Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής τ.ε.
Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας

# *ΘΕΜΑ : «ΜΕΛΕΤΗ ΣΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΣΥΓΚΟΛΗΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΟΠΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ»*

Έρευνα

**ΝΤΑΡΛΑ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ**

Επίβλεψη

**Δρ. ΗΛΙΑΣ ΑΣΑΡΙΔΗΣ**

ΜΑΡΤΙΟΣ 2018

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της πτυχιακής αυτής είναι η μελέτη οπτικών ινών και η μετάδοση πληροφορίας μέσω αυτής. Η οπτική ίνα, τεχνολογικά , θεωρείται το πιο προηγμένο μέσο που χρησιμοποιείται στις τηλεπικοινωνίες για την μετάδοση σημάτων και πληροφοριών γι' αυτό το λόγο θα μελετήσουμε και θα εξηγήσουμε στα παρακάτω κεφάλαια τη δομή της ,τους τρόπους μετάδοσης πληροφορίας και παράλληλα θα εξετάσουμε τα φαινόμενα απωλειών και πως αυτά επηρεάζουν την ποιότητα μετάδοσης του σήματος. Αφού θα έχουμε προσεγγίσει θεωρητικά το θέμα μας , θα εφαρμόσουμε τις γνώσεις μας και στο πρακτικό κομμάτι με τη βοήθεια του μετρητή Otdr με τον οποίο θα ελέγξουμε την ποιότητα των ινών του εργαστηρίου μας.

# ABSTRACT

The purpose of this thesis is to study fiber optics and transmit information through it. Technologically, optical fiber is considered to be the most advanced means used in telecommunications for the transmission of signals and information, so we will study and explain in the following chapters its structure, ways of transmitting information and, at the same time, we will look at the phenomena of losses and how these affect the signal transmission quality. Once we have theoretically approached our topic, we will apply our knowledge to the practical part with the help of the Otdr meter by which we will test the quality of our laboratory fibers.

# Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ..... 2
ABSTRACT ..... 3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1$^{O}$ ..... 7
ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ ..... 7
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ..... 7
1.1 Γεωμετρική οπτικής ίνας ..... 8
1.2 Μονότροπες οπτικές ίνες ..... 10
1.3 Πολύτροπες οπτκές ίνες ..... 11
1.4 Διαφορές μονότροπων και πολύτροπων ινών ..... 12
1.5 Τρόποι διάδοσης με οπτικές ίνες ..... 12
1.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα οπτικών ινών ..... 17
1.7 Εξασθένιση ..... 17
1.8 Διασπορά ..... 20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2$^{O}$ ..... 23
ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ..... 23
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ..... 23
2.1 Δομή οπτικού συστήματος επικοινωνιών ..... 23
2.2 Δομή Τηλεπικοινωνιακών Δικτύων ..... 24
2.3 Οπτική Τεχνολογία ..... 26
2.4 Οπτικές Ίνες ως Μέσο Δικτύωσης ..... 26
2.5 Οπτικές ίνες ως μέσο διάδοσης ..... 26
2.6 Πλεονεκτήματα ..... 27
2.7 Μειονεκτήματα ..... 28
2.8 Δίκτυα Δρομολόγησης Μήκους Κύματος ..... 29
2.10 Μεταγωγή Κυκλώματος ..... 30
2.11 Μεταγωγή Πακέτου ..... 31
2.12 Μεταγωγή Μηνύματος ..... 32
2.13 Σύγκριση Δικτύων Μεταγωγής ..... 33
2.14 Δίκτυα Πρόσβασης Φωνής και Δεδομένων ..... 33
2.15 Διαχείριση Οπτικού Δικτύου ..... 35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3$^{O}$ ..... 37
ΟΠΤΙΚΟΙ ΠΟΜΠΟΙ ΚΑΙ ΔΕΚΤΕΣ ..... 37
3.1 Οπτικοί πομποί ..... 37

3.2 Οπτικοί δέκτες ..... 38
3.3 LASER ..... 39
3.3.1 Διέγερση και αποδιέγερση ατόμων ..... 40
3.3.2 Βασικές αρχές ..... 41
3.3.3Απορρόφηση ..... 42
3.3.3 Αυτογενής Εκπομπή ..... 43
3.3.4 Εξαναγκασμένη ή Επαγομένη Εκπομπή ..... 44
3.3.5 Φαινόμενο LASER ..... 46
3.3.6 Τα συστατικά στοιχεία ενός laser ..... 47
3.3.7 Ιδιότητες της δέσμης laser ..... 49
3.4LED (Light Emitting Diode) ..... 51
3.4.1 Γενικά ..... 51
3.4.2 LED Ετεροεπαφής Υψηλής Εντάσεως ..... 54
3.4.3 Συνεχής εξέλιξη ..... 54
3.4.4 Εκχύλιση Φωτός ..... 55
3.4.5 Λευκά LED ..... 55
3.4.6 Συστήματα RGB ..... 56
3.4.7 Quantum Dot LED (σε πειραματικό στάδιο) ..... 56
3.4.8 Πλεονεκτήματα χρήσης των LED ..... 57
3.4.9 Εφαρμογές ..... 58
3.4 Συνοπτικά ..... 59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4$^{O}$ ..... 61
4 ΤΕΧΝΙΚΗ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ..... 61
4.1 OTDR ..... 61
4.3 SPLICER ..... 64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5$^{O}$ ..... 67
5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ..... 67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6$^{O}$ ..... 77
6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ..... 77
7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ..... 78

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

# ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ

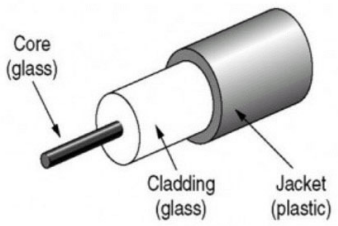
## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το βασικό στοιχείο σε ένα οπτικό δίκτυο είναι η οπτική ίνα.Οι οπτικές ίνες είναι το πλέον αξιόπιστο μέσο μετάδοσης των οπτικών συστημάτων. Είναι εύκαμπτες ίνες γυαλιού ή πλαστικού, λεπτές όσο μια ανθρώπινη τρίχα. Ουσιαστικά δεν είναι παρά κυλινδρικοί διηλεκτρικοί κυματοδηγοί που λειτουργούν στις συχνότητες της οπτικής περιοχής του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Σε αυτό το κεφάλαιο θα δούμε ποιοι είναι οι βασικοί τύποι οπτικών ινών και ποια τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του καθενός. Έπειτα θα ασχοληθούμε με τις αρχές λειτουργίας των οπτικών ινών τόσο με βάση τη θεωρία της γεωμετρικής οπτικής που θεωρεί το φως ακτίνες που διαδίδονται ευθύγραμμα, όσο και με βάση τη θεωρία της κυματικής οπτικής όπου το φως θεωρείται κύμα οπότε στη μελέτη λαμβάνονται υπ' όψη και άλλα φαινόμενα. Στα πλαίσια αυτών των δύο θεωριών θα μελετήσουμε τους δύο βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη διάδοση του φωτός στην ίνα, την εξασθένηση του σήματος και τη διασπορά των φωτεινών παλμών. Τέλος θα εξετάσουμε κάποια μη γραμμικά φαινόμενα που επηρεάζουν τη διάδοση του σήματος και παρατηρούνται όταν η ένταση της ακτινοβολίας είναι σχετικά μεγάλη.

## 1.1Γεωμετρική οπτικής ίνας

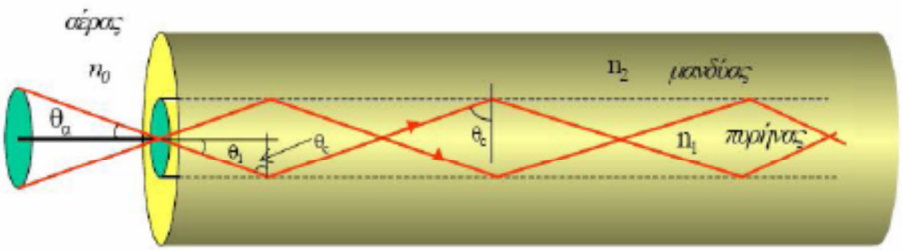
Οι οπτικές ίνες είναι πολύ λεπτές κυλινδρικές ίνες γυαλιού ή πλαστικού με διάμετρο κάτω των 8μm (δηλαδή πιο λεπτές από μια τρίχα). Είναι διαφανείς και εύκαμπτες. Κατασκευάζονται από εξαιρετικά καθαρό γυαλί, με τρόπο ώστε να αντανακλούν το φως προς τον άξονά τους – να το κρατούν στο εσωτερικό τους. Έτσι ,οι δέσμες φωτός μεταδίδονται εύκολα και γρήγορα. Με τις ακτίνες λέιζερ, ένα σήμα μπορεί να μεταδοθεί δια μέσου οπτικών ινών σε απόσταση μεγαλύτερη από 50 χλμ. Χωρίς ενδιάμεση ενίσχυση. Αυτό σημαίνει ότι οι οπτικές ίνες είναι πιο αποτελεσματικές από τα χάλκινα καλώδια. Με ένα μόνο ζεύγος οπτικών ινών μπορούν να πραγματοποιηθούν ταυτόχρονα εκατοντάδες τηλεφωνικές συνδιαλέξεις.Η γεωμετρική δομή της οπτικής ίνας αποτελείται από δυο ομοαξονικά διαφανή υλικά, που αποτελούν το εσωτερικό κα εξωτερικό τμήμα της. Το εσωτερικό τμήμα καλείται **πυρήνας (core),** ενώ το εξωτερικό αποτελεί το **περίβλημα (cladding)**. Οι εξωτερικές πλαστικές επικαλύψεις (**coating**) χρησιμοποιούνται μόνο για μηχανική προστασία, όπως συμβαίνει και στα ηλεκτρικά καλώδια. Με την βοήθεια των οπτικών ινών μπορούμε να "αναγκάσουμε" μια φωτεινή δέσμη να ακολουθήσει όποια διαδρομή επιθυμούμε Γι'αυτό λέμε ότι μια οπτική ίνα είναι ένας **φωτοαγωγός ή φωτοοδήγος.** κάθε οπτική ίνα αποτελείται από τρία μέρη:

I. Την κεντρική γυάλινη κυλινδρική ίνα, που ονομάζεται **πυρήνας** και είναι το τμήμα στο οποίο διαδίδεται το φως.
II. Την επικάλυψη (απλή ή πολλαπλή), που είναι ένας ομόκεντρος με τον πυρήνα κύλινδρος. Έχει μικρότερο δείκτη διάθλασης από τον πυρήνα, για να παθαίνει το φως συνεχείς ολικές ανακλάσεις. Η επικάλυψη αυτή ονομάζεται μανδύας.
III. Το **περίβλημα**, που είναι ένα αδιαφανές πλαστικό.




**Εικόνα 1 Δομή οπτικής ίνας**

Το φως εισέρχεται από την πρώτη μετωπική επιφάνεια και διαδίδεται με πολλαπλές ολικές ανακλάσεις μεταξύ πυρήνα και περιβλήματος. Δηλαδή, η προσπίπτουσα ακτίνα στην ενδοεπιφάνεια πυρήνα-μανδύα πρέπει να είναι ίση ή μεγαλύτερη της κρίσιμης γωνίας. Από τη γεωμετρία του σχήματος παρακάτωβλέπουμε ότι αυτό συμβαίνει μόνο όταν η φωτεινή ακτίνα εισέλθει στην ίνα υπό γωνία μικρότερη της γωνίας $\theta_\alpha$. Ακτίνες φωτός που εισέρχονται στην ίνα εκτός του κώνου που καθορίζεται από την $\theta_\alpha$, προσπίπτουν στην ενδοεπιφάνεια πυρήνα-μανδύα υπό γωνία μικρότερη της κρίσιμης γωνίας $\theta_c$ και δεν μπορούν να συνεχίσουν τη διάδοσή τους κατά μήκος της ίνας. Αυτές οι ακτίνες προοδευτικά διαφεύγουν εκτός της οπτικής ίνας. Η γωνία $\theta_\alpha$ λοιπόν θα είναι η μέγιστη γωνία που επιτρέπεται να έχει μια εισερχόμενη ακτίνα φωτός με τον άξονα της ίνας, ώστε να πληρεί τη συνθήκη της ολικής ανάκλασης και να περιοριστεί στοεσωτερικό της ίνας. Η γωνία αυτή ονομάζεται γωνία αποδοχής της ίνας. Ο αντίστοιχος τρισδιάστατος κώνος που σχηματίζεται από την θα ονομάζεται κώνος αποδοχής ή κρίσιμος κώνος (criticalcone ή acceptance cone). Ο κώνος αποδοχής είναι σημαντικός παράγοντας στη διαδικασία της σύζευξης (εισαγωγής) του φωτός στην ίνα.




Εικόνα 2 Σύζευξη φωτός στην οπτική ίνα

Θεωρώντας ότι η οπτική ίνα είναι κυλινδρική χωρίς ατέλειες και αποκλίσεις στη σύνθεσή της, η συμμετρία της γεωμετρίας του σχήματος 2επιβάλλει η φωτεινή ακτίνα να εξέρχεται από το άλλο άκρο της ίνας με την ίδια γωνία με την οποία εισέρχεται. Με άλλα λόγια το φως εξέρχεται της οπτικής ίνας υπό μορφή κώνου με άνοιγμα ίσο με αυτό του κρίσιμου κώνου της ίνας. Για να υπολογίσουμε τη μέγιστη γωνία σύζευξης του φωτός (γωνία αποδοχής) θα θεωρούμε ότι το φως εισέρχεται από τον αέρα (δείκτης διάθλασης $n_0$ =1) στον πυρήνα της οπτικής ίνας (δείκτης διάθλασης $n_1$). Ο νόμος του Snell και η γεωμετρίατου σχήματος 2 μας δίνουν:

$$n_0 \sin\theta_a = n_1 \sin\theta_1$$

Είναι όμως $\theta_1$=90-θc, από το ορθογώνιο τρίγωνο του σχήματος. Έτσι

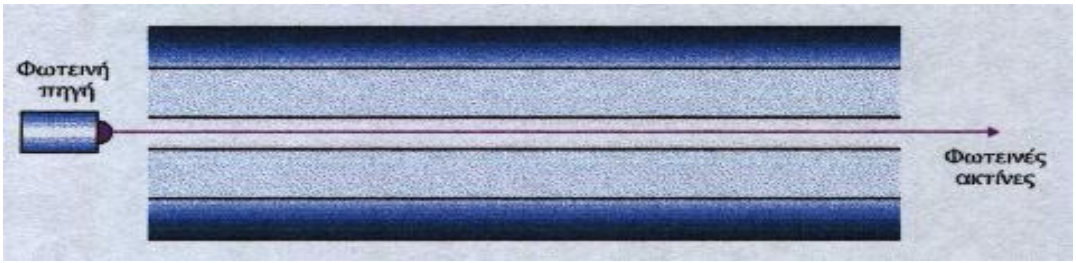
$$\sin\theta_a = \frac{n_1}{n_0}\sin\theta_c = \frac{n_1}{n_0}\sqrt{1-\sin^2\theta_c}$$

Θέτοντας $\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1}$ παίρνουμε

$$NA = n_0 \sin\theta_a = \sqrt{n_1^{\ 2} - n_2^{\ 2}}$$

## 1.2Μονότροπες οπτικές ίνες

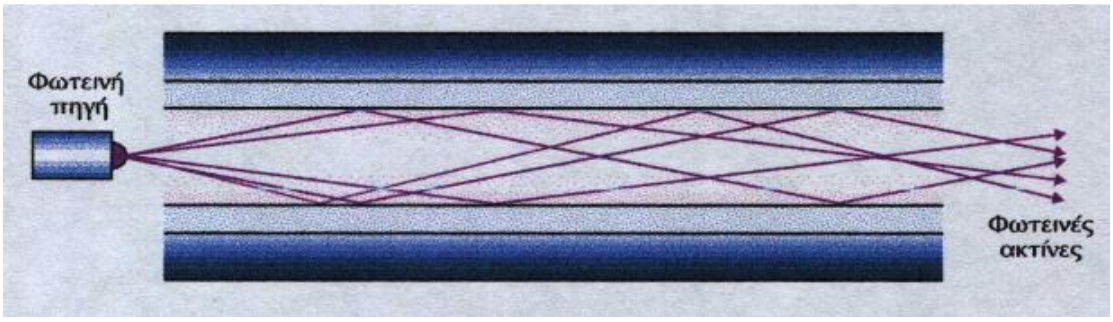
Οι οπτικές ίνες που υποστηρίζουν μονάχα ένα οπτικό τρόπο μετάδοσης λέγονται μονότροπες (single mode) και οι τυπικές διαστάσεις του πυρήνα τους (διάμετρος) είναι 8-10μm. Στις μονότροπες οπτικές ίνες η διάμετρος της κεντρικής ίνας είναι πολύ μικρή και πλησιάζει περίπου το επίπεδο του μήκους κύματος του εκπεμπόμενου σήματος. Στην περίπτωση αυτή, έχουμε έναν μόνο δυνατό τρόπο μετάδοσης του οπτικού σήματος, τον αξονικό. Η κεντρική ίνα στις μονότροπες οπτικές ίνες έχει διάμετρο από 5 microns (1 micron είναι 10-6 μέτρα) έως 10μm με συνηθέστερη τιμή τα 8,3μm. Ακτίνα πυρήνα 8 έως 9μm και διάμετρος περιβλήματος 125μm. Συνήθως οι μονότροπες ίνες χρησιμοποιούνται σε ζεύξεις επικοινωνιών μεγάλων αποστάσεων. Για μια συνηθισμένη μονότροπη ίνα η διασπορά εμφανίζεται στα 1310nm και η μικρότερη εξασθένηση στα 1550nm. Αν συνδυαστούν οι παράμετροι : Τιμή αποκοπής και Διάμετρος πεδίου ρυθμού μετάδοσης μπορούμε να έχουμε ένα παράγοντα που χαρακτηρίζει την ευαισθησία της ίνας στο λύγισμα. Υψηλή τιμή αποκοπής και μικρή διάμετρος πεδίου ρυθμού μετάδοσης μας δίνουν μια ίνα αρκετά ανθεκτική στο λύγισμα. Βασικό πλεονέκτημα των μονότροπων ινών είναι ότι δεν έχουν διασπορά λόγω εσωτερικών τρόπων μετάδοσης, απλώς επειδή η ενέργεια του εκπεμπόμενου παλμού μεταφέρεται μέσω ενός και μόνο τρόπου μετάδοσης. Ωστόσο, η παλμική διεύρυνση δεν εξαφανίζεται εντελώς. Η ταχύτητα ομάδας, που σχετίζεται με τον βασικό τρόπο μετάδοσης, εξαρτάται από την συχνότητα εξαιτίας της χρωματικής διασποράς.




**Εικόνα 3 Σύζευξη φωτός σε μονότροπη ίνα**

## 1.3Πολύτροπες οπτκές ίνες

Οι οπτικές ίνες με περισσότερους από ένα οπτικούς τρόπους μετάδοσης λέγονται πολύτροπες (multi mode) και έχουν τυπικές διαστάσεις πυρήνα (διάμετρος) από 50μm μέχρι και 125mm Ο τρόπος αναφοράς των μεγεθών για τις οπτικές ίνες είναι να αναφέρουμε πρώτα τη διάμετρο του πυρήνα (γυαλιού) και στη συνέχεια τη διάμετρο της επίστρωσης, δηλαδή του περιβλήματος (cladding). Οι μετρήσεις των παραπάνω μεγεθών γίνονται σε 10-6 μέτρα (μm). 50μm / 125μm Οι πολύτροπες οπτικές ίνες έχουν τυπικά μεγέθη, 62,5/125, 85/125 ή 100/140. Ο συνηθέστερος τύπος, ο οποίος κυκλοφορεί είναι ο 62,5/125. Η ολική διάμετρος της οπτικής ίνας συμπεριλαμβανομένων των ενισχυτικών συνθετικών ινών και του εξωτερικού περιβλήματος φτάνει τα 900μm. 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. Οι πολύτροπες οπτικές ίνες διακρίνονται σε δυο κατηγορίες: τις διακριτού βήματος (step index) και τις βαθμιαίου βήματος (graded index).




Εικόνα 4 Σύζευξη φωτός σε πολύτροπη ίνα

## 1.4 Διαφορές μονότροπων και πολύτροπων ινών

- Οι μονότροπες ίνες μπορούν να κατασκευαστούν μόνο από γυαλί, (πυρίτιο – SiO2) ενώ οι ίνες που μπορούν να κατασκευαστούν και από πολυμερή είναι αποκλειστικά πολλαπλού ρυθμού.
- Οι μονότροπες ίνες, λόγω του πολύ μικρού πυρήνα τους, είναι δύσκολες στο χειρισμό τους σε αντίθεση με τις πολύτροπες.
- Οι μονότροπες ίνες μπορούν να μεταδώσουν φως με μικρή παραμόρφωση παλμού σε μεγάλη απόσταση. Παρουσιάζουν όπως λέμε μικρότερη διασπορά του φωτεινού παλμού η οποία προκαλείται στις πολύτροπες ίνες από τις πολλαπλές οδεύσεις του φωτός κατά τη διάδοση του σ' αυτές.
- Η μονότροπη ίνα παρουσιάζει χαμηλότερη εξασθένιση από την πολύτροπη και μεγαλύτερο γινόμενο εύρος ζώνης-απόστασης.
- Οι πολύτροπες ίνες είναι απλούστερες στην κατασκευή τους, άρα και φθηνότερες. Επίσης σε αντίθεση με τις μονότροπες συνδυάζονται με πηγές LED οι οποίες είναι φθηνότερες από τις πηγές Laser για τις μονότροπες.
- Ο πυρήνας της πολύτροπης ίνας είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν της μονότροπης, επιτρέποντας εκατοντάδες ακτίνες φωτός να μετακινούνται μέσα από την ίνα ταυτόχρονα. Μεταφέρουν δηλαδή περισσότερο φως κάτι όμως που στις τηλεπικοινωνίες δεν αποτελεί πλεονέκτημα. Είναι όμως πλεονέκτημα για άλλου είδους εφαρμογές π.χ. ενδοσκόπια.

## 1.5Τρόποι διάδοσης με οπτικές ίνες

Στην ενότητα αυτή χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις Maxwellγια τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, θα ασχοληθούμε με την μετάδοση του φωτός στις οπτικές ίνες

Οι εξισώσεις Maxwellγια οπτικές ίνες με μη αγώγιμο μέσο χωρίς ελεύθερα φορτία παίρνουν την μορφή :

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}\left(\vec{r},t\right) = -\frac{\partial \vec{B}(\vec{r},t)}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H}\left(\vec{r},t\right) = -\frac{\partial \vec{D}(\vec{r},t)}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D}(\vec{r},t) = 0$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B}(\vec{r},t) = 0$$

Τα διανύσματα E και H περιγράφουν το ηλεκτρονικό και μαγνητικό πεδίο αντίστοιχα, ενώ τα διανύσματα D και B είναι η ηλεκτρική και μαγνητική πυκνότητα ροής που σχετίζονται με τα πεδία E και H ως

$$D(\vec{r},t) = \varepsilon_0 \vec{E}(\vec{r},t) + \vec{P}(\vec{r},t)$$
$$B(\vec{r},t) = \mu_0 \vec{H}(\vec{r},t)$$

Οι σταθερές εο και μο καλούνται ηλεκτρική και μαγνητική διαπερατότητα του κενού, ενώ η πόλωση P σχετίζεται σε οπτικές ίνες με το ηλεκτρικό πεδίο E στο πεδίο της συχνότητας ως

$$P(\vec{r},\omega) = \varepsilon_0 \mathrm{E}\chi(\vec{r},\omega) + \vec{E}(\vec{r},\omega)$$

Συνδυάζοντας τις δύο πρώτες σχέσεις προκύπτει ότι:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E}\left(\vec{r},t\right) = -\frac{\partial \nabla \times \vec{B}(\vec{r},t)}{\partial t} = \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{D}(\vec{r},t)}{\partial t^2} = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}(\vec{r},t)}{\partial t^2} - \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{P}(\vec{r},t)}{\partial t^2}$$

Παίρνοντας τον μετασχηματισμό της ως άνω σχέσης και λαμβάνοντας υπόψην

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E}\left(\vec{r},t\right) = \nabla(\nabla \times \vec{E}\left(\vec{r},t\right)) - \nabla^2 \vec{E}\left(\vec{r},t\right)$$

Βρίσκουμε ότι

$$\nabla^2 \vec{E}\left(\vec{r},\omega\right) = \left(1 + \chi(\vec{r},\omega)\right)\frac{\omega^2}{c^2}\vec{E}\left(\vec{r},\omega\right) = \varepsilon\left(\vec{r},\omega\right)\frac{\omega^2}{c^2}\vec{E}\left(\vec{r},\omega\right)$$

Καθώς (μοεο)^-1 = c. Η σύνθετη επιδεκτικότητα ε είναι γενικά μιγαδική τιμή, και το πραγματικό μέρος της αντιστοιχεί στο δείκτη διάθλασης n της ίνας, ενώ το φανταστικό μέρος σις απώλειες α. οι απώλειες σε οπτικές ίνες είναι συνήθως μικρές, οπότε η επιδεκτικότητα προσεγγίζεται με n2 και τελικά προκύπτει η εξίσωση διάδοσης σε οπτικές ίνες

$$\nabla^2 \vec{E}\left(\vec{r},\omega\right) = \frac{n^2\omega^2}{c^2}\vec{E}\left(\vec{r},\omega\right) = k_0^2 n^2 \vec{E}\left(\vec{r},\omega\right)$$

Οι απώλειες στις οπτικές ίνες είναι αμελητέες.

Ο όρος α(ω) της διηλεκτρικής σταθεράς ε φεύγει : $\varepsilon\left(\omega\right) = n^2\left(\omega\right)$

Το n(ω) είναι ανεξάρτητο από τις χωρικές συντεταγμένες.

