Εικόνα 4.21.* : Δομή LASER DFB
- Εικόνα 4.22.* : Φάσμα εκπομπής LASER DFB
- Εικόνα 4.23.* : Συγκριτικός πίνακας LED και LASER.



- Εικόνα 4.24.* : Το διάγραμμα δείχνει τη σχέση μεταξύ του ρεύματος οδήγησης και της ισχύος εξόδου. Η δίοδος laser λειτουργεί ως κοινό LED μέχρι το σημείο κατωφλίου.
- Εικόνα 4.25.* : Λοβός ακτινοβολίας LASER και LED αντίστοιχα.
- Εικόνα 4.26.* : Οπτικά φάσματα ενός LED, LASER και gas LASER.
- Εικόνα 4.27.* : Φωτοαγώγιμος ανιχνευτής
- Εικόνα 4.28.* : Ένα φωτόνιο μπορεί να δημιουργήσει ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών σε τρεις διαφορετικές περιοχές της δίοδου (A, B και C). Μόνο στην περιοχή αραίωσης (B) παρατηρείται άμεση ανίχνευση αυτών των ζευγών.
- Εικόνα 4.29.* : Σχηματικό διάγραμμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε μια p-n δίοδο
- Εικόνα 4.30.* : Δομή μιας φωτοδίοδου PIN. Τοποθετώντας το λεπτό στρώμα intrinsic μεγαλώνει πολύ η περιοχή απορρόφησης.
- Εικόνα 4.31.* : Φωτοδίοδος PIN σε συνδυασμό με InP και InGaAsP
- Εικόνα 4.32.* : Υψηλή ανάστροφη πόλωση της τάξης των 100-300 V δίνει στα ηλεκτρόνια αρκετή κινητική ενέργεια ώστε να λάβει χώρα το φαινόμενο «χιονοστιβάδας».
- Εικόνα 4.33.* : Παρουσίαση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τα διάφορα στρώματα μιας APD δίοδου.
- Εικόνα 4.34.* : Απόκριση μιας φωτοδίοδου σε σχέση με το μήκος κύματος του φωτός και το υλικό κατασκευής της.
- Εικόνα 4.35.* : Εξασθένηση οπτικού σήματος συναρτήσει μήκους κύματος.
- Εικόνα 4.36.* : Το φάσμα εξασθένισης λόγω ενδογενούς απορρόφησης και λόγω σκέδασης Rayleigh σε μία «καθαρή» ίνα από γυαλί $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$.
- Εικόνα 4.37.* : Απώλεια από κάμψη σε συνάρτηση του μήκους κύματος.
- Εικόνα 4.38.* : Απώλειες λόγω μικρό κάμψης της ίνας (κατασκευαστική ατέλεια).
- Εικόνα 4.39.* : Απώλειες λόγω κάμψης της ίνας κατά την τοποθέτησή της.
- Εικόνα 4.40.* : Πιθανότητες Bit Error Rate.
- Εικόνα 4.41.* : Οπτικός ενισχυτής / αναγεννητής.
- Εικόνα 4.42.* : Σημεία τοποθέτησης οπτικού ενισχυτή .
- Εικόνα 4.43.* : Οπτικός Ενισχυτής Ημιαγωγού (SOA)
- Εικόνα 4.44.* : Οπτικός ενισχυτής SOA – FPA.
- Εικόνα 4.45.* : Οπτικός ενισχυτής SOA – TWA.
- Εικόνα 4.46.* : Ενισχυτής ίνας με προσμείξεις Ερβίου.
- Εικόνα 4.47.* : Ιόντα Ερβίου σε ενεργειακή στάθμη.
- Εικόνα 5.1.* : Πολυπλεξία Μήκους Κύματος.
- Εικόνα 5.2.* : Δομικό διάγραμμα του συστήματος TDM.
- Εικόνα 5.3.* : Δομικό διάγραμμα του συστήματος FDM.
- Εικόνα 6.1.* : Η εξέλιξη των συστημάτων WDM.
- Εικόνα 6.2.* : Βασική δομή δικτύου με μεταδότη και αποδέκτη.



