



**Τμήμα
Μηχανικών
Πληροφορικής τ.ε.**

Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα
Δυτικής Ελλάδας

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ: «Συγκριτική μελέτη παραμέτρου αξιοπιστίας οπτικού δικτύου με χρήση OTDR και λογισμικού προσομοίωσης».

ΔΡΟΥΓΚΑ ΟΛΓΑ

ΑΜ 1908

Επιβλέπων καθηγητής: Ηλίας Ασαρίδης

ΑΝΤΙΠΡΪΟ 2018

Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	5
1.1 Ιστορική αναδρομή.....	5
1.2 Οπτικές Ίνες	9
1.3 Αρχές λειτουργίας	10
1.4 Δομή και χαρακτηριστικά οπτικών ινών.....	12
1.5 Τύποι οπτικών ινών	13
1.6 Καλώδια οπτικών ινών.....	14
1.7 Κυματοδήγηση – Θεώρηση κυματικής οπτικής.....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	19
Οπτικές πηγές- Οπτικοί Δέκτες.....	19
2.1 Οπτικές πηγές.....	19
2.1.1.1 Το LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) – Γενικά	19
2.1.1.2 Διέγερση και αποδιέγερση ατόμων	20
2.1.1.3 Βασικές αρχές.....	21
2.1.1.3.1 Απορρόφηση	21
2.1.1.3.2 Αυτογενής Εκπομπή	22
2.1.1.3.3 Εξαναγκασμένη ή Επαγομένη Εκπομπή	23
2.1.1.4 Φαινόμενο laser	25
2.1.1.5 Τα συστατικά στοιχεία ενός laser.....	26
2.1.1.6 Ιδιότητες της δέσμης laser	28
2.1.1.7 Εφαρμογές των Laser	29
2.1.2.1 Το LED (Light Emitting Diode) – Γενικά.....	30
2.1.2.2 LED Ετεροεπαφής Υψηλής Εντάσεως.....	33
2.1.2.3 Συνεχής εξέλιξη.....	33
2.1.2.4 Εκχύλιση Φωτός.....	34
2.1.2.5 Λευκά LED.....	35
2.1.2.6 Συστήματα RGB.....	35
2.2 Οπτικοί δέκτες.....	36
2.2.1 Βασικές έννοιες	36
2.2.2 Χαρακτηριστικά φωτοανιχνευτών	37
2.2.3 P-N Φωτοδίοδος.....	40

2.2.4 P-i-N Φωτοδίοδος.....	42
2.2.5 Φωτοδίοδος χιονοστιβάδα (APD)	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο	49
3.1 Εξασθένιση.....	49
3.2 Διασπορά και διεύρυνση οπτικών παλμών.....	51
3.3 Υπολογισμός BER από το διάγραμμα ματιού.....	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο	63
4.1 Εισαγωγή στο Optical Time Domain Reflectometer (OTDR)	63
4.2 Αρχή Λειτουργίας του OTDR	64
4.3 Μέτρηση Απόστασης Ίνας	65
4.4 Ρυθμίσεις ενός OTDR	66
4.5 CMA5000.....	68
4.6 Συγκόλληση Οπτικών Ίνών	77
4.7 Μέτρηση Συγκολλήσεων με OTDR	85

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει σκοπό να μελετήσουμε τις οπτικές ίνες ως μέσο πληροφορίας στο σύγχρονο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Αρχικά θα αναφερθούμε στις βασικές αρχές της οπτικής, την δομή και τα χαρακτηριστικά των οπτικών ινών. Επίσης θα μιλήσουμε για οπτικές πηγές(Laser,Led) - οπτικούς δέκτες (φωτοдиодοι). Θα αναλύσουμε την εξασθένιση και την διασπορά.

Ειδική αναφορά γίνεται σε διάφορες πηγές απωλειών όπως απορρόφηση, σκέδαση. Παράλληλα από πλευράς διασποράς, αναλύονται η χρωματική, η διασπορά των τρόπων διάδοσης και η διασπορά τρόπων πόλωσης. Και τέλος θα βγάλουμε συμπεράσματα για τις απώλειες λόγω συγκολλήσεων μέσα από μετρήσεις οπτικών ινών από την χρήση μετρητή OTDR.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1.1 Ιστορική αναδρομή

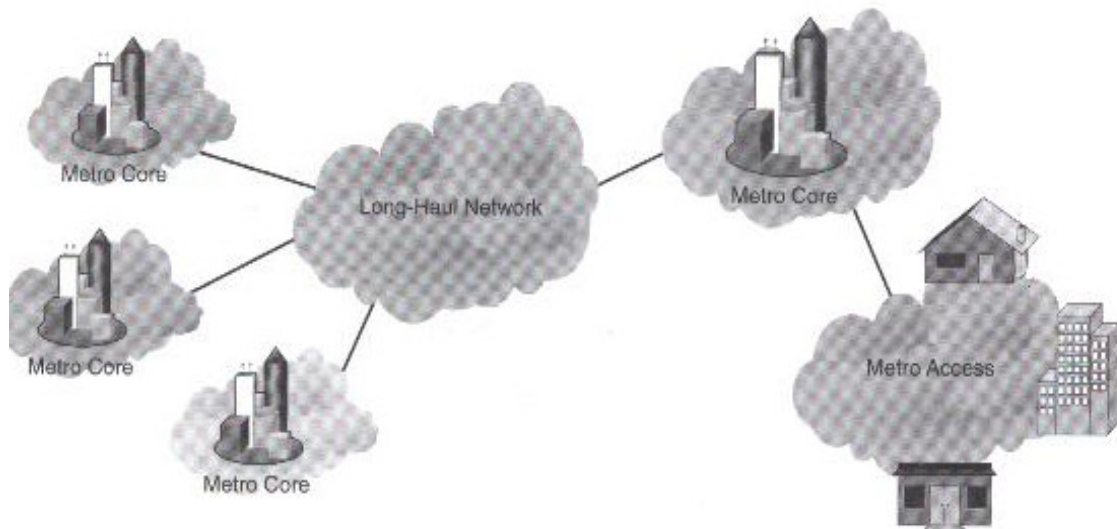
Για να κατανοήσουμε τις επιπτώσεις των οπτικών δικτύων θα πρέπει να γνωρίζουμε κάποια θέματα σχετικά με τα υπάρχοντα ‘δημόσια δίκτυα’ (public networks). Σήμερα σε όλο τον κόσμο εκατοντάδες και ίσως χιλιάδες εταιρείες χρησιμοποιούν αυτό που γενικά αναφέρεται σαν ‘δημόσιο δίκτυο’, ένα τεράστιο άμορφο σύμπλεγμα από καλώδια, διακόπτες που συνδέουν σπίτια και εταιρείες σε όλο τον κόσμο. Το τηλεφωνικό δίκτυο για παράδειγμα, είναι τόσο τεράστιο που για να το χειριστούμε είναι αρκετά δύσκολο.

Ο καλύτερος τρόπος προσέγγισής του είναι να το παρομοιάσουμε με ένα οδικό δίκτυο. Αυτό το δίκτυο περιλαμβάνει αυτοκινητοδρόμους που συνδέουν τις πόλεις μεταξύ τους, μεγάλες λεωφόρους μέσα σε αυτές και μικρότερες οδούς και εμπορικούς δρόμους. Το ίδιο ισχύει και στα ‘δημόσια δίκτυα’ υπολογιστών. Μεταξύ των πόλεων διαχειριστές μεγάλων αποστάσεων “long distance operators” τρέχουν “run” δίκτυα μεγάλων αποστάσεων “long-haul networks” που έχουν σχεδιαστεί για να μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις. Μέσα σε αυτά τα δίκτυα υπάρχουν διακόπτες υψηλής ταχύτητας για την μεταβίβαση των δεδομένων σε διαφορετικές πόλεις.

Στο άκρο αυτών των μεγάλων δικτύων τοπικοί διανομείς διαχειρίζονται μητροπολιτικά δίκτυα (MANs – Metropolitan Area Networks). Τα μητροπολιτικά δίκτυα περιλαμβάνουν δίκτυα πόλεων τα οποία ονομάζονται ο “πυρήνας του μητροπολιτικού δικτύου” (metro core networks) και “γειτονικά δίκτυα” (neighborhood networks) τα οποία ονομάζονται “μητροπολιτικά δίκτυα πρόσβασης” (metro access networks).

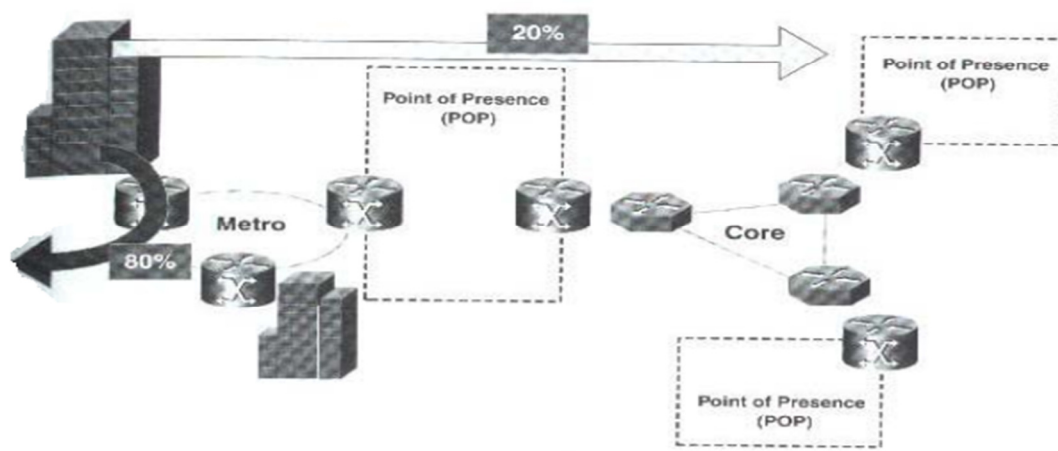
Οι πυρήνες μητροπολιτικών δικτύων είναι οι μεγαλύτεροι λεωφόροι δεδομένων σε μία πόλη συνδέοντας τα γειτονικά δίκτυα μεταξύ τους. Τα μητροπολιτικά δίκτυα

πρόσβασης διασυνδέουν οικήματα και εταιρείες με το μητροπολιτικό πυρήνα.

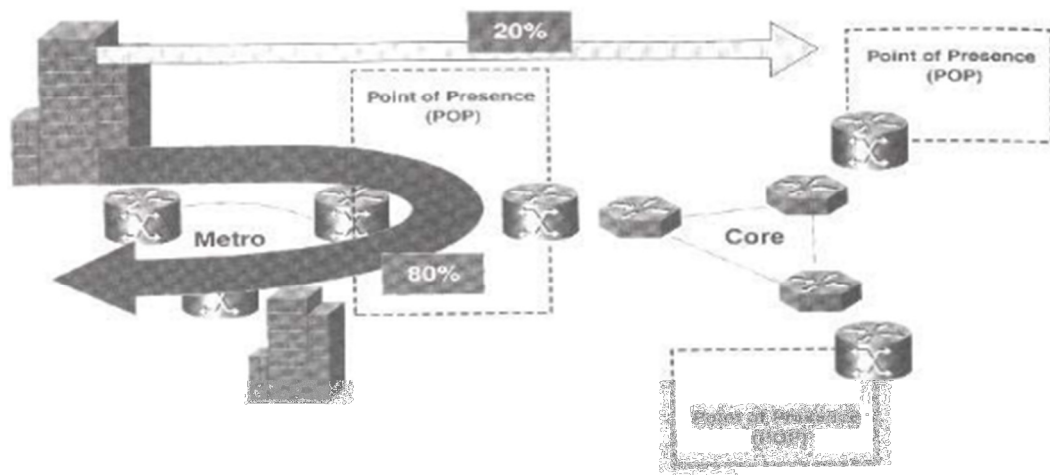


Εικόνα 1. Το δημόσιο δίκτυο αποτελείται από δίκτυα πρόσβασης μεγάλων αποστάσεων

Η διαφοροποίηση της αγοράς των τηλεπικοινωνιών δημιούργησε μια νέα δυναμική σχετικά με το κόστος του εύρους ζώνης των δικτύων και στη ποσότητα των δεδομένων που μεταφέρονται σε αυτά. Οι τιμές έπεσαν δραματικά ενώ οι απαιτήσεις για μεγαλύτερη χωρητικότητα αυξήθηκε κυρίως λόγω της ανάπτυξης του Internet. Πριν το internet η “κυκλοφορία δεδομένων” (traffic) ακολουθούσε τον κανόνα 80-20.



Εικόνα 2. Το 80% της κυκλοφορίας των δεδομένων παρέμεινε στο τοπικό δίκτυο ενώ 20% στο δίκτυο μεγάλων αποστάσεων



Εικόνα 3. Σήμερα αυτές οι αναλογίες έχουν αλλάξει με το 80% της κυκλοφορίας δεδομένων να διεκπεραιώνεται μεταξύ μεγάλων πόλεων.

Οι απαιτήσεις αυτές οδήγησαν στη δημιουργία νέων δυναμικών δικτύων που μπορούν να διαμορφώνουν, διαχειρίζονται και να φιλοξενούν οποιοδήποτε τύπο κυκλοφορίας. Τέτοια δίκτυα είναι και τα οπτικά².

Η αρχή της κλασικής πολυπλεξίας με επιμερισμό χρόνου (TDM) είναι ευρέως γνωστή. Από μια ομάδα αναλογικών σημάτων, λαμβάνονται δείγματα σε χρονική διαδοχή και με κοινό ρυθμό δειγματοληψίας. Τα δείγματα αυτά στη συνέχεια πολυπλέκονται για μετάδοση πάνω από κοινό κανάλι. Στις αρχές του 1960 όλα τα συστήματα μετάδοσης και μεταγωγής ήταν αναλογικά. Την περίοδο αυτή άρχισε να αναπτύσσεται η τεχνολογία της «παλμοκωδικής διαμόρφωσης» (PCM Pulse Code Modulation), όπου το αναλογικό σήμα φωνής μετατρέπεται σε ρεύμα δυαδικών ψηφίων μέσα από διαδικασίες δειγματοληψίας, κβάντισης, ψηφιοποίησης και τελικά κωδικοποίησης.

Στη συνέχεια, πολλά τέτοια δυαδικά σήματα (κανάλια) πολυπλέκονται σχηματίζοντας ένα σήμα με υψηλότερο ρυθμό. Αρχικά δημιουργήθηκε το λεγόμενο «ψηφιακό ρεύμα 1ου επιπέδου» (DS1- Digital Stream 1) το οποίο μετέφερε 24 (PCM 24) ψηφιακά κανάλια φωνής των 64 Kbps συν 8 Kbps σηματοδοσίας, με συνολικό ρυθμό 1,544 Mbps. Το πρώτο επίπεδο πολυπλεξίας είναι πρακτικά γνωστό ως T1. Λίγο αργότερα (1968) αναπτύχθηκε η διαδικασία μετάδοσης (PCM 30)

δημιουργώντας το λεγόμενο E1 σήμα, το οποίο αποτελείται από ένα ρεύμα δυαδικών ψηφίων με ρυθμό 2,048 Mbps.

Έχοντας ως βάση τα σήματα T1 και E1 και χρησιμοποιώντας κατάλληλη πολυπλεξία, δημιουργούνται ρεύματα υψηλότερης ταχύτητας τα οποία επιτρέπουν την ταυτόχρονη μετάδοση πολλών καναλιών. Παρενθετικά υπενθυμίζεται ότι ένας τύπος πολυπλεξίας χαρακτηρίζεται ως σύγχρονός ή ασύγχρονός ανάλογα με την ύπαρξη ή μη ενός κεντρικού ρολογιού, που ελέγχει και συντονίζει όλες τις πηγές των προς πολυπλεξία σημάτων. Σε αυτό το δεδομένο βασίζεται και η λεγόμενη «πλεισιόχρονη πολυπλεξία» (Pleisiochronous Multiplexing), συστήματα ψηφιακής μετάδοσης που εφαρμόστηκαν στα «δημόσια δίκτυα» για την οικονομική μεταφορά αρχικά φωνής και στη συνέχεια δεδομένων.

Η « πλεισιόχρονη ψηφιακή ιεραρχία (PDH Pleisiochronous Digital Hierarchy) αναπτύχθηκε πριν από 40 περίπου χρόνια στα εργαστήρια της BELL και χρησιμοποιήθηκε για την επιτυχή μεταφορά ψηφιοποιημένης φωνής. Όμως παρουσιάζει τα ακόλουθα μειονεκτήματα:

Μειωμένη απόδοση σε διαβίβαση ωφέλιμης πληροφορίας, λόγω ανάγκης για εισαγωγή δυαδικών ψηφίων συμπλήρωσης στις ανώτερες τάξεις πολυπλεξίας.

Δεν υπάρχει δυνατότητα πρόσβασης σε ένα σήμα χαμηλής τάξης, όταν αυτό έχει πολυπλεχθεί με ένα σήμα υψηλότερης τάξης.

Έχοντας αυτά υπ' όψη, βλέπουμε μία λογική εξέλιξη του χώρου λειτουργίας των δικτύων. Έχουμε κυριολεκτικά σήμερα μεταπηδήσει σε μία time division multiplexing (TDM)-βασισμένη στο SONET/SDH εποχή. Με την εισαγωγή των λύσεων της επόμενης γενιάς SONET/SDH, οδηγούμαστε κατευθείαν στη καρδιά της επανάστασης της επόμενης γενιάς των μητροπολιτικών δικτύων, στην οποία οι εταιρίες μπορούν να μεγιστοποιήσουν τα κέρδη των επενδύσεών τους πάνω στις υπάρχουσες υποδομές, μειώνοντας το κόστος της ανάπτυξης νέων δικτύων και με δραματική αύξηση της παραγωγικότητας.

Το τί σημαίνει η επόμενη γενιά του SONET/SDH, είναι για παράδειγμα, ότι το κόστος μπορεί να μειωθεί σημαντικά, διότι έχει απομείνει μόνο ένα σύστημα μετάδοσης, αντί για διαφορετικούς τύπους πολυπλεξίας.

1.2 Οπτικές Ίνες

Οι οπτικές ίνες είναι σήμερα η καλύτερη λύση στην μετάδοση πληροφορίας γιατί παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα άλλα μέσα. Διαθέτουν πολύ μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται υψηλές ταχύτητες μετάδοσης (της τάξης των Gbps). Οι πιο συνηθισμένες ταχύτητες είναι στα 2.5 και 10 Gbps, ενώ έχουν αναπτυχθεί και συστήματα των 20, 40 και 50 Gbps. Χρησιμοποιώντας την τεχνική της πολυπλεξίας μήκους κύματος, που θα περιγραφεί παρακάτω, οι ταχύτητες μπορούν να φτάσουν τα μερικά Tbps.

Η εξασθένηση του σήματος είναι μικρότερη από ότι στα χάλκινα και ομοαξονικά καλώδια, με αποτέλεσμα οι αποστάσεις μεταξύ ενισχυτών ή άλλων ενεργών στοιχείων του δικτύου να κυμαίνονται από μερικά μέχρι και μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα, ανάλογα με τη τεχνική και το ρυθμό μετάδοσης. Παράλληλα, δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικά πεδία, με αποτέλεσμα να συνιστάται η χρήση τους σε βιομηχανικό περιβάλλον και σε χώρους με υψηλό θόρυβο.