Η κυματική εξίσωση παίρνει την απλή μορφή :

$$\nabla^2 \overset{\mathrm{v}}{E} + n^2(\omega)\frac{\omega^2}{c^2}\overset{\mathrm{v}}{E} = 0$$

Κάθε λύση της κυματικής εξίσωσης που ικανοποιεί τις οριακές συνθήκες στη διεπιφάνεια μεταξύ πυρήνα και μανδύα ονομάζεται τρόπος ή ρυθμός διάδοσης.

Σε συχνότητα ω οι οπτικές ίνες μπορούν να κυματοδηγήσουν έναν πεπαρεσμένο αριθμό τρόπων διάδοσης. Για την επίλυση της κυματικής εξίσωσης είναι πιο συνετό να εργαστούμε με κυλινδρικές συντεταγμένες ρ,φ,ζ.

Η κυματική εξίσωση για τη συνιστώσα $E_\zeta$ είναι :

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial \mathrm{E}_z}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2}\frac{\partial^2 \mathrm{E}_z}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \mathrm{E}_z}{\partial z^2} + n^2 k_0^2 \mathrm{E}_z = 0$$

Κατόπιν οι συνιστώσεις $E_\rho$ και $E_\phi$ υπολογίζονται σε σχέση με το $E_\zeta$

Για την επίλυση της κυματικής εξίσωσης χρησιμοποιείται η μέθοδος του χωρισμού των μεταβλητών

$$\mathrm{E}_z(\rho, \phi, z) = F(\rho)\cdot\Phi(\varphi)\cdot Z(z)$$

Έτσι η κυματική εξίσωση μετατρέπεται σε τρεις ανεξάρτητες εξισώσεις

Όπου m ένας ακέραιος αριθμός

$$\frac{d^2 Z}{dz^2} + \beta^2 Z = 0$$

$$\frac{d^2 \Phi}{d\phi^2} + m^2 \Phi = 0$$

$$\frac{d^2 F}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho}\frac{dF}{d\rho} + \left(n^2 k_0^2 - \beta^2 - \frac{m^2}{\rho^2}\right)F = 0$$

Οι δύο πρώτες εξισώσεις λύνονται απλά :

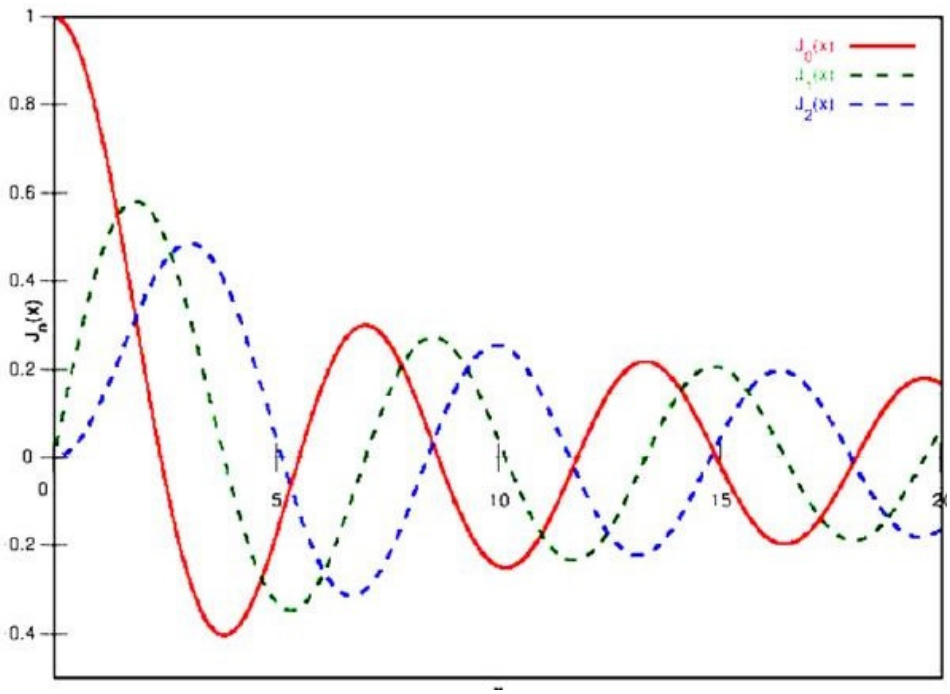
$$Z = \exp(i\beta z)$$
$$\Phi = \cdot \exp(i\beta\phi)$$

Η τρίτη εξίσωση για το F(ρ) ικανοποιείται από τις συναρτήσεις Bessel :

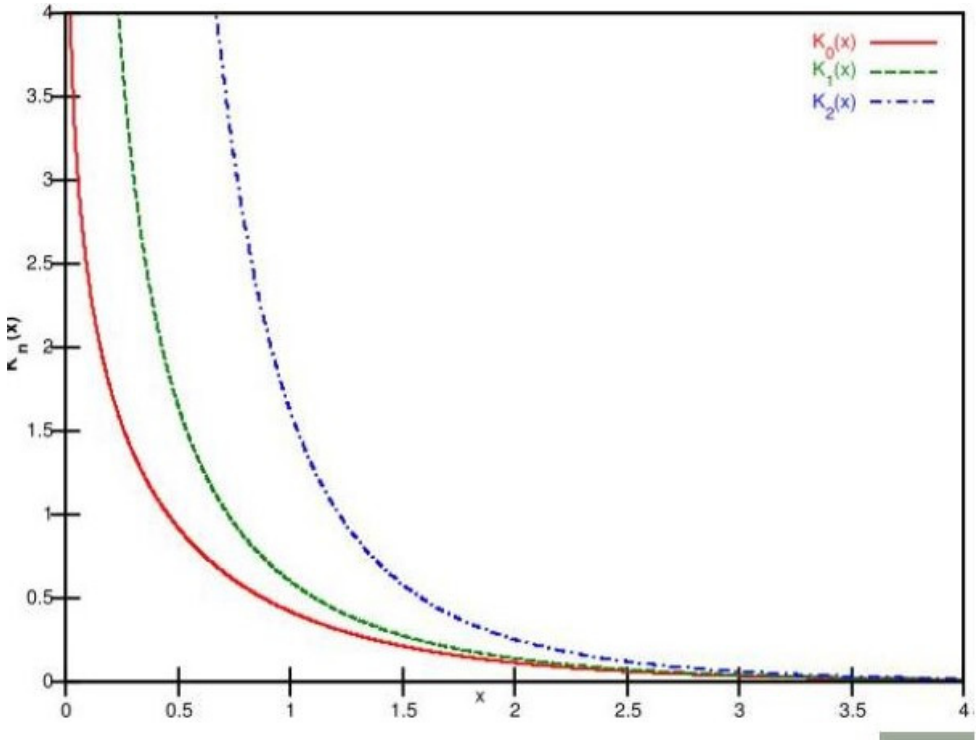
$$F(\rho) = A \cdot J_m\left[\left(n_1^2 k_0^2 - \beta^2\right)^{1/2} \cdot \rho\right] \quad ,\rho \le \alpha$$
$$F(\rho) = C \cdot K_m\left[\left(\beta^2 - n_2^2 k_0^2\right)^{1/2} \cdot \rho\right] \quad ,\rho > \alpha$$

Άρα η γενική λύση για το $E_z$είναι :

$$\mathrm{E_Z} = AJ_m\left[\left(n_1^2 k_0^2 - \beta^2\right)^{1/2} \cdot \rho\right] \cdot \exp(jm\varphi) \cdot \exp(j\beta z) \quad ,\rho \le \alpha$$
$$E_Z = CK_m\left[\left(\beta^2 - n_2^2 k_0^2\right)^{1/2} \cdot \rho\right] \cdot \exp(jm\varphi) \cdot \exp(j\beta z) \quad ,\rho > \alpha$$




**Εικόνα 5Κανονικές συναρτήσεις Bessel 1ου είδους**




**Εικόνα 6 Τροποποιημένες συναρτήσεις Bessel 2ου είδους**

Οι οριακές συνθήκες : Οι εφαπτομενικές συνιστώσεις $E_z$,$E_\phi$,$H_z$πρέπει να είναι συνεχείς στη διεπιφάνεια μεταξύ πυρήνα και μανδύα (ρ=α).Εφαρμογή οριακών συνθηκών οδηγεί σε χαρακτηριστική εξίσωση :

$$\left[\frac{J'_m(u)}{u\cdot J_m(u)}+\frac{K'_m(w)}{w\,K_m(w)}\right]\left[\frac{n_1^2}{n_2^2}\frac{J'_m(u)}{u\cdot J_m(u)}+\frac{K'_m(w)}{w\,K_m(w)}\right]=m^2\left(\frac{1}{u^2}+\frac{1}{w^2}\right)\left(\frac{n_1^2}{n_2^2}\frac{1}{u^2}+\frac{1}{w^2}\right)$$

όπου:

$$u = a\left(n_1^2 k_0^2 - \beta^2\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$w = a\left(\beta^2 - n_2^2 k_0^2\right)^{\frac{1}{2}}$$

Για κάθε τιμή του ακεραίου mη χαρακτηριστική εξίσωση έχει ένα πεπαρεσμένο πλήθος λύσεων. Κάθε τέτοια λύση χαρακτηρίζεται από μια σταθερά διάδοσης $\beta_{mn}$και αντιστοιχείι σε ένα ρυθμό που η ίνα μπορεί να κυματοδηγήσει.

Ορίζουμε την κανονικοποιήμενη συχνότητα Vαπό τη σχέση :

$$V^2 = u^2 + w^2$$

$$V^2 = k_0 a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Η κανονικοποιήμενη συχνότητα Vεμπεριέχει πληροφορία που αφορά τα δομίκα στοιχεία της ίνας (διάμετρος, δείκτης διάθλασης πυρήνα και μανδύα). Όταν για την κανονικοποιήμενη συχνότητα ισχύει $V<V_c$($V_c$=2.405) τότε έχουμε διάδοση μόνο του θεμελιώδους ρυθμού $HE_{11}$. Από τη σχέση $V_c$=2.405 μπορούμε να βρούμε το μήκος κύματος αποκοπής μιας ίνας $\lambda_c$. Μια ίνα κυματοδηγεί μόνο το θεμελιώδη ρυθμό όταν $\lambda > \lambda_c$.

## 1.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα οπτικών ινών

- Χαμηλό κόστος αφού η πρώτη ύλη κατασκευής των οπτικών ινών είναι το γυαλί.
- Οι διαστάσεις μιας οπτικής ίνας είναι όση και η τυπική διάμετρος ενός οπτικού καλωδίου(1-2mm).
- Μικρός εσωτερικός πυρήνας.
- Το βάρος θεωρείται αμελητέο.
- Ηλεκτρική μόνωση λόγω του γυαλιού.
- Μετάδοση πληροφοριών υψίστης ασφαλείας αφού τα οπτικά καλώδια αποκλείουν κάθε κλοπή πληροφοριών.

## 1.7 Εξασθένιση

Η εξασθένιση σήματος (ή απώλεια σήματος) σε μια οπτική ίνα ορίζεται ως ο λόγος της οπτικής ισχύος στην έξοδο της σε σχέση με τη ισχύ εισόδου και εκφράζεται σε dB/km.

Καθορίζει, κατά μεγάλο μέρος, τη μέγιστη απόσταση στην οποία απαιτείται αναγέννηση και ενίσχυση του σήματος. Η εξασθένιση της ισχύος του σήματος στο εσωτερικό της ίνας δίνεται από το νόμο του Beer:

$$\frac{dP}{dz} = -aP$$

Όπου **α** είναι ο συντελεστής εξασθένισης και **P** η οπτική ισχύς του σήματος. Η λύση της παραπάνω διαφορικής εξίσωσης πρώτης τάξης είναι:

$$P_0 = P_i * e^{-aL}$$

Όπου $\mathbf{P_i}$η οπτική ισχύς εισόδου στην ίνα και $\mathbf{P_0}$η ισχύς εξόδου και **L** το μήκος της.

Συνήθως στις τηλεπικοινωνίες οπτικών ινών οι απώλειες εκφράζονται σε dB/Km και ο συντελεστής εξασθένισης γράφεται εναλλακτικά:

$$a(dB) = -10\log_{10} * \frac{P_0}{P_i a_z}$$

Διάφοροι μηχανισμοί είναι υπεύθυνοι για την εξασθένιση του σήματος στην οπτική ίνα και οφείλονται στην απορρόφηση του υλικού της ίνας, σε σκεδάσεις στο εσωτερικό της ίνας, στα σημεία συνενώσεων δύο οπτικών ινών (splices) και στους συνδετήρες (connectors).

**I. Απορρόφηση** (absorption). Τα ηλεκτρόνια ξένων προσμείξεων που υπάρχουν στο γυαλί της ίνας απορροφούν μέρος της μεταδιδόμενης οπτικής ισχύος. Ιδιαίτερα τα ιόντα $OH^-$, ευθύνονταν για τις μεγάλες απώλειες των οπτικών ινών. Απώλειες απορρόφησης έχουμε ακόμα στην περιοχή του υπεριώδους λόγω του ίδιου του υλικού της ίνας και στο υπέρυθρο λόγω αλληλεπίδρασης των φωτονίων με τα ταλαντούμενα μόρια του πλέγματος του γυαλιού. Επίσης άλλοι εξωγενείς παράγοντες όπως ξένες προσμίξεις, ανομοιογένειες στη κατασκευή της ίνας συμβάλλουν στις απώλειες λόγω απορρόφησης.

**II. Σκέδαση** (Scattering). Με τον όρο αυτό χαρακτηρίζουμε τη διάχυση (σκόρπισμα) που υφίσταται η φωτεινή ακτινοβολία στο μανδύα καθώς διαδίδεται στον πυρήνα της ίνας. Οφείλεται σε ανωμαλίες στη σύνθεση του υλικού της ίνας που μπορεί να είναι είτε ξένες προσμείξεις (impurities) είτε κάποια σημειακή ανομοιογένεια του δείκτη διάθλασης. Όταν αυτές οι ανωμαλίες έχουν μέγεθος r αρκετά μικρότερο από το χρησιμοποιούμενο μήκος κύματος λ ($r<0.1\lambda$), η σκέδαση ονομάζεται Rayleigh και έχει ισχυρή εξάρτηση από το μήκος κύματος. Συγκεκριμένα η σκέδαση-εξασθένηση είναι πολύ μεγαλύτερη στα μικρά μήκη

κύματος γιατί είναι ανάλογη του $1/\lambda^4$. Αυτός ο τύπος σκέδασης είναι υπεύθυνος για τις απώλειες στις ίνες αλλά και για το μπλε χρώμα του ουρανού. Εκτός από τη σκέδαση Rayleigh άλλοι τύποι σκέδασης που όμως δεν παρατηρούνται στις οπτικές ίνες, είναι η σκέδαση Mie ($0.1\lambda<r<10\lambda$) οι οποία έχει ασθενή εξάρτηση από το λ, αλλά και η σκέδαση Tyndall ($r>10\lambda$) που δεν εξαρτάται από το λ και στην οποία οφείλεται το άσπρο χρώμα στα σύννεφα. Στις ίνες παρατηρούνται επίσης η σκέδαση Raman και η σκέδαση Brillouin που όμως ανήκουν στα μη γραμμικά φαινόμενα.

Η σκέδαση Rayleigh αποτελεί ένα βασικό μηχανισμό απώλειας ο οποίος προκαλείται από σημειακές μικροσκοπικές διακυμάνσεις της πυκνότητας. Οι διακυμάνσεις αυτές οδηγούν σε τυχαία διακύμανση του δείκτη διάθλασης, σε κλίμακα μικρότερη του οπτικού μήκους κύματος λ. Η σκέδαση του φωτός σε ένα τέτοιο μέσο είναι γνωστή ως σκέδαση Rayleigh. Η ενεργός διατομή της σκέδασης μεταβάλλεται συναρτήσει του $\lambda^{-4}$. Η συνεισφορά της σκέδασης Rayleigh μπορεί να μειωθεί σε επίπεδο κάτω από 0.01 dB/km για μήκος κύματος μεγαλύτερο από 3 μm.

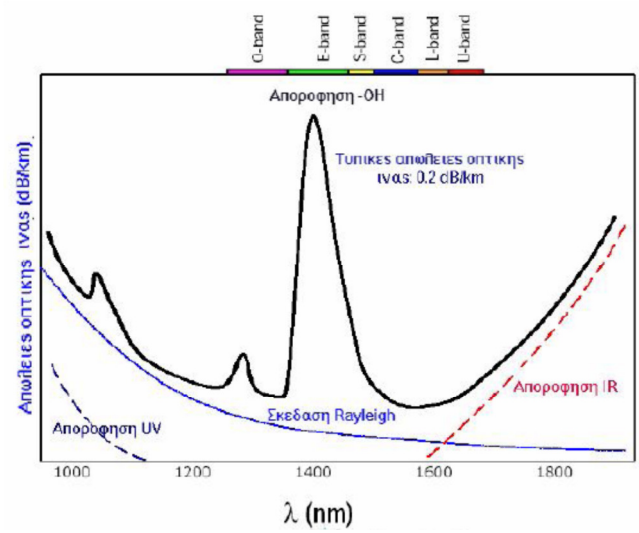
Ωστόσο, ένας θεμελιώδης εσωτερικός μηχανισμός απωλειών είναι οι απώλειες σκέδασης Raman, οι οποίες προκύπτουν από μικροσκοπικές διακυμάνσεις του δείκτη διάθλασης στον πυρήνα της οπτικής ίνας κατά τη διάρκεια της κατασκευής της. Οι διακυμάνσεις της πυκνότητας οδηγούν σε διακυμάνσεις στην τιμή του δείκτη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

$$a_s\left(dB/Km\right)=\frac{\left(0.75+66\Delta n_{Ge}\right)}{\lambda^4}$$

όπου το λ μετριέται σε μm και το $\Delta n_{Ge}$ είναι η διαφορά στην τιμή του δείκτη διάθλασης λόγω του γερμανίου στην ίνα. Τυπικές τιμές του $a_s$ είναι 0.12-0.16 dB/km για λ = 1.55 μm. Αυτές οι απώλειες περιορίζουν τελικά την απόσταση στην οποία μπορούν να μεταδοθούν σήματα και απαιτούν την ύπαρξη οπτικής ενίσχυσης.

Στο Σχήμα 1.14 βλέπουμε την εξάρτηση των απωλειών μιας τυπικής οπτικής ίνας σε σχέση με το χρησιμοποιούμενο μήκος κύματος και με τους μηχανισμούς που τις προκαλούν. Φαίνονται οι περιοχές γύρω από τα μήκη κύματος 1.3 μm και 1.5 μm, όπου η

οπτική ίνα παρουσιάζει μικρή εξασθένιση. Οι περιοχές αυτές, γνωστές και σαν «φασματικά παράθυρα» των οπτικών επικοινωνιών χρησιμοποιούνται για την οπτική μετάδοση.




**Εικόνα 7 Η ολική εξασθένιση σε μία τυπική οπτική ίνα**

Δεν διακρίνεται βέβαια το παράθυρο των 0.8 μm που χρησιμοποιήθηκε αρχικά είναι φανερή όμως η ισχυρή εξάρτηση της σκέδασης από το λ. Τα παράθυρα των 1.3μm με εύρος περίπου 12 THz και των 1.55 μm με εύρος περίπου 15 THz, χρησιμοποιούνται πλέον στα σημερινά συστήματα, αφού η τεχνολογία επέτρεψε την κατασκευή κατάλληλων φωτοπηγών και φωτοφωρατών. Οι μακροσκοπικές (macro bending) και οι μικροσκοπικές (micro bending) κάμψεις της οπτικής ίνας αποτελούν εξωγενή αίτια απωλειών.

## 1.8 Διασπορά

Στον τομέα των οπτικών ινών ονομάζουμε διασπορά τη διεύρυνση του χρόνου ενός παλμού καθώς αυτός ταξιδεύει μέσα στην ίνα. Καθώς ένας παλμός διευρύνεται, μπορεί να πλατύνει αρκετά και έτσι να προκαλεί παρεμβολές στους γειτονικούς παλμούς που βρίσκονται μέσα στην ίνα. Η διασπορά λοιπόν περιορίζει το διάστημα ανάμεσα στα bits και το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης σε ένα οπτικό κανάλι. Τα είδη διασποράς είναι τα εξής :

- intermodal or modal dispersion (διατροπικήδιασπορά)
- intramodal dispersion (ενδοτροπική διασπορά)
- διασπορά πόλωσης του ρυθμού μετάδοσης (PMD)

η διασπορά τρόπων διάδοσης αυξάνει με την αύξηση του διανυόμενου μήκους ίνας, ενώ για σταθερό μήκος ίνας περιορίζει το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης (ελάχιστη χρονική απόσταση μεταξύ παλμών). Σαν αποτέλεσμα, η μετάδοση πάνω από πολυρρυθμικές ίνες περιορίζεται σε λίγα χιλιόμετρα και ρυθμούς μετάδοσης που δεν υπερβαίνουν τις εκατοντάδες Mbps.

**Διατροπική Διασπορά(IntermodalDispresion)**

Ένα είδος διασποράς είναι η intermodal dispersion, η οποία προκαλείται όταν πολλές καταστάσεις του ίδιου σήματος διαδίδονται με διαφορετικές ταχύτητες στην ίνα. Αυτό το είδος διασποράς δεν εμφανίζεται στις μονότροπες ίνες.

Ένας παλμός φωτός που διαδίδεται μέσα σε μια πολύτροπη ίνα πρέπει να θεωρείται ως ένας μεγάλος αριθμός υπό παλμών,ο καθένας με την χαρακτηριστική του γωνία πρόσπτωσης μέσα στην ίνα. Το μήκος της ακτίνας διαδρομής διαφέρει λόγω των γωνιών πρόσπτωσης και διάθλασης. Ως αποτέλεσμα προκύπτει οι παλμοί φωτός που διαδίδονται ταυτόχρονα να φτάσουν στο τέλος της ίνας με ελάχιστα διαφορετικούς χρόνους. Το φαινόμενο αυτό περιορίζει αρκετά τις τηλεπικοινωνίες οπτικών ινών. Η διατροπική διασπορά δημιουργεί τα εξής προβλήματα :

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

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

$$\delta\tau \approx \sqrt{fiberiength(L)}$$

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

**Ενδοτροπική (Χρωματική) Διασπορά**

Ακόμα και στην περίπτωση που αντιμετωπιστεί εξολοκλήρου το φαινόμενο της διατροπικής διασποράς και επιτευχθεί η μετάδοση να γίνεται μόνο στον θεμελιώδη ρυθμό μέσα στην ίνα, θα συνεχιστεί να υπάρχει διασπορά του συκγκρκιμένου ρυθμού. Η παραμόρφωση αυτού του τύπου ονομάζεται ενδοτροπική ή χρωματική διασπορά. Η ενδοτροπική διασπορά μέσα σε μια μονότροπη ίνα συνίσταται από τη διασπορά υλικού και τη διασπορά κυματοδηγού.Η διασπορά υλικού και κυματοδηγού τείνουν να αλληλοαναιρούνται σε μήκη κύματος κοντά στα 1310 nm, όπου η χρωματική διασπορά θεωρείται μηδέν. Για μικρότερα μήκη κύματος η χρωματική διασπορά είναι αρνητική ενώ για μεγαλύτερα μήκη κύματος είναι θετική. Η διασπορά υλικού μπορεί να διορθωθεί μόνα αν μεταβληθεί η σύσταση του γυαλιου΄στον πυρήνα και στον μαδύα της ίνας. Η διασπορά κυματοδηγού οφείλεται στο προφίλ δείκτη διάθλασης του κυματοδηγού και μπορεί να διορθωθεί μόνο αλλάζοντας αυτό το προφίλ.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

# ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

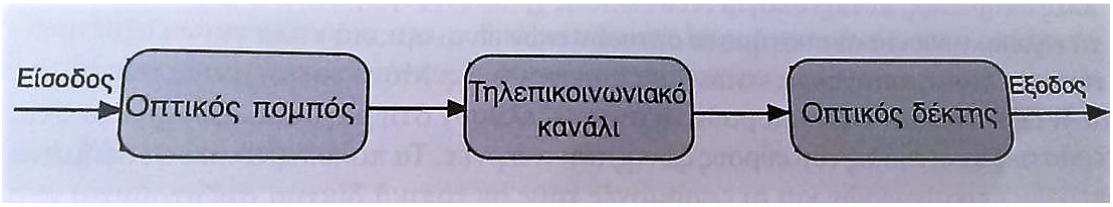
## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην ενότητα αυτή θα μελετήσουμε και θα κατανοήσουμε βασικές έννοιες και ορισμούς που πλαισιώνουν την τεχνολογία ενός οπτικού δικτύου.