- Εικόνα 6.3.* : Διάγραμμα δομής ενός συστήματος μετάδοσης WDM.
- Εικόνα 6.4.* : Λεπτομερές διάγραμμα δομής ενός συστήματος WDM.
- Εικόνα 6.5.* : Διαφορές WDM και TDM Πολυπλέκτη.
- Εικόνα 6.6.* : WDM πολυπλέκτης και ενισχυτικές διατάξεις.
- Εικόνα 6.7.* : Σύγκριση μεταξύ CWDM , WWDM και DWDM.
- Εικόνα 6.8.* : Αποπολύπλεξη φωτός με διάθλαση σε πρίσμα.
- Εικόνα 6.9.* : Διαδικασία περίθλασης με χρήση φράγματος.
- Εικόνα 6.10.* : Συστοιχία κυματοδηγών με φράγματα περίθλασης.
- Εικόνα 6.11.* : Τεχνική αποπολύπλεξης με την τεχνική thin film.
- Εικόνα 6.12.* : Οπτικός Πολυπλέκτης Προσθαφαίρεσης OADM.
- Εικόνα 6.13.* : Σταθερός Πολυπλέκτης OADM.
- Εικόνα 6.14.* : Πολυπλέκτης Δεύτερης Γενιάς OADM.
- Εικόνα 6.15.* : Σχεδιάγραμμα λειτουργίας ενός πολυπλέκτη OADM.
- Εικόνα 6.16.* : Οπτικός διασταυρωτήρας OXC.
- Εικόνα 6.17.* : Οπτικός διασταυρωτήρας OXC.
- Εικόνα 6.18.* : Σχηματική αναπαράσταση του συμβολόμετρου Mach – Zehnder.
- Εικόνα 6.19.* : Δρομολογητής Μήκους Κύματος.
- Εικόνα 6.20.* : Γενική αρχή λειτουργίας Μετατροπέα Μήκους Κύματος.
- Εικόνα 6.21.* : Συνολική ιεραρχία στη δομή των τηλεπικοινωνιακών δικτύων.
- Εικόνα 6.22.* : Παράδειγμα WDM συνδέσμου από σημείο σε σημείο.
- Εικόνα 6.23.* : Αρχιτεκτονικές Lambda-net και Παθητικού Οπτικού Τοπικού βρόχου.
- Εικόνα 6.24.* : Αύξηση εύρους ζώνης.
- Εικόνα 6.25.* : Τεχνολογίες Μετάδοσης και Πρωτόκολλα πάνω από WDM.
- Εικόνα 6.27.* : Το σύστημα PMA32 της Marconi.
- Εικόνα 6.28.* : Το σύστημα TransXpress WaveLine EL1 της Siemens A.G.
- Εικόνα 6.29.* : Το σύστημα Optinex 1686 WM της Alcatel.
- Εικόνα 7.1.* : Πρότυπα ρυθμών μεταφοράς.
- Εικόνα 7.2.* : Μορφή Πλαισίου STM-1.
- Εικόνα 7.3.* : Μετατροπέας ηλεκτρικού σε οπτικό σήμα.
- Εικόνα 7.4.* : Τερματικός Πολυπλέκτης TM.
- Εικόνα 7.5.* : Αναγεννητής Σήματος.
- Εικόνα 7.6.* : Πολυπλέκτης Προσθήκης/Αφαίρεσης.
- Εικόνα 7.7.* : Ένα WDCS σύστημα.
- Εικόνα 7.8.* : Σύνθεση point-to-point SONET συνδέσμων μετάδοσης.
- Εικόνα 7.9.* : Αρχιτεκτονική Κομβικού Σημείου (Hub).
- Εικόνα 7.10.* : Τοπολογία Δακτυλίου.
- Εικόνα 7.11.* : DXC και αρχιτεκτονική Δακτυλίου.
- Εικόνα 7.12.* : Αρχιτεκτονική Πλέγματος (Mesh).
- Εικόνα 7.13.* : Πλέγματος, Σημείο-σε-Σημείο και Δακτυλίου Τοπολογίες.
- Εικόνα 7.14.* : Η αρχή λειτουργίας του transponder.



Εικόνα 7.15. : IP over SONET/SDH over WDM.

Εικόνα 7.16. : IP over WDM σύστημα.

Εικόνα 7.17. : Σύγκριση IP over SONET/SDH over WDM – IP over WDM.