Επιπλέον, δεν είναι ευαίσθητες στο υγρό περιβάλλον, όπου τα χάλκινα καλώδια μπορεί να δημιουργήσουν βραχυκυκλώματα. Επειδή η οπτική ίνα δεν μεταφέρει ηλεκτρικό σήμα, προτιμάται σε περιοχές υψηλού κίνδυνου εκρήξεων από σπινθήρες (χώροι καυσίμων, εύφλεκτων αερίων κλπ.). Επίσης, το βάρος και ο όγκος τους είναι σημαντικά μικρότερος από τα αντίστοιχα μεγέθη των άλλων αγωγών. Αξίζει να αναφερθεί ότι ένα χάλκινο καλώδιο με 1000 ζεύγη και μήκος 500 μέτρων ζυγίζει περίπου 4 τόνους, ενώ μία οπτική ίνα του ίδιου μήκους, που περιέχει τον ίδιο αριθμό καναλιών, ζυγίζει μόνο 45 κιλά.

Τέλος, η υποκλοπή ή η παρεμβολή πληροφορίας είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθούν, με αποτέλεσμα οι οπτικές ίνες να συνιστούν πολύ ασφαλές μέσο μετάδοσης. Συμπερασματικά, πρέπει να αναφερθεί, ότι τα καλώδια οπτικών ινών παρουσιάζουν τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες με τα ομοαξονικά, αλλά είναι ελαφρότερα, μικρότερα σε διάμετρο και οι αποστάσεις μεταξύ των επαναληπτών είναι μεγαλύτερες.

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

1.3 Αρχές λειτουργίας

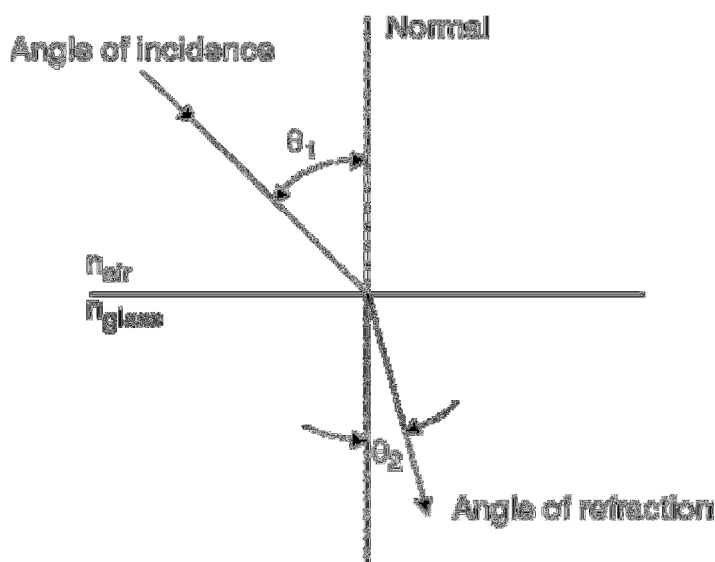
Η λειτουργία των οπτικών ινών βασίζεται στην ικανότητά τους να μεταδίδουν φως από ένα σημείο σε ένα άλλο, λόγω της κατασκευής τους. Η δυσκολία την οποία συναντά το φως κατά την κίνησή του μέσα στην οπτική ίνα καθορίζεται από τον δείκτη διάθλασης του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένη η ίνα. Δείκτης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

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

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

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

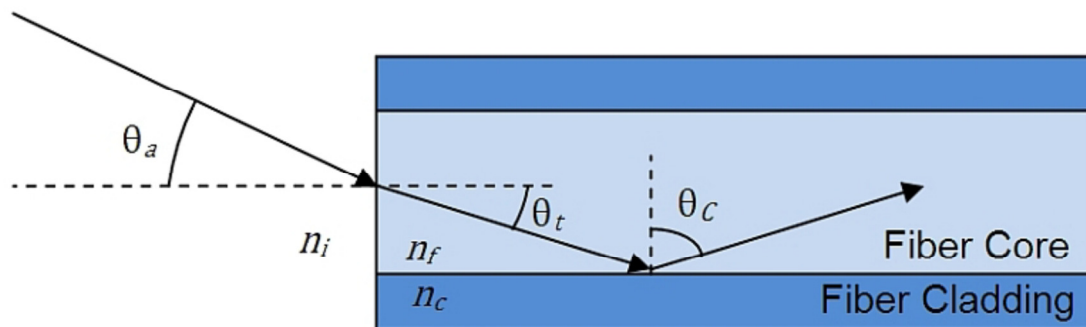
Αυτό το φαινόμενο έχει σαν αποτέλεσμα τη συνεχόμενη διάδοση του φωτός στο ίδιο υλικό και αποτελεί την αρχή λειτουργίας των οπτικών ινών. Το φως διαδίδεται μέσα σε αυτές λόγω των συνεχόμενων ανακλάσεων που συμβαίνουν στο εσωτερικό τους. Η οριακή γωνία για την οποία συμβαίνει ολική ανάκλαση στη διαχωριστική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



Εικόνα 4. Η οριακή γωνία

Για την περίπτωση των οπτικών ινών η οριακή γωνία αντιστοιχεί σε έναν κώνο ο οποίος καθορίζεται από το αριθμητικό άνοιγμα (numerical aperture (NA)) της ίνας. Το αριθμητικό άνοιγμα είναι το ημίτονο της μέγιστης γωνίας εισόδου μιας ακτίνας φωτός ώστε αυτή να διαδοθεί μέσα στην οπτική ίνα με ολική ανάκλαση και δίνεται από την σχέση $NA = n_i \sin \theta_c$, όπου n_i είναι ο δείκτης διάθλασης του υλικού έξω από την οπτική ίνα (συνήθως αέρας) και θ_c είναι η γωνία αποδοχής μιας ίνας. Σαν γωνία αποδοχής ορίζεται η μισή γωνία του κώνου φωτός που μπορεί να πέσει πάνω στην οπτική ίνα και να ανακλαστεί ολικά.

Το αριθμητικό άνοιγμα μιας ίνας και οι γωνίες αποδοχής χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίζουν την ποιότητα των πομπών και των ανιχνευτών. Όταν ο εξωτερικός χώρος είναι ο αέρας, τότε $n=1$, το άνοιγμα δεν μπορεί να υπερβεί την τιμή της μονάδας και λαμβάνει τυπικές τιμές, που κυμαίνονται μεταξύ 0.2 και 1.0. Στην εικόνα, θ_c είναι η οριακή γωνία για ολική ανάκλαση του σήματος στο εσωτερικό της οπτικής ίνας.

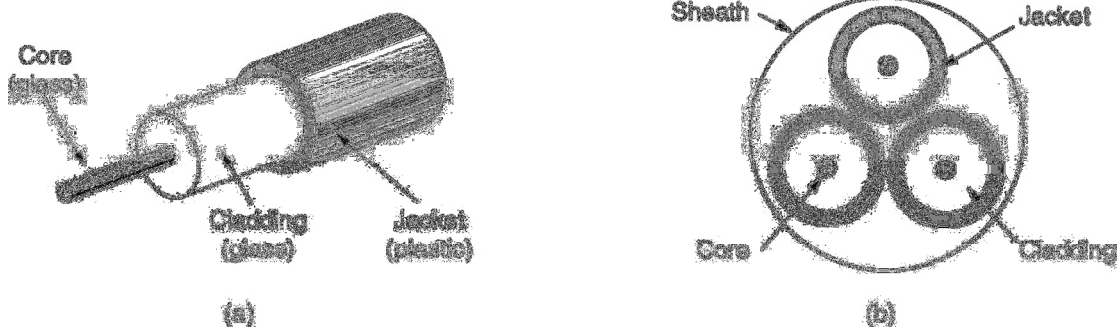


Εικόνα 5. Ανάκλαση του φωτός στην οπτική ίνα

1.4 Δομή και χαρακτηριστικά οπτικών ινών

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

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



Εικόνα 6. Δομή της οπτικής ίνας

Περίβλημα ονομάζεται το υλικό όπου περιβάλλει τον πυρήνα και είναι το μέρος της ίνας που ανακλά το φως πίσω στον πυρήνα. Είναι κατασκευασμένο από γυαλί και έχει διάμετρο 125μm ή 140μm. Ένα σχεδιαστικό χαρακτηριστικό όλων των οπτικών ινών είναι ότι ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα είναι υψηλότερος από τον δείκτη διάθλασης του περιβλήματος. Και τα δυο, ο πυρήνας και το περίβλημα, μπορεί να είναι κατασκευασμένα και από πλαστικό υψηλής καθαρότητας.

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

1.5 Τύποι οπτικών ινών

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

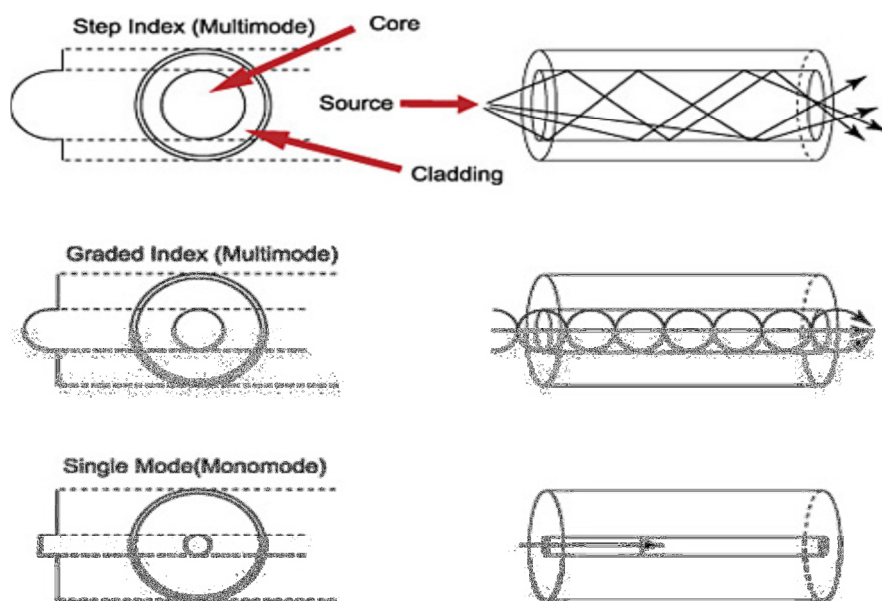
Στις πολύτροπες οπτικές ίνες αναφέρεται πρώτα η διάμετρος του πυρήνα και στη συνέχεια η διάμετρος του περιβλήματος. Οι πολύτροπες οπτικές ίνες έχουν τυπικά μεγέθη 50 μm /125 μm , 62,5/125, 85/125 ή 100/140, με τον συνηθέστερο τύπο να είναι ο 62,5/125 μm . Η ολική διάμετρος της οπτικής ίνας, συμπεριλαμβανομένων των ενισχυτικών συνθετικών ινών και του εξωτερικού περιβλήματος, φτάνει τα 900 μm .

Η αρχή μετάδοσης σε πολύτροπη οπτική ίνα είναι ότι οι διάφορες ακτίνες φωτός ταξιδεύουν ανακλώμενες υπό διαφορετικές γωνίες, ανάλογα με την γωνία εισόδου τους στην οπτική ίνα, όπως φαίνεται στο σχήμα παρακάτω. Ο τρόπος αυτός μετάδοσης ονομάζεται πολύτροπος επειδή υπάρχουν πολλοί δρόμοι μετάδοσης που αντιστοιχούν στις διαφορετικές γωνίες ανάκλασης. Οι πολύτροπες οπτικές ίνες διακρίνονται σε δυο υποκατηγορίες: τις διακριτού δείκτη (step index) και τις βαθμιαίου δείκτη (graded index).

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

Οι ίνες βαθμιαίου δείκτη χαρακτηρίζονται από βαθμιαία μεταβολή του δείκτη διάθλασης του υλικού της κεντρικής ίνας.

Έτσι γίνεται βαθμιαία μείωση όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο προς την εξωτερική επιφάνεια του γυαλιού. Η πορεία των ακτινών σε μια τέτοια ίνα είναι αυτή που φαίνεται.



Εικόνα 7. Πολύτροπες οπτικές ίνες

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

1.6 Καλώδια οπτικών ινών

Τα οπτικά καλώδια περιλαμβάνουν μία ή περισσότερες οπτικές ίνες μέσα σε ειδική επικάλυψη που φροντίζει για τη προστασία και την αντοχή της γυάλινης οπτικής ίνας από τις περιβαλλοντικές αλλαγές, μηχανικές τάσεις και ρωγμές.

Η επιλογή του κατάλληλου κάθε φορά καλωδίου εξαρτάται από την εφαρμογή αφού κανένα καλώδιο δεν είναι κατασκευασμένο για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις

όλων των χρήσεων. Τα κύρια τμήματα της δομής ενός οπτικού καλωδίου είναι: πρωτεύουσα επικάλυψη (buffer), ίνες Kevlar (Kevlar fibers), άκαμπτο τμήμα (strength member), δευτερεύουσα επικάλυψη (buffer), εξωτερικό περίβλημα (jacket).

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

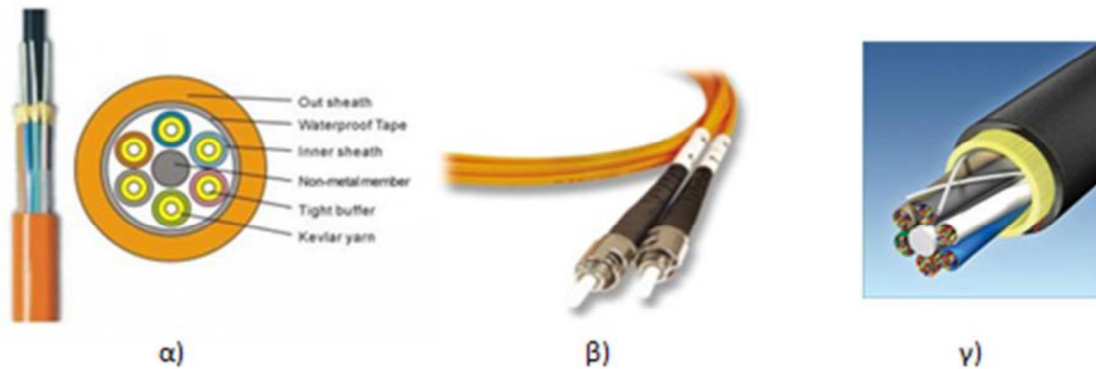
Όταν σχεδιάζεται και κατασκευάζουμε ένα καλώδιο πρέπει να λαμβάνονται όλες οι προφυλάξεις που απαιτούνται για να προφυλάξουν την ίνα από μόνιμες παραμορφώσεις που σαν αποτέλεσμα έχουν το σπάσιμο της ίνας και από μικροκάμψεις που σαν αποτέλεσμα έχουν την αύξηση των απωλειών.

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

- Ο πρώτος τύπος είναι γνωστός σαν Tight Buffer καλώδιο, σχήμα 8α, όπου σε κάθε οπτική ίνα και εξωτερικά από την επίστρωση υπάρχουν συνθετικές ίνες και εξωτερικό μονωτικό περίβλημα. Μέσα στο καλώδιο υπάρχουν πολλές ίνες, όπου η κάθε ίνα αποτελεί και ένα ξεχωριστό καλώδιο, και καλώδια τα οποία χρησιμεύουν για ενίσχυση και στρογγυλοποίηση του όλου σχήματος. Όλα αυτά τα καλώδια, τέλος, περικλείονται από εξωτερικό περίβλημα. Παρόμοιας κατασκευής είναι τα εύκαμπτα καλώδια, που χρησιμοποιούμε για τη σύνδεση με τον ενεργό εξοπλισμό (optical patch cords). Αποτελούνται από δυο καλώδια ενωμένα στο εξωτερικό τους, το κάθε ένα από τα οποία περιέχει οπτική ίνα από πλαστικό.

- Ο δεύτερος τύπος είναι γνωστός σαν Loose Buffer, όπου οι οπτικές ίνες με την επίστρωση τους είναι τοποθετημένες ελεύθερα μέσα στο καλώδιο και περικλείονται από εξωτερικό περίβλημα.

Εδώ υπάρχει επίσης επίστρωση από συνθετικές ίνες μέσα από το εξωτερικό περίβλημα, για την ανθεκτικότητα του καλωδίου.



Εικόνα 8. α) Tiger Buffer, β) optical patch cord, γ) Loose Buffer καλώδια οπτικών ινών

1.7 Κυματοδότηση – Θεώρηση κυματικής οπτικής

Σε προηγούμενο κεφάλαιο περιγράψαμε τη κυματοδότηση του φωτός μέσα στην οπτική ίνα στα πλαίσια της γεωμετρικής οπτικής των φωτεινών ακτινών. Για οπτικές ίνες με διάμετρο πυρήνα της τάξης των 10 μm η γεωμετρική προσέγγιση δεν είναι ποσοτικά αξιόπιστη για τα μήκη κύματος της τάξης των $\lambda=1.5\mu\text{m}$ που χρησιμοποιούνται στις οπτικές τηλεπικοινωνίες. Επιπλέον, μια σειρά σημαντικών φαινομένων στις οπτικές ίνες δεν μπορούν να αντιμετωπισθούν στα πλαίσια της γεωμετρικής οπτικής. Για το σκοπό αυτό είναι απαραίτητο να καταφύγουμε στο πλαίσιο της θεωρίας του Maxwell, όπου το φως θεωρείται ηλεκτρομαγνητικό κύμα που διαδίδεται στο χώρο. Η Ηλεκτροδυναμική ενός απεριόριστου, ομοιογενούς, ισότροπου και μη αγώγιμου μέσου, όπως ο αέρας, περιγράφεται από τις τέσσερις εξισώσεις του Maxwell.

$$\nabla^r \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}^r}{\partial t}$$

$$\nabla^r \times \vec{H} = -\varepsilon \frac{\partial \vec{E}^r}{\partial t}$$

$$\nabla^r \cdot \vec{E} = 0$$

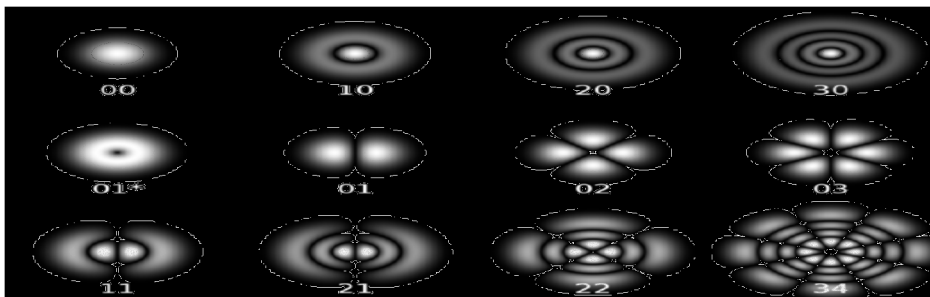
$$\nabla^r \cdot \vec{H} = 0$$

Στην Ηλεκτρομαγνητική θεωρία δεν έχουμε ακτίνες, αλλά ηλεκτρομαγνητικό κύμα, με διαφορετικές κατανομές ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Η μελέτη γίνεται με τις εξισώσεις του Maxwell και τη θεμελιώδη εξίσωση της κυματικής.

$$\nabla^2 \cdot \vec{E} + \left(\frac{n \cdot \omega}{c} \right)^2 \cdot E = 0$$

Όπου E η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Ανάλογη έκφραση ισχύει και για το μαγνητικό πεδίο B.