## 2.1 Δομήοπτικού συστήματοςεπικοινωνιών

Τα συστήματα οπτικών επικοινωνιών διαφέρουν βασικά από τα μικροκυματικά συστήματα μόνο στην περιοχή συχνοτήτων του φέροντος κύματος που χρησιμοποιείται για να μεταφέρει την πληροφορία. Η συχνότητα του οπτικού φέροντος είναι τυπικά ~200 THz σε αντίθεση με τις συχνότητες του μικροκύματος φέροντος που είναι ~1GHz. Επίσης αναμένεται μια αύξηση στην χωρητικότητα πληροφορίας των συστημάτων οπτικών επικοινωνιών κατά ένα παράγοντα ~10.000 λόγω των μεγάλων συχνοτήτων φέροντος που χρησιμοποιούνται για συστήματα οπτικών επικοινωνιών. Για παράδειγμα εάν πάρουμε σαν οριακή τιμή το 1% τα συστήματα οπτικών επικοινωνιώνμπορούν να μεταφέρουν την

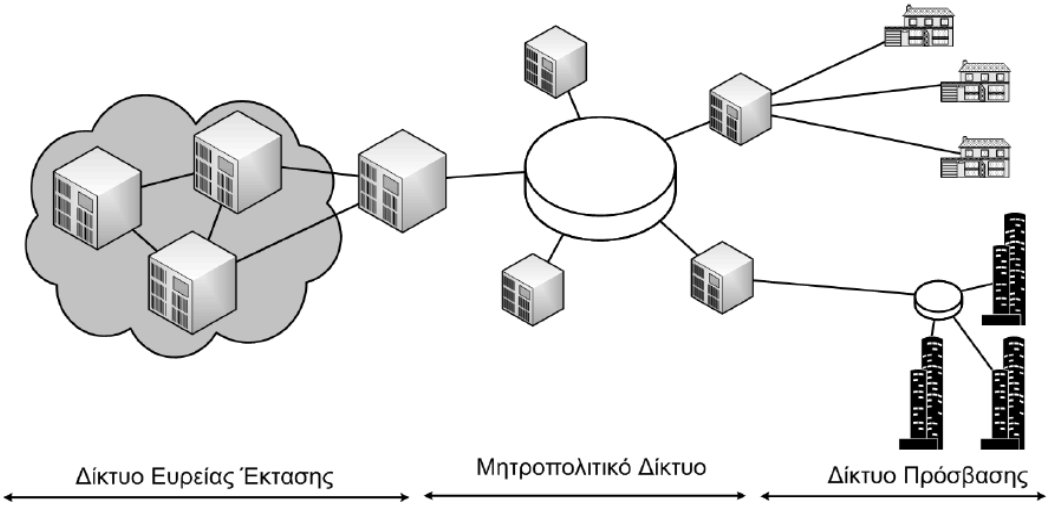
πληροφορία με ταχύτητεςbit≈1 Tb/s. Τα πιο σύγχρονα συστήματα λειτουργούν με ταχύτητα περίπου 10 Gb/s.




**Εικόνα 8 Γενικό διάγραμμα οπτικού συστήματος επικοινωνιών**

## 2.2 Δομή Τηλεπικοινωνιακών Δικτύων

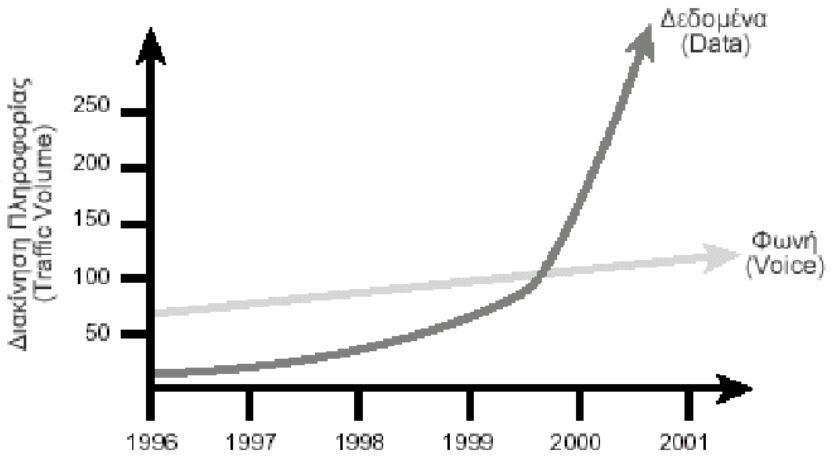
Η ευρέως διαδομένη δομή των δημόσιων τηλεπικοινωνιακών θα μπορούσε να περιγραφεί στο ακόλουθο σχήμα. Αν και τα δίκτυα παρουσιάζουν ποικιλία δομών, μια αναλυτικότερη προσέγγιση είναι δυνατόν να διαχωριστεί σε μητροπολιτικά και ευρείας έκτασης δίκτυα.




**Εικόνα 9 Δομή τηλεπικοινωνιακών δικτύων (Κ. Βλάχος, 2009)**

Τα ευρείας έκτασης δίκτυα αφορούν τη διασύνδεση γεωγραφικά απομακρυσμένων περιοχών όπως πόλεις και χωριά, και είναι δυνατόν να καλύπτουν μέχρι και υπερωκεάνιες αποστάσεις. Αντίθετα τα μητροπολιτικά δίκτυα συνήθως περιορίζονται σε συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή για παράδειγμα στα όρια ενός μεγάλου δήμου. Τα μητροπολιτικά δίκτυα κατηγοριοποιούνται περαιτέρω σε δίκτυα διανομής και δίκτυα πρόσβασης. Τα δίκτυα πρόσβασης συγκεντρώνουν σε αντίστοιχους κόμβους την κίνηση που παράγεται από τους χρήστες του δικτύου, ενώ τα δίκτυα διανομής διασύνδεουν τους κόμβους πρόσβασης σε μεγαλύτερους κόμβους διανομής. Η διασύνδεση των μητροπολιτικών δικτύων με τα ευρεία έκτασης δίκτυα γίνεται συνήθως σε κυρίους του δικτύου ευρείας έκτασης.

Περαιτέρω τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα είναι δυνατόν να κατηγοριοποιηθούν σε δημόσια και ιδιωτικά δίκτυα. Τα δημόσια δίκτυα αποτελούν την μεγαλύτερη κατηγορία τηλεπικοινωνιακών δικτύων παρέχουν εκτεταμένη γεωγραφική κάλυψη και η διαχείριση τους γίνεται από δικτυακούς παρόχους ή φορείς. Τα παραδοσιακά δημόσια τηλεπικοινωνιακά δίκτυα παρείχαν απλώς τηλεφωνικές υπηρεσίες, η κατάσταση όμως έχει διαφοροποιηθεί σημαντικά τα τα τελευταία χρόνια λόγω της ραγδαίας αύξησης των απαιτήσεων σε*εύρος ζώνης (bandwidth).*




**Εικόνα 10 Απαιτήσεις σε έυρος ζώνης (Α.Τζιουμάκης, 2011)**

Πλέον τα δημόσια δίκτυα καλούνται να παρέχουν υπηρεσίες όπως τηλεφωνικές γραμμές, μισθωμένες γραμμές αλλά και υποδομές σε δίκτυα εναλλακτικών παροχών όπως πάροχοι Διαδικτύου και κινητής τηλεφωνίας. Αντίθετα τα ιδιωτικά δίκτυα είναι συνήθως ιδιοκτησία διαφόρων οργανισμών και υλοποιούνται για να καλύψουν τις εσωτερικές τηλεπικοινωνιακές ανάγκες τους. Τα ιδιωτικά δίκτυα διαχωρίζονται με βάση τη γεωγραφική περιοχή που καλύπτουν σε LocalAreaNetworks (με έκταση μερικών χιλιομέτρων) σε MetropolitanAreaNetworks και σε WideAreaNetworks (με έκταση χιλιάδων χιλιομέτρων). Στις δύο τελευταίες κατηγορίες ο οργανισμός μισθώνει συνδέσεις από το δημόσιο δίκτυο για τη δημιουργία του ιδιωτικού δικτύου, οπότε το δίκτυο δεν είναι εξολοκλήρου ιδιόκτητο. (Ε. Νικόλα, 2012)

## 2.3 Οπτική Τεχνολογία

Η οπτική τεχνολογία καθιστά εφικτή τη διασύνδεση σε όλα τα επίπεδα της τηλεπικοινωνιακής υποδομής παρέχοντες τεράστιους ρυθμούς μετάδοσης και κοινή υποδομή για μεγάλη γκάμα υπηρεσιών. Η ευρυζωνικότητα που παρέχεται από την οπτική τεχνολογία οφείλεται κυρίως στις οπτικές ίνες. Συνεπώς η οπτική τεχνολογία αποτελεί την προτιμητέα τεχνολογία μετάδοσης σε δίκτυα με ρυθμούς μετάδοσης μεγαλύτερους από μερικά Mbitκαι για αποστάσεις που επρβαίνουν το ένα χιλιόμετρο. Παράλληλα οι οπτικές ινες δεν παρουσιάζουν ευαισθησία σε ηλετρκομαγνητικές μαρεμβολές, κατά συνέπεια τα οπτικά δίκτυα δεν επηρε΄ζονται από την παρουσία άλλων ενσύρματων ή ασύρματων δικτύων.Περαν των οπτικών ινών στη διάδοση της οπτικής τεχνολογίας συντέλεσε η ανάπτυξη κατάλληλων δομικών στοιχείων όπως οπτικοί πομποί και εισχυτές αλλά και η εδραίωση της πολυπλεξίας μήκους κύματος, τα οποία θα αναλυθούν στα επόμενα κεφάλαια.

## 2.4 Οπτικές Ίνες ως Μέσο Δικτύωσης

Η Οπτική ίνα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο τηλεπικοινωνιών και δικτύωσης, διότιείναι ευέλικτη και μπορεί να ομαδοποιείται. Είναι ιδιαίτερα επωφελής για επικοινωνίες μεγάλωναποστάσεων, επειδή το φως διαδίδεται μέσα από την ίνα με μικρή εξασθένηση συγκριτικά με τημεγαλύτερη εξασθένιση του σήματος των ηλεκτρικών καλωδίων. Αυτό επιτρέπει να εκτείνονται σεμεγάλες αποστάσεις με λίγους επαναλήπτες αναμετάδοσης. Επιπλέον, τα φωτεινά σήματα αναλύσεωνστην ίνα μπορεί να διαμορφώνονται σε ποσοστά τόσο υψηλά όσο 40 Gb/s κάθε ίνα μπορεί ναμεταφέρει πολλά ανεξάρτητα κανάλια, το καθένα με διαφορετική πολύπλεξη με επιμερισμό μήκουςκύματος του Φώτος (wavelength-divisionmultiplexing). Σε μικρές αποστάσεις, όπως η δικτύωσημέσα σε ένα κτίριο, η ίνα εξοικονομεί χώρο διότι μια ενιαία ίνα μπορεί να μεταφέρει πολύπερισσότερα δεδομένα από ένα ενιαίο ηλεκτρικό καλώδιο.

## 2.5 Οπτικές ίνες ως μέσο διάδοσης

Η Οπτική ίνα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο τηλεπικοινωνιών και δικτύωσης, διότιείναι ευέλικτη και μπορεί να ομαδοποιείται. Είναι ιδιαίτερα επωφελής για επικοινωνίες μεγάλωναποστάσεων, επειδή το φως διαδίδεται μέσα από την ίνα με μικρή εξασθένηση συγκριτικά με τημεγαλύτερη εξασθένιση του σήματος των ηλεκτρικών καλωδίων. Αυτό επιτρέπει να εκτείνονται σεμεγάλες αποστάσεις με λίγους επαναλήπτες αναμετάδοσης.

Επιπλέον, τα φωτεινά σήματα αναλύσεωνστην ίνα μπορεί να διαμορφώνονται σε ποσοστά τόσο υψηλά όσο 40 Gb/s κάθε ίνα μπορεί ναμεταφέρει πολλά ανεξάρτητα κανάλια, το καθένα με διαφορετική πολύπλεξη με επιμερισμό μήκουςκύματος του Φώτος (wavelength-divisionmultiplexing). Σε μικρές αποστάσεις, όπως η δικτύωσημέσα σε ένα κτίριο, η ίνα εξοικονομεί χώροδιότι μια ενιαία ίνα μπορεί να μεταφέρει πολύπερισσότερα δεδομένα από ένα ενιαίο ηλεκτρικό καλώδιο.

## 2.6 Πλεονεκτήματα

Η υψηλή διείσδυση της τεχνολογίας των οπτικών ινών στις σύγχρονεςτηλεπικοινωνίες δενείναι τυχαία, αλλά αντίθετα οφείλεται στον μεγάλο αριθμό πλεονεκτημάτων της, τα οποίασυνοψίζονταιπαρακάτω.

- **Χαμηλό κόστος**

Η δημιουργία ενός καλωδίου οπτικών ινών είναι πιο συμφέρουσα οικονομικά, σε σχέση με ένα χάλκινο καλώδιο ίδιας απόστασης και δυνατοτήτων. Αυτό ωφελεί αρχικά τους πάροχους υπηρεσιών τηλεπικοινωνιών, οι οποίοι με μικρότερο κόστος παρέχουν ποιοτικές υπηρεσίες. Τελικά αυτό μειώνει και τις ανάγκες απόσβεσης εξόδων των παρόχων.

- **Υψηλό bandwidth**

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

- **Μικρές απαιτήσεις σε ενέργεια**

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

- **Αμιγώς ψηφιακό σήμα**

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

Εξασφαλίζει υψηλότερη ποιότητα επικοινωνίας και αποφυγή προβλημάτων που θα προέκυπταν σε μια αναλογική μετάδοση.

- **Υψηλή διαθεσιμότητα**

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

- **Error rate**

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

- **Μικρές διαστάσεις & 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

## 2.7 Μειονεκτήματα

Ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα, που παρουσιάζουν οι οπτικές ίνες, είναι η δυσκολίασύνδεσης των οπτικών ινών με άλλα εξαρτήματα, επειδή απαιτείται υψηλή προσαρμογή καιευθυγράμμιση της φωτεινής πηγής, για να μην υπάρχει διασπορά και να ελαχιστοποιηθούν οιαπώλειες. Είναι χαρακτηριστικό ότι και μικρές ακόμη αποκλίσεις στην ευθυγράμμιση αυτή μπορούννα προξενήσουν μεγάλη απώλεια του φωτεινού σήματος. Όμως, η πρόοδος της τεχνολογίας, που έχεισημειωθεί τα τελευταία χρόνια στην περιοχή των οπτικών ινών, αντιμετώπισε με επιτυχία τηνπαραπάνω δυσκολία, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η χρήση τους και για συνδέσειςσημείου προς πολλά σημεία .Παρόλα αυτά, η χρήση τους σε τέτοιες συνδέσεις δεν έχει ακόμη ευρέως εξαπλωθεί,ιδιαίτερα λόγω του αυξημένου κόστους, που παρουσιάζουν τέτοια συστήματα.

## 2.8 Δίκτυα Δρομολόγησης Μήκους Κύματος

Στα πρώτα οπτικά δίκτυα (δίκτυα πρώτης γενιάς) η οπτική τεχνολογία χρησιμοποιούνταν μόνο στην μετάδοση ως μέσο για την παροχή μεγάλου έυρους ζώνης με μικρούς ρυθμούς εμφάνισης σφαλμάτων.

Τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς παρέχουν ζεύξεις που καλούνται οπτικά μονοπάτια μεταξύ των χρηστών τους. περισσότερα του ενός οπτικά μονοπάτια πολυπλέκονται πάνω από μια οπτική ίνα με την τεχνολογία πολυπλεξίας WDM.

Τα οπτικά μονοπάτια διασυνδέουν τον κόμβο προορισμού με τον κόμβο αποστολής μέσω ενδιάμεσων κόμβων, οι οποίοι δρομολογούν και μετάγουν κατάλληλα τα οπτικά μονοπάτια μεταξύ των οπτικών ινών στην είσοδο και έξοδο τους.

Βασικά δομικά στοιχεία τα οποία καθιστούν δυνατή την υλοποιήση οπτικών δικτύων δρομολόγησης μήκους κύματος είναι οι τερματισμοί οπτικής γραμμής (OpticalLineTerminals–OLTSs) οι οπτικοί πολυπλέκτες προσθήκης- απομάστευσης (OpticalAdd/DropMultiplexers–OADMs) και οι οπτικές διασυνδέσεις (OpticalCrossConnects–OXCs)

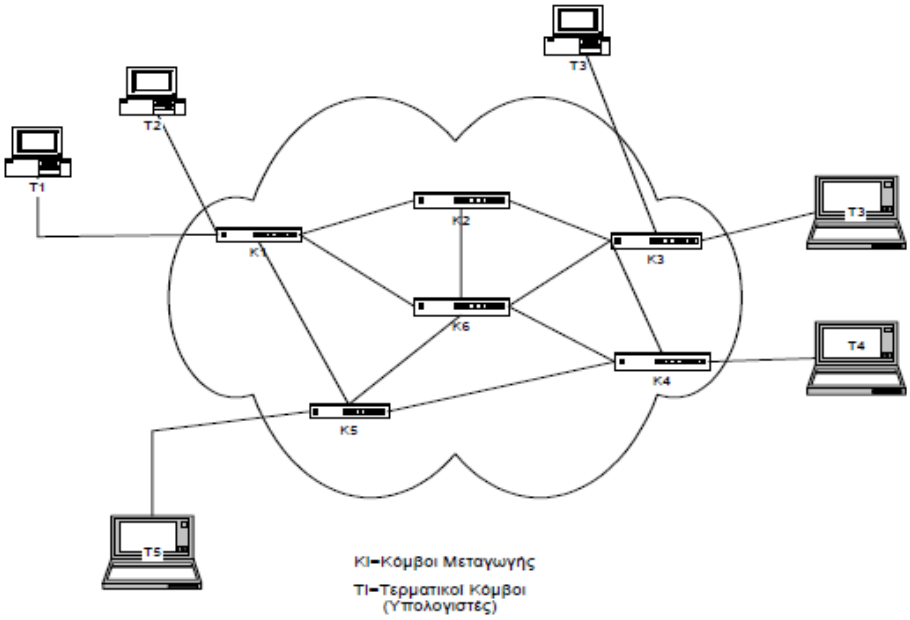
## 2.9 Δίκτυα Μεταγωγής

Στα δίκτυα μεταγωγής, τα δεδομένα που εισέρχονται στο δίκτυο από κάποια πηγή πληροφορίας (τερματική διάταξη), μεταφέρονται μέσω ενδιάμεσων κόμβων στον προκαθορισμένο δέκτη. Οι κόμβοι διακινούν τα δεδομένα προς τον προορισμό τους αποφασίζοντας ή όχι για την αποτελεσματική διακίνησή τους. Για την αύξηση της αξιοπιστίας του δικτύου, οι κόμβοι συνδέονται με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει εναλλακτικός δρόμος μεταξύ των τερματικών σημείων. Οι τρεις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση δεδομένων στα δίκτυα μεταγωγής είναι οι εξής:

- Μεταγωγή κυκλώματος (Circuit switching)
- Μεταγωγή πακέτων (Packet switching)
- Μεταγωγή μηνύματος (Message switching)

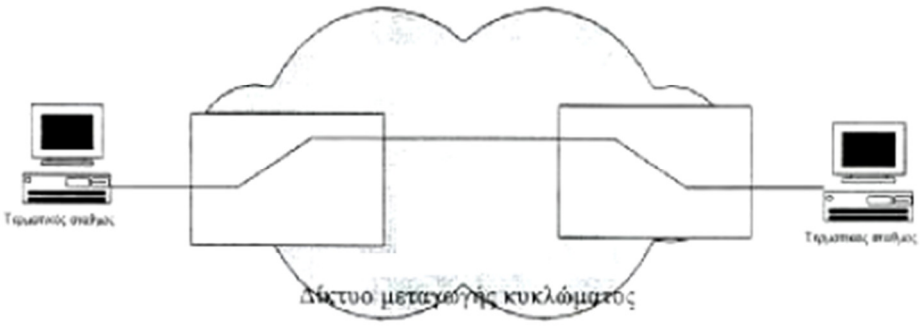
## 2.10 Μεταγωγή Κυκλώματος

Στη μεταγωγή κυκλώματος ένα φυσικό κανάλι προσφέρεται στους συνδρομητές αποκλειστικά σε όλη τη διάρκεια της επικοινωνίας τους και καταργείται μόνο με τον τερματισμό της επικοινωνίας αυτής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της τεχνικής μεταγωγής κυκλώματος αποτελεί το τηλεφωνικό δίκτυο. (Π. Μουντρουιδου, 2002)




**Εικόνα 11 Τηλεφωνικό δίκτυο,επικοινωνία δύο υπολογιστών με χρήση modem**

Στη μέθοδο μεταγωγής κυκλώματος βασίζεται η τεχνολογία ATM. Προγενέστερη της ATM (Εικόνα 5) υπήρξε η STM(Εικόνα 6) η οποίαχρησιμοποιείται ευρέως στα τηλεφωνικά δίκτυα όμως δεν κατόρθωσε να καλύψει τα όσα απαιτούν οι σύγχρονες ανάγκες κυρίως όμως να καλύψει το θέμα της στατιστικής πολυπλεξίας.




**Εικόνα 12 Δίκτυο μεταγωγής κυκλώματος (Ε.Νικόλα,2012)**

Η μεταγωγή κυκλώματος είναι η πρώτη μέθοδος μεταφοράς πληροφορίας πουυποστήριξαν τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Για την επικοινωνία δυο τερματικών,έπρεπε να σχηματιστεί αγώγιμος δρόμος μεταξύ τους μέσω των ενδιάμεσωνμεταγωγών.

**Εικόνα 13 Δίκτυο μεταγωγής πακέτου (Ε.Νικόλα,2012)**

Ουσιαστικά, κατά την εγκατάσταση του κυκλώματος οι μεταγωγοίςέκλειναν τους απαραίτητους διακόπτες ώστε να ενωθούν τα κατάλληλα κομμάτια της “διαδρομής”. Από την στιγμή που το κύκλωμα αυτό σχηματιζόταν, τα δυο τερματικάμπορούσαν να επικοινωνήσουν χρησιμοποιώντας το εύρος ζώνης του αγώγιμουδρόμου. (Κ. Στούμπου, 2008)

## 2.11 Μεταγωγή Πακέτου

Στη μεταγωγή πακέτων τα δεδομένα που πρόκειται να μεταφερθούν τεμαχίζονται σε πακέτα ομοίου μήκους. Στην τεχνική αυτή δεν υπάρχει εκ των προτέρων σχηματιζόμενο φυσικό κανάλι για τη συγκεκριμένη επικοινωνία των δύο συνδρομητών. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι του δικτύου αποφασίζουν για τη διαδρομή που θα διανύσει το κάθε πακέτο ώστε να φτάσει στον προορισμό του με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο. Συνεπώς οι κόμβοι του δικτύου θα πρέπει να έχουν επεξεργαστική ικανότητα για την προώθηση των πακέτων. Δύο διαφορετικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την προώθηση των πακέτων:

- τα αυτοδύναμα πακέτα (datagram)

- τα εικονικά κυκλώματα (virtual circuits)

Με τη μέθοδο datagram, κάθε πακέτο αντιμετωπίζεται από τους κόμβους του δικτύου σαν ένα ολοκληρωμένο μήνυμα. Κάθε κόμβος που παραλαμβάνει το πακέτο επιλέγει ποιος θα είναι ο επόμενος έτσι ώστε το δίκτυο να λειτουργεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Για τον λόγο αυτόν οι κόμβοι οφείλουν να διαθέτουν αρκετές πληροφορίες για τη δομή και την κατάσταση του δικτύου κάθε χρονική στιγμή. Τα πακέτα πληροφορίας ενώ έχουν τον ίδιο προορισμό δεν ακολουθούν όλα τον ίδιο δρόμο γι' αυτό υπάρχει πιθανότητα να φτάσουν με διαφορετική σειρά από αυτήν που στάλθηκαν. Έτσι θα πρέπει να υπάρχει κατάλληλη διάταξη που να τα τοποθετεί στην αρχική τους σειρά.

Στη μέθοδο εικονικού κυκλώματος (virtual circuit), πριν αρχίσει η αποστολή των πακέτων αποκαθίσταται μία σταθερή νοητή σύνδεση μεταξύ των δύο συνδρομητών από όπου στη συνέχεια θα περάσουν όλα τα πακέτα του μηνύματος. Δηλαδή ο δρόμος που θα ακολουθήσουν τα πακέτα καθορίζεται μια φορά στην αρχή και παραμένει ο ίδιος μέχρι να διακοπεί η επικοινωνία των δύο συνδρομητών. Η εξασφάλιση της ύπαρξης ελεύθερου δρόμου γίνεται με την ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ των δύο συνδρομητών που πρόκειται να επικοινωνήσουν. Στην τεχνική αυτή οι ενδιάμεσοι κόμβοι δεν απαιτείται να έχουν πληροφορίες για την κατάσταση του δικτύου, γιατί δεν αποφασίζουν για τη δρομολόγηση των μηνυμάτων αλλά απλά τα διακινούν στον προορισμό τους.

## 2.12 Μεταγωγή Μηνύματος

Στη μεταγωγή μηνύματος τα δεδομένα αποστέλλονται με τη μορφή μηνύματος που μεταδίδεται ολόκληρο ανεξάρτητα από το μέγεθός του. Το δίκτυο προωθεί το μήνυμα από κόμβο σε κόμβο μέχρι να φτάσει στον προορισμό του. Κάθε κόμβος αποφασίζει ποιος θα είναι ο επόμενος που θα παραλάβει το μήνυμα, δηλαδή οι κόμβοι αποφασίζουν για τη δρομολόγηση του μηνύματος. Για τον λόγο αυτόν θα πρέπει στους κόμβους να υπάρχει αρκετή πληροφορία για τη δομή και την κατάσταση του δικτύου κάθε χρονική στιγμή. Παρά τα πλεονεκτήματα της τεχνικής αυτής, στην πράξη η μεταγωγή μηνύματος έχει αντικατασταθεί από τη μεταγωγή πακέτων.

## 2.13 Σύγκριση Δικτύων Μεταγωγής

Κάνοντας σύγκριση των τριών μεθόδων μεταγωγής προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η μεταγωγή κυκλώματος είναι ιδανική μέθοδος για μετάδοση συνεχών σημάτων μεγάλης διάρκειας, π.χ. για μετάδοση φωνής (τηλεφωνικό δίκτυο) και εικόνας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην περίπτωση αυτή δεν απαιτείται καμιά επεξεργασία των σημάτων από τη στιγμή που εγκαθίσταται το κύκλωμα (φυσικό κανάλι). Τέτοιες επεξεργασίες καθυστερούν τη μετάδοση, πράγμα που δεν είναι επιθυμητό για μεγάλα και συνεχή μηνύματα.

- Η μεταγωγή κυκλώματος δεν είναι αποδοτική για μετάδοση μηνυμάτων μικρής διάρκειας και σποραδικής φύσεως. Στην περίπτωση αυτή, ο χρόνος που απαιτείται για να συνδεθούν οι χρήστες για κάθε σύντομη μετάδοση θα ήταν σημαντική επιβάρυνση, ενώ η διατήρηση της σύνδεσης μεταξύ διαδοχικών μεταδόσεων θα σήμαινε σπατάλη ενός μεγάλου ποσοστού της χωρητικότητας της γραμμής. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ενδείκνυται η μεταγωγή πακέτων.
- Η τεχνική εικονικού κυκλώματος συνδυάζει χαρακτηριστικά και των δύο προαναφερθέντων τύπων μεταγωγών.
- Όσον αφορά την αξιοπιστία του συστήματος η τεχνική datagram είναι πολύ καλύτερη γιατί σε περίπτωση βλάβης (π.χ. καταστροφής ενός κόμβου) το μήνυμα θα φτάσει στον προορισμό του μέσω άλλων εναλλακτικών δρόμων. Αντίθετα στη μεταγωγή κυκλώματος, καταστροφή του διαθέσιμου καναλιού θα έχει σαν αποτέλεσμα την απώλεια του μηνύματος. Στη μεταγωγή εικονικού κυκλώματος υπάρχει μεγάλη πιθανότητα απώλειας του μηνύματος ή ανάγκη επαναμετάδοσής του, αφού σε περίπτωση που χαλάσει κάποιος κόμβος όλα τα μηνύματα που διέρχονται από τον κόμβο αυτόν θα χαθούν.

## 2.14 Δίκτυα Πρόσβασης Φωνής και Δεδομένων

Τα δίκτυα πολλαπλής πρόσβασης στο κανάλι διάδοσης έχουν εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά από τα δίκτυα μεταγωγής που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτών των δικτύων είναι τα εξής:

- Δεν υπάρχουν ενδιάμεσοι κόμβοι μεταγωγής μεταξύ πομπού και δέκτη.
- Το μέσο επικοινωνίας είναι κοινό για όλους τους συνδρομητές.

- Σε μια συγκεκριμένη περιοχή του μέσου επικοινωνίας μόνο ένας συνδρομητής μπορεί κάθε στιγμή να εκπέμπει.
- Το εκπεμπόμενο σήμα μπορεί να λαμβάνεται από όλους τους συνδρομητές αρκεί να έχουν την κατάλληλη συσκευή πρόσβασης.

Μπορεί να υπάρχουν πολλοί πομποί που μοιράζονται χρονικά το ίδιο μέσο μετάδοσης. Οι πιο γνωστοί τύποι τέτοιων δικτύων είναι:

- Τα επίγεια ραδιοδίκτυα.
- Τα δορυφορικά δίκτυα.
- Τα τοπικά δίκτυα (LAN)

Οι δύο πρώτοι τύποι δικτύων αποτελούν αντικείμενο των ασυρμάτων τηλεπικοινωνιών. Στα δίκτυα αυτά κάθε σταθμός πρέπει να διαθέτει κεραίες εκπομπής και λήψεως και να βρίσκεται μέσα στην εμβέλεια των υπολοίπων. Τα τοπικά δίκτυα LAN είναι εντελώς διαφορετικά από τους άλλους τύπους δικτύων αλλά και εδώ το βασικό χαρακτηριστικό είναι η ύπαρξη κοινού μέσου επικοινωνίας για όλους τους συνδρομητές, το οποίο είναι ένα καλώδιο ή μία οπτική ίνα.

Το IP πρωτόκολλο αποτελεί το πλέον διαδεδομένο πρωτόκολλο επικοινωνίας ανοιχτών συστημάτων. Το σύνολο των διαδικτυακών εφαρμογών προϋποθέτουν την ύπαρξη του TCP/IP πρωτοκόλλου για την λειτουργία τους. Ως εκ τούτου και το σύνολο των φορέων που διαθέτουν κάποια δικτυακή υποδομή στηρίζονται στην οικογένεια πρωτοκόλλων TCP/IP για την υλοποίηση των υπηρεσιών που παρέχουν. Στο πλαίσιο αυτό η ενσωμάτωση του πρωτοκόλλου TCP/IP και από το ευρύτερο Δίκτυο παρέχει το μέγιστο βαθμό διαλειτουργικότητας μεταξύ των επιμέρους Φορέων, διευκολύνοντας κατά πολύ την επικοινωνία.

Η μετάδοση φωνής πάνω από IP δίκτυα (VoIP) αποτελεί μία από τις ελκυστικότερες τεχνολογικές εξελίξεις στο χώρο των δικτύων επικοινωνιών καθώς επιτρέπει την ολοκλήρωση σε ένα ενιαίο IP δίκτυο τόσο των δεδομένων όσο και της φωνής. Οι λόγοι που επέτρεψαν και οδηγούν την παραπάνω εξέλιξη είναι οι εξής:

- Οι σημερινές τεχνικές μεταγωγής της φωνής (PSTN) στηρίζονται στην PCM τεχνική δειγματοληψίας και κωδικοποίησης φωνής με αποτέλεσμα τη χρήση αφιερωμένου καναλιού 64Kbps για κάθε τηλεφωνική συνομιλία. Λόγω της μικρής ικανότητας για αναπροσαρμογή του παρόντος τηλεφωνικού δικτύου αλλά και της μεγάλης

εξάπλωσης του, δεν είναι δυνατή η συνολική μεταβολή του παραπάνω χαρακτηριστικού ή τουλάχιστον μπορεί να επιτευχθεί με ασύμφορους όμως οικονομικούς όρους. Η σύγχρονη δυνατότητα κωδικοποίησης με χρήση DSPs και συμπίεση κάτω από τα 10Kbps επιτρέπει τη μετάδοση της φωνής με ενθυλάκωση αυτής σε κλασικά IP πακέτα.

- Τα δίκτυα δεδομένων διαθέτουν ένα συνεχώς αυξανόμενο εύρος ζώνης (bandwidth), ενώ από την άλλη πλευρά η εξέλιξη των CODECs και των τεχνικών συμπίεσης φωνής μειώνει το απαιτούμενο εύρος ζώνης για τη μετάδοση της φωνής, με αποτέλεσμα την εξάλειψη των προβλημάτων που αρχικά παρουσιάστηκαν στην ποιότητα μετάδοσης της φωνής.

- Η χρήση κοινού ενεργού εξοπλισμού αλλά και τηλεπικοινωνιακών γραμμών για την υλοποίηση και των δύο δικτύων (φωνής και δεδομένων) συνεπάγεται μικρότερο κόστος υλοποίησης, συντήρησης και εκπαίδευσης προσωπικού, ενώ από την άλλη μεριά επιτυγχάνεται η καλύτερη διαχείριση και παρακολούθηση του συνολικού δικτύου.

## 2.15Διαχείριση Οπτικού Δικτύου

Μία από τις πιο σημαντικές και δύσκολες διαδικασίες όσο αφορά τα οπτικά δίκτυα, είναι η διαχείριση τους. Αυτό συμβαίνει για πάρα πολλούς λόγους.

Αν και η διαχείριση των οπτικών δικτύων είναι ένα θέμα τεράστιο για να καλυφθεί διεξοδικά, θα προσπαθήσουμε να μιλήσουμε λίγο για τις πιο σημαντικές του προεκτάσεις.

Πρώτα απ’όλα πρέπει να γνωρίζουμε ότι ένα οπτικό δίκτυο υλοποιείται στην κορυφή μίας υπάρχουσας SONET αρχιτεκτονικής, η οποία παρέχει δικά της σχήματα προστασίας και απόδοσης.

Χωρίς ένα «έξυπνο» σύστημα διαχείρισης του δικτύου, γίνεται εξαιρετικά δύσκολη η αποφυγή των συγκρούσεων μεταξύ του ηλεκτρικού και του οπτικού στρώματος του δικτύου.

Εκτός από την μεσολάβηση μεταξύ του οπτικού και του SONET επιπέδου, η διαχείριση του δικτύου πρέπει να είναι σε θέση να εμποδίζει τις συγκρούσεις, ή στην χειρότερη περίπτωση να δίνει την δυνατότητα στον πάροχο να αναγνωρίζει τις συγκρούσεις.

Επιπλέον, τα συστήματα διαχείρισης του δικτύου, πρέπει να είναι σε θέση να παρακολουθούν την απόδοση των σημάτων σε κάθε μήκος κύματος. Έτσι παρέχουν την δυνατότητα στον πάροχο να επιλύνει προβλήματα που αφορούν το δίκτυο, απομονώνοντας προβληματικά μήκη κύματος καθώς και την περιοχή του προβλήματος. Μάλιστα, όσο ο αριθμός των μηκών κύματος σε κάθε οπτική ίνα αυξάνεται, αυξάνεται και η σημασία μιας αποδοτικής μεθόδου παρακολούθησης τους.

Το σύστημα ενοποιημένης διαχείρισης οπτικού δικτύου καλύπτει και την διαχείριση των ATM, SDH,WDM και των δικτύων πρόσβασης AN.

Ειδικά για το όλο οπτικό δίκτυο και την αρχιτεκτονική του μπορούμε να δούμε περισσότερες λεπτομέρειες στην σύσταση G.872(02/98)της ITU-T.

Δεδομένου πάντως ότι το όλο οπτικό δίκτυο αποτελεί ένα επι πλέον στρώμα στο ήδη υφιστάμενο σύγχρονο στρώμα θα κάνουμε χρήση μέχρι ενός σημείου της υφισταμένης στον Ο.Τ.Ε. υποδομής διαχείρισης για EMLκαι NML:

Για τα συστήματα της INTRACOM τα MV36/38

Για τα συστήματα της SIEMENS το TNMS

Για τα συστήματα της ANCO(ALCATEL) το 1353SH

Όλα τα παραπάνω συστήματα μπορούν να προσφέρουν τις βασικές λειτουργίες διαχείρισης όπως είναι η διαχείριση βλαβών, διαχείριση επίδοσης, διαχείρισης διάρθρωσης και διαχείρισης ασφάλειας τόσο σε επίπεδο χωριστού μήκους κύματος όσο και σε επίπεδο ολοκλήρου του συστήματος. Φυσικά στη συνέχεια πρέπει να ακολουθήσει μελέτη σε επίπεδο NML και άνω για την ολοκλήρωση των τριών τεχνολογιών.

Η τοπική διαχείριση των συστημάτων αυτών μπορεί να γίνεται με τοπικά τερματικά LCT (Local Craft Terminal)μέσω διεπαφής F και η απομακρυσμένη διαχείριση μέσω των Element &Network Managers.

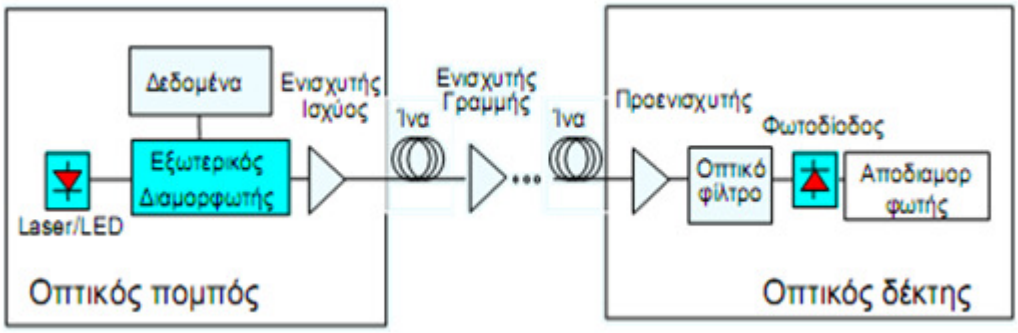
**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο**

# ΟΠΤΙΚΟΙ ΠΟΜΠΟΙ ΚΑΙ ΔΕΚΤΕΣ

## 3.1 Οπτικοί πομποί

Ο πομπός πραγματοποιεί την μετατροπή από ηλεκτρικό σε οπτικό σήμαποτυπώνοντας ταδεδομένα του ηλεκτρικού σήματος πάνω στον φορέα του φωτός. Αυτή η διεργασία λέγεταιδιαμόρφωση. Η διαμόρφωση μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε άμεσα, χρησιμοποιώντας μόνο ένα laser και τότε ονομάζεται άμεση διαμόρφωση (αυτή είναι και που μας απασχολεί περισσότερο) είτεχρησιμοποιώντας ένα εξωτερικό διαμορφωτή. Μετά τη διαμόρφωση, το οπτικό σήμα μεταδίδεταικατά μήκος της οπτικής ίνας. Κατά σύμβαση, ο παλμός φωτός παριστάνει το bit 1 και η απουσίαφωτός παριστάνει το bit 0. Στην έξοδο της ίνας, το οπτικό σήμα ανιχνεύεται και επεξεργάζεται από τοδέκτη.Επιγραμματικά ο ρόλος των οπτικών πομπών είναι:

- Να μετατρέπουν ένα ηλεκτρικό σήμα εισόδου σε αντίστοιχο οπτικό σήμα.
- Να το εκπέμπουν στο εσωτερικό της οπτικής ίνας, δηλαδή στο κανάλι επικοινωνίας.

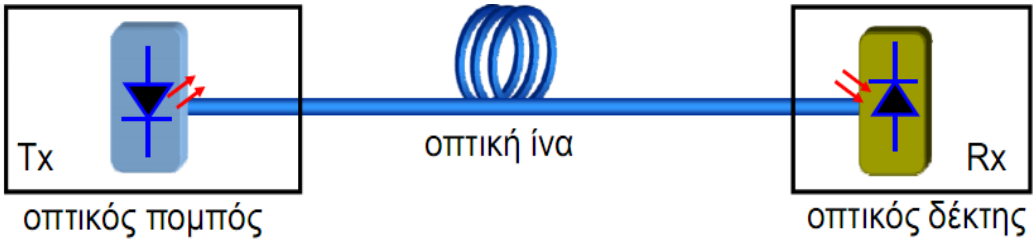



**Εικόνα 14 Αναπαράσταση μεταφοράς δεδομένων από το πομπό στο δέκτη**

## 3.2 Οπτικοί δέκτες

Ο ρόλος ενός απτικού δέκτη είναι να μετατρέπει το οπτικό σήμα πάλι σε ηλεκτρικό και να ανακτά τις πληροφορίες που έχουν μεταδοθεί μέσω ενός οπτικού συστήματος.Ο δέκτης αποτελείται κυρίως από μία φωτοδίοδο που ανιχνεύει το οπτικό σήμα και τομετατρέπει σε ηλεκτρικό. Το ηλεκτρικό σήμα μπορεί να το επεξεργαστεί περαιτέρωαν είναιαναγκαίο. Τέλος, μετά από τη δειγματοληψία που βασίζεται στην ανάκτηση του ρολογιού (clock recovery) και στην απόφαση του στοιχείου αποφάσεως (slicer), ανακτάται το μεταδιδόμενο σήμα. Σταοπτικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα υπάρχουν διάφορα στοιχεία. Για παράδειγμα, το οπτικό σήμαεξασθενεί κατά μήκος της μετάδοσης και για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται οπτικοί ενισχυτές γιατην κάλυψη των οπτικών απωλειών πριν την ανίχνευση του σήματος στο δέκτη. Επιπρόσθετα, οπτικάζωνοπερατά (bandpass) φίλτρα και ηλεκτρικά χαμηλοπερατά (lowpass) φίλτρα μπορούν ναχρησιμοποιηθούν για να εξαλείψουν κατά ένα μεγάλο μέρος τον θόρυβο τόσο στο οπτικό, όσο και στοηλεκτρικό επίπεδο αντίστοιχα.

Βασικό εξάρτημα του δέκτη είναι ο φωτοανιχνευτής με την βοήθεια του οποίου το φως μετατρέπεται σε ηλεκτρικό παλμό.




**Εικόνα 15 Οπτικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα(Ι. Βακίντης & Ε. Γυπάρης, 2011)**

## 3.3 LASER

Η ιστορία των laser ξεκίνησε στις αρχές του προηγούμενου αιώνα όταν, το 1917, ο Albert Einstein διατύπωσε την υπόθεση της ύπαρξης διαδικασίας της εξαναγκασμένης εκπομπής. Αυτός ήταν που έδειξε πως η διαδικασία της επαγομένης ή εξαναγκασμένης εκπομπής θα πρέπει να υπάρχει ώστε να εξισορροπεί σε θερμοδυναμική ισορροπία τις διαδικασίες της απορρόφησης και της αυτογενούς εκπομπής. Αυτή άλλωστε, είναι η βάση για ένα laser. Η λέξη laser είναι ακρωνύμιο για τις λέξεις : Light Amplification by StimulatedEmissionofRadiation, δηλαδή ενισχυμένο φως μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής ακτινοβολίας. Έτσι, η λέξη laser αναφέρεται τόσο στο φαινόμενο της ενίσχυσης της επαγομένης ακτινοβολίας όσο και στις αντίστοιχες διατάξεις.

Η πρώτη διάταξη laser με ορατό μήκος κύματος, ερυθρό για την ακρίβεια, ήρθε στο φως το 1960 όταν ο T.H. Maiman πραγματοποίησε ένα στερεάς κατάστασης laser ρουβιδίου. Αργότερα, μετά από μισό περίπου χρόνο, εμφανίστηκε και διάταξη laser He-Ne (ήλιο-νέο) από τον A.Javan. Το He-Ne laser με μήκος κύματος 1,15 μm ξεκίνησε έναν καινούριο κλάδο στην επιστήμη και στην τεχνολογία, τα laser αερίου ενεργού μέσου. Στις μέρες μας πολλοί τύποι laser είναι γνωστοί. Σύμφωνα με το ενεργό μέσο που ενισχύει την επαγόμενη ακτινοβολία κατηγοριοποιούνται σε laser αερίου, στερεάς κατάστασης (κρυστάλλων), ημιαγωγών, ρευστής χρωστικής ουσίας και ελευθέρων ηλεκτρονίων. Τα μήκη κύματος αυτών τω laser καλύπτουν σχεδόν όλο το φάσμα από μικρά μήκη κύματος ~100 nm στο μακρυνό υπεριώδες έως ~1 mm στο μικροκυματικό εύρος. Σε αυτό το σημείο πρέπει να προστεθεί πως και η ισχύς τους καλύπτει ένα πλατύ εύρος, από τα μwatt σε μικρά laser ημιαγωγών έως τα terawatt σε μεγάλες διατάξεις laser που χρησιμοποιούνται σε πειράματα πυρηνικής σύντηξης.

Αξίζει να σημειώσουμε πως το ακρωνύμιο laser υποδηλώνει ότι αναφέρεται σε μία διάταξη ενισχυτή. Μία τέτοια παρατήρηση όμως δεν θα ήταν τόσο ακριβής όσο ο

χαρακτηρισμός της ως ταλαντωτής που είναι πιο επεξηγηματικός ως προς τον τρόπο ενίσχυσης. Ωστόσο, μία πιο πλήρης περιγραφή θα ήταν δυνατή σε συνδυασμό με τα κύρια συστατικά στοιχεία ενός laser που είναι το ενεργό μέσο, η πηγή και ο τρόπος διέγερσης καθώς και το οπτικό αντηχείο και η σύνδεση του τελευταίου με την ενίσχυση και τις ιδιότητες της ακτινοβολίας. Αυτές όμως οι βασικές έννοιες για ένα laser θα παρουσιαστούν αναλυτικότερα στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου. Μία αυστηρή και ακριβής ανάλυση της φυσικής των laser είναι σχετικά δύσκολη, γι αυτό και η παρουσίασή της στο παρόν κεφάλαιο είναι απλοποιημένη.

Καταλήγοντας, παρόλο που οι εφαρμογές των laser είχαν ένα ¨αργό ξεκίνημα¨, μία μεγάλη ποικιλία εφαρμογών είναι πλέον ευρέως γνωστή στις μέρες μας. Από την μαζική επέλαση των laser εγγραφής και αναπαραγωγής ήχου έως τις εφαρμογές του στην βιομηχανία και την ιατρική (π.χ. νυστέρι YAG ή επέμβαση διόρθωσης της μυωπίας). Στις διάφορες αυτές εφαρμογές καθοριστικό ρόλο ορθής εφαρμογής έχουν διάφορες παράμετροι όπως είναι το μήκος κύματος λειτουργίας ενός laser, ο τρόπος λειτουργίας (συνεχής ή παλμικός) και κυριότερα η ισχύς που συνδέεται με τα ανωτέρω. Θα μπορούσε, λοιπόν, εύκολα να παρατηρηθεί ότι τα laser κατέχουν σήμερα ηγετικό ρόλο στην έρευνα, την τεχνολογία, την επιστήμη και σε πολλές άλλες εκφάνσεις της ανθρώπινης δραστηριότητας.

### 3.3.1 Διέγερση και αποδιέγερση ατόμων

Στις συνηθισμένες θερμοκρασίες τα ηλεκτρόνια ενός ατόμου βρίσκονται κυρίως στη χαμηλότερη δυνατή ενεργειακή στάθμη, δηλαδή το άτομο βρίσκεται στη θεμελιώδη του κατάσταση. Στην περίπτωση αυτή το άτομο μπορεί να διεγερθεί, δηλ. κάποιο από τα ηλεκτρόνιά του να μεταβεί σε υψηλότερη ενεργειακή στάθμη απορροφώντας ένα φωτόνιο ενέργειας ίσης με τη διαφορά ενέργειας των σταθμών μεταξύ των οποίων γίνεται η μετάβαση. Η διεργασία αυτή λέγεται εξαναγκασμένη απορρόφηση. Αν με κάποιο τρόπο ένα άτομο βρεθεί σε μια διεγερμένη ενεργειακή κατάσταση, το άτομο αυτό έχει κάποια πιθανότητα να εκπέμψει ένα φωτόνιο και να μεταβεί σε ενεργειακά χαμηλότερη κατάσταση. Η διεργασία αυτή λέγεται αυθόρμητη αποδιέγερση. Τα φωτόνια που εκπέμπονται με αυθόρμητη αποδιέγερση έχουν τυχαίες διευθύνσεις. Συνήθως ένα άτομο παραμένει σε διεγερμένη κατάσταση περίπου $10^{-8}$ sec. Αν κατά τη διάρκεια παραμονής του ηλεκτρονίου στη διεγερμένη κατάσταση προσκρούσει με αυτό ένα φωτόνιο ενέργειας ίσης

με την ενεργειακή διαφορά διεγερμένης-θεμελιώδους στάθμης, το φωτόνιο αυτό αναγκάζει το άτομο να αποδιεγερθεί, εκπέμποντας ένα δεύτερο φωτόνιο, το οποίο έχει ίδια κατεύθυνση και φάση με το φωτόνιο που υποκίνησε την αποδιέγερση. Η διαδικασία αυτή λέγεται εξαναγκασμένη εκπομπή (stimulatedemission) και αποτελεί τη βάση της λειτουργίας του Laser.

### 3.3.2 Βασικές αρχές

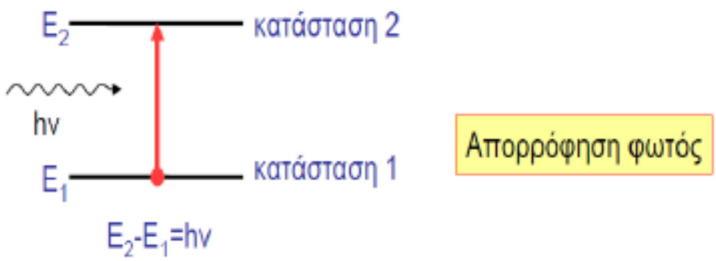
Αρχικά θα παρατεθούν οι βασικές αρχές που διέπουν την λειτουργία των laser. Η βασική ιδέα, λοιπόν, ενός laser είναι η ενίσχυση φωτός μέσω της αλληλεπίδρασής του με το μέσο μέσα στο οποίο ταξιδεύει. Ακολουθώντας την ανάλυση κατά Einstein που ασχολείται με την ακτινοβολία του μέλανος σώματος, διαχωρίζονται τρεις βασικοί κβαντικοί μηχανισμοί της ακτινοβολίας σε ένα απλό υποθετικό μοντέλο ατόμου δύο ενεργειακών σταθμών: Απορρόφηση, Αυτογενής Εκπομπή και Εξαναγκασμένη Εκπομπή. Ένα μέσο αποτελείται από σωματίδια, π.χ. άτομα ή μόρια, καθένα από τα οποία κατέχει ένα μεγάλο αριθμό διακριτών ενεργειακών σταθμών. Ωστόσο, για λόγους απλότητας, θα θεωρήσουμε ένα σύστημα με μόνο δύο ενεργειακά επίπεδα. Έστω ($E_1$) η θεμελιώδης κατάσταση με ενέργεια $E_1$ και ($E_2$) η διεγερμένη ανώτερη στάθμη με ενέργεια $E_2$ , όπου φυσικά $E_2>E_1$. Η ενεργειακή διαφορά μεταξύ των δύο αυτών επιπέδων είναι ανάλογη της συχνότητας, ν, ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu ,$$

όπου h είναι η σταθερά του Planck. Στο υποθετικό αυτό σύστημα θεωρούμε ότι ο πληθυσμός των καταστάσεων είναι κατανεμημένος στα δύο επίπεδα, όπου στο χρόνο t υπάρχουν $N_1$ άτομα ανά μονάδα όγκου στη θεμελιώδη κατάσταση ($E_1$) και $N_2$ αντίστοιχα στη διεγερμένη κατάσταση ($E_2$). Γενικά όταν ένα σωματίδιο (άτομο ή μόριο) βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση ($E_1$) μπορεί να διεγερθεί αν κάποιο εξωτερικό ερέθισμα εφαρμοστεί πάνω του στην ανώτερη στάθμη ($E_2$) προσλαμβάνοντας ενέργεια $E_2–E_1$. Αλλιώς όταν βρίσκεται στη διεγερμένη κατάσταση ($E_2$) τείνει να επιστρέψει στη θεμελιώδη σύμφωνα με τον νόμο του Boltzmann ελευθερώνοντας την ίδια ενέργεια.