Αν και δε θα επεκταθούμε στη μελέτη της διάδοσης του φωτός στις οπτικές ίνες με βάση τα κυματικά χαρακτηριστικά του μπορούμε εν συντομία να πούμε ότι κάθε τρόπος διάδοσης ή αλλιώς ρυθμός κυματοδότησης (TEM) αντιστοιχεί, όπως έχουμε πει, σε συγκεκριμένη κατανομή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και συνεπώς και της έντασης του φωτεινού σήματος στην εγκάρσια διατομή της ίνας. Οι κατανομές αυτές προκύπτουν από την επίλυση των εξισώσεων Maxwell με τις οριακές συνθήκες που επιβάλλει η δομή και η συμμετρία της ίνας. Η μαθηματική περιγραφή τους γίνεται με τον συνδυασμό μιας gaussian κατανομής της έντασης του πεδίου με τα πολώνυμα Laguerre. Το αποτέλεσμα αυτού του συνδυασμού (mode patterns) φαίνεται (στην εικόνα 9) όπου κάθε ρυθμός χαρακτηρίζεται από ένα ζεύγος ακεραίων αριθμών που υποδηλώνει την γωνιακή και την ακτινική τάξη του ρυθμού.



Εικόνα 9. Οι κατανομές του ηλεκτρικού πεδίου για διάφορους ρυθμούς-τρόπους διάδοσης σε μια πολύτροπη ίνα. Πάνω αριστερά ο βασικός ρυθμός TEM00 από τον οποίο προκύπτουν και οι υπόλοιποι

Κάθε τρόπος διάδοσης χαρακτηρίζεται από τη σταθερά διάδοσής του β με την βοήθεια του οποίου ορίζεται και ο ενεργός δείκτη διάθλασης του τρόπου διάδοσης (effective refractive index). Η σταθερά διάδοσης (propagation constant) β καθορίζει το πώς αλλάζει το πλάτος αλλά και η φάση του κύματος καθώς αυτό διαδίδεται μέσα στην ίνα. Είναι εν γένει ένας μιγαδικός αριθμός το πραγματικό μέρος του οποίου δηλώνει την καθυστέρηση φάσης ανά μονάδα μήκους που προκαλεί η διάδοση, ενώ το φανταστικό μέρος την απώλεια (ή ενίσχυση αν είναι θετικό) του κύματος. Ο ενεργός δείκτης διάθλασης που δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{n} = \frac{\beta \cdot \lambda}{2 \cdot \pi}$$

καθορίζει αν ο αντίστοιχος ρυθμός διάδοσης μπορεί να κυματοδηγηθεί ή όχι. Συγκεκριμένα, κάθε οπτική ίνα επιτρέπει τη διάδοση ενός τρόπου μόνο εάν γι' αυτόν ισχύει ότι $n_1 > \bar{n} > n_2$ όπου φυσικά n_1 και n_2 οι δείκτες διάθλασης πυρήνα και μανδύα αντίστοιχα. Όταν $\bar{n} > n_2$ ο τρόπος διάδοσης παύει να κυματοδηγείται από την οπτική ίνα και λέμε ότι φθάνει σε επίπεδο αποκοπής.

Τέλος για τον συσχετισμό των χαρακτηριστικών της οπτικής ίνας, με τον επιτρεπόμενο αριθμό ρυθμών διάδοσης, αλλά και με τα μήκη κύματος που μπορούν να διαδοθούν σε αυτήν, έχει οριστεί το μέγεθος παράγοντας V , ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$V = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{\lambda} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

όπου a είναι η ακτίνα του πυρήνα της ίνας, n_1 ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα, n_2 ο δείκτης διάθλασης του μανδύα και λ το μήκος κύματος.

Αποδεικνύεται ότι για πολύτροπες ίνες βηματικού δείκτη διάθλασης το πλήθος των υποστηριζόμενων ρυθμών διάδοσης είναι $V^2/2$, στις ίνες διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης $V^2/4$, ενώ στις μονότροπες πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση $0 < V < 2,4$. Ο αριθμός V ονομάζεται και κανονικοποιημένη συχνότητα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Οπτικές πηγές- Οπτικοί Δέκτες

2.1 Οπτικές πηγές

2.1.1.1 Το LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) – Γενικά

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 Stimulated Emission of Radiation, 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 των laser καλύπτουν σχεδόν όλο το φάσμα από μικρά μήκη κύματος ~100 nm στο μακρινό 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 μW 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.

2.1.1.2 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 (stimulated emission) και αποτελεί τη βάση της λειτουργίας του Laser.

2.1.1.3 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 αλληλεπίδρασης 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.

2.1.1.3.1 Απορρόφηση

Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα (φωτόνιο) με ενέργεια $E_{ph} = h\nu$ μπορεί να απορροφηθεί από ένα άτομο του πληθυσμού N_1 επάγοντας σε αυτό μετάβαση στη διεγερμένη κατάσταση. Θεωρώντας πως η ενεργειακή διαφορά $E_2 - E_1$ που απαιτείται για την μετάβαση παρέχεται

από την ενέργεια του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, τότε υπάρχει μία πεπερασμένη πιθανότητα το άτομο να διεγερθεί στην ανώτερη στάθμη.



Εικόνα 10. Απορρόφηση φωτός

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 :

$$dN_1 = -N_1 B_{12} u(\nu_{12}) dt$$

όπου ο παράγοντας B_{12} 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 σ_{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.

2.1.1.3.2 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.



Εικόνα 11. Αυθόρμητη εκπομπή φωτός

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

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

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

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

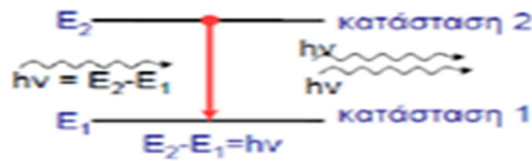
όπου $A_{21}(\text{sec}^{-1})$ ονομάζεται η πιθανότητα αυτογενούς εκπομπής, ή ο συντελεστής αυτογενούς εκπομπής του Einstein (A) και έχει διαστάσεις αντιστρόφου χρόνου. Η ποσότητα $\tau_{sp}=1/A$ ονομάζεται χρόνος ζωής της αυτογενούς εκπομπής. Εναλλακτικά ο αριθμός των μεταβάσεων προς την θεμελιώδη κατάσταση εξαρτάται από τον πληθυσμό N_2 και μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

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

2.1.1.3.3 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 N_2 να αποδιεγερθεί μέσω της μετάβασης $2 \rightarrow 1$. Η ενεργειακή διαφορά $E_2 - E_1$ 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 $u(\nu_{12})$.



Εικόνα 12.Επαγόμενη ή εξαναγκασμένη εκπομπή φωτός

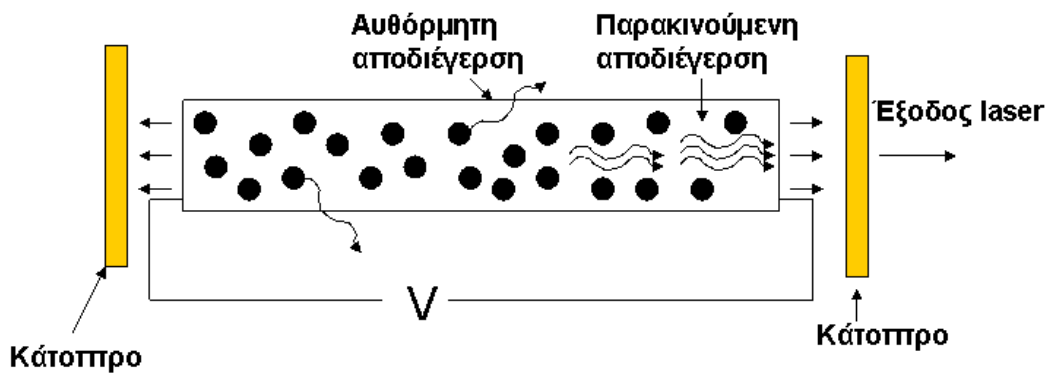
Η εκπομπή του φωτός είναι σε φάση με το προσπίπτον ηλεκτρομαγνητικό κύμα, ταξιδεύει προς την κατεύθυνση και κατέχει την ίδια πόλωση με αυτό. Η ποσοτική αναπαράσταση της επαγόμενης εκπομπής συντελείται περιγράφοντας την μεταβολή του πληθυσμού N_2 . Η μεταβολή αυτή θα είναι ανάλογη του πληθυσμού N_2 , της φασματικής πυκνότητας ενέργειας $u(\nu_{12})$ και του χρόνου dt . Έτσι διαμορφώνεται η σχέση

$$dN_2 = -N_2 B_{21} u(\nu_{12}) dt$$

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 σ_{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 13.. Σχηματική αναπαράσταση διάταξης Laser.

2.1.1.4 Φαινόμενο laser

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:

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

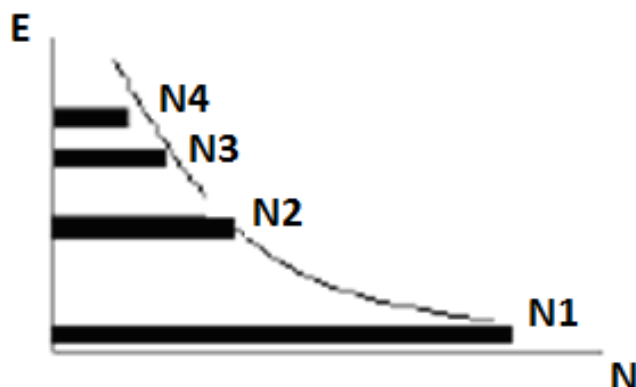
Η παραπάνω σχέση δείχνει πως το υλικό συμπεριφέρεται σαν ένας ενισχυτής όταν $N_2 > N_1$, και ως απορροφητής όταν αντίστοιχα $N_2 < N_1$.

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:

$$\frac{N_j^e}{N_i^e} = \exp \left[-\frac{(E_j - E_i)}{k_B T} \right]$$

όπου k_B είναι η σταθερά του Boltzmann και T είναι η απόλυτη θερμοκρασία του υλικού. Μια γραφική απεικόνιση παρουσιάζεται στη παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 14.. 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 ανωτέρω ιδιότητες 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. Αντληση μπορεί να επιτευχθεί με πολλούς τρόπους οι οποίοι θα αναλυθούν στη συνέχεια.

2.1.1.5 Τα συστατικά στοιχεία ενός laser

Ένα σύστημα laser αποτελείται από τα παρακάτω μέρη:

- Το ενεργό μέσο
- Το οπτικό αντηχείο
- Το μηχανισμό εξόδου
- Τρόποι άντλησης του ενεργού υλικού

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 οποίο 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, οι οποίοι παρουσιάζονται στο σημείο αυτό.

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

- **Ηλεκτρική διέγερση αερίου:** 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 αερίου 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.

2.1.1.6 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:

-μονοχρωματικότητας

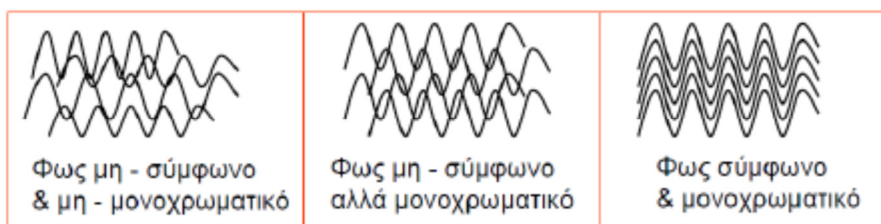
-συμφωνίας

-κατευθυντικότητας

-λαμπρότητας

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 (εικόνα 15).



Εικόνα 15. 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.

2.1.1.7 Εφαρμογές των Laser

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

- 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.

2.1.2.1 To LED (Light Emitting Diode) – Γενικά

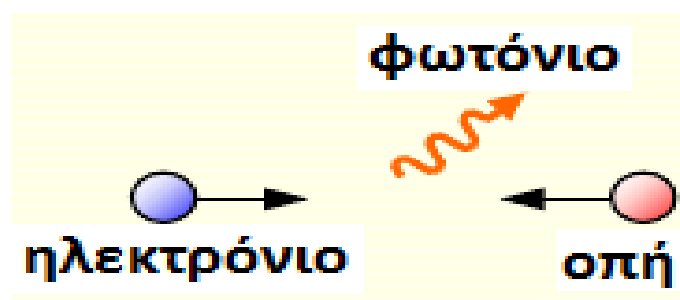
Η δίοδος εκπομπής φωτός είναι μία ημιαγωγίμος δίοδος που εκπέμπει φως όταν ηλεκτρικό ρεύμα εφαρμόζεται με εμπρόσθια ορθή πόλωση (forward-biased) προς τη συσκευή, όπως ακριβώς και σε ένα απλό κύκλωμα. Το αποτέλεσμα είναι μια μορφή ηλεκτροφωταύγειας, όπου ασυνεχές και στενού φάσματος φως εκπέμπεται από 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 δίοδου 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 ημιαγωγίμων υλικών το 1955. Ο Braunstein παρατήρησε υπεριώδεις εκπομπές παραγόμενες από απλές σε δομή δίοδους 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 δίοδου 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 mm²) 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 ημιαγωγίμου υλικού που χρησιμοποιείται και μπορεί να είναι υπέρυθρο, ορατό ή υπεριώδες.

Το χρώμα του φωτός που εκπέμπεται εξαρτάται από την χημική σύσταση του ημιαγωγίμου 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 εγχείει 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 ακτινοβολία επανασύνδεσης κυριαρχεί σε υλικά υψηλής ποιότητας.



Εικόνα 16. Εκπομπή φωτός

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, $h\nu$, ισούται κατά προσέγγιση με το ενεργειακό χάσμα E_g

$$E_g = E_{\text{φωτονίου}} = h \cdot \nu$$

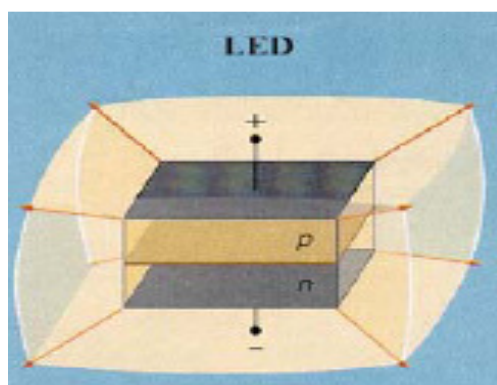
Η δομή ενός LED πρέπει να είναι τέτοια ώστε τα εκπεμπόμενα φωτόνια να μπορούν να απομακρύνονται από την διάταξη χωρίς να επαναπορροφώνται από το ημιαγωγίμο υλικό. Αυτό σημαίνει ότι η p-περιοχή πρέπει να είναι επαρκώς ρηχή, ή διαφορετικά πρέπει να χρησιμοποιήσουμε διατάξεις ετεροδομών. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πολλά ημιαγωγίμα 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 υπέρυθη περιοχή μηκών κύματος του φάσματος.

Η εξωτερική απόδοση $\eta_{εξ}$ 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 $P_{εξ}$, τότε

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

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 $\eta_{εξ}$ 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.



Εικόνα 17. Η 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.

2.1.2.2 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 ημιαγωγίμη 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 ομοιοδομής (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 διακενου σε μια περιοχή στενού διακενου.

2.1.2.3 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 ερευνήσε 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.

2.1.2.4 Εκχύλιση Φωτός

Ο δείκτης διάθλασης των περισσότερων ημιαγωγικών 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 αντανάκλαται 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 αντανάκλαται 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 αντανάκλαστική 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 προστεθεί Το 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.

2.1.2.5 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.

2.1.2.6 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.

2.2 Οπτικοί δέκτες

2.2.1 Βασικές έννοιες

Βασικό εξάρτημα του οπτικού δέκτη είναι ο φωτοανιχνευτής. Γενικά οι φωτοανιχνευτές (photodetectors) είναι μετατροπείς σήματος (transducers) που μεταβάλλουν κάποια χαρακτηριστική τους ιδιότητα, όταν φως προσπέσει πάνω τους. Στην κατηγορία των διατάξεων αυτών θα μπορούσαμε γενικά να συμπεριλάβουμε τις φωτοαντιστάσεις, που μεταβάλλουν την ωμική τους αντίσταση, το ανθρώπινο μάτι, που αντιδρά ηλεκτροχημικά στο φως, κλπ. Για εφαρμογές όμως στις τηλεπικοινωνίες οπτικών ινών χρειαζόμαστε φωτοανιχνευτές οι οποίοι να έχουν:

- Μεγάλη ευαισθησία στο φως
- Γρήγορη απόκριση
- Χαμηλό θόρυβο
- Μεγάλη αξιοπιστία
- Σταθερότητα στα χαρακτηριστικά λειτουργίας
- Χαμηλή τάση πόλωσης
- Χαμηλό κόστος

Οι παραπάνω προδιαγραφές καλύπτονται πλήρως, όταν ο φωτοανιχνευτής είναι κατασκευασμένος από υλικά ημιαγωγών και ουσιαστικά μετατρέπει το οπτικό σήμα σε αντίστοιχο ηλεκτρικό. Στα παρακάτω θα περιγράψουμε τα βασικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας των φωτοανιχνευτών, τους βασικούς μηχανισμούς φωτοανίχνευσης στις ημιαγωγικές διατάξεις και συγκεκριμένα θα αναφερθούμε στις φωτοδιόδους p-n, p-i-n και φωτοδίοδο χιονοστιβάδας (APD). Τέλος θα αναφερθούμε σύντομα στις βασικές αρχές της άμεσης και σύμφωνης φωτοανίχνευσης ή φώρασης.

2.2.2 Χαρακτηριστικά φωτοανιχνευτών

Οι φωτοανιχνευτές χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένες παραμέτρους σπουδαιότερες από τις οποίες είναι οι:

Φασματική απόκριση: εκφράζει την ένταση του ρεύματος που παράγεται σε συνάρτηση με μήκος κύματος, υποθέτοντας ότι όλα τα προσπίπτοντα μήκη κύματος έχουν την ίδια φωτεινή ένταση.

Ανιχνευτική ικανότητα D: είναι η πιο σημαντική παράμετρος που πρέπει να αξιολογείται για την επιλογή ενός φωρατή. Η ανιχνευτική ικανότητα καθορίζεται από τον τύπο, , όπου A η ενεργός επιφάνεια του ανιχνευτή, Δf το εύρος σήματος σε Hz, P_N ισοδύναμη ισχύς θορύβου.

Κβαντική απόδοση: είναι ο αριθμός των παραγόμενων ζευγών ηλεκτρονίων-οπών (δηλ. ρεύματος) δια του αριθμού των φωτονίων που προσπίπτουν στον φωτοανιχνευτή. Εκφράζεται από τη σχέση , όπου είναι ο ρυθμός των προσπιπτόντων φωτονίων και ο ρυθμός των παραγόμενων ηλεκτρονίων. Η κβαντική απόδοση είναι συνάρτηση του μήκους κύματος λ και πρέπει να αναφέρεται για συγκεκριμένο λ .