### 3.3.3Απορρόφηση

Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα (φωτόνιο) με ενέργεια $E_{ph}$ = hv μπορεί να απορροφηθεί από ένα άτομο του πληθυσμού $N_1$ επάγοντας σε αυτό μετάβαση στη διεγερμένη κατάσταση. Θεωρώντας πως η ενεργειακή διάφορα $E_2$−$E_1$ που απαιτείται για την μετάβαση παρέχεται από την ενέργεια του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, τότε υπάρχει μία πεπερασμένη πιθανότητα το άτομο να διεγερθεί στην ανώτερη στάθμη.




Ο αριθμός των απορροφημένων φωτονίων εξαρτάται από τον αριθμό της πυκνότητας ατόμων (ή μορίων) στη θεμελιώδη κατάσταση και από την πυκνότητα των φωτονίων στη συχνότητα της μετάβασης. Ως αποτέλεσμα ο ρυθμός μεταβολής των ατόμων (ή μορίων) που μεταβάλλουν τον πληθυσμό της θεμελιώδης κατάστασης περιγράφεται από την διαφορική εξίσωση :

$$dN_1 = -N_1 B_{12} u\left(v_{12}\right) dt$$

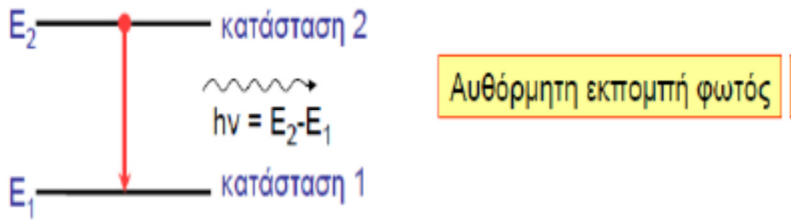
όπου ο παράγοντας B12 καλείται συντελεστής απορρόφησης του Einstein. Εναλλακτικά έχουμε :

$$\frac{dN_1}{dt} = -N_1 W_{12}$$

όπου $N_1$ είναι ο πληθυσμός στο επίπεδο με ενέργεια $E_1$ και $W_{12} = \sigma_{12}F$ είναι η πιθανότητα μετάβασης από τη κατάσταση 1 στην κατάσταση 2. Ως $\sigma_{12}$ συμβολίζεται η ενεργός διατομή απορρόφησης, μια ποσότητα με διαστάσεις επιφανείας που εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά της δεδομένης μετάβασης και ως F η ροή φωτονίων του προσπίπτοντος κύματος.

### 3.3.3 Αυτογενής Εκπομπή

Το φαινόμενο κατά το οποίο ένα σωματίδιο (άτομο ή μόριο) σε διεγερμένη κατάσταση επιστρέφει στη θεμελιώδη αποβάλλοντας την αντίστοιχη ενεργειακή διαφορά υπό μορφή ηλεκτρομαγνητικού κύματος, δηλαδή εκπέμποντας φως, περιγράφεται ως αυτογενής εκπομπή. Τα σωματίδια του πληθυσμού $N_2$ διαμένουν διεγερμένα για ορισμένο χρονικό διάστημα (διάρκεια ζωής) και στη συνέχεια αποδιεγείρονται αυτογενώς εκπέμποντας φως με συγκεκριμένη πιθανότητα εκπομπής.




Η εκπομπή του φωτός γίνεται σε τυχαίο χρόνο, με τυχαία κατεύθυνση και πόλωση. Η συχνότητα του ακτινοβολούμενου κύματος δίνεται από την σχέση του Planck :

$$v = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

Η μείωση του πληθυσμού $N_2$ λόγω αποδιέγερσης θα είναι ανάλογη του πληθυσμού N2, του χρόνου dt και της πιθανότητας αυτογενούς εκπομπής ανά sec. Οπότε έχουμε τη σχέση :

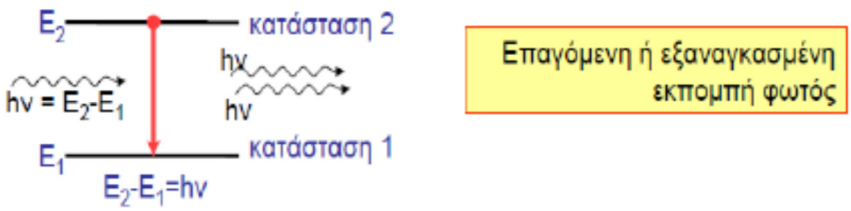
$$dN_2 = -N_2 A_{21} dt$$

όπου $A_{21}(sec^{-1})$ ονομάζεται η πιθανότητα αυτογενούς εκπομπής, ή ο συντελεστής αυτογενούς εκπομπής του Einstein (A) και έχει διαστάσεις αντιστρόφου χρόνου. Η ποσότητα $\tau_{sp}$=1/A ονομάζεται χρόνος ζωής της αυτογενούς εκπομπής. Εναλλακτικά ο αριθμός των μεταβάσεων προς την θεμελιώδη κατάσταση εξαρτάται από τον πληθυσμό N2 και μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\frac{dN_2}{dt} = -A_{21} N_2$$

### 3.3.4 Εξαναγκασμένη ή Επαγομένη Εκπομπή

Έστω ότι ένα Ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας ν προσπίπτει στο υποθετικό μας σύστημα. Αφού αυτό το κύμα έχει την ίδια συχνότητα με την ατομική συχνότητα, υπάρχει μία πεπερασμένη πιθανότητα ότι αυτό το κύμα θα εξαναγκάσει άτομο του πληθυσμού N2 να αποδιεγερθεί μέσω της μετάβασης 2→1. Η ενεργειακή διαφορά E2−E1 που ελευθερώνεται αποδίδεται με την μορφή ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος που προστίθεται στο προσπίπτον με καλά καθορισμένες ιδιότητες. Η διαδικασία αυτή καλείται εξαναγκασμένη ή επαγομένη εκπομπή επειδή εξαρτάται από την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας μέσω του όρου $u(\nu_{12})$.



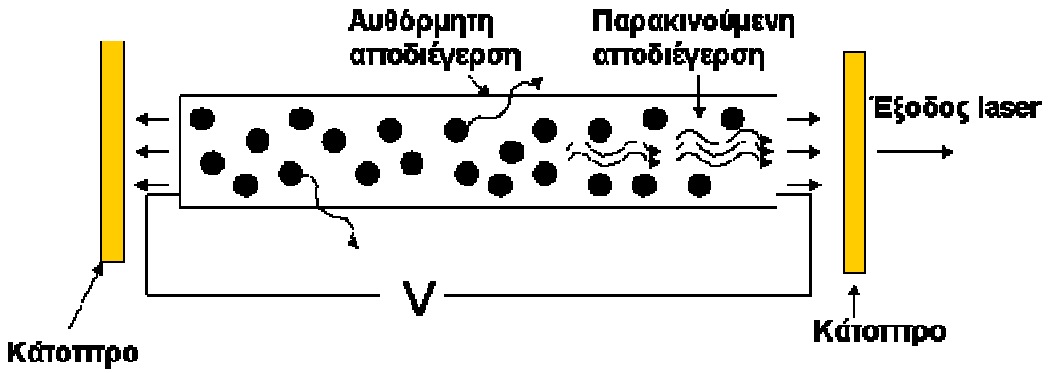

Η εκπομπή του φωτός είναι σε φάση με το προσπίπτον ηλεκτρομαγνητικό κύμα, ταξιδεύει προς την κατεύθυνση και κατέχει την ίδια πόλωση με αυτό. Η ποσοτική αναπαράσταση της επαγόμενης εκπομπής συντελείται περιγράφοντας την μεταβολή του πληθυσμού N2. Η μεταβολή αυτή θα είναι ανάλογη του πληθυσμού N2, της φασματικής πυκνότητας ενέργειας u(v12) και του χρόνου dt. Έτσιδιαμορφώνεται η σχέση

$$dN_2 = -N_2 B_{21} u\left(v_{12}\right) dt$$

όπου ο συντελεστής $B_{21}$ καλείται συντελεστής εξαναγκασμένης ή επαγόμενης εκπομπής του Einstein. Εναλλακτικά έχουμε :

$$\frac{dN_2}{dt} = -N_2 W_{21}$$

όπου η ποσότητα $W_{21}= \sigma_{21}F$ ονομάζεται πιθανότητα εξαναγκασμένης εκπομπής η οποία και σε αυτή την περίπτωση έχει διαστάσεις αντιστρόφου χρόνου. Αντίστοιχα ως $\sigma_{21}$ συμβολίζεται η ενεργός διατομή της εξαναγκασμένης εκπομπής και ως F η ροή φωτονίων του προσπίπτοντος κύματος. Κάτω από κατάλληλες συνθήκες η εξαναγκασμένη εκπομπή μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ενίσχυση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (σχήμα 3.1).




**Εικόνα 16 Σχηματική αναπαράσταση διάταξης laser**

**Παρατηρήσεις:**

- Στις προηγούμενες παραγράφους περιγράφηκαν οι βασικές αρχές των διεργασιών της απορρόφησης, της αυτογενούς και της εξαναγκασμένης εκπομπής. Για τα φαινόμενα αυτά δόθηκαν για το καθένα δύο ποσοτικές περιγραφές καθώς η μία αποτελούσε τον μαθηματικό ορισμό τους και η δεύτερη συνέδεσε την ενεργό διατομή ή το χρόνο ζωής με αυτά. Το όφελος της σύνδεσης αυτής θα γίνει πιο ξεκάθαρο στα κεφάλαια που ακολουθούν.
- Αντίθετα με τον συντελεστή A, οι συντελεστές $W_{21}$ και $W_{12}$ όχι μόνο εξαρτώνται από την επιμέρους μετάβαση αλλά επίσης και από την ένταση του προσπίπτοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Σ'αυτό το σημείο αξίζει να προσθέσουμε ότι $\sigma_{21} = \sigma_{12} = \sigma$, γεγονός που δείχνει πως οι πιθανότητες εξαναγκασμένης εκπομπής και απορρόφησης είναι ίσες.
- Υπάρχει μία βασική διάκριση μεταξύ της αυτογενούς και της εξαναγκασμένης εκπομπής που πρέπει να σημειωθεί. Στην περίπτωση της αυτογενούς εκπομπής, το άτομο εκπέμπει ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα που δεν έχει ορισμένη φασική σχέση με εκείνο που εκπέμπεται από άλλο άτομο. Επιπλέον το κύμα μπορεί να εκπεμφθεί προς οποιαδήποτε διεύθυνση. Στην περίπτωση, όμως, της εξαναγκασμένης εκπομπής, η εκπομπή κάθε ατόμου είναι σε συμφωνία με το προσπίπτον κύμα. Αυτό το κύμα καθορίζει ακόμη και την διεύθυνση του εκπεμπόμενου κύματος.

### 3.3.5 ΦαινόμενοLASER

Ας θεωρήσουμε δύο αυθαίρετα ενεργειακά επίπεδα 1 και 2 δεδομένου υλικού και $N_1$, $N_2$ οι αντίστοιχοι πληθυσμοί τους. Εάν ένα επίπεδο κύμα έντασης I που αντιστοιχεί σε ροή φωτονίων F διαδίδεται κατά μήκος της διεύθυνσης z στο υλικό η στοιχειώδης μεταβολή αυτής της ροής, που οφείλεται στην εξαναγκασμένη εκπομπή και απορρόφηση δίνεται από τη σχέση:

$$dF = \sigma F \left( N_2 - N_1 \right) dz$$

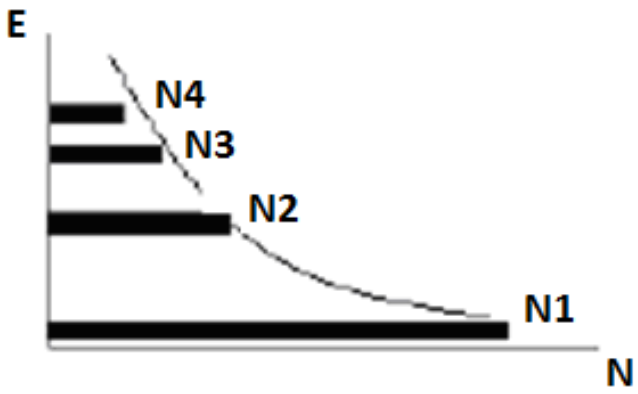
Η παραπάνω σχέση δείχνει πως το υλικό συμπεριφέρεται σαν ένας ενισχυτής όταν $N_2 > N_1$ ,και ως απορροφητής όταν αντίστοιχα $N_2 < N_1$.

Σε αυτό το σημείο, αφού η σύγκριση των πληθυσμών των δύο επιπέδων κατέχει σημαντικό ρόλο, αξίζει να προσθέσουμε πως στην περίπτωση της θερμοδυναμικής ισορροπίας οι πληθυσμοί των ενεργειακών επιπέδων περιγράφονται από την στατιστική Boltzmann.

Έτσι αν $N_i$ και $N_j$ είναι οι πληθυσμοί των δύο επιπέδων (i < j), σε θερμική ισορροπία, ο νόμος του Boltzmann υπαγορεύει:

$$\frac{N_2^e}{N_1^e} = \exp\left[ -\frac{\left( E_2 - E_1 \right)}{k_B T} \right]$$

όπου $k_B$ είναι η σταθερά του Boltzmann και T είναι η απόλυτη θερμοκρασία του υλικού. Μια γραφική απεικόνιση παρουσιάζεται στοπαρακάτω σχήμα 3.2.




**Εικόνα 17 Πληθυσμοί των ενεργειακών επιπέδων**

Παρατηρείται, λοιπόν, ότι στην περίπτωση της θερμικής ισορροπίας έχουμε $N_2 < N_1$ με αποτέλεσμα το υλικό να δρα σαν απορροφητής συχνότητας ν, έχοντας θετικό συντελεστή απορρόφησης. Εάν όμως επιτευχθεί μια συνθήκη μη ισορροπίας για την οποία $N_2 > N_1$ , τότε το μέσο θα ακτινοβολήσει κατά τη διάρκεια της διαταραχής της θερμοδυναμικής ισορροπίας και θα συμπεριφερθεί σαν ένας επιλεκτικός ενισχυτής στην συχνότητα ν. Τότε θα έχει έναν αρνητικό συντελεστή απορρόφησης και θα παρουσιάζει ένα κέρδος. Κάθε μέσο το οποίο έχει τις ανωτέρωιδιότητες καλείται ενεργό. Η αντιστροφή πληθυσμού που περιγράφηκε πιο πάνω οφείλει να πραγματοποιείται έτσι ώστε ο χρόνος διέγερσης να είναι μικρότερος από τον χρόνο χαλάρωσης του ατομικού συστήματος προς την ισορροπία. Στην αντίθετη περίπτωση η αντιστροφή πληθυσμού δεν θα ήταν δυνατή. Η διαταραχή της θερμοδυναμικής ισορροπίας πραγματοποιείται με την βοήθεια μιας εξωτερικής πηγής ενέργειας που καλείται άντληση. Άντληση μπορεί να επιτευχθεί με πολλούς τρόπους οι οποίοι θα αναλυθούν στη συνέχεια.

### 3.3.6 Τα συστατικά στοιχεία ενός laser

Ένα σύστημα laser αποτελείται από τα παρακάτω μέρη:

- **Το ενεργό μέσο**

Το ενεργό μέσο μπορεί να είναι στερεό, υγρό ή αέριο. Αποτελείται από ένα πλήθος ατόμων ή μορίων, τα οποία διεγείρονται σε μια ανώτερη ενεργειακά κατάσταση. Μέσω του μηχανισμού εξαναγκασμένης εκπομπής μπορούν να εκπέμψουν ακτινοβολία.

- **Το οπτικό αντηχείο**

Το οπτικό αντηχείο, το οποία αποτελείται από δυο κάτοπτρα, εξασφαλίζει και τον κλάδο ανάδρασης, μια απαραίτητη παράμετρο για την ύπαρξη δράσης laser. Το ένα από τα δυο κάτοπτρα έχει ανακλαστικότητα 100% και το άλλο <100% ώστε να επιτρέπει την έξοδο της ακτινοβολίας. Το μέρος της ακτινοβολίας που διαφεύγει από το δεύτερο καθρέπτη αποτελεί την ακτινοβολία laser. Τα δυο κάτοπτρα αναγκάζουν τα φωτόνια να εκτελούν πολλαπλές διαδρομές μέσα στην κοιλότητα και να εξαναγκάζουν τα άτομα που βρίσκονται σε διεγερμένες καταστάσεις να αποδιεγερθούν. Με αυτό τον τρόπο ενισχύεται η ακτινοβολία που κυκλοφορεί μέσα στη κοιλότητα και βγαίνει τελικά από αυτήν ενισχυμένη.

- **Μηχανισμός εξόδου**

Το σύστημα εξόδου αποτελεί το ένα από τα δυο κάτοπτρα της κοιλότητας και συγκεκριμένα αυτό με τη μικρότερη ανακλαστικότητα <100%. Το μέρος της ακτινοβολίας που δεν ανακλάται εξέρχεται από τη κοιλότητα και αποτελεί την ακτινοβολία laser. Στα συνεχούς λειτουργίας laser το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας παραμένει μέσα στη κοιλότητα και ελευθερώνεται μόνο ένα μικρό ποσοστό, ενώ στα παλμικά laser το μεγαλύτερο μέρος εξέρχεται από τη κοιλότητα σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή με τη μορφή ενός παλμού.

- **Τρόποι άντλησης του ενεργού μέσου**

Η διέγερση του ενεργού μέσου συχνά αναφέρεται και ως άντληση. Η διαδικασία της άντλησης είναι καθοριστικής σημασίας για την δημιουργία του φαινομένου laser αφού μέσω αυτής παρέχεται η απαιτούμενη ενέργεια ώστε τα άτομα του ενεργού μέσου να διεγερθούν και να προκληθεί η επιθυμητή αντιστροφή πληθυσμού. Αυτό επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους.

• **Οπτική άντληση**: Η προσφερόμενη ενέργεια είναι υπό μορφή φωτονίων, τα οποία μπορεί να προέρχονται από λυχνίες ή από άλλο laser.

• **Ηλεκτρική διέγερση αεριού**: Η ηλεκτρική διέγερση χρησιμοποιείται συνήθως στις περιπτώσεις που το ενεργό μέσο είναι αέριο. Σε αυτή την περίπτωση ο ρόλος των ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι μείζονος σημασίας. Αρχικά εφαρμόζεται υψηλή τάση στα άκρα του ενεργού μέσου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια να επιταχύνονται λόγω του υψηλού δυναμικού. Κατά την κίνηση τους αυτή συγκρούονται με άτομα του αεριού και τα διεγείρουν, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται η αναστροφή πληθυσμών.

• Διέγερση μέσω κρούσεων: διεγείρεται το ένα είδος ατόμων και μετά αποδίδει την ενέργεια του στο άλλο μέσω κρούσεων.

• Χημική διέγερση: Κατά τη διέγερση αυτή η απαραίτητη ενέργεια προσφέρεται από χημική αντίδραση μεταξύ των ατόμων του μορίου.

• Διέγερση με ηλεκτρικό ρεύμα: Είναι μια μέθοδος που εφαρμόζεται στα laser ημιαγωγών. Το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει το ενεργό μέσο προκαλεί την επιθυμητή αντιστροφή πληθυσμών.

### 3.3.7 Ιδιότητες της δέσμης laser

Μετά την σύντομη περιγραφή των βασικών φυσικών μηχανισμών που σχετίζονται με το φαινόμενο laser, θα εξεταστούν οι ιδιότητες της δέσμης. Η ακτινοβολία laser χαρακτηρίζεται από έναν υψηλό βαθμό:

- **Μονοχρωματικότητα:** Η ιδιότητα αυτή οφείλεται στις ακόλουθες δύο περιστάσεις: α. στο ότι μόνο ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας f μπορεί να ενισχυθεί και β. αφού το σύστημα των δύο κατόπτρων σχηματίζει μία κοιλότητα συντονισμού, ταλάντωση μπορεί να συμβεί μόνο στις συχνότητες συντονισμού αυτής της κοιλότητας. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε ένα εύρος γραμμής του laser που είναι συχνά πολύ στενότερο από το συνηθισμένο εύρος γραμμής της μετατόπισης $2 \rightarrow 1$ όπως αυτό παρατηρείται στην αυθόρμητη εκπομπή.
- **Συμφωνία:** Εάν θεωρήσουμε μία ακτινοβολία που διαδίδεται υπό τύπο μίας δέσμης τότε μπορούμε να διακρίνουμε δύο τύπους συμφωνίας, τη χρονική και τη χωρική συμφωνία. Αναφερόμαστε σε χρονική συμφωνία όταν παίρνουμε σημεία με σταθερή διαφορά φάσης κατά μήκος της διάδοσης της φωτεινής δέσμης, ενώ μιλάμε για χωρική συμφωνία όταν παίρνουμε σημεία με σταθερή διαφορά φάσης επάνω στο μέτωπο κύματος της ακτινοβολίας και κάθετα προς την διεύθυνση διάδοσης της φωτεινής δέσμης. Σε σύγκριση με τις συμβατικές πηγές φωτός, η δέσμη laser χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό συμφωνίας τόσο χωρικής όσο και χρονικής όπως φαίνεται και στη παρακάτω εικόνα.

**Εικόνα 18 Βαθμός συμφωνίας χωρικής και χρονικής**

- **Κατευθυντικότητα:** Αυτή η ιδιότητα είναι άμεσο επακόλουθο του γεγονότος ότι ενεργό υλικό τίθεται σε μια κοιλότητα συντονισμού. Στην ουσία μόνο ένα

κύμα διαδιδόμενο κατά μήκος της διεύθυνσης της κοιλότητας ( ή σε μία διεύθυνση πολύ κοντά σε αυτή) μπορεί να διατηρείται στην κοιλότητα.

- **Λαμπρότητα:** ορίζουμε την λαμπρότητα μια δεδομένης πηγής ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ως την ισχύ που εκπέμπει ανά μονάδα επιφάνειας και στερεάς γωνίας. Γενικά τα laser συγκρινόμενα με τις συμβατικές πηγές φωτός σχηματίζουν εικόνες πολύ μεγαλύτερης λαμπρότητας λόγω της πολύ υψηλής πυκνότητας ενέργειας που μεταφέρεται από την πολύ υψηλής κατευθυντικότητας δέσμη τους. Αντίθετα, επειδή η ενέργεια μιας συμβατικής πηγής έχει ισότροπο χαρακτήρα, η ποσότητα που μπορούμε να συλλέξουμε σε καθορισμένη διεύθυνση είναι ανάλογη της στερεάς γωνίας που σχηματίζεται από την πηγή και την επιφάνεια πρόσπτωσης. Ο φωτισμός τους θα είναι πάντα μικρότερος ή το πολύ ίσος με την ισχύ εκπομπής της πηγής.

Καταλήγοντας, αξίζει να σημειωθεί ότι τα χαρακτηριστικά της λαμπρότητας, της κατευθυντικότητας και της μονοχρωματικότητας των πηγών laser είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με την υψηλή συμφωνία που παρουσιάζει η ακτινοβολία τους.

### 3.3.9Εφαρμογές 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:

- 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 (τρισδιάστατη απεικόνιση).
- Πολεμική βιομηχανία.

## 3.4LED (Light Emitting Diode)

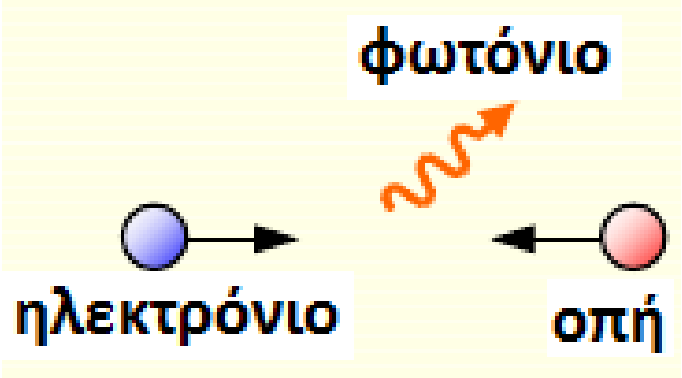
### 3.4.1Γενικά

Η δίοδος εκπομπής φωτός είναι μία ημιαγώγιμος δίοδος που εκπέμπει φως όταν ηλεκτρικό ρεύμα εφαρμόζεται με εμπρόσθια ορθή πόλωση (forward-biased) προς τη συσκευή, όπως ακριβώς και σε ένα απλό κύκλωμα. Το αποτέλεσμα είναι μια μορφή ηλεκτροφωταύγειας, όπου ασυνεχές και στενού φάσματος φως εκπέμπεται από το πέρασμα p-n σε ένα συμπαγές υλικό. Τα LED χρησιμοποιούνται ευρέως ως φωτεινές ενδείξεις για ηλεκτρονικές συσκευές και όλο και περισσότερο σε εφαρμογές με απαιτήσεις όπως σε φακούς και φωτισμούς χώρων.

Η πρώτη γνωστή αναφορά συμπαγούς διόδου εκπομπής φωτός έγινε το 1970 από τον Βρετανό πειραματιστή H. J. Round του Marconi Labs, όταν παρατήρησε φωταύγεια παραγόμενη από ένα κρύσταλλο πυριτίου, ενώ χρησιμοποιούσε έναν ανιχνευτή μαγνητικού πεδίου (cats' whiskers sensor). Ο Ρώσος Oleg Vladimirovich Losev δημιούργησε το πρώτο LED στα μέσα της δεκαετίας του 1920. Η ερευνά του αν και διανεμήθηκε σε Ρωσικά, Γερμανικά και Βρετανικά επιστημονικά περιοδικά αγνοήθηκε και δεν βρήκε πρακτική εφαρμογή για αρκετές δεκαετίες. Ο Rubin Braunstein του Radio Corporation of America ανέφερε υπεριώδεις εκπομπές από αρσενικούχο γάλλιο (GaAs) και από άλλα κραμάτα ημιαγώγιμων υλικών το 1955. Ο Braunstein παρατήρησε υπεριώδεις εκπομπές παραγόμενες από απλές σε δομή διόδους χρησιμοποιώντας κράματα GaSb, GaAs, InP και Ge-Si σε θερμοκρασία δωματίου στους 77 βαθμούς Kelvin. Το πρώτο πρακτικά ορατού φάσματος (κόκκινο) LED δημιουργήθηκε το 1962 από τον Nick Holonyak Jr., ενώ δούλευε στην General Electrics Company. Ο Holonyak θεωρείται ο πατέρας της διόδου εκπομπής φωτός. Ο M. George Craford, ένας πρώην απόφοιτος φοιτητής του Holonyak, εφήυρε το πρώτο κίτρινο LED και το 10 φορές πιο δυνατό κόκκινο και το κόκκινο-πορτοκαλί LED το 1972. Η τεχνολογία αυτή αποδείχτηκε να έχει σημαντικές εφαρμογές σε αλφαριθμητικές οθόνες και εντάχθηκε η εφαρμογή της στα πρώιμα φορητά κομπιουτεράκια.

Ένα LED είναι συνήθως μια μικρή περιοχή (μικρότερη από 1 $mm^2$) φωτεινής πηγής, συχνά με φακό τοποθετημένο στην κορυφή του chip για να διαμορφώσει την ακτινοβολία του και να συμβάλει στην αντανάκλαση. Το χρώμα του εκπεμπόμενου φωτός εξαρτάται από την σύνθεση και την κατάσταση του ημιαγώγιμου υλικού που χρησιμοποιείται και μπορεί να είναι υπέρυθρο, ορατό ή υπεριώδες.

Το χρώμα του φωτός που εκπέμπεται εξαρτάται από την χημική σύσταση του ημιαγώγιμου υλικού που χρησιμοποιείται, και μπορεί να είναι υπεριώδες, ορατό ή υπέρυθρο. Η βασική αρχή των LED είναι μια επαφή p-n η οποία πολώνεται ορθά για να εγχέει ηλεκτρόνια και οπές μέσα στις p- και n- πλευρές αντίστοιχα. Το εγχεόμενο φορτίο μειονότητας επανασυνδέεται με το φορτίο πλειονότητας στην περιοχή απογύμνωσης ή στην ουδέτερη περιοχή. Σε ημιαγωγούς αμέσου διάκενου η επανασύνδεση οδηγεί σε εκπομπή φωτός αφού η ακτινοβόλα επανασύνδεσης κυριαρχεί σε υλικά υψηλής ποιότητας.




Σε υλικά έμμεσου χάσματος, η απόδοση εκπομπής φωτός είναι αρκετά φτωχή και οι περισσότερες από τις διαδρομές επανασύνδεσης είναι μη ακτινοβόλες με παραγωγή θερμότητας μάλλον παρά φωτός. Το μήκος κύματος του φωτός που εκπέμπεται, και, κατά συνέπεια, το χρώμα του, εξαρτάται από το χάσμα ενέργειας των υλικών, τα οποία χρησιμοποιούνται για την δημιουργία του περάσματος p-n, όπου:

p = Υλικό νοθευμένο με αποδέκτες.

n = Υλικό νοθευμένο με δότες.

Η ενέργεια των εκπεμπόμενων φωτονίων, hv , ισούται κατά προσέγγιση με το ενεργειακό χάσμα $E_g$

$$\mathbf{E_g = E_{\varphi\omega\tau o\nu\acute{\iota}o\upsilon} = h \cdot v}$$

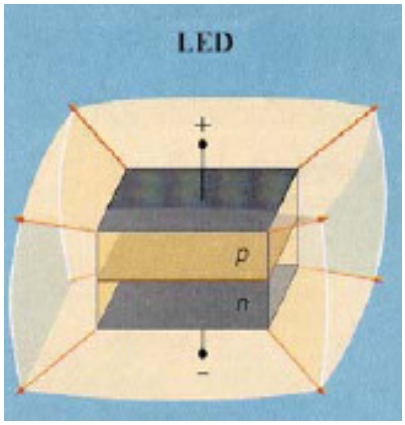
Η δομή ενός LED πρέπει να είναι τέτοια ώστε τα εκπεμπόμενα φωτόνια να μπορούν να απομακρύνονται από την διάταξη χωρίς να επαναπορροφώνται από το ημιαγώγιμο υλικό. Αυτό σημαίνει ότι η p-περιοχή πρέπει να είναι επαρκώς ρηχή, ή διαφορετικά πρέπει να χρησιμοποιήσουμε διατάξεις ετεροδομών.Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πολλά ημιαγώγιμα υλικά άμεσου ενεργειακού διακένου, τα οποία μπορούν εύκολα να νοθευτούν και να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή εμπορικών LED που εκπέμπουν ακτινοβολία στην ερυθρή και την υπέρυθρη περιοχή μηκών κύματος του φάσματος.

Η εξωτερική απόδοση $\eta_{\varepsilon\xi}$ ενός LED είναι ένα μέτρο της απόδοσης της μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε εκπεμπόμενη εξωτερικά φωτεινή ενέργεια. Στο μέγεθος αυτό συνυπολογίζεται η εσωτερική απόδοση της ακτινοβολούσας διαδικασίας επανασύνδεσης και η επακόλουθη απόδοση της εξόδου των φωτονίων από την διάταξη. Η ηλεκτρική ενέργεια στην είσοδο ενός LED ισούται απλά με το γινόμενο του ρεύματος επί την τάση της διόδου ( $I \cdot V$ ). Αν η φωτεινή ισχύς που εκπέμπεται από την διάταξη είναι $P_{\varepsilon\xi}$,τότε

$$\eta_{\varepsilon\xi} = P_{\varepsilon\xi}(\text{οπτική}) \cdot I \cdot V \cdot 100\%$$

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

Όπως και σε άλλες διόδους, το ρεύμα ρέει εύκολα από την p πλευρά, ή άνοδο, προς την n πλευρά, ή κάθοδο, αλλά όχι προς την αντίθετη κατεύθυνση. Οι φορείς φορτίου - τα ηλεκτρόνια και οι οπές ροής – περνούν από την επαφή κινούμενα από ηλεκτρόδια με διαφορετικό δυναμικό. Όταν ένα ηλεκτρόνιο συναντά μια τρύπα, πέφτει σε ένα χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο και απελευθερώνει ενέργεια με τη μορφή ενός φωτονίου. Το μήκος κύματος του φωτός που εκπέμπεται και επομένως και το χρώμα του, εξαρτάται από την ενέργεια χάσματος των υλικών που αποτελούν την επαφή p-n.




Στις διόδους πυριτίου ή γερμανίου, τα ηλεκτρόνια και οι οπές επανασυνδέονται από μια χωρίς ακτινοβολία μετάβαση, η οποία δεν παράγει οπτική εκπομπή, γιατί αυτά είναι έμμεσα υλικά χάσματος. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για το LED είναι άμεσης ζώνης χάσματος με ενέργεια που αντιστοιχεί στο εγγύς υπέρυθρο φως, στο ορατό φως ή κοντά στην υπεριώδη ακτινοβολία.

### 3.4.2 LED Ετεροεπαφής Υψηλής Εντάσεως

Μια ένωση p-n ανάμεσα σε δύο ημιαγωγούς με διαφορετική νόθευση, οι οποίοι όμως αποτελούνται από το ίδιο υλικό, έχουν δηλαδή το ίδιο ενεργειακό διάκενο, ονομάζεται ομοεπαφή. Μια ένωση ανάμεσα σε δύο ημιαγωγούς με το ίδιο ενεργειακό διάκενο ονομάζεται ετεροεπαφή. Μια ημιαγώγιμη δομή διάταξης η οποία περιλαμβάνει ενώσεις ανάμεσα σε υλικά με διαφορετικό ενεργειακό διάκενο ονομάζεται διάταξη ετεροδομής.

Αν η LED κατασκευάζεται από ένα απλό ημιαγωγό, υπάρχει ένας αριθμός προβλημάτων που μειώνει την απόδοση της συσκευής. Ένα σημαντικό πρόβλημα είναι ότι σε μία LED ομοιδομής (μια συσκευή βασισμένη σε ένα απλό ημιαγωγό), ο όγκος εκπομπής φωτονίων πρέπει να είναι κοντά στην επιφάνεια ώστε τα εκπεμπόμενα φωτόνια να μην απορροφώνται ξανά. Αφού κοντά στην επιφάνεια η ποιότητα του ημιαγωγού δεν είναι συνήθως πολύ καλή λόγω της παρουσίας καταστάσεων ατελειών, αυτό προκαλεί μεγάλο αριθμό μη ακτινοβόλων επανασυνδέσεων με την βοήθεια επιφανειακών καταστάσεων. Ένα ακόμα πρόβλημα είναι το ότι τα ηλεκτρόνια που εγχέονται από την πλευρά στην p-περιοχή μπορούν να διαχυθούν σε μεγάλες αποστάσεις πριν επανασυνδεθούν με οπές. Έτσι ο ενεργός όγκος από τον οποίο εξέρχονται τα φωτόνια είναι πολύ μεγάλος. Η ετεροδομή LED λύνει αυτά τα προβλήματα εγχέοντας φορτίο από ένα υλικό μεγαλύτερου ενεργειακού διάκενου σε μια περιοχή στενού διάκενου.

### 3.4.3 Συνεχής εξέλιξη

Το πρώτο υψηλής φωτεινότητας μπλε LED παρουσιάστηκε από τον Shuji Nakamura και βασίστηκε σε InGaN, δανειζόμενο στοιχεία εξέλιξης από την GaN πυρήνωση σε υποστρώματα ζαφείριου και την επίδειξη με p-type ενίσχυμένο GaN που αναπτύχθηκε από τους Isamu Akasaki και H. Amano στη Nagoya. Το 1995, ο Alberto Barbieri στο Εργαστήριο του Cardiff University ερεύνησε την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία της υψηλής φωτεινότητας διόδου LED και επέδειξε ένα πολύ εντυπωσιακό αποτέλεσμα χρησιμοποιώντας μια διάφανη επαφή που κατασκευάστηκε από οξείδιο του ινδίου και του κασσιτέρου (ITO), στα (AlGaInP/GaAs) LED. Η ύπαρξη των μπλε LED και LED υψηλής απόδοσης γρήγορα οδήγησε στην ανάπτυξη του πρώτου. Οι εξελίξεις αποδίδονται σε παράλληλη ανάπτυξη άλλων τεχνολογιών ημιαγωγών καθώς και στις εξελίξεις στην οπτική και στην επιστήμη των υλικών.

### 3.4.4 Εκχύλιση Φωτός

Ο δείκτης διάθλασης των περισσοτέρων ημιαγώγιμων υλικών είναι αρκετά υψηλός, έτσι ώστε σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις το φως από τα LED είναι συνδεδεμένο με ένα μέσο με πολύ χαμηλότερο δείκτη. Η μεγάλη διαφορά δείκτη κάνει την αντανάκλαση αρκετά ουσιαστική (ανά συντελεστές Fresnel). Το παραγόμενο φως εν μέρει αντανακλάται πίσω στον ημιαγωγό, όπου μπορεί να απορροφηθεί και να μετατραπεί σε επιπλέον θερμότητα. Αυτό είναι συνήθως ένα από τα κυρίαρχα αίτια της αναποτελεσματικότητας των LED. Συχνά πάνω από το ήμισυ του εκπεμπόμενου φωτός αντανακλάται πίσω στο LED. Η αντανάκλαση είναι σύνηθες να μειώνεται με τη χρήση σε σχήμα θόλου (μισή σφαίρα) καλύμματος με τη δίοδο στο κέντρο, έτσι ώστε οι απερχόμενες ακτίνες φωτός να χτυπάνε την επιφάνεια κάθετα, κατά την οποία γωνία η ανάκλαση γίνεται η ελάχιστη δυνατή. Τα υποστρώματα που είναι διαφανή στο εκπεμπόμενο μήκος κύματος, και υποστηρίζονται από μια αντανακλαστική επίστρωση, αυξάνουν την αποτελεσματικότητα των LED. Ο δείκτης διάθλασης του υλικού συσκευασίας πρέπει να ταιριάζει με το δείκτη του ημιαγωγού, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η αντανάκλαση. Μια επίστρωση ενάντια στην αντανάκλαση μπορεί επίσης να προστεθείΤο περίβλημα μπορεί να είναι έγχρωμο, αλλά αυτό είναι μόνο για αισθητικούς λόγους ή για να βελτιωθεί ο βαθμός αντίθεσης. Το χρώμα του περιβλήματος δεν επηρεάζει σημαντικά το χρώμα του εκπεμπόμενου φωτός. Άλλες στρατηγικές για τη μείωση των επιπτώσεων της αντανάκλασης διεπαφής περιλαμβάνουν το σχεδιασμό των LED ώστε να απορροφούν και να επανεκπέμπουν το ανακλώμενο φως (η διαδικασία ονομάζεται ανακύκλωση φωτονίων) και την μετατροπή της μικροσκοπική δομής της επιφάνειας για τη μείωση της ανάκλασης, με το να της προκαλέσουμε τυχαία τραχύτητα, δημιουργώντας προγραμματισμένα μοτίβα.

### 3.4.5 Λευκά LED

Υπάρχουν δύο τρόποι για την παραγωγή υψηλής έντασης λευκού φωτός χρησιμοποιώντας LED. Ο ένας είναι να χρησιμοποιηθούν μεμονωμένα LED που εκπέμπουν τα τρία βασικά χρώματα - κόκκινο, πράσινο και μπλε και στη συνέχεια να αναμιχθούν όλα τα χρώματα για να παράγουν λευκό φως. Ο άλλος είναι η χρήση φωσφόρου για να μετατρέψει το μονοχρωματικό φως από ένα μπλε ή UV LED σε ευρέως φάσματος λευκό φως, κατά τον ίδιο τρόπο που δουλεύει ένας λαμπτήρας φθορισμού.

### 3.4.6 Συστήματα RGB

Το λευκό φως μπορεί να παραχθεί με ανάμειξη διαφορετικών χρωμάτων. Η πιο κοινή μέθοδος είναι η χρήση κόκκινου, πράσινου και μπλε (RGB), εξ ου και η μέθοδος ονομάζεται πολύχρωμα λευκά LED (μερικές φορές αναφέρεται ως RGB LED). Επειδή ο μηχανισμός του σχετίζεται με εξελιγμένο ηλεκτροπτικό σχεδιασμό για τον έλεγχο της ανάμιξης και της διάδοσης των διαφόρων χρωμάτων, η προσέγγιση αυτή έχει σπάνια χρησιμοποιηθεί για τη μαζική παραγωγή λευκών LED στην βιομηχανία. Παρ' όλα αυτά η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα για πολλούς ερευνητές και τους επιστήμονες λόγω της ευελιξίας της ανάμειξης διαφόρων χρωμάτων. Επίσης, ο μηχανισμός αυτός έχει υψηλότερη κβαντική απόδοση στην παραγωγή λευκού φωτός. Υπάρχουν διάφοροι τύποι πολύχρωμων λευκών LED: δι-, τρι- και τετραχρωματικά λευκά LED. Αρκετά σημαντικοί παράγοντες που εμπλέκονται σε αυτές τις διαφορετικές προσεγγίσεις περιλαμβάνουν την σταθεροποίηση του χρώματος, την ικανότητα απόδοσης του χρώματος, και την απόδοση φωτεινότητας. Συχνά υψηλότερη αποδοτικότητα σημαίνει χαμηλότερη απόδοση των χρωμάτων, παρουσιάζοντας ένα συμβιβασμό μεταξύ της φωτεινής απόδοσης και της χρωματικής απόδοσης. Για παράδειγμα, τα διχρωματικά λευκά LED έχουν την καλύτερη αποδοτικότητα φωτεινότητας (120 lm/W), αλλά τη χαμηλότερη ικανότητα χρωματικής απόδοσης. Αντιθέτως, τα τετραχρωματικά λευκά LED αν και έχουν εξαιρετική ικανότητα χρωματικής απόδοσης, έχουν συχνά χαμηλή αποδοτικότητα φωτεινότητας. Τα τριχρωματικά λευκά LED είναι μια ενδιάμεση κατάσταση και έχουν και καλή αποδοτικότητα φωτεινότητας (>70lm/W) αλλά και επαρκείς ικανότητες απόδοσης χρωμάτων. Το τι προσφέρουν τα πολύχρωμα LED δεν είναι απλώς άλλη μια λύση για την παραγωγή λευκού φωτός, αλλά είναι μια ολόκληρη νέα τεχνική παραγωγής λευκού φωτός από διαφορετικά χρώματα. Κατ' αρχήν, όλα τα ικανά να αντιληφθούμε χρώματα μπορούν να παραχθούν με ανάμειξη διαφορετικών ποσοτήτων των τριών βασικών χρωμάτων, και αυτό καθιστά δυνατή την επίτευξη ακριβή έλεγχου των χρωμάτων.

### 3.4.7 Quantum Dot LED (σε πειραματικό στάδιο)

Μια νέα τεχνική που αναπτύχθηκε από τον Michael Bowers, έναν μεταπτυχιακό φοιτητή στο Πανεπιστήμιο Vanderbilt στο Nashville, περιλαμβάνει επίστρωση ενός μπλε LED με κβαντικές τελείες που εκπέμπουν ένα λευκό φως σε σχέση με το μπλε φως από τα LED. Η τεχνική αυτή δημιουργεί ένα ζεστό, υπόλευκο φως παρόμοιο με αυτό που παράγεται από τους λαμπτήρες πυρακτώσεως. Τα Quantum dots είναι ημιαγώγιμοι

νανοκρύσταλλοι που διαθέτουν μοναδικές οπτικές ιδιότητες.Το χρώμα των εκπομπών τους μπορεί να ρυθμιστεί από την ορατή περιοχή μέχρι όλο το υπέρυθρο φάσμα. Αυτό παρέχει περισσότερες επιλογές χρωμάτων και καλύτερη χρωματική απόδοση λευκών LED. Τα κβαντικά LED είναι διαθέσιμα στα ίδια είδη περιβλήματος, όπως τα παραδοσιακά φωσφορούχα LED.

### 3.4.8 Πλεονεκτήματα χρήσης των LED

- Απόδοση: Τα LED παράγουν περισσότερο φως ανά Watt από τους λαμπτήρες πυρακτώσεως. Αυτό είναι σημαντικό σε συσκευές εξοικονόμησης ενέργειας ή συσκευές που τροφοδοτούνται από μπαταρίες.
- Χρώμα: Τα LED μπορούν να εκπέμψουν φως στο χρώμα της προτίμησής μας χωρίς τη χρήση φίλτρων χρωματισμού που απαιτούνται στις παραδοσιακές μεθόδους φωτισμού. Αυτό είναι πιο αποδοτικό και μπορεί να μειώσει το αρχικό κόστος.
- Μέγεθος: Τα LED μπορεί να είναι πολύ μικροί (μικρότεροι από 2 mm2) και μπορούν εύκολα να τοποθετηθούν πάνω σε τυπωμένα κυκλώματα.
- Χρόνος On / Off: Τα LED ανάβουν πολύ γρήγορα. Μια χαρακτηριστική κόκκινη ενδεικτική λυχνία LED επιτυγχάνει πλήρη φωτεινότητα σε μικροδευτερόλεπτα. Λυχνίες LED που χρησιμοποιούνται σε συσκευές επικοινωνίας μπορούν να έχουν και ακόμη ταχύτερους χρόνους απόκρισης
- Συχνή χρήση: Τα LED είναι ιδανικά για χρήση σε εφαρμογές που υπόκεινται σε συχνή on-off χρήση, σε αντίθεση με τους λαμπτήρες φθορισμού που καίγονται πιο γρήγορα όταν εναλλάσσονται συχνά, ή HID λαμπτήρες που απαιτούν μεγάλο χρονικό διάστημα πριν την επανέναρξη.
- Dimming: Τα LED μπορούν πολύ εύκολα να μετριάσουν τη φωτεινότητά τους, είτε με διαφοροποίηση του παλμικού εύρους είτε μειώνοντας το ρεύμα.
- Αντοχή σε κραδασμούς: Τα LED, όντας συμπαγή, είναι δύσκολο να καταστραφούν με εξωτερικούς κραδασμούς, σε αντίθεση με τους λαμπτήρες φθορισμού και τους λαμπτήρες πυρακτώσεως που είναι εύθραυστοι.
- Τοξικότητα: Τα LED δεν περιέχουν υδράργυρο, σε αντίθεση με τους λαμπτήρες φθορισμού.

### 3.4.9 Εφαρμογές

Οι πολλές εφαρμογές των LED είναι ποικίλες, αλλά κατατάσσονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

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.Τέλος, τα LED επίσης χρησιμοποιούνται για να παράγουν φως για τη μέτρηση και την αλληλεπίδραση με διαδικασίες που δεν περιλαμβάνουν το ανθρώπινο οπτικό σύστημα.

Χρήσεις ενδείξεων και σήμανσης

- Ενδείξεις κατάστασης σε μια ποικιλία εξοπλισμού
- Οθόνες LED που χρησιμοποιούνται ως οθόνες τηλεόρασης σε γήπεδα, ηλεκτρονικούς πίνακες και διακοσμητικές οθόνες.
- Φωτεινούς σηματοδότες και σημάνσεις
- Φωτεινά σήματα εξόδου
- Λεπτές, ελαφριές οθόνες μηνυμάτων σε αεροδρόμια και σιδηροδρομικούς σταθμούς και ως οθόνες δρομολογίων για τρένα, λεωφορεία, τραμ, καθώς και για πλοία.
- Κόκκινες ή κίτρινες λυχνίες LED που χρησιμοποιούνται ως ενδείξεις σε οθόνες σε περιβάλλοντα όπου η νυχτερινή ορατότητα πρέπει να διασφαλιστεί: πιλοτήρια αεροσκαφών, γέφυρες υποβρυχίων και πλοίων, αστρονομικά παρατηρητήρια, καθώς και σε ανοιχτούς χώρους, πχ. για τη παρακολούθηση των ζώων τη νύχτα και για στρατιωτική χρήση.
- LED όλων των χρωμάτων, συμπεριλαμβανομένων του υποκίτρινου, ώστε να προσομοιάζει τις λάμπες πυρακτώσεως, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές σε σιδηροδρομικές εγκαταστάσεις.
- Σε ηλεκτρονικούς πίνακες για την εμφάνιση μηνυμάτων.
- Ως ένα μέσο αναφοράς της ποιότητας της τάσης σε ηλεκτρονικά κυκλώματα. Η προς τα εμπρός πτώση τάσης (πχ., περίπου 1,7 V για ένα κανονικό κόκκινο LED) μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί για μια δίοδο Zener σε χαμηλής τάσης ρυθμιστές. Αν και η τάση των LED προς τα εμπρός είναι πολύ πιο εξαρτημένη από την ένταση, από μια καλή δίοδο Zener, οι Zener δεν είναι διαθέσιμες για τάσεις κάτω των 3V περίπου.
- Ως φωτισμός ασφαλείας σε οχήματα

- Χριστουγεννιάτικα φώτα με LED λαμπτήρες διατίθενται σε διάφορα χρώματα και με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.
- Παρέχονται LED-modules σε μια πιο εύχρηστη μορφή για τα άτομα με λιγότερες γνώσεις των ηλεκτρονικών και ικανότητα εγκατάστασής τους: αυτοί οι λαμπτήρες LED περιέχονται μέσα σε σε προστατευτικό περίβλημα και ένας οδηγός βοηθάει στην τοποθέτηση τους, με παροχή ρεύματος συνήθως 12 βολτ. Τα LED αυτά είναι διαθέσιμα σε μια ευρεία ποικιλία σχημάτων, μεγεθών και χρωμάτων.

## 3.4 Συνοπτικά

Οι περισσότερο συνηθισμένες οπτικές πηγές που χρησιμοποιούνται είναι οι δίοδοι LED και τα διοδικά lasers (LD). Και οι δύο μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να δημιουργήσουν ακτίνες με διαφορετικά μήκη κύματος, που αντιστοιχούν στα 3 παράθυρα στα οποία οι οπτικές ίνες έχουν ελάχιστη εξασθένιση.

Τα LEDs γενικά παρουσιάζουν:

- Καλή αξιοπιστία
- Μικρή κατευθυντικότητα
- Είναι σχετικά ανέξοδα
- Επιτρέπουν καλή ζεύξη με τις οπτικές ίνες
- Δεν είναι μονοχρωματικά και λόγω αυτής της ιδιότητας τους παρουσιάζουν χρωματική διασπορά μέσα στην οπτική ίνα

Τα διοδικά lasers (LD) παρουσιάζουν:

- Άκρως στενό φάσμα εκπομπής
- Ελάχιστη χρωματική διασπορά (σε σχέση με τα LED)
- Χρειάζονται μεγαλύτερη ισχύ τροφοδοσίας απ’ ότι τα LEDs.
- Είναι πιο ακριβά από τα LEDs.
- Η ισχύς που εκπέμπει είναι πολύ ευαίσθητη σε θερμοκρασιακές μεταβολές.
- Πρέπει να λειτουργούν σε σταθερή θερμοκρασία ή να οδηγούνται από κύκλωμα APC (αυτόματος έλεγχος ισχύος), που σταθεροποιεί την εκπεμπόμενη ισχύ στις διάφορες μεταβολές της θερμοκρασίας.