Αποκρισιμότητα: Εκφράζει την ένταση του παραγόμενου φωτορεύματος (σε Ampere) ανά μονάδα προσπίπτουσας φωτεινής ισχύος (σε Watt). Δίνεται από τη σχέση (με μονάδα μέτρησης το) όπου είναι το φωτορεύμα εξόδου σε Ampere και η προσπίπτουσα οπτική ισχύς σε Watt. Όσο μεγαλύτερη είναι η αποκρισιμότητα του ανιχνευτή, τόσο καλύτερη είναι η ευαισθησία του δέκτη. Αφού η αποκρισιμότητα ποικίλει σε σχέση με το μήκος κύματος, καθορίζεται είτε στο μήκος κύματος της μέγιστης αποκρισιμότητας είτε στο μήκος κύματος που μας ενδιαφέρει. Για τις περισσότερες εφαρμογές, η αποκρισιμότητα είναι το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό ενός ανιχνευτή επειδή καθορίζει τη σχέση μεταξύ της οπτικής εισόδου και τις ηλεκτρικής εξόδου. Η αποκρισιμότητα R συνδέεται άμεσα με την κβαντική απόδοση η της φωτοδιόδου μέσω της σχέσης όπου το φορτίο του ηλεκτρονίου, λ το μήκος κύματος, h η σταθερά του Planck και c η ταχύτητα του φωτός.

Ρεύμα σκότους: η ένταση του ρεύματος που διαρρέει την φωτοδίοδο κατά την πλήρη απουσία φωτός (πλήρες σκότος) όταν η φωτοδίοδος είναι ανάστροφα πολωμένη. Ουσιαστικά είναι πηγή θορύβου.

Χρονική απόκριση του φωτοανιχνευτή: ο χρόνος που απαιτείται ώστε το σήμα εξόδου να ανέλθει από το 10% στο 90% του μέγιστου πλάτους του (χρόνος ανόδου) και να πέσει από το 90% στο 10% του πλάτους (χρόνος καθόδου). Η ταχύτητα απόκρισης εκφράζει την ταχύτητα με την οποία ο φωτοανιχνευτής αποκρίνεται στις μεταβολές της έντασης του φωτός. Αν μία πηγή φωτός σταθερής έντασης φωτίσει τον φωτοανιχνευτή, θα χρειαστεί ένας πεπερασμένος χρόνος μέχρι να εμφανιστεί φωτόρευμα στο εξωτερικό κύκλωμα και μέχρι αυτό να αποκτήσει σταθερή τιμή. Αν η πηγή σταματήσει να εκπέμπει, θα μεσολαβήσει πάλι κάποιος χρόνος μέχρι να φτάσει το φωτόρευμα στην αρχική μηδενική του τιμή. Πρέπει να σημειώσουμε ότι το κόστος του φωρατή είναι ανάλογο της ταχύτητας απόκρισης του.

Φασματική περιοχή λειτουργίας στην οποία η φωτοδίοδος είναι ευαίσθητη. Είναι μια παράμετρος που αποσκοπεί στην κατάλληλη επιλογή της περιοχής φάσματος λειτουργίας του φωρατή. Έτσι διακρίνουμε τους φωρατές σε:

1. Υπεριώδους φάσματος (UV) με μήκος κύματος 0.1-0.4μm.
2. Ορατού φάσματος με μήκος κύματος 0.4-0.8μm.
3. Υπερύθρου (IR) φάσματος με μήκος κύματος 0.8-20μm.
4. Μακρό-υπερύθρου (FIR) φάσματος με μήκος κύματος 20-400μm.

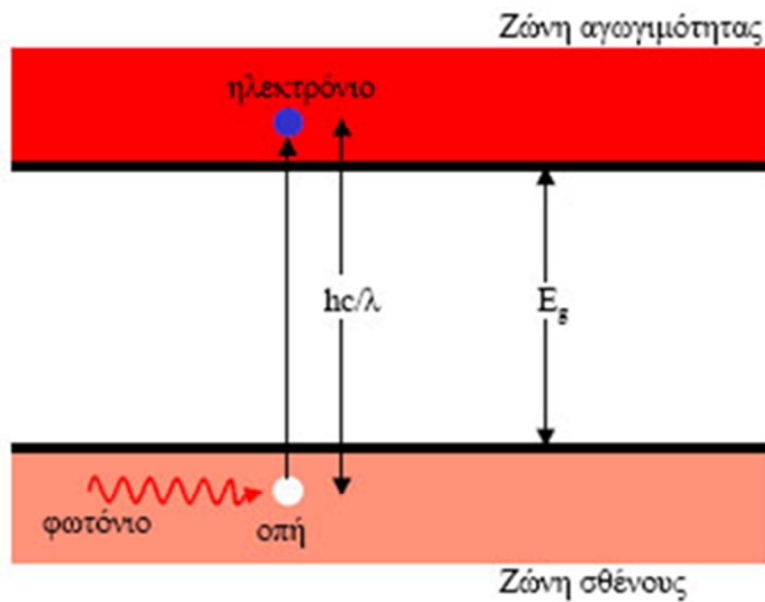
Συχνότητα (μήκος κύματος) αποκοπής: είναι η χαμηλότερη συχνότητα ήτοι το υψηλότερο μήκος κύματος, στην οποία η φωτοδίοδος είναι ευαίσθητη.

Ενεργός επιφάνεια: Είναι η επιφάνεια του φωρατή, όπου γίνεται η ανίχνευση και η λήψη του φωτεινού σήματος ώστε να γίνει η μετατροπή του σε ηλεκτρικό.

Όλοι οι φωτοανιχνευτές στηρίζονται στην αρχή ότι φωτόνια προσπίπτοντα σε ένα φωτοευαίσθητο υλικό απορροφούνται με την δημιουργία ελεύθερων φορέων ηλεκτρικού ρεύματος τα οποία και ανιχνεύονται ως ηλεκτρικό ρεύμα. Τεχνολογικά συναντάμε δύο ειδών φωτοεκπομπής φορέων ηλεκτρικού φορτίου: εξωτερική και εσωτερική. Με εξωτερική φωτοεκπομπή ηλεκτρονίων λειτουργούν διατάξεις όπως οι

λυχνίες φωτοπολλαπλασιαστών η οι φωτοδίοδοι κενού. Οι διατάξεις αυτές είναι πολύ ογκώδεις και απαιτούν υψηλές τάσεις λειτουργίας.

Στην περίπτωση που τα φωτόνια απορροφούνται από ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους τα οποία αποκτούν έτσι υψηλότερη ενέργεια και διεγείρονται στη ζώνη αγωγιμότητας αφήνοντας πίσω στη ζώνη σθένους μια οπή. Όταν εφαρμοσθεί κατάλληλη εξωτερική τάση στον ημιαγωγό, αυτά τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών δίνουν ηλεκτρικό ρεύμα που ονομάζεται φωτορεύμα. Σύμφωνα με την κβαντομηχανική κάθε ηλεκτρόνιο μπορεί να απορροφήσει ένα μόνο φωτόνιο για να υποστεί μετάπτωση ανάμεσα στις δύο ζώνες ενέργειας που αναφέραμε. Επίσης η ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου πρέπει να είναι ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού για να παραχθεί το φωτορεύμα. Αυτό εισάγει έναν περιορισμό ως προς τη συχνότητα f_c η το μήκος κύματος λ_c για το οποίο ημιαγωγός με ενεργειακό χάσμα E_g μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως φωτοανιχνευτής. Η συχνότητα ονομάζεται συχνότητα αποκοπής και είναι η ελάχιστη συχνότητα για να έχουμε απορρόφηση του φωτονίου. Το μήκος κύματος ονομάζεται μήκος κύματος αποκοπής και είναι το μέγιστο αντίστοιχα μήκος κύματος για να έχουμε απορρόφηση του φωτονίου, όπου c η ταχύτητα του φωτός. Η μεγαλύτερη τιμή του λ που ικανοποιεί την παραπάνω σχέση ονομάζεται μήκος κύματος αποκοπής. Μελετώντας το ενεργειακό χάσμα διαφόρων ημιαγωγικών υλικών και το αντίστοιχο μήκος κύματος αποκοπής, διαπιστώνουμε ότι το Si και το GaAs δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για φωτοανίχνευση στα μήκη κύματος 1.3 και 1.55 μm . Οι νέες συνθετικές δομές ημιαγωγών που βασίζονται στο InGaAsP (Indium Gallium Arsenide Phosphide) χρησιμοποιούνται συνήθως για την κατασκευή φωτοανιχνευτών στα 1.3 και 1.55 μm . Φωτοανιχνευτές από Si χρησιμοποιούνται κυρίως στη ζώνη των 0.8 μm .



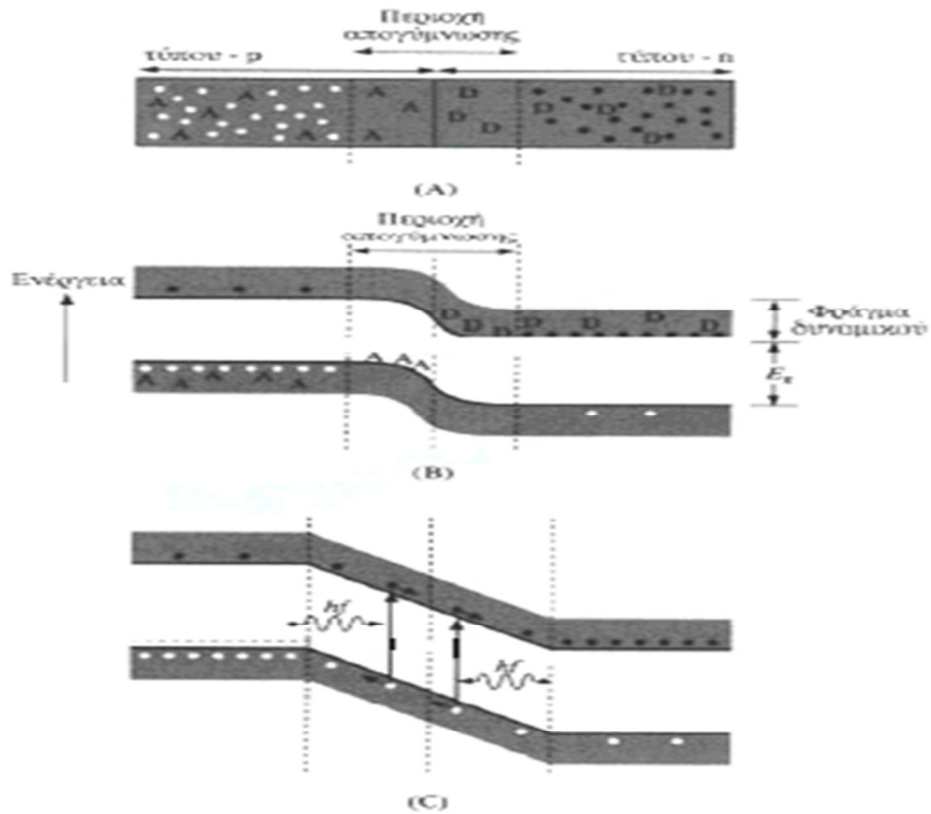
Εικόνα 18.Βασική αρχή φωτοανίχνευσης χρησιμοποιώντας ημιαγωγό.

2.2.3 P-N Φωτοδίοδος

Η πιο απλή φωτοδίοδος είναι εκείνη που αποτελείται από μια επαφή p-n. Αυτός ο τύπος διόδου χρησιμοποιείται σπάνια στα οπτικά συστήματα αλλά κρίνεται απαραίτητη η παρουσίασή του, για να κατανοήσουμε τις βασικές αρχές λειτουργίας μιας φωτοδίοδου.

Θεωρούμε μια επαφή p-n όπως φαίνεται στην εικόνα 19 ανάστροφα όμως πολωμένη. Λόγω της ανάστροφης πόλωσης η περιοχή απογύμνωσης (depletion region) είναι τώρα διευρυμένη. Κάθε προσπίπτον φωτόνιο με μήκος κύματος μικρότερο από το αντίστοιχο μήκος κύματος αποκοπής μπορεί να απορροφηθεί από ηλεκτρόνιο της ζώνης σθένους παράγοντας ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής, σύμφωνα με το μηχανισμό που είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο. Υπό την επίδραση της εφαρμοζόμενης τάσης (ανάστροφη πόλωση) τα ηλεκτρόνια ολισθαίνουν προς την περιοχή n και οι οπές ολισθαίνουν αντίστοιχα στην περιοχή p, πριν προλάβουν να επανασυνδεθούν, παράγοντας έτσι στο εξωτερικό κύκλωμα σήμα φωτορεύματος. Η ένταση του παραγόμενου φωτορεύματος είναι ανάλογη με τον αριθμό των παραγόμενων ζευγών ηλεκτρονίων –οπών και συνεπώς ανάλογο του πλήθους των προσπιπτόμενων φωτονίων (ένταση φωτεινού σήματος). Σημειώνουμε ότι μετά την

απορρόφηση του προσπίπτοντος φωτονίου και την παραγωγή του ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής, υπάρχει πιθανότητα αυτά να επανασυνδεθούν επανεκπέμποντας φωτόνιο ίσης με το αρχικό ενέργειας, οπότε δεν παράγεται φωτορεύμα.



Εικόνα 19. Φωτοδίοδος p-n. Επαφή ανοικτού κυκλώματος (A) με αντίστοιχο ενεργειακό διάγραμμα (B). Ενεργειακή κατάσταση της επαφής p-n όταν εφαρμοσθεί ανάστροφη πόλωση (C).

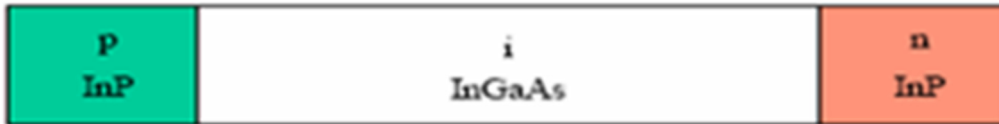
Η ανεπιθύμητη αυτή πιθανότητα επανασύνδεσης όμως ελαττώνεται δραστικά όσο μεγαλύτερη γίνεται η εφαρμοζόμενη εξωτερική ανάστροφη τάση: τα μέλη του ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής ωθούνται να κινηθούν γρήγορα προς αντίθετες κατευθύνσεις μακριά το ένα από το άλλο πριν προλάβουν να επανασυνδεθούν. Ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών όμως, που παράγονται μακριά από την περιοχή απογύμνωσης κινούνται κυρίως με το μηχανισμό της διάχυσης, που είναι αργή διαδικασία, οπότε η πιθανότητα να επανασυνδεθούν χωρίς να δώσουν φωτορεύμα είναι πολύ μεγαλύτερη. Αυτό ελαττώνει την απόκριση του φωτοανιχνευτή. Ένας τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος είναι να ελαττώσουμε το εύρος των περιοχών p και n και να αυξήσουμε

το εύρος της περιοχής απογύμνωσης. Τεχνολογικά αυτό επιτυγχάνεται, όπως θα δούμε αμέσως παρακάτω, στις φωτοδιόδους p-i-n. Οι φωτοδιόδοι p-n μπορούν να λειτουργήσουν με ρυθμό μετάδοσης μέχρι 1Gb/s περίπου.

2.2.4 P-i-N Φωτοδίodos

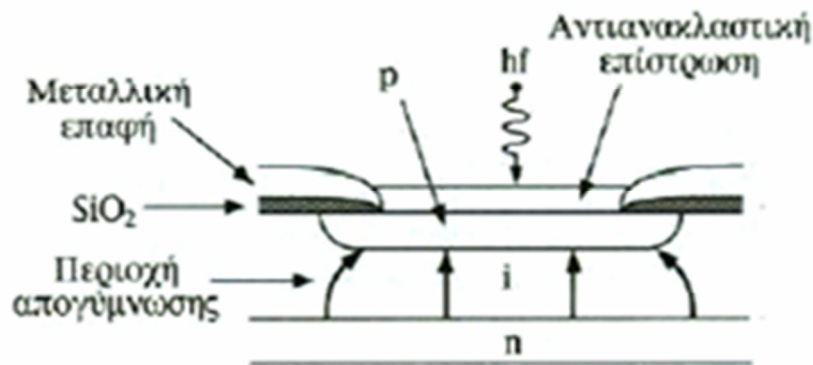
Η δίοδος p-n μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση του ορατού φωτός. Για την ανίχνευση της υπέρυθρης ακτινοβολίας (μεγαλύτερα μήκη κύματος) έχει αναπτυχθεί ένας άλλος τύπος διόδου. Το φως μεγάλου μήκους κύματος διαπερνά περισσότερο το p-στρώμα απ' ό,τι το φως μικρού μήκους κύματος. Μια λύση θα ήταν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

Για να βελτιώσουμε την απόκριση του φωτοανιχνευτή αυξάνοντας το εύρος της περιοχής απογύμνωσης παρεμβάλλουμε ένα στρώμα ανόθευτο ή και ελαφρά νοθευμένου ημιαγωγού ανάμεσα στα αρχικά στρώματα p και n του ημιαγωγικού υλικού. Τέτοια φωτοδίοδος ονομάζεται pin φωτοδίοδος (εικόνα 20) και το γράμμα i αντιπροσωπεύει το ανόθευτο (intrinsic -i) τμήμα. Στην pin φωτοδίοδο η περιοχή απογύμνωσης εκτείνεται σ' όλο το ανόθευτο τμήμα, ενώ το εύρος των περιοχών p και n είναι μικρότερο σχετικά με αυτό της i, ώστε το μεγαλύτερο μέρος της απορρόφησης του φωτός να λαμβάνει χώρα στην περιοχή i. Το εύρος της περιοχής απογύμνωσης για ημιαγωγικές διατάξεις InGaAs είναι περίπου 3-5 μ m και το εύρος ζώνης του ανιχνευτή κυμαίνεται γύρω στα 3-5GHz. Η απόδοση μιας pin φωτοδίοδος μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά αν χρησιμοποιήσουμε σχεδίαση διπλής ετεροδομής. Το μεσαίο στρώμα τύπου i είναι διαφορετικού ημιαγωγού από τα p και n και επιλέγεται με ενεργειακό χάσμα τέτοιο ώστε το φως να απορροφάται μόνο στο στρώμα i, ενώ τα p και n επιλέγονται να είναι διαφανή στην περιοχή των μηκών κύματος που ενδιαφέρει. Για την pin φωτοδίοδο ετεροεπαφής της εικόνας 20, για παράδειγμα το μήκος κύματος αποκοπής για το InP είναι τα 0.92 μ m. Έτσι τα τμήματα p και n είναι διαφανή στην περιοχή 1.3-1.6 μ m που μας ενδιαφέρει στις οπτικές τηλεπικοινωνίες.



Εικόνα 20. P-i-N φωτοδίοδος βασισμένη σε ετεροδομή.

Το μήκος κύματος αποκοπής όμως του *i* στρώματος InGaAs είναι 1.65μm και συνεπώς μπορεί να απορροφήσει φως με μήκος κύματος στην περιοχή 1.3-1.6 μm. Η γεωμετρία μιας τυπικής pin φωτοδίοδου φαίνεται στην εικόνα 21, όπου το στρώμα *p* στο οποίο προσπίπτει το φως καλύπτεται για ευνόητους λόγους με αντανακλαστική επίστρωση, ενώ μεταλλικές επαφές προστίθενται για τη διασύνδεση της φωτοδίοδου με το εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα.



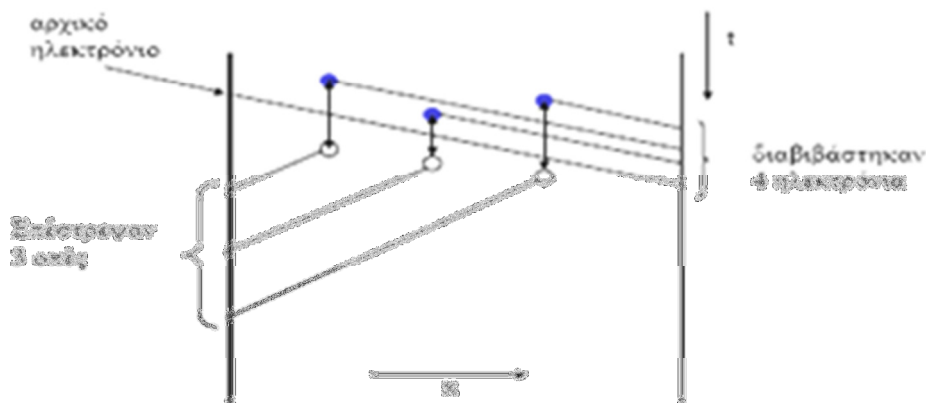
Εικόνα 21.Τυπική γεωμετρική διάταξη φωτοδίοδου.

Τελευταία έχουν αρχίσει και χρησιμοποιούνται συνδυασμοί υλικών που δεν περιέχουν σιλκόνη και γερμάνιο. Για ακόμα μεγαλύτερα μήκη κύματος οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν συνδυασμούς InGaAsP με InP ή GaAlAsSb με GaSb.

2.2.5 Φωτοδίοδος χιονοστιβάδα (APD)

Σε μια ιδανική PIN φωτοδίοδο, κάθε προσπίπτον φωτόνιο δημιουργεί ένα ζεύγος e-h, γεγονός που σημαίνει ότι το ηλεκτρόνιο θα κινηθεί από το θετικό προς τον αρνητικό πόλο. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι η PIN δίοδος είναι το αντίστροφο του LED (σχεδόν κάθε ηλεκτρόνιο αντιδρά σε προσπίπτον φωτόνιο).

Η αποκρισσιμότητα μιας φωτοδιόδου ορίστηκε στην αρχή του κεφαλαίου ως η ένταση του παραγόμενου φωτορεύματος για κάθε μονάδα προσπίπτουσας φωτεινής ισχύος. Η αποκρισσιμότητα όμως περιορίζεται από το γεγονός ότι στις φωτοδιόδους που έχουμε εξετάσει μέχρι τώρα κάθε προσπίπτον φωτόνιο όταν απορροφάται παράγει ένα μόνο ηλεκτρόνιο και την αντίστοιχη οπή. Θα ήταν λοιπόν επιθυμητή η παραγωγή περισσότερων του ενός ηλεκτρονίων για κάθε προσπίπτον φωτόνιο, γεγονός που θα οδηγούσε σε μια «εσωτερική απολαβή», ήτοι οπτική ενίσχυση του σήματος, όπως ακριβώς συμβαίνει και στις λυχνίες με φωτοπολλαπλασιαστή. Κάτι τέτοιο επιχειρείται στην φωτοδίοδο χιονοστιβάδας, όπου αξιοποιείται το φυσικό φαινόμενο του ιονισμού με κρούση για την παραγωγή περισσότερων του ενός ηλεκτρονίων ως εξής: το προσπίπτον φωτόνιο απορροφάται από ένα ηλεκτρόνιο της ζώνης σθένους το οποίο μεταπίπτει στη ζώνη αγωγιμότητα και κινείται ελεύθερα. Όταν το ηλεκτρόνιο αυτό βρεθεί σε υψηλό ηλεκτρικό πεδίο επιταχύνεται και αποκτά αρκετή κινητική ενέργεια ώστε σε κάθε του σύγκρουση με ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους να τα ωθεί στη ζώνη αγωγιμότητας παρέχοντας τους μέρος της κινητικής του ενέργειας και δημιουργώντας έτσι ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών. Τα δευτερογενή αυτά ηλεκτρόνια επιταχύνονται επίσης από το ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο, συγκρούονται με άλλα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους δημιουργώντας με τη σειρά τους και άλλα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται με τη μορφή χιονοστιβάδας, όταν το πεδίο είναι αρκετά ισχυρό, μέχρι την έξοδο των ηλεκτρονίων από την περιοχή απογύμνωσης (σχήμα 6.5.1). Τέτοια φωτοδίοδος καλείται φωτοδίοδος χιονοστιβάδας (Avalence photodiode – APD).



Εικόνα 22.Χρονοδιάγραμμα που δείχνει σχηματικά το φαινόμενο του ιονισμού με κρούση.

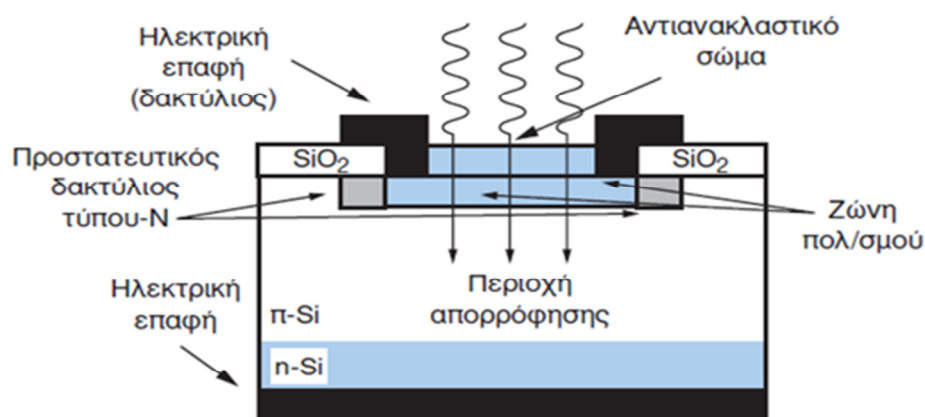
Με τον παραπάνω τρόπο πετυχαίνουμε τον πολλαπλασιασμό της έντασης, που δημιουργείται από τα κινούμενα ηλεκτρόνια. Λόγω αυτού του φαινομένου «χιονοστιβάδας» η δίοδος ονομάστηκε avalanche. Ο συντελεστής πολλαπλασιασμού εξαρτάται κατά μεγάλο βαθμό από την ανάστροφη πόλωση. Συνηθίζεται ο συντελεστής πολλαπλασιασμού να έχει τιμές μέσα στο διάστημα (70-100). Αυτό σημαίνει ότι ένα φωτόνιο δημιουργεί ροή 70 με 100 ηλεκτρονίων στο εξωτερικό κύκλωμα. Μέτρο της εσωτερικής απολαβής της φωτοδίοδου χιονοστιβάδας αποτελεί ο παράγοντας πολλαπλασιασμού M που ορίζεται από τη σχέση $M = I / I_p$ όπου I είναι το συνολικό ρεύμα εξόδου για τη συγκεκριμένη τάση πόλωσης και I_p το αρχικό φωτορεύμα πριν την έναρξη της διαδικασίας του πολλαπλασιασμού των φορέων με το μηχανισμό του ιονισμού με κρούση. Ο SNR βελτιώνεται αρκετά λόγω του φωτοπολλαπλασιασμού. Η ανάστροφη πόλωση καθορίζει το συντελεστή πολλαπλασιασμού, διότι πρέπει να δημιουργηθεί αρκετά ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο ώστε να εμφανιστεί το φαινόμενο «χιονοστιβάδας». Για μια τιμή αρκετών εκατοντάδων Volts (threshold) τα ζεύγη e-h θα δημιουργούνται χωρίς να είναι απαραίτητη η πρόσπτωση φωτός.

Η φωτοδίοδος χιονοστιβάδας είναι πιο περίπλοκη διάταξη από την p-i-n φωτοδίοδο μια και ένα επιπλέον στρώμα p προστίθεται (σχήμα 6.5.2) για τη διευκόλυνση της δημιουργίας δευτερευόντων ζευγών ηλεκτρονίου-οπής μέσω ιονισμού με κρούση. Κάτω από ανάστροφη πόλωση των 100 V περίπου που εφαρμόζονται εξωτερικά στην APD αναπτύσσεται ένα υψηλό ηλεκτρικό πεδίο στο στρώμα p (που βρίσκεται ανάμεσα στα i και n⁺) το οποίο μπορεί να φθάσει τα 2-4x10⁵ V/cm. Το στρώμα p ονομάζεται στρώμα πολλαπλασιασμού, αφού σ' αυτό δημιουργούνται τα δευτερογενή ζεύγη ηλεκτρονίου-οπής με ιονισμό με κρούση, ενώ το στρώμα i προσφέρεται για την απορρόφηση των φωτονίων και τη δημιουργία του αρχικού ζεύγους ηλεκτρονίου—οπής.



Εικόνα 23.Σχηματική διάταξη της δομής μιας τυπικής APD

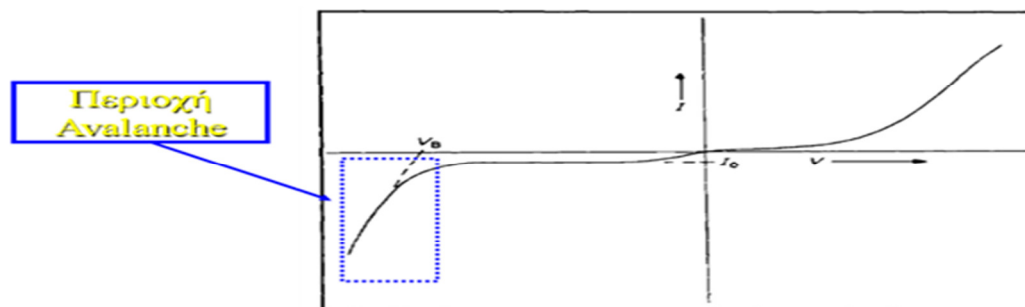
Πιο αναλυτικά η δομή μιας APD παρουσιάζεται στο παρακάτω (στην εικόνα 24). Στην είσοδο υπάρχουν δύο ηλεκτρική δακτύλιοι (metal contacts) οι οποίοι περιέχουν χαμηλές αντιστάσεις και επιτρέπουν έτσι στο φως να περάσει στο επόμενο επίπεδο. Το αντανακλαστικό σώμα (antireflecting coating) αποτρέπει τις αντανακλάσεις των φωτονίων ώστε να μην υπάρχουν απώλειες φωτός από την οπτική ίνα μέχρι την περιοχή πολλαπλασιασμού της φωτοδιόδου. Στη ζώνη πολλαπλασιασμού (multiplication zone) έχουμε τον πολλαπλασιασμό των ελεύθερων ηλεκτρονίων και στο ίδιο επίπεδο συναντάμε και τους δύο προστατευτικούς δακτυλίους (guard rings) οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την εξάλειψη υψηλής συγκέντρωσης ηλεκτρικού πεδίου στην περιφέρεια της επαφής. Τέλος, στην περιοχή απορρόφησης εισχωρεί το η συνολική τιμή του φωτορεύματος το οποίο θα μετατραπεί σε ηλεκτρικό σήμα για να μπορέσει να γίνει λήψη από τον δέκτη.



Εικόνα 24.Δομή μιας τυπικής APD.

Οι φωτοδιόδοι χιονοστιβάδας, όπως έχει ήδη αναφερθεί, πολώνονται ανάστροφα με τον ίδιο τρόπο που προαναφέρθηκε γενικά για την πόλωση φωτοδιόδων με την διαφορά ότι οι APD's διαθέτουν μηχανισμό ενίσχυσης του φωτός που οφείλεται στο φαινόμενο της χιονοστιβάδας (avalanche effect). Η ανάστροφη πόλωση πραγματοποιείται λίγο πριν την τάση διάσπασης (καταστροφή του στοιχείου από την απότομη αύξηση ρεύματος) της φωτοδιόδου όπως παρουσιάζεται (στην εικόνα 25). Καθώς αυξάνεται η ανάστροφη πόλωση VB στο εσωτερικό της φωτοδιόδου το ρεύμα I_0 παραμένει σχεδόν σταθερό. Παρατηρείται ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο το οποίο είναι υπεύθυνο για την μετάβαση ηλεκτρονίων σε υψηλότερες

ενεργειακές στάθμες (αυξημένη κινητική ενέργεια). Προκαλείται έτσι ιονισμός στα άτομα του ημιαγωγού.



Εικόνα 25.Χαρακτηριστική I-V για μια τυπική APD.

Τα e^- που παράγουν τα φωτόνια που εισέρχονται στην ενεργή περιοχή της φωτοδιόδου συγκρούονται με τα ζεύγη e^- και e^+ που δημιουργήθηκαν λόγω ανάστροφης πόλωσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον συνεχή πολλαπλασιασμό των ελεύθερων e^- και συνεπώς την ενίσχυση του φωτορεύματος έως ότου τα ηλεκτρόνια να πάντων να κινούνται στην περιοχή της φωτοδιόδου. Εδώ πρέπει να σημειωθεί πως το φαινόμενο Avalanche δεν προκαλεί καταστροφή της APD φωτοδιόδου, αλλά η θερμοκρασία που αυξάνεται συνεχώς λόγω της μεγάλης ισχύς του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να προκαλέσει την καταστροφή του αγωγού.

Στα πλεονεκτήματα της φωτοδιόδου χιονοστιβάδας, σε σχέση με την PIN φωτοδίοδο, συγκαταλέγεται και η μεγαλύτερη ευαισθησία της, αφού η εσωτερική απολαβή που προσφέρει της επιτρέπει καλύτερη αντιμετώπιση του ηλεκτρικού θερμικού θορύβου του ανιχνευτή. Με APD μπορούν να επιτευχθούν απολαβές 15-20 dB, ενώ ο παράγοντας θορύβου είναι γύρω στα 3 dB. Το μειονέκτημα βέβαια είναι η πολυπλοκότητα της κατασκευής και το αντίστοιχα αυξημένο κόστος που αυτό συνεπάγεται. Θα μπορούσαμε τέλος στα μειονεκτήματα των APD να προσθέσουμε και το γεγονός ότι η τυχαία φύση του μηχανισμού εσωτερικής απολαβής προσδίδει επί πλέον θόρυβο, ενώ η υψηλή τάση πόλωσης που απαιτείται εξαρτάται από το μήκος κύματος λειτουργίας της φωτοδιόδου.

Μια δίodos PIN χρειάζεται μόνο μια πόλωση μερικών Volt για να λειτουργήσει κατάλληλα, ενώ μια APD είναι πολωμένη με ηλεκτρική τάση μέχρι 150volt. Όταν το φως πέφτει στη φωτοδίοδο APD το ρεύμα διαρρέει με τον ίδιο σχεδόν τρόπο, όπως

μια χαρακτηριστική δίοδο PIN, αλλά σε υψηλότερα επίπεδα ρεύματος. Μια δίοδο PIN που μπορεί να παράγει μόνο 1μΑ ρεύματος για 2μW φωτός, ενώ μια APD μπορεί να παράγει τουλάχιστον 100μΑ για κάθε 1μW (x100 κέρδος).

Όταν σε ένα οπτικό σύστημα χρησιμοποιούνται φωτοδιόδοι APD και στενής ζώνης οπτικά φίλτρα τότε το σύστημα έχει πολύ υψηλότερες φωτεινές ευαισθησίες ακόμη και για μεγαλύτερες αποστάσεις από ότι πιθανώς θα είχε με μια πρότυπη φωτοδίοδο PIN. Σε σχέση με τις PIN, στα συστήματα με χρήση φωτοδίοδου χιονοστιβάδας που χρησιμοποιούν πομπό LEDs, ο πρόσθετος θόρυβος που παράγεται από το περιβάλλον φως, που εστιάζεται επάνω στη φωτοδίοδο, μειώνει πολύ το πλεονέκτημα του κέρδους των APDs. Μια καλή φωτοδίοδο PIN είναι 20 φορές φθηνότερη από των APDs. Η υψηλή τιμή ανάστροφης πόλωσης που απαιτείται και η ευαισθησία θερμοκρασίας των APD, είναι αιτία τα κυκλώματα ανιχνευτών να είναι πιο περίπλοκα από εκείνα που χρειάστηκαν με μια PIN. Όσον αφορά εύρος ζώνης, οι φωτοδιόδοι τύποι PIN προφανώς χειρίζονται μικρότερα εύρη ζώνης από ότι τα APD (που χειρίζονται μεγαλύτερα του GB/s), γιατί ο χρόνος που χρειάζεται η διαδικασία χιονοστιβάδας είναι κατά πολύ μεγαλύτερος από το χρόνο που διαρκεί η μετατροπή φωτονίων σε φορείς (ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής) στις PIN.

Οι φωτοδιόδοι pin έχουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

3.1 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 τη σχέση:

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

$$P_0 = P_i \cdot e^{-aL}$$

Όπου P_i η οπτική ισχύς εισόδου στην ίνα και 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:

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

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^- , ευθύνονται 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-εξασθένιση 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 οποίες 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.

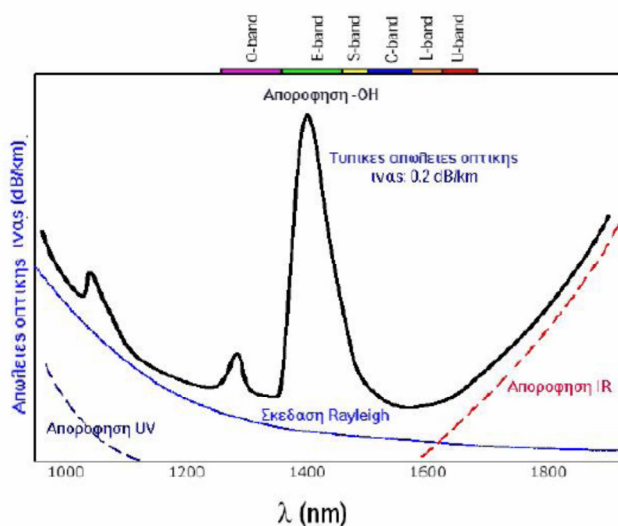
Η σκέδαση Rayleigh αποτελεί ένα βασικό μηχανισμό απώλειας ο οποίος προκαλείται από σημειακές μικροσκοπικές διακυμάνσεις της πυκνότητας. Οι διακυμάνσεις αυτές οδηγούν σε τυχαία διακύμανση του δείκτη διάθλασης, σε κλίμακα μικρότερη του οπτικού μήκους κύματος λ . Η σκέδαση του φωτός σε ένα τέτοιο μέσο είναι γνωστή ως σκέδαση Rayleigh. Η ενεργός διατομή της σκέδασης μεταβάλλεται συναρτησί του λ^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 καλή προσέγγιση του συντελεστή σκέδασης Rayleigh δίνεται από τον τύπο :

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

όπου το λ μετριέται σε μm και το Δn_{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 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$. Αυτές οι απώλειες περιορίζουν τελικά την απόσταση στην οποία μπορούν να μεταδοθούν σήματα και απαιτούν την ύπαρξη οπτικής ενίσχυσης.

Στην εικόνα 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.



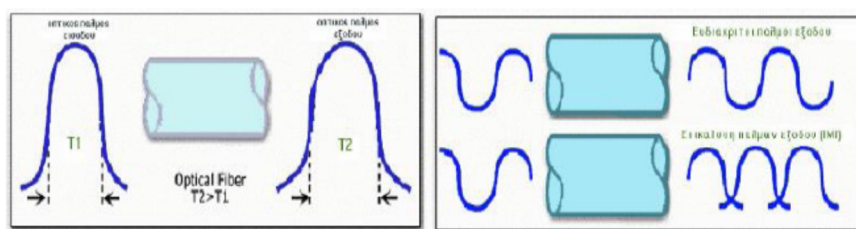
Εικόνα 26. Η ολική εξασθένιση σε μία τυπική οπτική ίνα

Δεν διακρίνεται βέβαια το παράθυρο των 0.8 μm που χρησιμοποιήθηκε αρχικά είναι φανερό όμως η ισχυρή εξάρτηση της σκέδασης από το λ . Τα παράθυρα των 1.3 μm 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.