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο**

# 4 ΤΕΧΝΙΚΗ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

## 4.1 OTDR

Το OTDR είναι ένα όργανο που χρησιμοποιείται ευρέως για τον έλεγχο ποιότητας εγκατεστημένων ή προς εγκατάσταση οπτικών ινών και τον ευρύτερο χαρακτηρισμό τους όσον αφορά τις απώλειες που εμφανίζουν κατά το μήκος τους. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στην διαδικασία εύρεσης σημείων που προκαλούν τη διακοπή μίας ζεύξης ή την υπερβολική υποβάθμισή της από πλευράς ισχύος.

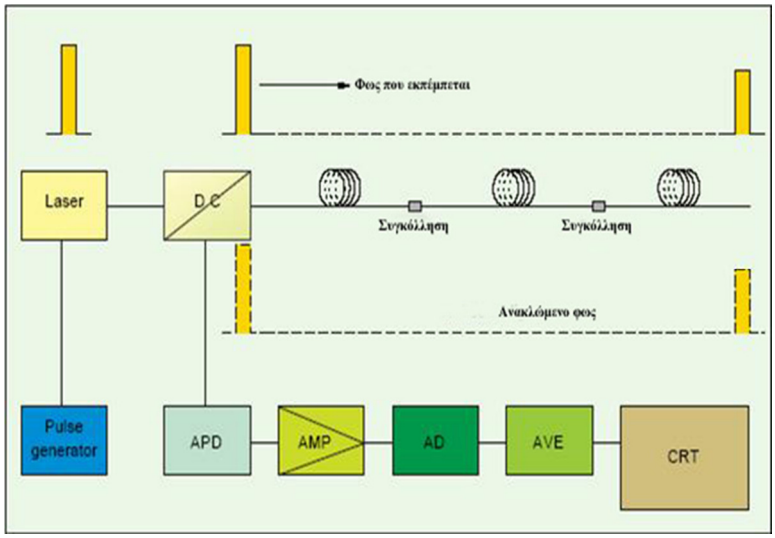
Συγκεκριμένα η χρησιμότητά τους αναδεικνύεται σε μια σειρά από μετρήσεις όπως:

1. Μέτρηση αποστάσεων.
2. Μέτρηση εξασθένησης οπτικών ινών, οπτικών ζεύξεων, συγκολλήσεων και συνδέσεων.
3. Ανίχνευση τοπικών διαταραχών εξασθένησης.
4. Μέτρηση ανακλάσεων σε συνδέσεις ή στο τέλος μίας οπτικής ζεύξης.

Το OTDR λειτουργεί με βάση τη διάδοση φωτός σε οπτική ίνα κατά τη διάρκεια συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος. Μία γεννήτρια σχετικά στενών ηλεκτρικών παλμών (π.χ. 0.01μs έως 0.1μs) παράγει τους παλμούς αυτούς ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Οι παλμοί αυτοί οδηγούν μία διοδική πηγή laser, η οποία παράγει μία διαμορφωμένη δέσμη φωτός που στέλνεται μέσω ενός κατευθυντικού συζεύκτη στην οπτική ίνα. Λόγω των εγγενών ανωμαλιών που χαρακτηρίζουν την οπτική ίνα αλλά και λόγω ασυνεχειών (συνδετήρες, συγκολλήσεις, τέλος μίας ζεύξης) κατά τη διάδοση συγκεκριμένη ποσότητα φωτός θα επιστρέψει στο όργανο μέσω σκέδασης Rayleigh ή ανακλάσεων. Η επιστρεφόμενη δέσμη θα ανιχνευθεί από μία φωτοδίοδο χιονοστιβάδας (Avalanche Photodiode, APD) και το ηλεκτρικό σήμα που θα παραχθεί από αυτή ενισχύεται από ενισχυτική βαθμίδα και γίνεται αντικείμενο επεξεργασίας από εσωτερικό μικροϋπολογιστή. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται πολλές φορές και έτσι τα αποτελέσματα που προβάλλονται στην οθόνη του οργάνου προκύπτουν από στατιστική επεξεργασία. Η ισχύς του σήματος απεικονίζεται στον κάθετο άξονα του οργάνου και η απόσταση, που έχει υπολογισθεί από το χρόνο διάδοσης στον οριζόντιο.

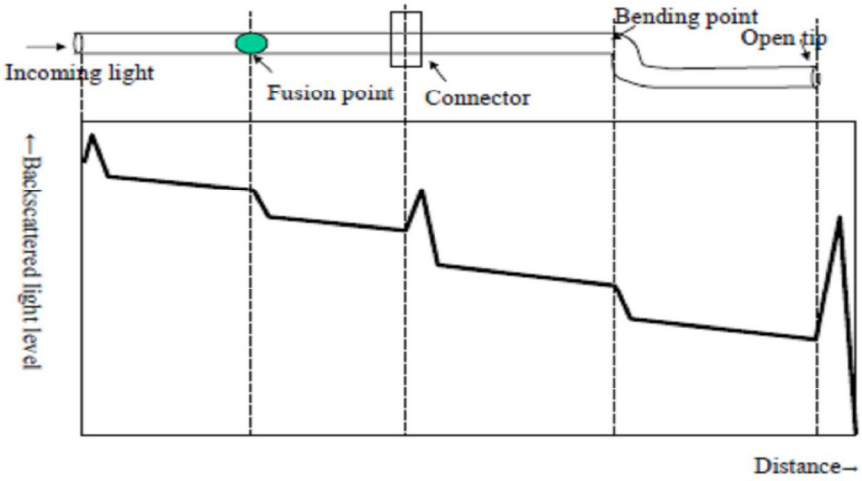
Συγκεκριμένα η χρησιμότητά τους αναδεικνύεται σε μια σειρά από μετρήσεις όπως:

5. Μέτρηση αποστάσεων οπτικών ζεύξεων.
6. Μέτρηση εξασθένησης οπτικών ινών, οπτικών ζεύξεων, συγκολλήσεων και συνδέσεων.
7. Ανίχνευση τοπικών διαταραχών εξασθένησης.
8. Μέτρηση ανακλάσεων σε συνδέσεις ή στο τέλος μίας οπτικής ζεύξης




**Εικόνα 19** ***Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας OTDR***

Χονδρικά μπορούμε να πούμε ότι η μορφή του ίχνους που βλέπουμε είναιμια ευθεία γραμμή με αρνητική κλίση (κατηφορική). Αυτό συμβαίνει φυσικά γιατί,όπως έχουμε πει και παραπάνω, η ισχύς του παλμού καθώς αυτός διαδίδεται κατάμήκος της ίνας, ολοένα και μειώνεται. Προφανώς από τη διαφορά στην ισχύ τουπαλμού στα σημεία εισόδου και εξόδου μπορούμε να υπολογίσουμε τις απώλειες της ζεύξης, ενώ από την κλίση της Δy/Δx υπολογίζονται οι απώλειες αν χιλιόμετρο(dB/Km) οι οποίες φυσικά εξαρτώνται από το μήκος κύματος που χρησιμοποιούμε.Με μια πιο προσεκτική παρατήρηση του ίχνους θα δούμε ότι υπάρχουν σε κάποιασημεία απότομες πτώσεις της ισχύος ή και μικρές κορυφές. Οι ανωμαλίες αυτέςοφείλονται σε ασυνέχειες της ζεύξης δηλαδή σε splices, συνδετήρες ή σε σημεία μεαπώλειες (τραυματισμοί, καμπυλώσεις). Αναλυτικότερα, όπως φαίνεται και στην εικόνα 9, κάθε φορά που ο παλμός διέρχεται από σημείο θερμικής συγκόλλησηςπαρουσιάζει μια μικρή απότομη πτώση της ισχύος του η οποία στο ίχνος φαίνεται σαν μικρό σκαλοπάτι. Βέβαια με τις σύγχρονες συσκευές θερμικής συγκόλλησης είναι δυνατό να επιτύχουμε συγκολλήσεις με πολύ μικρές απώλειες, τόσο μικρές πουπολλές φορές δεν ανιχνεύονται από το OTDR. Αντίθετα από τις θερμικές συγκολλήσεις, οι συνδετήρες παρουσιάζουν μεγαλύτερες απώλειες οπότε είναι πάντα «ορατοί». Κατά τη διέλευση του παλμού από τον συνδετήρα ένα σημαντικό μέρος της ισχύος του ανακλάται από τη διεπαφή της ένωσης και αυτό δημιουργεί χαρακτηριστική εικόνα στο ίχνος. Η ανακλώμενη ακτινοβολία ανιχνεύεται από το OTDR το οποίο φυσικά δεν μπορεί να ξεχωρίσει την προέλευση της, αν είναι δηλαδή από οπισθοσκέδαση ή ανάκλαση σε κάποια διεπαφή, και ερμηνεύεται σαν μια στιγμιαία αύξηση της ισχύος του παλμού οπότε φαίνεται στο ίχνος σαν μια μικρή κορυφή πριν την απότομη πτώση.




**Εικόνα 20***Διάγραμμα ίχνους με σημεία συγκόλλησης, συνδετήρες και σημεία καμπύλωσης*

## 4.3SPLICER

Η σύνδεση οπτικών ινών είναι, σε αντίθεση με τη σύνδεση χάλκινων αγωγών, μιαχρονοβόρα σύνθετη και λεπτή διαδικασία. Υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι σύνδεσηςοπτικών ινών. Οι μόνιμες συνδέσεις (splices) και οι σύνδεση με συνδετήρα(connector) . Στις πρώτες οι ίνες συγκολλούνται μεταξύ τους είτε με μηχανικό τρόπο(Mechanical splicing) είτε με θερμικό (Fusion splicing) και οι απώλειες του σήματοςείναι πολύ μικρές. Στις συνδέσεις με συνδετήρες οι απώλειες είναι μεγαλύτερες αλλάπλεονεκτούν φυσικά στον τομέα της ευελιξίας .Δύο είναι οι βασικές παράμετροι οι οποίες θα χαρακτηρίσουν μια σύνδεση. Ημηχανική αντοχή της σε κάμψη ή εφελκυσμό και η απώλειες του σήματος που επιφέρει. Οι απώλειες μπορεί να συμβαίνουν για πολλούς και διάφορους λόγους, συνηθέστερες όμως αιτίες απωλειών είναι η κακή ευθυγράμμιση των ινών, η παρουσία αέρα ή ξένων σωμάτων ανάμεσα στις ίνες, αλλά και η ατελής λείανση τωνεπιφανειών που συγκολλούνται.

Η ***θερμική συγκόλληση*** πραγματοποιείται με ειδικά μηχανήματα που λέγονταιsplicers. Τα splicers φέρουν δύο ακίδες – ηλεκτρόδια τα οποία δημιουργούν, στοδιάκενό τους, ηλεκτρικό τόξο. Η θερμοκρασία που αναπτύσσεται τοπικά είναιπερίπου 1100ο C και λιώνει τα άκρα των ινών, οι οποίες στην συνέχεια έρχονται σεεπαφή και συγκολλούνται. Η διαδικασία ξεκινά με την απογύμνωση (stripping) των ινών από τα προστατευτικά περιβλήματα τους. Κατόπιν οι ίνες κόβονται με ειδικούς κοπτήρες (cleavers) για να έχουν όσο γίνεται πιο επίπεδη επιφάνεια και κάθετη στο διαμήκη άξονα τους. Στη συνέχεια καθαρίζονται με διάλυμα αιθυλικής αλκοόλης και τοποθετούνται στοsplicer. Τα περισσότερα σύγχρονα μηχανήματα έχουν ενσωματωμένα μικροσκόπιακαι χρησιμοποιούν διάφορες τεχνικές για να ευθυγραμμίζουν τις ίνες. Ηευθυγράμμιση των ινών είναι ο βασικότερος παράγοντας για μια επιτυχημένησυγκόλληση με μικρές απώλειες.Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι και η ποιότητα των επιφανειών πουσυγκολλούνται. Οι επιφάνειες πρέπει να είναι όσο γίνεται πιο καθαρές και επίπεδες.Γι’ αυτό το λόγο πριν τη δημιουργία της συγκόλλησης ένα ηλεκτρικό τόξομικρότερης ισχύος (prefusion) «καθαρίζει» τις επιφάνειες από ατέλειες πουδημιουργήθηκαν κατά την κοπή τους. Επίσης το περιβάλλον στο οποίο γίνεται ησυγκόλληση πρέπει να είναι ελεγχόμενο και σχετικά προστατευμένο, κυρίως από τησκόνη.Τέλος σημαντική επίδραση στη συγκόλληση έχει και η ισχύς του ηλεκτρικού τόξου.της ένωσης και ανιχνεύεται φυσικά από το OTDR και φαίνεται στο ίχνος σαν μιαμικρή κορυφή πριν την Ηλεκτρική εκκένωση μεγάλης έντασης έχει σαν αποτέλεσμα την τήξη μεγάλου μέρους των ινών άρα και μια πιο ανθεκτική συγκόλληση, υστερεί όμως σε οπτικές ιδιότητες γιατί χαλάει η «ομοιομορφία» του δείκτη διάθλασης.

Αντίθετα ηλεκτρικέςεκκενώσεις μικρότερης έντασης δημιουργούν ενώσεις με καλύτερες οπτικές ιδιότητες(μικρότερες απώλειες, μικρότερες οπισθοσκεδάσεις) αλλά και με μικρότερη μηχανικήαντοχή.Γενικά μια αποδεκτή θερμική συγκόλληση έχει απώλειες περίπου 0.1 dB, μικρότερεςαπό της μηχανικές συγκολλήσεις ή τους συνδετήρες, όχι όμως αμελητέα για ταδεδομένα των οπτικών ινών αφού ισοδυναμεί με τις απώλειες που επιφέρει ίνα 500 m.Παρ' όλα αυτά με τα σύγχρονα splicer μπορούν να γίνουν και συγκολλήσεις μεμικρότερες απώλειες. Επίσης κάποια splicer έχουν τη δυνατότητα να κάνουνταυτόχρονα πολλές συγκολλήσεις, μέχρι και 12 ίνες.

Οι ***μηχανικές συγκολλήσεις***, σε αντίθεση με τις θερμικές, δεν είναι χρονοβόρες ούτεαπαιτούν ειδικό εξοπλισμό υψηλού κόστους. Είναι όμως και ποιοτικά κατώτερες μιακαι παρουσιάζουν μεγαλύτερες απώλειες από τις θερμικές. Χρησιμοποιούνται κυρίωςσε συγκολλήσεις πολύτροπων ινών όπου οι ευθυγράμμιση είναι πιο εύκολη και οιαπαιτήσεις μικρότερες. Κατά τη διαδικασία της μηχανικής συγκόλλησης οι ίνεςκόβονται, όπως και στην θερμική συγκόλληση, με cleavers. Στη συνέχεια αφού γίνειο υποτυπώδης καθαρισμός τους ευθυγραμμίζονται και συγκολλούνται.Η ευθυγράμμιση κατά την μηχανική συγκόλληση δεν απαιτεί την ευθυγράμμιση τωνπυρήνων αλλά μόνο του μανδύα των ινών. Αυτό έχει ως συνέπεια φυσικά ναυπάρχουν ατέλειες γι' αυτό άλλωστε έχουμε και μεγαλύτερες απώλειες σ'αυτού τουείδους συγκολλήσεις. Αυτές οι ατέλειες οφείλονται σε πιθανή εκκεντρότητα τουπυρήνα σε σχέση με τον μανδύα αλλά και στο ελαφρώς ελλειπτικό σχήμα που εκκατασκευής πολλές φορές έχουν οι ίνες. Επίσης πολλές φορές οφείλονται και στηνανοχή των εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται για την ευθυγράμμιση. Ταεξαρτήματα αυτά είναι μικροί γυάλινοι σωλήνες (tubes) στους οποίους τοποθετούνταιτα άκρα των ινών που θα συγκολληθούν. Η συγκόλληση γίνεται με εποξική ρητίνη. Ηεποξική ρητίνη είναι ρευστή κόλλα με κατάλληλο δείκτη διάθλασης, παρόμοιο μεαυτόν της ίνας, και τοποθετείται στην επιφάνεια της μιας ίνας. Είναι όμως και αυτήένας παράγοντας που συμβάλλει στις αυξημένες απώλειες των μηχανικώνσυγκολλήσεων λόγω του ελαφρώς διαφορετικού δείκτη διάθλασης της αλλά και τουδιαφορετικού συντελεστή θερμικής διαστολής σε σχέση με τις ίνες.

Οι ***συνδετήρες*** χρησιμοποιούνται όταν η σύνδεση των ινών δεν θέλουμε να είναι μόνιμη, όταν δηλαδή θέλουμε να υπάρχει δυνατότητα σύνδεσης και αποσύνδεσης.

Οι συνδετήρες υστερούν σε σχέση με τις μόνιμες συνδέσεις στις απώλειες. Απώλειες εως και 1dB είναι αποδεκτές γιασυνδετήρες αν και υπάρχουν συνδετήρες με μικρότερες

απώλειες. Η σύνδεση ινών με συνδετήρες υπερτερεί όμως στην ευελιξία αφού οι συνδέσεις αυτές δεν είναι μόνιμες οπότε μπορούν να συνδεθούν και να αποσυνδεθούν πολλές φορές, συνήθως 500 ως 1000. Γι' αυτό το λόγο η αντοχή ενός συνδετήρα στην επαναληψιμότητα είναι βασική παράμετρος κατά τη σχεδίαση και κατασκευή του.
Μια άλλη πρόκληση στην κατασκευή συνδετήρων είναι και η μικρή ανοχή που πρέπει να έχουν όσο αφορά στις διαστάσεις τους.

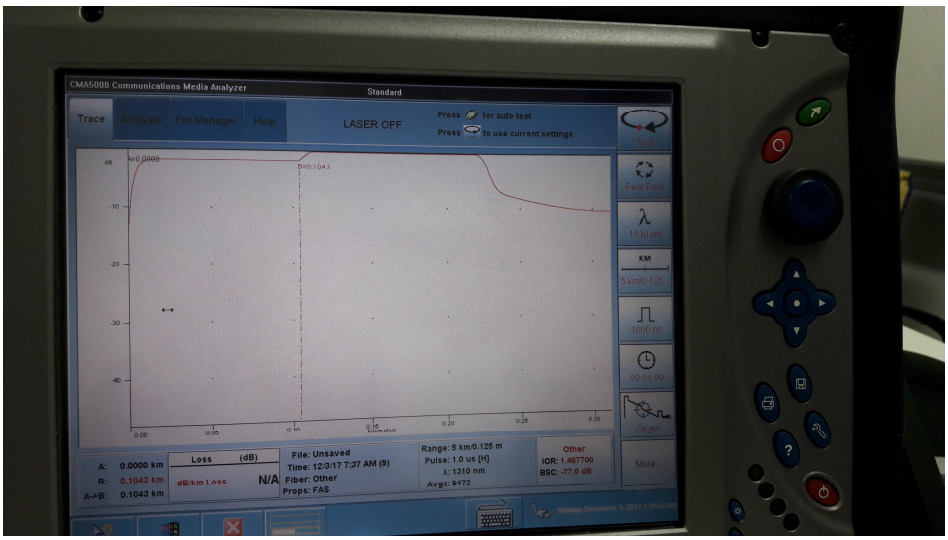
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

# 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Αφού έγιναν οι απαραίτητες ρυθμίσεις στο Otdrπροχωρήσαμε στον έλεγχο τεσσάρων οπτικών ινών(2 μονότροπων και 2 πολύτροπων) του εργαστηρίου. Σύμφωνα με τις ενδείξεις του κατασκευαστή έχουμε δύο μονότροπες ίνες με μήκος 100nmκαι 1000nm και δύο πολύτροπες με μήκος 100nmκαι 200nm. Ακολούθως παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

## Μονότροπη ίνα 100m

**Για λ=1310nm**




Λόγω μικρού μήκος ίνας δεν υπάρχει κατάλληλη διακριτική ικανότητα και δεν είναι δυνατόν να παρατηρήσουμε σε αυτό το μήκος κύματος «φαινόμενα» στην οπτική ίνα παρά μόνο να επιβεβαιώσουμε το μήκος της.

**Γιαλ=1550nm**

Επιβεβαιώνεταιτο μήκος της ίνας και παρατηρούνται δύο pickπου οφείλονται στη σύνδεση πηγής με ίνας μέσω connectora (1$^{o}$ pick)και στη σύνδεση ίνας με οπτικό δέκτη μέσω connectora (2$^{o}$pick).Δεν παρατηρείται ασυνέχεια στη διάδοση φωτός μέσα στην ίνα, ο συντελεστής απωλειών όπως έχει προσδιοριστεί από την κλίση της ευθείας μεταξύ δύο κορυφών α=0,2 db/km κάτι που βρίσκεται σε συμφωνία και με τη θεωρία η οποία προβλέπει αυτή τη τιμή για το συντελεστή απωλειών σε αυτό το μήκος κύματος.

**Video inspector input 1**

Ο πυρήνας έχει υποστεί ζημιά και δεν είναι εφικτό να γίνει το τεστ.

**Video inspector input 2**

Οι μαρκαρισμένες περιοχές ανάλογα με το χρώμα είναι γρατζουνιές και ρύποι εντός του connector. Το pass ή tofail είναι αποτελέσματα που προκύπτουν από τα προφίλ απαιτήσεων που έχουμε θέσει. Στην περίπτωση μας το τεστ απέτυχε.

## Μονότροπη ίνα 1000m

**Γιαλ=1310 nm**

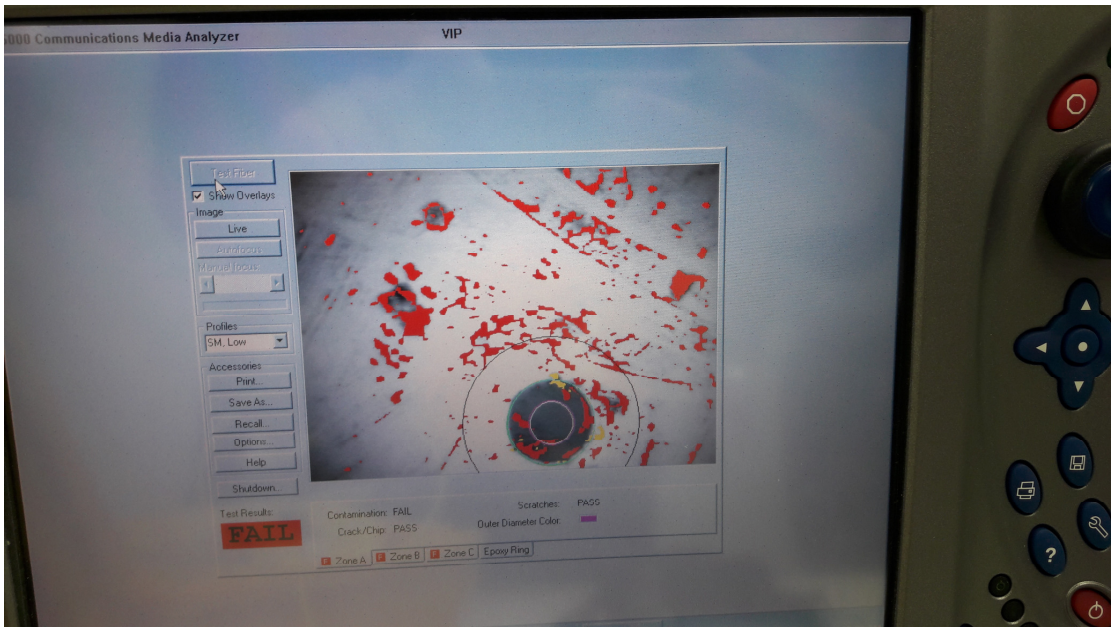
Το Otdr,σε αντίθεση με πριν, μετράει καλύτερα την ίνα των 1000 mκαι παρατηρούμε στο σημείο του πρώτου Pick  είναι ο συνδετήρας που έχουμε συνδέσει στην πηγή και το

καταλαβαίνουμε από την 1η ανάκλαση. Στο σημείο του δείκτη δεύτερου pick είναι το τέλος του καλωδίου και ο δεύτερος συνδετήρας που μας δίνει φαινόμενο ανάκλασης.

**Γιαλ=1550 nm**

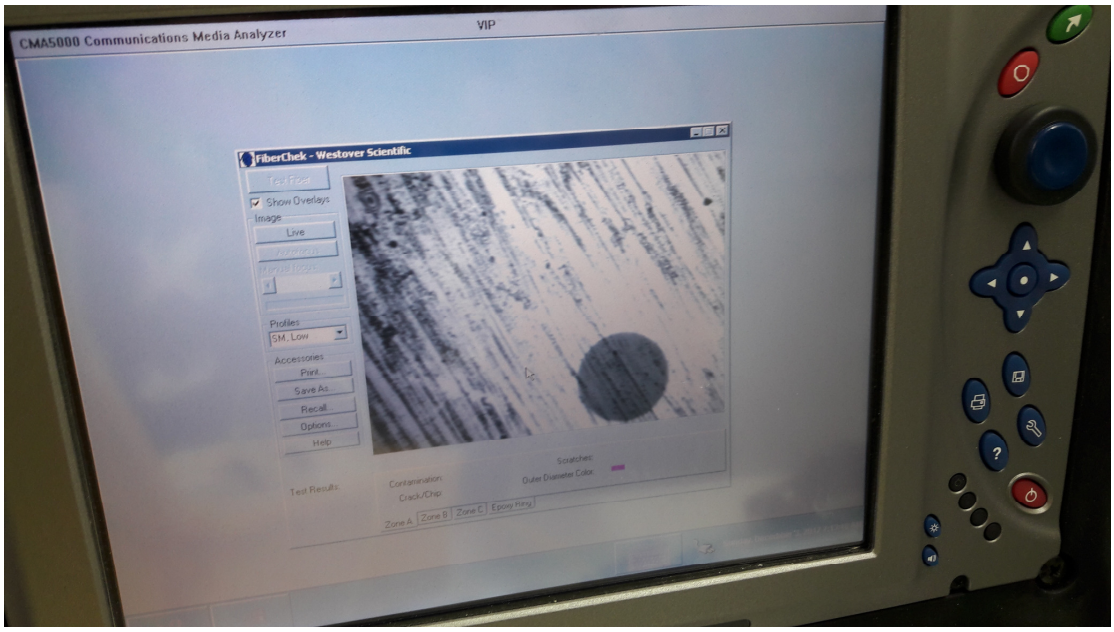
Σε αύτη τη μέτρηση διακρίνουμε ότι για αυτό το μήκος κύματος η ίνα δεν παρουσιάζει ασυνέχεια στη διάδοση φωτός μεταξύ των δύο Pickκαι ο συντελεστής απωλειών όπως έχει προσδιοριστεί από την κλίση της ευθείας μεταξύ δύο κορυφών είναι α≈0,2 db/km κάτι που βρίσκεται σε συμφωνία και με τη θεωρία η οποία προβλέπει αυτή τη τιμή για το συντελεστή απωλειών σε αυτό το μήκος κύματος.