3.2 Διασπορά και διεύρυνση οπτικών παλμών

Οι διάφοροι μηχανισμοί διασποράς στην οπτική ίνα έχουν σαν τελικό αποτέλεσμα τη διεύρυνση του πλάτους των φωτεινών παλμών καθώς αυτοί ταξιδεύουν στην ίνα. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται (στην εικόνα 27) όπου παρατηρούμε ότι καθώς διευρύνεται το πλάτος ενός παλμού, κάποια στιγμή αλληλεπικαλύπτεται με γειτονικούς παλμούς και γίνεται δυσδιάκριτος στο δέκτη (Intersymbol Interference). Το αποτέλεσμα είναι η αύξηση του ρυθμού των λαθών. Έτσι λοιπόν η διασπορά των παλμών του σήματος περιορίζει το

ρυθμό διακίνησης πληροφορίας (Bit Rate) στην οπτική ίνα, δηλαδή το εύρος ζώνης της ίνας που μπορεί να αξιοποιηθεί. Το μέγεθος τη διασποράς ενός παλμού εξαρτάται επίσης και από την απόσταση που ο παλμός διένυσε στην ίνα.



Εικόνα 27. Το φαινόμενο της διασποράς στις οπτικές ίνες

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε αναλυτικά τους διάφορους μηχανισμούς που οδηγούν σε διασπορά των παλμών στις οπτικές ίνες. Επιγραμματικά αναφέρουμε ότι οι κυριότεροι μηχανισμοί είναι η χρωματική διασπορά, η διασπορά των τρόπων διάδοσης και η διασπορά των τρόπων πόλωσης.

I. Χρωματική διασπορά

Συναντάται σε όλους τους τύπους των οπτικών ινών και οφείλεται στο πεπερασμένο εύρος ζώνης της οπτικής πηγής που τροφοδοτεί την ίνα. Η οπτική πηγή μπορεί να είναι laser συνεχούς εκπομπής και φωτοдиодοι (Light Emitting Diodes – LED). Οι φωτοдиодοι (LED), λόγω των φτωχών αποτελεσμάτων της λειτουργίας τους (ευρύ φάσμα εκπομπής ασύμφωνου φωτός, χαμηλή οπτική ισχύς εξόδου), χρησιμοποιούνται κυρίως σε τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις μικρών σχετικά αποστάσεων όπως τα τοπικά δίκτυα LAN. Η μεγάλη ώθηση στις οπτικές τηλεπικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων οφείλεται κυρίως στις ιδιότητες της διόδου laser. Οι προδιαγραφές των Laser είναι πιο αυστηρές σε σχέση με αυτές των LEDs, μια και το laser είναι μια διάταξη που ενισχύει το φως. Αυτό άλλωστε δηλώνει και το όνομά του που είναι το ακρωνύμιο της φράσης Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – LASER. Πρακτικά, το laser είναι ένας οπτικός ταλαντωτής στο εσωτερικό του οποίου σχηματίζονται στάσιμα ηλεκτρομαγνητικά κύματα με άμεσο αποτέλεσμα, την έξοδο υψηλά σύμφωνης μονοχρωματικής ακτινοβολίας. Από την άλλη μεριά τα LED παρέχουν οπτική εκπομπή χωρίς μηχανισμούς ενίσχυσης (άρα μικρότερη ισχύ) και ασύμφωνη οπτική έξοδο.

Επειδή λοιπόν η φωτεινή πηγή (laser ή LED) δεν εκπέμπει μόνο μια συχνότητα αλλά ομάδα συχνοτήτων πεπερασμένου εύρους, (π.χ. LED με ονομαστικό λ στα 850nm στην πραγματικότητα εκπέμπει μήκη κύματος από 825-875nm) υπάρχουν διαφορετικές

καθυστερήσεις στη διάδοση κάθε μιας συχνότητας (ή κάθε μήκος κύματος) αφού όπως θα δούμε στη συνέχεια αυτές ταξιδεύουν στην οπτική ίνα με διαφορετική ταχύτητα. Αυτές οι χρονικές καθυστερήσεις των διαφόρων συχνοτήτων στο άλλο άκρο του δέκτη έχουν σαν αποτέλεσμα τη χρονική διεύρυνση (διασπορά) του παλμού. Οι χρονικές αυτές καθυστερήσεις μπορεί να οφείλονται σε δύο διαφορετικούς παράγοντες: κατά πρώτον στις συγκεκριμένες ιδιότητες του υλικού του κυματοδηγού, και, κατά δεύτερον, στην επιλεκτική με τη συχνότητα κυματοδότηση της ίνας. Στην πρώτη περίπτωση έχουμε τη διασπορά υλικού Δt και στην δεύτερη τη διασπορά κυματοδηγού δW . Η συνολική διασπορά δ είναι το άθροισμα $\delta = \Delta t + \delta W$.

Διασπορά κυματοδηγού

Στην περίπτωση μονότροπης ίνας ο μοναδικός τρόπος διάδοσης συμπεριφέρεται ως εξής: Στα μικρά μήκη κύματος περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό μέσα στον πυρήνα, στα μεσαία μήκη κύματος διαχέεται ελαφρά μέσα στο περίβλημα ενώ στα μεγάλα μήκη κύματος διαχέεται σε μεγάλο βαθμό στο περίβλημα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου διάδοσης καθώς το μήκος κύματος αυξάνεται και αυτό γιατί ο δείκτης διάθλασης n του μανδύα είναι μικρότερος από του πυρήνα άρα η ταχύτητα των κυμάτων που διαδίδονται εκεί μεγαλύτερη. Δεν πρέπει να συγχέεται όμως αυτός ο μηχανισμός διασποράς με τον μηχανισμό διασποράς τρόπων διάδοσης που θα δούμε παρακάτω.

Ο μηχανισμός αυτός είναι γνωστός ως διασπορά κυματοδηγού. Η διασπορά κυματοδηγού εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπτικής ίνας, και το μήκος κύματος και έχει ως αποτέλεσμα την διαπλάτυνση του διαδιδόμενου σήματος λόγω της διαφορετικής χρονικής καθυστέρησης $\Delta \tau_{wg}$ των μηκών κύματος. Ένα μέτρο λοιπόν αυτής της διαπλάτυνσης που οφείλεται στη διασπορά κυματοδηγού, δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta \tau_{wg} = -n_2 \cdot \Delta \cdot \frac{L}{c} \cdot \frac{\Delta \lambda}{\lambda} V_D$$

όπου V_D είναι η χαρακτηριστική παράμετρος διασποράς κυματοδηγού.

Η διασπορά κυματοδηγού συμβάλλει στη χρωματική διασπορά. Καθώς όμως εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπτικής ίνας μπορεί να πάρει ελεγχόμενες τιμές με την κατάλληλη σχεδίαση και μπορεί να αντισταθμίσει την χρωματική διασπορά.

Το πρόβλημα της διασποράς εξαλείφεται πλήρως αν χρησιμοποιηθεί οπτική πηγή που να εκπέμπει σε ένα μόνο μήκος κύματος. Αυστηρά μονοχρωματικές πηγές βέβαια δεν υπάρχουν. Οι ευρέως χρησιμοποιούμενες φωτεινές πηγές Laser εκπέμπουν σε ένα φασματικό

εύρος $\Delta\lambda$ από 1 έως 10 nm ενώ οι πηγές LEDs έχουν μεγαλύτερο φασματικό εύρος 50 – 100nm.

Σήμερα κατασκευάζονται πηγές με ακόμη μικρότερο εύρος και με αμελητέα χρωματική διασπορά, ωστόσο είναι πολύ ακριβές και χρησιμοποιούνται μόνο σε ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων. Επιπλέον, ακόμη και μονοχρωματική πηγή να υπήρχε, μία διεύρυνση του φασματικού εύρους της είναι αναπόφευκτη λόγω της διαμόρφωσης που πρέπει να εφαρμοστεί για την μεταφορά του σήματος πληροφορίας.

Το ποσοστό διεύρυνσης των οπτικών παλμών εξαρτάται από την αρχική τους χρονική διάρκεια. Παλμοί με μικρή διάρκεια, έχουν μεγάλο εύρος ζώνης και επομένως η διασπορά θα κάνει πιο έντονη την παρουσία της. Επομένως, η σημασία του φαινομένου γίνεται εντονότερη όσο αυξάνει ο ρυθμός του οπτικού σήματος. Η διασπορά κυματοδηγού είναι παρούσα τόσο σε μονότροπη, όσο και σε πολύτροπη ίνα.

Διασπορά υλικού

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

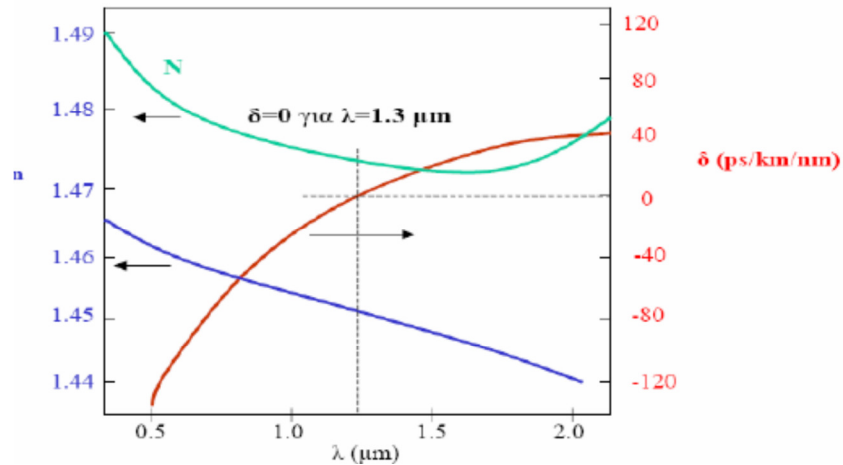
Μια φασματική συνιστώσα συχνότητας f φθάνει στο άκρο της ίνας μετά από χρόνο $t=L/v_g$. Αν $\Delta\lambda$ είναι το εύρος ζώνης του παλμού, τότε η διεύρυνση του παλμού θα είναι

$$\Delta t = \frac{dt}{d\lambda} \cdot \Delta\lambda = L \cdot \frac{d \frac{1}{v_g}}{d\lambda} \cdot \Delta\lambda \Rightarrow \Delta t = L \cdot D \cdot \Delta\lambda$$

Η παράμετρος D δίνει τη διασπορά της ίνας ανά μονάδα μήκους ίνας και ανά μονάδα μήκους κύματος και εκφράζεται σε μονάδες $\frac{ps}{Km \cdot nm}$. Χρησιμοποιώντας τη σχέση $v_g = \frac{c}{N}$, οπού

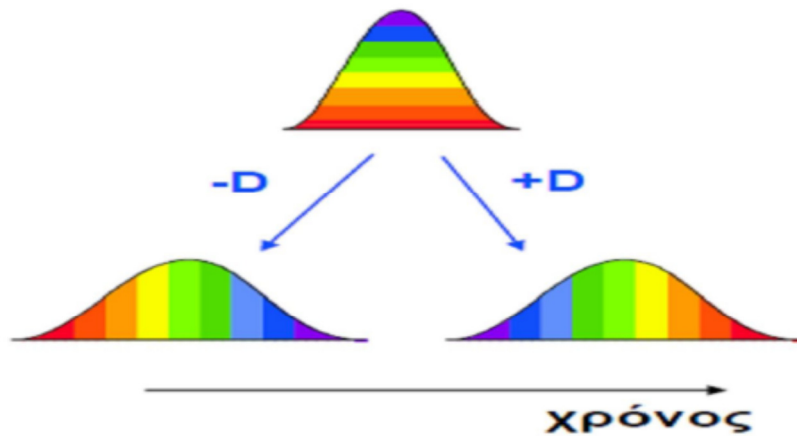
$N = n - \lambda \cdot \frac{dn}{d\lambda}$, ο δείκτης διάθλασης ομάδας, έχουμε για τον συντελεστή διασποράς υλικού

$$D, D = \frac{d \frac{1}{v_g}}{d\lambda} = \frac{1}{c} \cdot \frac{dN}{d\lambda} \Rightarrow D = -\frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2n}{d\lambda^2}$$



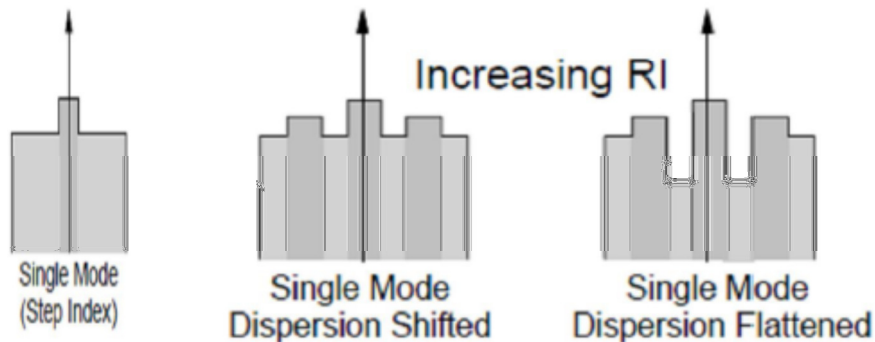
Εικόνα 28. Σχηματική μεταβολή του δείκτη διάθλασης n , του δείκτη διάθλασης ομάδας N και του συντελεστή διασποράς D (δ στο σχήμα) συναρτήσει του μήκους κύματος λ για μονότροπη οπτική ίνα.

Με άλλα λόγια η διασπορά υλικού Δt , οφείλεται στην εξάρτηση του δείκτη διάθλασης $n=n(\lambda)$ από το μήκος κύματος (εικόνα 28). Το γεγονός αυτό μας δίνει και ταχύτητα ομάδας $v_g=v_g(\lambda)$, για κάθε χρωματική συνιστώσα που εξαρτάται από το μήκος κύματος λ .



Εικόνα 29: Διασπορά υλικού. Για θετικές τιμές του D τα μεγαλύτερα μήκη κύματος (κόκκινο στο σχήμα) είναι ταχύτερα από τα μικρότερα (ιώδες) ενώ για αρνητικές τιμές τα μικρότερα μήκη κύματος είναι ταχύτερα.

Για την αντιμετώπιση του συνολικού φαινομένου της χρωματικής (υλικού και κυματοδηγού) διασποράς έχουν δημιουργηθεί διάφοροι τύποι μονότροπων οπτικών ινών. Οι ίνες αυτές έχουν ιδιαίτερο προφίλ δείκτη διάθλασης (Εικόνα 29) με το οποίο επιτυγχάνουν τη ρύθμιση της διασποράς κυματοδηγού και κατ' επέκταση της συνολικής διασποράς.



Εικόνα 30.Χαρακτηριστικά προφίλ δεικτών διάθλασης για Standard SMF, DSF και DFFμονότροπες ίνες.

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

1. Η ίνα επίπεδης διασποράς (Dispersion Flattened Fiber - DFF)

2. Η ίνα μετατοπισμένης διασποράς (Dispersion Shifted Fiber - DSF)

3. Η ίνα επανόρθωσης της διασποράς (Dispersion Compensation Fiber-DCF)

Οι ίνες επίπεδης διασποράς DFF, είναι μονότροπες ίνες με πολύ μικρό συντελεστή διασποράς, περίπου 3 psec/nm/km, σε ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος από τα 1300-1700nm περίπου. Συνήθως, για τις standard μονότροπες ίνες η διασπορά είναι μηδενική στα 1310nm. Σε αυτό το μήκος κύματος η διασπορά κυματοδηγού αντισταθμίζει την διασπορά υλικού και έτσι η συνολική χρωματική διασπορά είναι μηδενική. Σε μικρότερα η μεγαλύτερα μήκη κύματος όμως (850nm ή 1550nm) ο συντελεστής διασποράς παίρνει τιμές από -50 psec/km/nm έως και +20 psec/km/nm όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.16.

Οι ίνες μετατοπισμένης διασποράς DSF, έχουν σχεδιαστεί ώστε να παρουσιάζουν μηδενική διασπορά στα 1550nm και όχι στα 1310nm. Η περιοχή των 1550 nm είναι ιδιαίτερα ελκυστική στις οπτικές επικοινωνίες μια και προσφέρει το πλεονέκτημα της χαμηλότερης εξασθένησης σε σχέση με την περιοχή των 1310nm. Επιπλέον, σ' αυτό το μήκος κύματος μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και οπτικούς ενισχυτές (EDFA) κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για WDM ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων.

Τέλος οι DCF είναι ίνες με μεγάλη τιμή του συντελεστή διασποράς D αλλά με αντίθετο πρόσημο σε σχέση με τις standard SMF ώστε να αντισταθμίζουν τη διασπορά που δημιουργείται από πολλά km standard SMF. Σε ζεύξεις μακρινών αποστάσεων ανάμεσα σε μεγάλα τμήματα SMF παρεμβάλλονται μικρά τμήματα DCF τα οποία «μαζεύουν» ξανά τον παλμό που είχε απλώσει εξαιτίας της διάδοσης του στην ίνα.

II. Διασπορά των τρόπων διάδοσης

Όπως συνάγεται και από την ονομασία της, συναντάται μόνο σε πολύτροπες ίνες. Η ισχύς ενός παλμού, καθώς αυτός κυματοδηγείται σε οπτική ίνα με σταθερούς δείκτες διάθλασης, διαμοιράζεται ανάλογα με τις διαστάσεις του πυρήνα της σε περισσότερους από έναν τρόπους. Η διεύρυνση ενός παλμού λόγω της διασποράς των τρόπων διάδοσης οφείλεται ουσιαστικά στις διαφορετικές χρονικές καθυστερήσεις που υφίστανται οι διάφοροι τρόποι στην πολύτροπη οπτική ίνα. Για μια ίνα μήκους L με σταθερό δείκτη διάθλασης πυρήνα (βηματικού δείκτη διάθλασης – Step Index), η διαπλάτυνση $\Delta\tau_{m(SI)}$ αποδεικνύεται ότι δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta\tau_{m(SI)} = n_c \cdot \frac{L}{2 \cdot c_0} \cdot \Delta$$

Όπου n_c , ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα, c_0 , η ταχύτητα του φωτός στο κενό και Δ , η σχετική διαφορά $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ των δεικτών διάθλασης πυρήνα-μανδύα.

Το πρόβλημα μετριάζεται με τη χρήση οπτικής ίνας, στην οποία ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα δεν είναι σταθερός, αλλά μειώνεται ακτινικά μέχρι το περίβλημα (ίνα διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης - Graded Index). Με αυτό τον τρόπο σχεδόν εξισώνεται ο χρόνος διάδοσης των διαφόρων τρόπων. Για μια τέτοια ίνα η διαπλάτυνση $\Delta\tau_{m(gi)}$ δίνεται από τη σχέση:

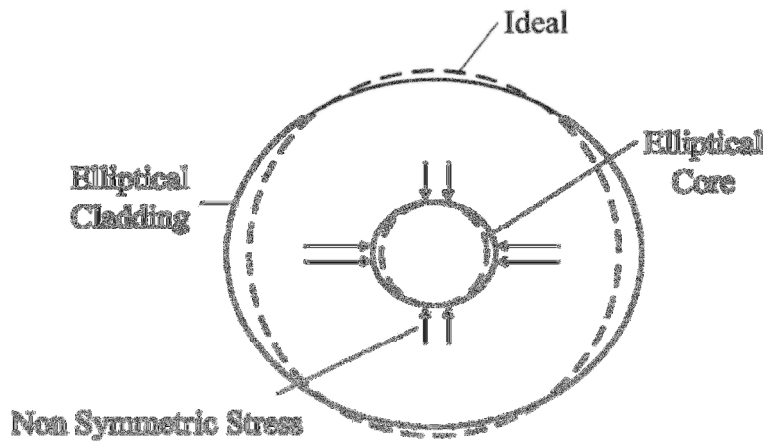
$$\Delta\tau_{m(gi)} = n_c \cdot \frac{L}{4 \cdot c_0} \cdot \Delta^2$$

Όπως αναφέραμε η διασπορά των τρόπων διάδοσης παρατηρείται στις πολύτροπες ίνες. Η κατάσταση μπορεί να βελτιωθεί υιοθετώντας κατάλληλο προφίλ του δείκτη διάθλασης, κατασκευάζοντας δηλαδή ίνες διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης.

III. Διασπορά των τρόπων πόλωσης

Η διασπορά τρόπου πόλωσης (Polarization Mode Dispersion - PMD) οφείλεται στο γεγονός ότι κάθε τρόπος διάδοσης αποτελείται από δύο καταστάσεις πόλωσης (State Of Polarizations - SOPs) κάθετες μεταξύ τους. Υπό ιδανικές συνθήκες ο πυρήνας της ίνας είναι κυκλικός και οι δύο αυτές καταστάσεις πόλωσης διαδίδονται με την ίδια ταχύτητα. Στην πραγματικότητα όμως λόγω κατασκευής ή λόγω μηχανικών ή ακόμα και θερμικών φορτίων που δέχεται η ίνα, το σχήμα του πυρήνα δεν είναι τέλεια κυκλικό αλλά ελαφρά ελλειπτικό όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.19. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ίνα να έχει ελάχιστα διαφορετικό δείκτη διάθλασης για κάθε κατάσταση πόλωσης. Η ιδιότητα αυτή λέγεται διπλοθλαστικότητα (birefringence) και εμφανίζεται και σε κάποιους κρυστάλλους εκ φύσεως.

Φυσικά αυτό σημαίνει ότι οι δύο καταστάσεις πόλωσης που διαδίδονται στους δύο κάθετους μεταξύ τους άξονες θα έχουν και διαφορετικές ταχύτητες πράγμα που οδηγεί στην καθυστέρηση του αργού τρόπου πόλωσης σε σχέση με τον ταχύ. Η καθυστέρηση αυτή είναι γνωστή και ως διαφορική καθυστέρηση ομάδας (Differential Group Delay-DGD) και έχει αποτέλεσμα τη διασπορά του παλμού όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.20. Τυπικές διαφορές στον δείκτη διάθλασης των δύο αξόνων είναι της τάξης του 10^{-5} πράγμα που σημαίνει ότι για μικρές αποστάσεις η καθυστέρηση είναι αμελητέα. Για δίκτυα πολλών χιλιομέτρων όμως ακόμα και αυτή η πολύ μικρή διαφορά μπορεί να δημιουργήσει μεγάλες σχετικά τιμές DGD.



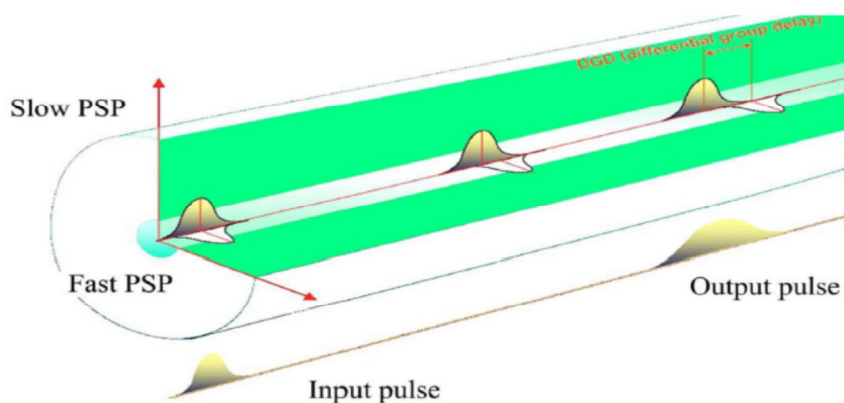
Εικόνα 31. Η ίνα λόγω μη συμμετρικών μηχανικών φορτίων αποκτά ένα ελαφρώς ελλειπτικό σχήμα.

Η σχέση που δίνει τη χρονική καθυστέρηση λόγω PMD είναι:

$$\Delta\tau = DPMD \cdot L$$

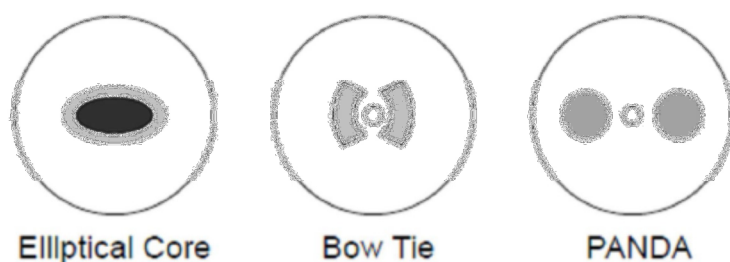
όπου L το μήκος της ίνας σε km και $DPMD$ ο συντελεστής διασποράς πόλωσης τυπικές τιμές του οποίου είναι της τάξης των $0,02\text{psec}/\text{km}^{1/2}$. Όπως προκύπτει για ίνα μήκους 25km επάγει DGD περίπου 0,1psec. Η τιμή αυτή είναι πολύ μικρή συγκρινόμενη με τη διασπορά που προκαλείται από τους υπόλοιπους μηχανισμούς. Όμως σε ζεύξεις μακρινών αποστάσεων και υψηλών ρυθμών μετάδοσης, μεγαλύτερους από 2.5 Gbps, δεν μπορεί να αγνοηθεί.

Πολύ σημαντικός είναι επίσης και ο θόρυβος που προκαλεί η διπλοθλαστικότητα στις ίνες. Στις συνηθισμένες ίνες, καθώς το H/M κύμα διαδίδεται, δε διατηρεί την πόλωση του. Αυτό συμβαίνει εξ αιτίας ατελειών στη σύνθεση και τη γεωμετρία της ίνας. Χωρίς να υπάρχει συνολικά απώλεια ενέργειας, ενέργεια μεταφέρεται από τον ένα άξονα πόλωσης στον άλλο.



Εικόνα 32.διασπορά παλμού σε ίνα λόγω της PMD.

Για να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο αυτό έχουν κατασκευαστεί ίνες με ειδική γεωμετρία (π.χ. ελλειπτικούς πυρήνες) και σύνθεση οι οποίες διατηρούν την πόλωση σταθερή χωρίς να υπάρχει μεταφορά ενέργειας από τη μια κατάσταση πόλωσης στην άλλη. Οι ίνες αυτές είναι γνωστές ως Polarization Maintaining Fibers – PMF. Η διατήρηση της SOP επιτυγχάνεται συνήθως κάνοντας τις ίνες έντονα διπλοθλαστικές ώστε οι δύο καταστάσεις πόλωσης να έχουν πολύ διαφορετικές ταχύτητες και άρα να απέχουν ικανή απόσταση ώστε να μην μπορεί να γίνει σύζευξη (μεταφορά ενέργειας) μεταξύ τους.



Εικόνα 33. Τρεις βασικοί τύποι ινών που διατηρούν την κατάσταση πόλωσης του φωτός ίδια με αυτή που είχε κατά την είσοδο του στην ίνα. Οι σκιασμένες περιοχές έχουν διαφορετικό συντελεστή διαστολής και κατά την ψύξη της ίνας προκαλούν πιέσεις στον πυρήνα κάνοντας τον έντονα διπλοθλαστικό.

Το διάγραμμα ματιού δείχνει την παραμόρφωση του σήματος καθώς αυτό διέρχεται από το οπτικό σύστημα. Παρουσιάζει την υπέρθεση των bits που λαμβάνει ο δέκτης, σε τριάδες. Το άνοιγμα του ματιού και η σαφήνεια των γραμμών που το αποτελούν δίνουν μια ποιοτική εκτίμηση του ρυθμού σφαλμάτων. Όσο πιο ανοιχτό είναι το μάτι και όσο πιο ξεκάθαρες είναι οι γραμμές του, τόσο πιο καθαρό φτάνει το σήμα στον δέκτη και τόσο πιο μικρό είναι το BER. Έχει επιλογές που επιτρέπουν στο χρήστη να μετατοπίσει το κέντρο του διαγράμματος ματιών στο παράθυρο διαγράμματος, να θέσει τον τίτλο του διαγράμματος και το όνομα αρχείου που πρόκειται να γραφτεί και να αποφασίσει εάν θα επιδείξει το ASE του οπτικού σήματος ή τον ηλεκτρικό θόρυβο του σήματος στο σχεδιασμένο διάγραμμα ματιών ή όχι.

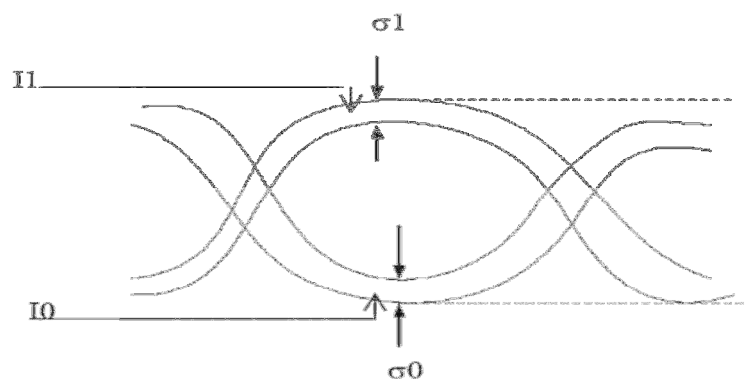
3.3 Υπολογισμός BER από το διάγραμμα ματιού

Ο παράγοντας Q είναι ένα μέτρο της ποιότητας του μεταδιδόμενου σήματος σε σχέση με την αναλογία σήματος-θορύβου (SNR). Για να εκτιμήσουμε τον παράγοντα Q πρέπει να ληφθούν υπόψη οι παράγοντες υποβάθμισης του σήματος που μπορούν να οδηγήσουν τελικά σε λάθη στα δυφία (θόρυβος, χρωματική διασπορά, και μη γραμμικά φαινόμενα ή φαινόμενα πόλωσης). Όσο υψηλότερος είναι ο παράγοντας Q τόσο καλύτερο είναι το SNR και κατ' επέκταση και η πιθανότητα σφαλμάτων.

Ο παράγοντας Q αναπαριστά την ποιότητα του SNR στο διάγραμμα ματιού ενός ψηφιακού σήματος. Το καλύτερο σημείο απόφασης για την τιμή ενός δυφίου αντιστοιχεί στη δειγματοληψία με το όσο το δυνατόν μεγαλύτερο άνοιγμα του ματιού. Καθώς το άνοιγμα του ματιού γίνεται πιο μεγάλο, η διαφορά στην τιμή μεταξύ του λογικού '0' και του λογικού '1' μεγαλώνει και σαν αποτέλεσμα ο παράγοντας Q και το BER επίσης μεγαλώνουν. Ο παράγοντας προσεγγίζεται μαθηματικά λύνοντας την παρακάτω σχέση:

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$$

όπου I_1 και I_0 είναι οι αριθμητικές τιμές του λογικού '0' και του λογικού '1' αντίστοιχα, ενώ σ_1 και σ_0 είναι οι τιμές των αντίστοιχων αποκλίσεων, όπως παρουσιάζονται στο σχήμα 2.5.



Εικόνα 34. Παράμετροι του διαγράμματος ματιού.

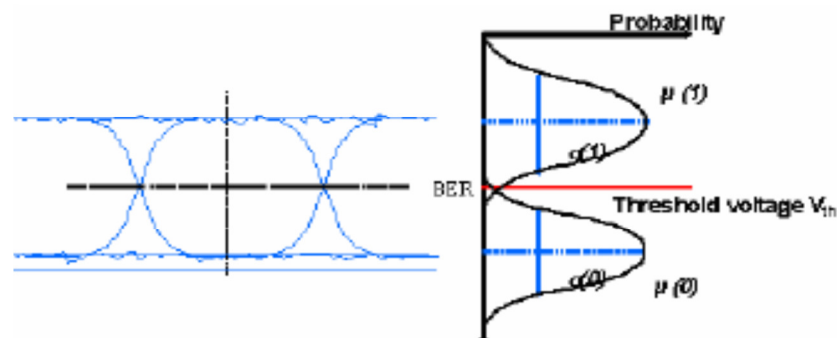
Η παραπάνω ισότητα εξηγεί τη σχέση μεταξύ του παράγοντα Q και του ανοίγματος του ματιού όπως επίσης και του SNR. Γι' αυτούς τους ορισμούς υποθέσαμε μια Γκαουσιανή κατανομή για το θόρυβο, όπως επίσης και ίση πιθανότητα για μετάδοση του λογικού '1' και του λογικού '0' [$P(1) = P(0) = 1/2$].

BER και Παράγοντας Q

Στον δέκτη το πλάτος του σήματος συγκρίνεται με ένα συγκεκριμένο κατώφλι για να καθοριστεί αν το δυφίο είναι '1' ή '0'. Σαν αποτέλεσμα το BER είναι ίδιο με την πιθανότητα ενός λάθους και δίνεται απ' την παρακάτω σχέση:

$$\text{BER} = n_0 p(01) + n_1 p(10)$$

όπου n_1 και n_0 είναι ο αριθμός των '1' και '0' αντίστοιχα στην συχνότητα ψηφίου με $n_1 = 1 - n_0$ όπου $p(01)$ είναι η υποθετική πιθανότητα να παρουσιαστεί ένας '1' (ενώ στην πραγματικότητα είναι '0') και $p(10)$ είναι η πιθανότητα να παρουσιαστεί ένα '0' αντί για '1'. Για PRBS's αυτό είναι $n_1 = n_0 = 1/2$. Η συνάρτηση πιθανότητας πυκνότητας σφαλμάτων στα επίπεδα '1' και '0' φαίνεται στο σχήμα 2.6. Το πλάτος των καμπύλων αναπαριστά θόρυβο που έχει προστεθεί στο σήμα. Λιγότερος θόρυβος έχει σαν αποτέλεσμα πιο στενό γράφο με μικρότερη επικάλυψη. Η επικαλυπτόμενη περιοχή δείχνει το BER.



Εικόνα 35. Η συνάρτηση πιθανότητας πυκνότητας σφαλμάτων στα επίπεδα '1' και '0'.

Σαν επακόλουθο, το BER δημιουργείται απ' τις ουρές των PDF θορύβου στα επίπεδα '1' και '0'.

Στο ιδανικό κατώφλι τάσης έχουμε το ελάχιστο BER το οποίο είναι μια πολύ καλή στρωγγυλοποίηση ίση με $\text{erfc}(Q)$:

$$\text{BER} = \frac{e^{-\left(\frac{Q^2}{2}\right)}}{Q\sqrt{2\pi}}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°

4.1 Εισαγωγή στο Optical Time Domain Reflectometer (OTDR)

(Όργανο Μέτρησης Ανακλάσεων Οπτικής Ισχύος στο πεδίο του χρόνου)

Το OTDR είναι ένα όργανο που χρησιμοποιείται ευρέως για τον έλεγχο ποιότητας εγκατεστημένων ή προς εγκατάσταση καλωδίων 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. Ένα τυπικό OTDR απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



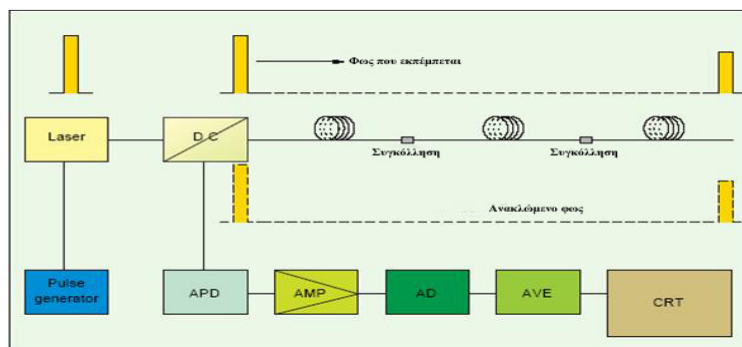
Εικόνα 36. Φορητή Συσκευή OTDR

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.

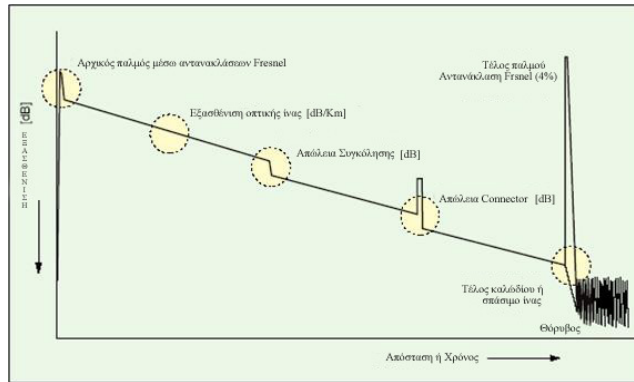
4.2 Αρχή Λειτουργίας του OTDR

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, συγκολλησεις, 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.



Εικόνα 37. Σχηματική αναπαράσταση των βασικών δομικών στοιχείων της διάταξης OTDR

Το σύστημα συντεταγμένων απεικονίζεται μαζί με άλλα χρήσιμα στοιχεία στην οθόνη του οργάνου. Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται ένα πρότυπο της μέτρησης που διενεργεί το OTDR.



Εικόνα 38. Απλοποιημένο διάγραμμα από OTDR.

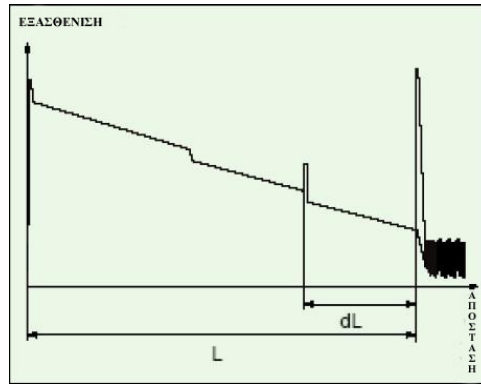
4.3 Μέτρηση Απόστασης Ίνας

Με τη χρήση ενός OTDR είναι δυνατό να προσδιοριστεί το μήκος μίας οπτικής ζεύξης με ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια. Η μέτρηση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική επίσης για να προσδιορισθεί σημείο διακοπής μίας ζεύξης, ή εισαγωγής υψηλής εξασθένησης. Η μέτρηση επιτυγχάνεται έμμεσα μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$L = \frac{v \cdot t}{2} = \frac{c \cdot t}{2 \cdot n}$$

όπου v η ταχύτητα διάδοσης του φωτός στην οπτική ίνα, t ο χρόνος που απαιτείται να

διαδοθεί και να ανακλαστεί το φως πίσω στο όργανο, L το μήκος της οπτικής ίνας, c η ταχύτητα του φωτός στο κενό και n ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα της οπτικής ίνας. Στην ουσία το όργανο μετράει το χρόνο διάδοσης και επιστροφής της φωτεινής δέσμης και έχοντας μία τιμή του δείκτη διάθλασης n υπολογίζει το μήκος με βάση τη παραπάνω σχέση. Είναι λοιπόν προφανές ότι η σωστή επιλογή δείκτη διάθλασης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια της μέτρησης.