**Video inspector input 1**



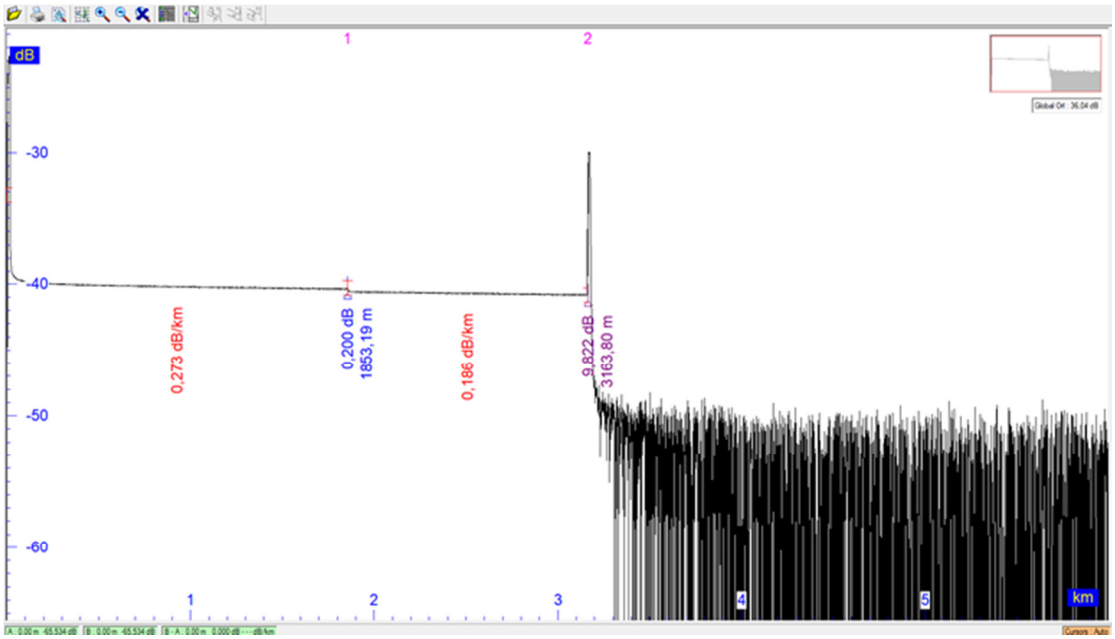

Έχειγίνει σωστό calibrationαφού τα όρια ταιριάζουν απόλυτα με τον connector, αλλά βλέπουμε ότι υπάρχουν ρύποι στην ίνα μας.

**Video inspector input 2**




Ο πυρήνας έχει υποστεί ζημιά και δεν είναι εφικτό να γίνει το τεστ.

## Μονότροπη ίνα 3,133m



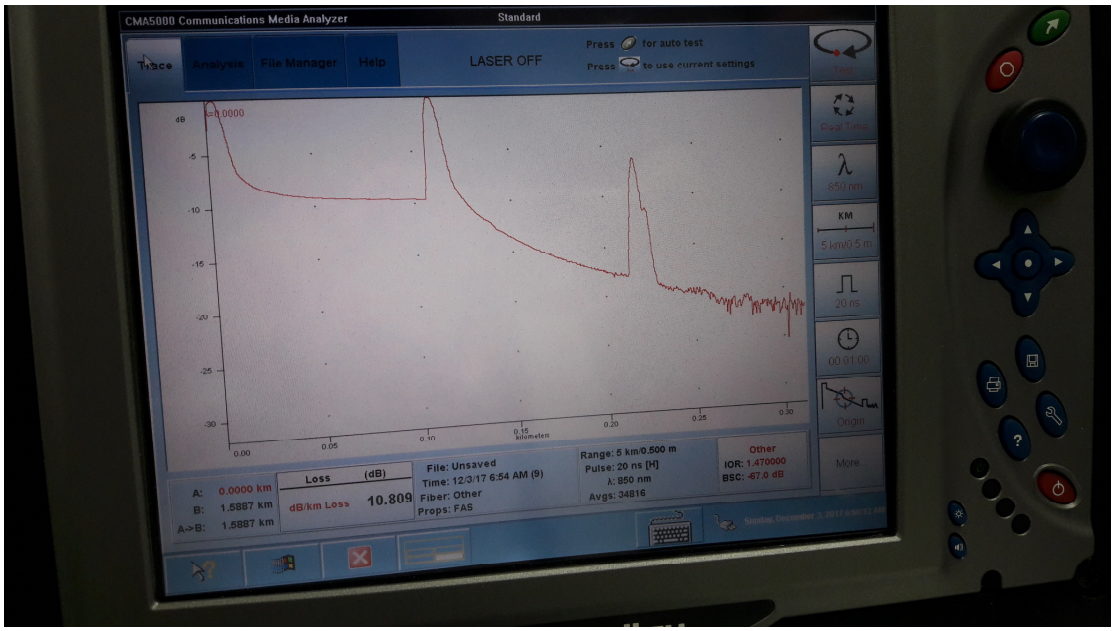

Σε αυτή την ίνα παρατηρούμε ότι έχει γίνει συγκόλληση. Ο συντελεστής απωλειών είναι διαφορετικός πριν και μετά την συγκόλληση (a=0.273db/kmκαι a=0.186db/kmαντίστοιχα.)

## Μονότροπη ίνα 103km

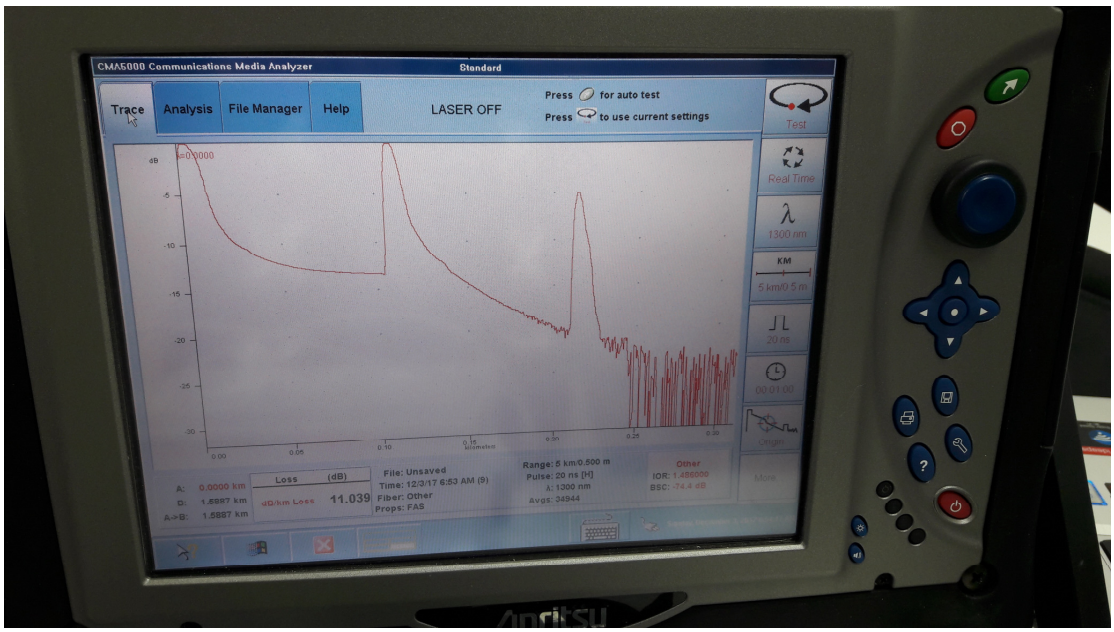
Σε αυτή την εικόνα βλέπουμε να έχουν συμβεί δυο γεγονότα .Υπάρχει ένα λύγισμα ή ράγισμα στην ίνα και πρέπει να διορθωθεί.

## Πολύτροπη ίνα 100m

*Γιαλ=850 nm*

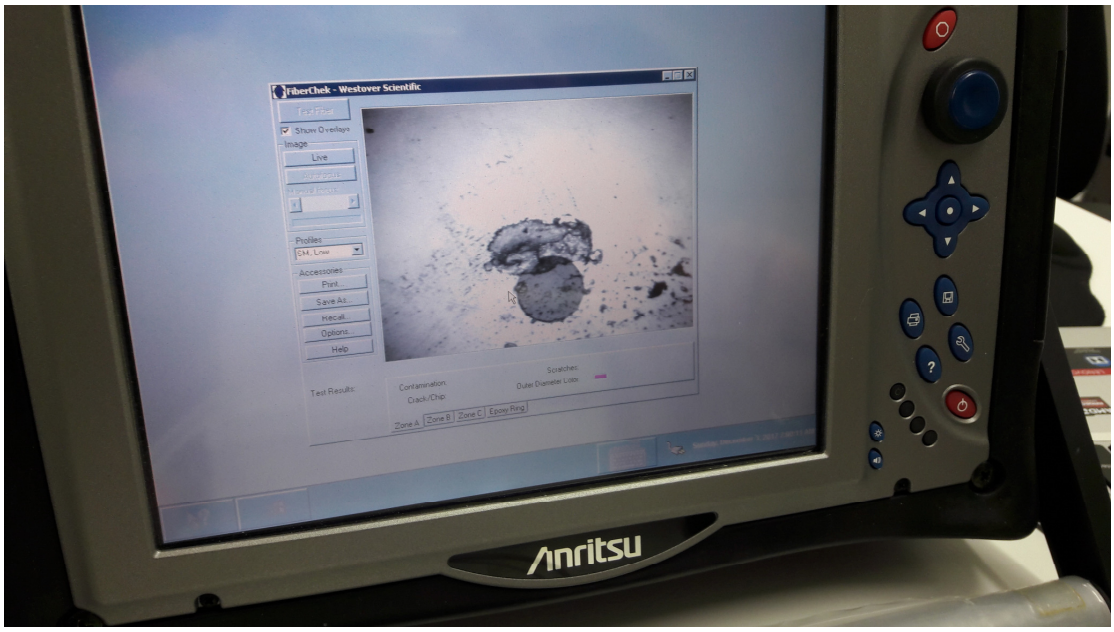



*Για λ=1300nm*



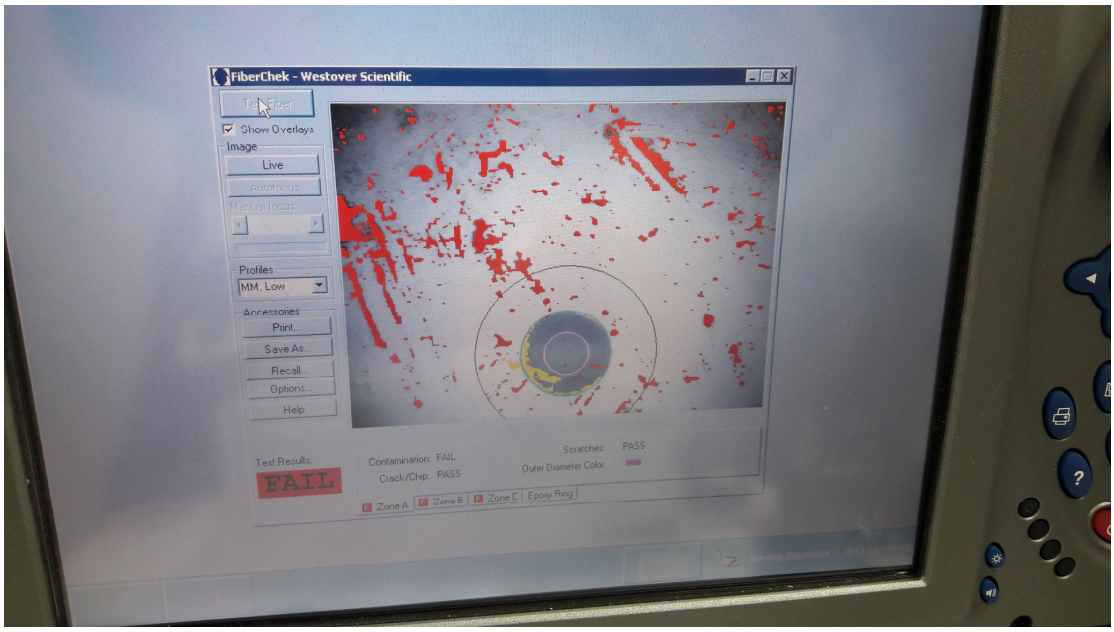

Στην ίνα αυτή επιβεβαιώνουμε ότι το μήκος της είναι 100 m, βλέπουμε όμως ότι υπάρχει κλίση ανάμεσα στα δύο pick, πράγμα που μας κάνει την ίνα μη αξιόπιστη.

**Video inspector input 1**




Ο πυρήνας έχει υποστεί ζημιά και δεν είναι εφικτό να γίνει το τεστ.

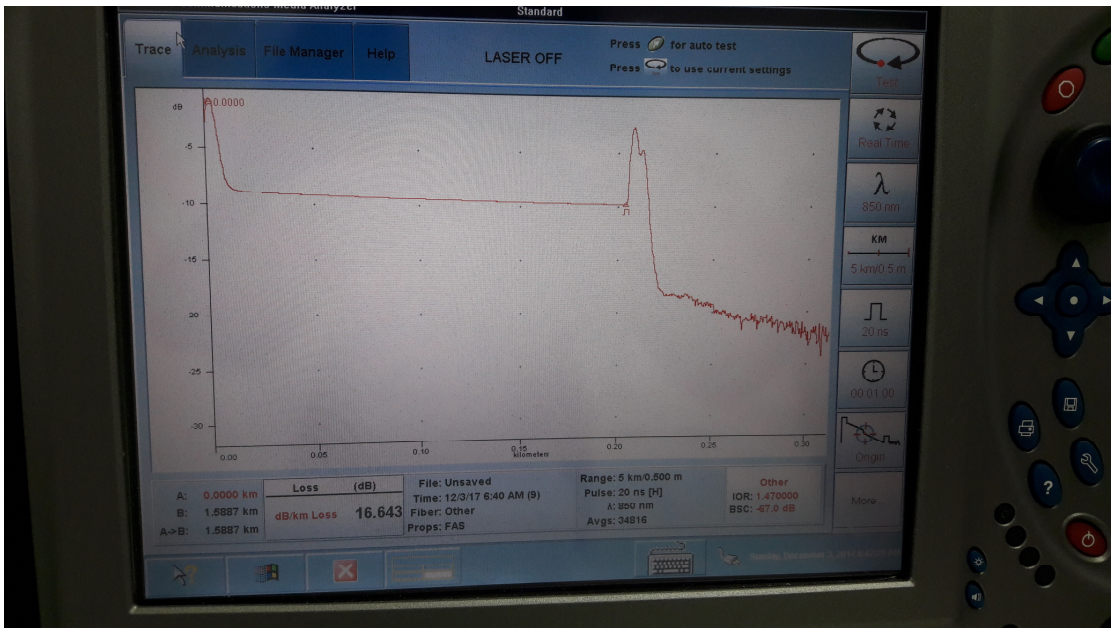
**Video inspector input 2**




Έχειγίνει σωστό calibrationαφού τα όρια ταιριάζουν απόλυτα με τον connector, αλλά βλέπουμε ότι υπάρχουν ρύποι και γρατζουνιές στην ίνα μας.

# Πολύτροπη ίνα 200m

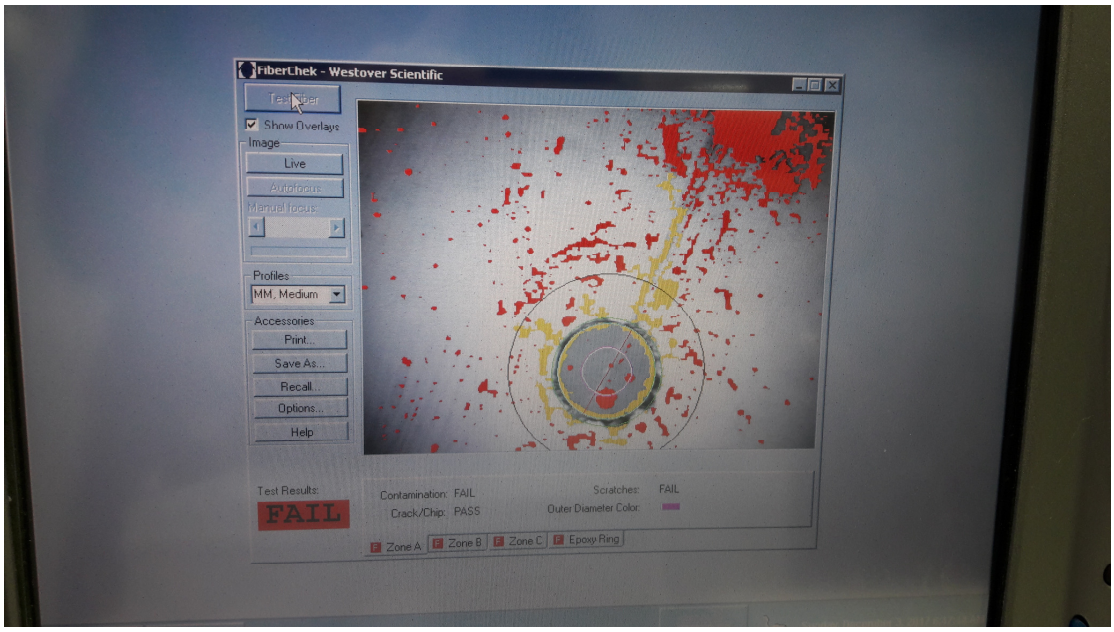
*Γιαλ=850 nm*




*Για λ=1300 nm*

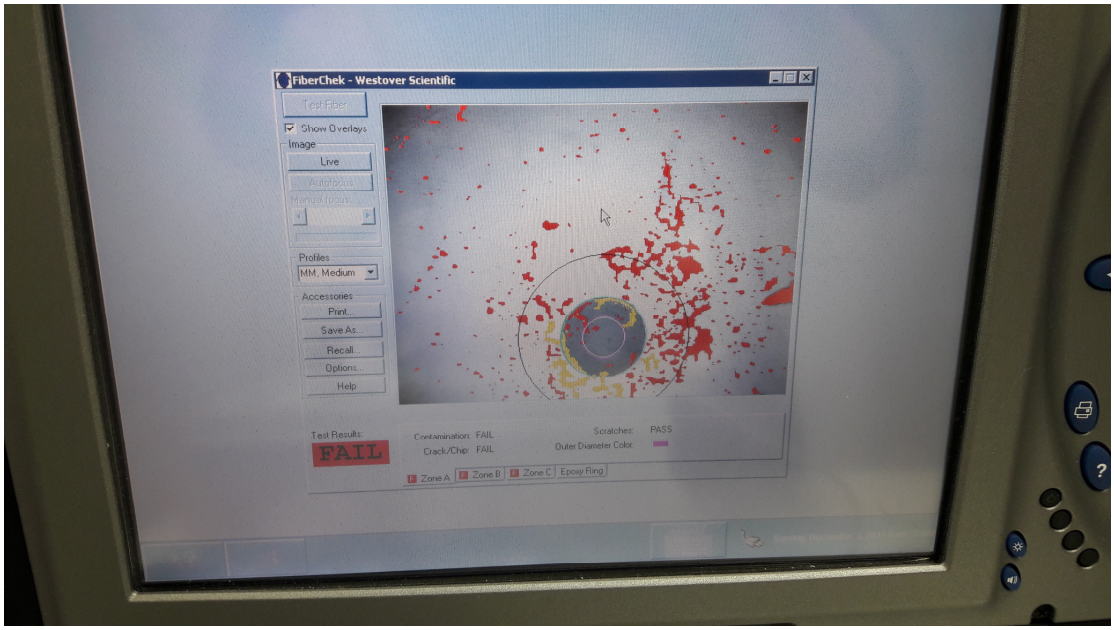
Η ίνα αυτή έχει καλύτερη πιστότητα από την προηγούμενη και αυτό το καταλαβαίνουμε από την ευθεία ανάμεσα στα δύο pick. Επίσης παρατηρούμε ότι επιβεβαιώνεται το μήκος της ίνας.

**Videoinspectorinput 1**




Έχειγίνει σωστό calibrationαφού τα όρια ταιριάζουν απόλυτα με τον connector, όμως παρατηρούμε ότι η ίνα μας έχει υποστεί ζημία στο πυρήνα.

**Video inspector input 2**




Έχειγίνει σωστό calibrationαφού τα όρια ταιριάζουν απόλυτα με τον connector, αλλά βλέπουμε ότι υπάρχουν ρύποι και γρατζουνιές στο πυρήνα της ίνα μας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο

# 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρατηρούμε ότι η μονότροπη ίνα έχει καλύτερη συμπεριφορά από την πολύτροπη. Υποστηρίζει μεγαλύτερα μήκη κύματος και παρουσιάζει μικρότερη διασπορά ,σε αντίθεση με τη πολύτροπη γεγονός που επιβεβαιώνεται ότι οι απώλειες που παρουσιάζουν οι πολύτροπες ίνες στο λ=850nmκαι λ=1300nmείναι μεγαλύτερες σε σχέση με τις απώλειες που παρουσιάζουν οι μονότροπες ίνες για λ=1500nm. Επιπλέον παρατηρείται εξάρτηση του μήκους κύματος διάδοσης της πληροφορίας σε σχέση με το συντελεστή απωλειών της κάθε ίνας ανεξάρτητα από το είδος της (είτε μονότροπη είτε πολύτροπη),κάτι που είναι σε συμφωνία με τη θεωρία. Επίσης οι συνολικές απώλειες που εμφανίζονται στην οπτική ζεύξη (μήκος ίνας (km) × συντελεστής απωλειών ($\frac{db}{km}$ ) ) , όπως αυτές προκύπτουν από τις μετρήσεις με τη χρήση του OTDR, που είναι κι αυτές σε συμφωνία με το θεωρητικό μοντέλο. Ακόμα μέσω της εφαρμογής VIDEOINSPECTORόπου μπορούμε να παρατηρήσουμε τη δομή-τομή μιας ίνας μπορούμε να συμπεράνουμε ότι είναι μια αρκετά αξιόπιστη τεχνική όπου μπορούν να καθοριστούν με μεγάλη διακριτική ικανότητα τα όρια πυρήνα-μανδύα , κάτι ιδιαίτερα χρήσιμο στη περίπτωση που η ίνα παρουσιάζει δυσλειτουργία και χρειάζεται συγκόλληση με τη χρήση ενός συγκολλητή . Στις περιπτώσεις των οπτικών ιών του εργαστηρίου που ελέγχθηκαν παρατηρήθηκαν αρκετές «ατέλειες» με αποτέλεσμα η σύνδεση τους μέσω συνδετήρων με τη πηγη και το δέκτη Otdrνα μην είναι δυνατή. Γεγονός που επιβεβαιώνεται από τις «πλατιές» κορυφές που παρατηρούνται στις μετρήσεις με το Otdrστην αρχή και στο τέλος της οπτικής ίνας

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ


Συστήματα Επικοινωνιών με Οπτικές Ίνες (4η Έκδοση) [Βιβλίο] – GovindP. Agrawal / Εκδόσεις Τζιώλα.

Fiber-Optics Technologies [Βιβλίο] - Vivek Alwayn / Cisco Press.

Optical Fibres and Fibre Optic Communication Systems [Βιβλίο] - Subir Kumar Sarkar / S. Chand.

Ανάλυση Σηματοδοσίας Μεταγωγής και Δρομολόγησης σε Περιβάλλον Ανοικτής Πρόσβασης [Βιβλίο]-Ε. Νικόλα .

Ανάλυση της Τεχνολογίας των Οπτικών Ίνων & των Δικτύων Οπτικών Ινών [Βιβλίο]-Ι. Βακίντης & Ε. Γυπάρης Ι.

Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος - Εφαρμογές σε Μητροπολιτικά Δίκτυα [Βιβλίο]-Α. Τζιουμάκης Α.

Σχεδίαση Χρονοπρογραμματιστή Πακέτων για Δίκτυα ATM Υψηλής Ταχύτητας [Βιβλίο]-Π. Μουντρουιδου .

Εισαγωγή στις Οπτικές Ίνες-Χ. Ευθυμίου.

Στοιχεία Θεωρίας Ημιαγωγών, Εργαστήριο Οπτοηλεκτρονικής και Laser - Γ. Μήτσου.

Αρχές των Laser -Ο. Svelto, Μετάφραση και Επιμέλεια Γ. Α. Κουρουκλής, Α.Α. Σεραφετινίδης,

Οπτικά Δίκτυα – Δίκτυα Υψηλών Ταχυτήτων (Σημειώσεις Εργαστηρίου/θεωρίας).

Διαλέξεις στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο του Καθ. Κ. Ηρακλής Αβραμόπουλος στην σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Η/Υ