Εικόνα 39.OTDR καμπύλη και η χρήση της για τον υπολογισμό μήκους ζεύξης.

4.4 Ρυθμίσεις ενός OTDR

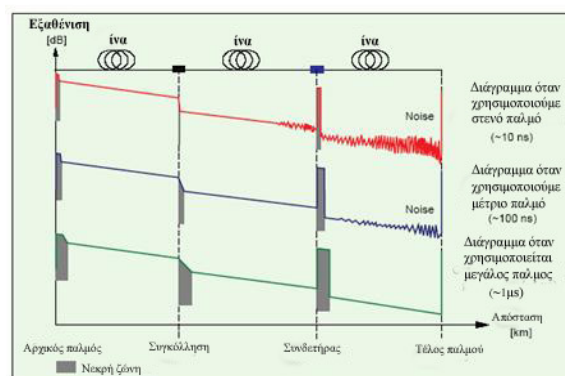
Οι σωστές ρυθμίσεις ενός OTDR παίζουν σημαντικό ρόλο στην εξαγωγή αξιόπιστων μετρήσεων. Χαρακτηριστικά κρίσιμης σημασίας είναι τα παρακάτω:

1. Νεκρή Ζώνη

Κάθε συγκόλληση ή συνδετήρας προκαλούν μία παρενόχληση στο διαδιδόμενο και ανακλώμενο οπτικό σήμα. Αυτού του είδους η επίδραση επιβάλλει μία ζώνη συγκεκριμένου μήκους μετά την ένωση για την οποία δεν είναι δυνατό να μελετήσουμε το οτιδήποτε. Για παράδειγμα η συγκόλληση που βρίσκεται στο εσωτερικό ενός κατανεμητή (Optical Distribution Frame) δεν είναι δυνατό να ανιχνευθεί από ένα OTDR, αφού πριν από αυτή υπάρχει ο συνδετήρας που ενώνει την οπτική ίνα με τον κατανεμητή. Σε αυτή τη περίπτωση αν η συγκόλληση δεν είχε γίνει σωστά θα βλέπαμε στο διάγραμμα του OTDR ότι η εξασθένιση είναι μεγαλύτερη από τη προβλεπόμενη τιμή που αναμένεται. Θα πρέπει τότε πρώτα να ελέγξουμε το συνδετήρα αν είναι καθαρισμένος και μετά αν η μέτρηση μας εμφανίζει τις ίδιες τιμές θα πρέπει να ξαναγίνει η συγκόλληση. Επίσης για μία οπτική ίνα που έχει συγκολληθεί δύο φορές σε απόσταση μερικών μέτρων (έως 3m) δεν είναι δυνατή η διάκριση των δύο συγκολλήσεων από το όργανο. Αντί αυτών θα φανεί μία συγκόλληση της οποίας οι συνολικές απώλειες είναι το άθροισμα των επιμέρους απωλειών. Πρέπει να τονίσουμε όμως ότι στην πράξη τότε δεν θα κάναμε δύο συγκολλήσεις σε απόσταση έως 3m διότι δεν είναι αποδεκτό κάτι τέτοιο από οποιαδήποτε εταιρεία που κάνει συγκολλήσεις. Αντί για δύο συγκολλήσεις θα αποκόπταμε το ελαττωματικό σημείο της οπτικής ίνας και θα κάναμε μία συγκόλληση. Για τις συγκολλήσεις θα μιλήσουμε παρακάτω.

2. Εύρος παλμών

Η «νεκρή ζώνη» μπορεί να περιοριστεί σε μέγεθος αν οι παλμοί που εκπέμπονται από το OTDR είναι όσο το δυνατό στενότερου εύρους. Δυστυχώς μία τέτοια ρύθμιση δεν είναι άμοιρη μειονεκτημάτων, μιας και οι στενοί παλμοί δεν είναι δυνατό να διαδίδονται για μεγάλες αποστάσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένας στενός παλμός λόγω των απωλειών και των εξασθενίσεων που συμβαίνουν κατά τη μετάδοση στην οπτική ίνα αν χρησιμοποιηθεί σε μεγάλες αποστάσεις θα “χαθεί” ο παλμός μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και το OTDR θα εμφανίζει ότι η σύνδεση “κόβεται”(σπάσιμο ή τέλος ίνας) και τα αποτελέσματα θα είναι ανακριβής για το δίκτυο που ελέγχουμε. Σ’ αυτή την περίπτωση λοιπόν περιορίζεται η ικανότητα του οργάνου για τον καθορισμό χαρακτηριστικών στις μεγάλες αποστάσεις. Συμπερασματικά, οι μεγάλοι εύρους παλμοί είναι κατάλληλοι για το χαρακτηρισμό μίας οπτικής ζεύξης μεγάλης σχετικά απόστασης, με τίμημα την μεγέθυνση της νεκρής ζώνης. Για παράδειγμα αν θέλουμε να μετρήσουμε δίκτυο 2 έως 4 χιλιόμετρα θα χρησιμοποιούσαμε παλμό των 100ns. Για μεγαλύτερη απόσταση όπως 40 χιλιόμετρα θα χρησιμοποιούνταν παλμός 1μs. Αντίθετα οι στενοί παλμοί αυξάνουν τη διακριτική ικανότητα του οργάνου, μειώνοντας το μήκος της νεκρής ζώνης, αλλά ταυτόχρονα λόγω της ευαισθησίας τους, μειώνουν την απόκριση του οργάνου στις μεγάλες αποστάσεις και αποφεύγονται να χρησιμοποιούνται διότι όταν κάνουμε μετρήσεις με OTDR μας ενδιαφέρει οι συνολικές απώλειες του δικτύου που κάνουμε μετρήσεις να τηρούν τις τα όρια με βάση τις προδιαγραφές που έχει δώσει ο κατασκευαστής. Συνήθως η σωστή ρύθμιση επιτυγχάνεται από την αυτόματη λειτουργία που διαθέτουν σαν επιλογή σχεδόν όλα τα εμπορικά διαθέσιμα όργανα. Η αυτόματη λειτουργία επιλέγει το σωστό εύρος παλμών με κριτήριο την όσο το δυνατόν καλύτερη απόδοσή του για τον ικανοποιητικό καθορισμό όλων των χαρακτηριστικών της ζεύξης.



Εικόνα 40. Διαγράμματα μεταβάλλοντας το εύρος του παλμού.

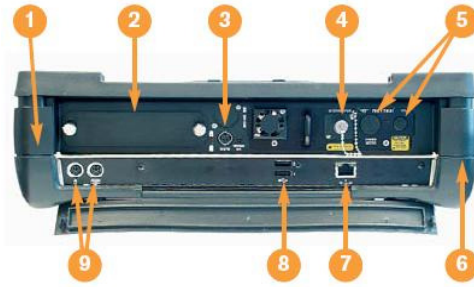
3. Δυναμική περιοχή

Η δυναμική περιοχή του OTDR καθορίζεται από το πόσο ισχυρή είναι η οπτική πηγή του οργάνου και ταυτόχρονα από το πόσο ευαίσθητη είναι η φωτοδίοδος χιονοστιβάδας (APD) που λαμβάνει το ανακλώμενο οπτικό σήμα. Όσο αυξάνεται η ισχύς και η ευαισθησία του πομπού και του δέκτη αντίστοιχα, τόσο το όργανο θεωρείται πληρέστερο, αφού αποδίδει τα χαρακτηριστικά της ζεύξης με μεγάλη ακρίβεια για μεγαλύτερες αποστάσεις. Η δυναμική περιοχή ενός τυπικού OTDR επιτρέπει την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων για αποστάσεις μέχρι 100Km, σε μία τυπική ίνα η οποία θεωρείται επαρκής για το χαρακτηρισμό των σημερινών οπτικών ζεύξεων. Η δυναμική περιοχή σε αυτή την περίπτωση μπορεί να προσδιορισθεί ποσοτικά σκεπτόμενοι ότι 100Km εισάγουν 35dB απωλειών στο μήκος κύματος των 1310nm. Αν συμπεριληφθούν άλλα 5dB απωλειών λόγω συγκολλήσεων και συνδέσεων στον καταναμητή, συμπεραίνουμε ότι η δυναμική περιοχή πρέπει να είναι ίση με 40dB. Επίσης αν αναλογιστούμε ότι το σήμα που στέλνουμε θα υποστεί τη διαδικασία δύο φορές από το ένα άκρο της ζεύξης στο άλλο (αρχικά διαδιδόμενο και κατόπιν ανακλώμενο), τότε συμπεραίνουμε ότι η δυναμική περιοχή πρέπει να είναι 80dB, αριθμός ιδιαίτερα υψηλός και είναι δυνατό να επιτευχθεί για μικρό εύρος παλμών.

4.5 CMA5000

Το CMA5000 είναι μία ισχυρή συσκευή βασισμένη στο λειτουργικό σύστημα των windows (XP), με οθόνη με υψηλής ανάλυσης χρωμάτων που είναι εύκολο να διαβαστεί και σε εσωτερικούς χώρους και σε εξωτερικούς. Επίσης η οθόνη είναι αφής, έχει ειδικά interfaces για τον χρήστη και διάφορες οπτικές επιλογές για να καλύψουν ανάγκες ελέγχου είτε σε μονότροπες είτε σε πολύτροπες ίνες σε αποστάσεις που ξεκινούν από 10 μέτρα και φτάνουν τα 250 χιλιόμετρα. Περιλαμβάνει επιπλέον χαρακτηριστικά όπως USB θύρες, interface 10/100 Ethernet και αφιερωμένοι μέθοδοι ελέγχου για μεγαλύτερη ευκολία στη χρήση και ευελιξία.

Εικόνα 41. Χαρακτηριστικά CMA5000



1. Μηχανισμός CD-R/W ή εσωτερική δισκέτα
2. Μπαταρία Λιθίου
3. Φορτιστής/Adapter Εναλλασσόμενου ρεύματος με ένδειξη σε τι επίπεδο βρίσκεται η φόρτιση
4. Σύνδεσμος γενικής χρήσεως ο οποίος δέχεται όλων των ειδών adapters.
5. Επιλογές για το συνολικό έλεγχο απωλειών για ολοκληρωμένο έλεγχο(all-in-one)
6. 20 GB σκληρός δίσκος
7. Θύρα Ethernet 10(Ethernet)/100(Γρήγορο Ethernet) για σύνδεση δικτύου.
8. Θύρα USB
9. Θύρες PS/2 για να συνδέσουμε εξωτερικό πληκτρολόγιο και ποντίκι.

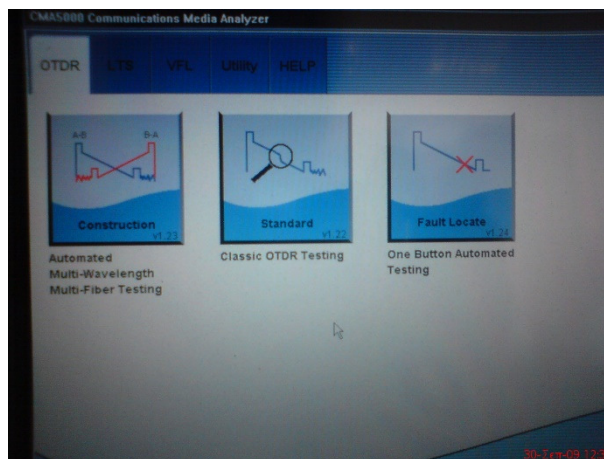
Λειτουργία Module

Wizard Εγκατάστασης Ίνας και Χρήση OTDR

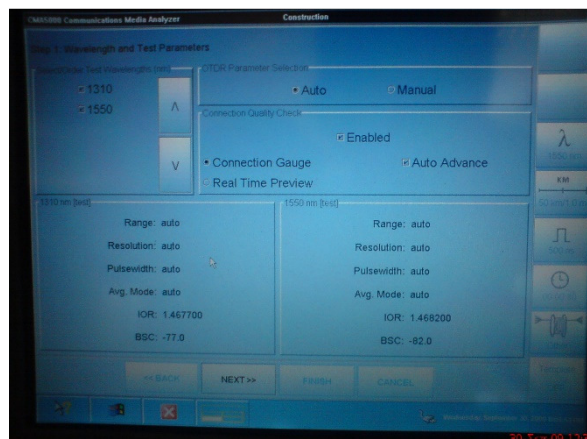
Μέσω του συγκεκριμένου λογισμικού εξοικονομούμε χρόνο που θα χρειαζόταν για επαναλαμβανόμενες διεργασίες όσον αφορά την επιλογή παραμέτρων, ανάλυση και αποθήκευση αρχείου. Ένας wizard καθοδηγεί τον χρήστη μέσω μερικών γρήγορων βημάτων εγκατάστασης, μετά διαχειρίζεται ολόκληρη τη λειτουργία του ελέγχου, δίνοντας ακόμα και οδηγίες για το ποια ίνα θα συνδέσει. Έτσι ο χρήστης συγκεντρώνεται στον έλεγχο και όχι στο να βρει ποιο πλήκτρο θα χρησιμοποιήσει, μειώνοντας τη πιθανότητα ο χρήστης να κάνει λάθη στην ονομασία αρχείου και στην ιχνηλάτηση δεδομένου ότι στην κατασκευή OTDR γίνεται αυτόματα. Έτσι αυτοματοποιούνται κάποιες διεργασίες και απλοποιεί τον έλεγχο σε περίπτωση που έχουμε μεγάλο αριθμό ιών. Έχοντας ανοικτό το μενού του OTDR θα εμφανιστεί το εξής:

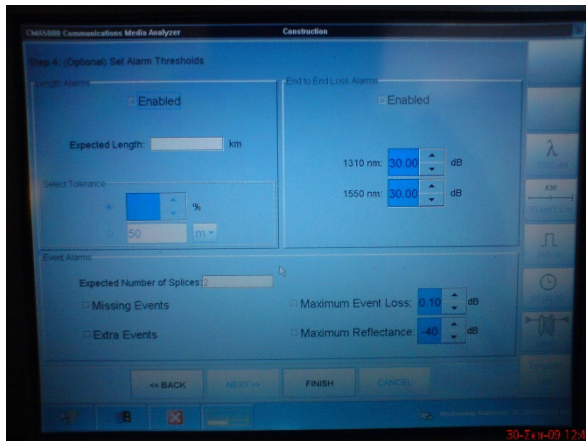
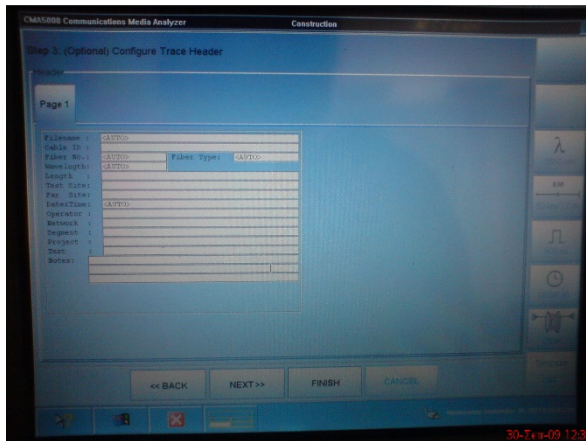
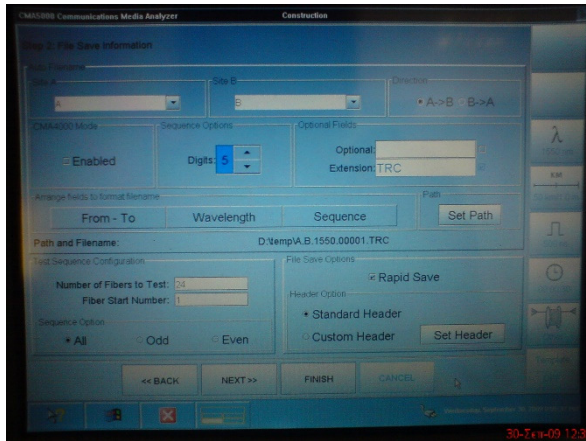


Το αριστερό IDLE είναι το module και αφορά τις μονότροπες ίνες και μήκος κύματος 1330 και 1550 μέτρα. Το δεξί IDLE είναι το module που αφορά τις πολύτροπες ίνες και μήκος κύματος 800 και 1550 μέτρα. Πιέζουμε στην οθόνη αφής ένα από τα δύο IDLE και θα εμφανιστεί το εξής μενού:

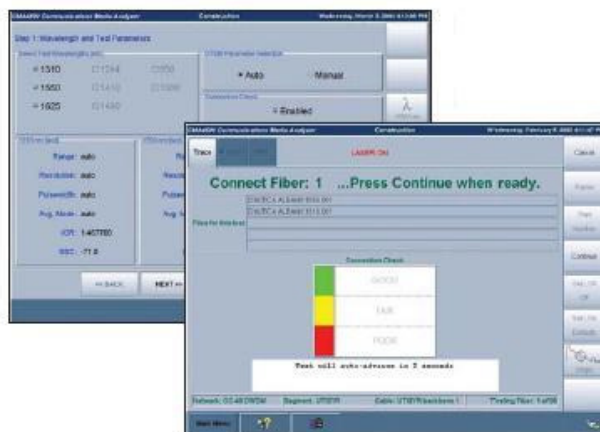


Επιλέγουμε αριστερά το Construction(Κατασκευή OTDR) πιέζοντας την οθόνη αφής. Μόλις το επιλέξουμε ακολουθούν 4 βήματα όπου ρυθμίζουμε κάποιες παραμέτρους πριν ξεκινήσει ο έλεγχος OTDR. Τα 4 αυτά βήματα φαίνονται στις παρακάτω εικόνες.



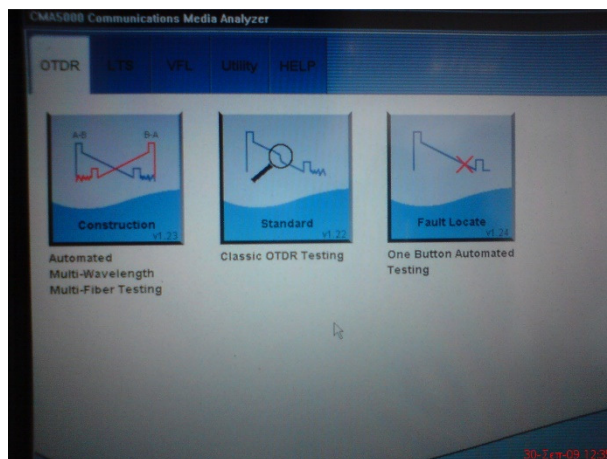


Μόλις γίνει η ρύθμιση των παραμέτρων στο επόμενο μενού εμφανίζει αν η σύνδεση των συνδέσμων (connectors) έχει γίνει σωστά. Αν έχει γίνει σωστά μετά από λίγα δευτερόλεπτα ξεκινάει ο έλεγχος.



Εικόνα 42. Οπτικός Ανιχνευτής Λάθους

Με τη μέθοδο αυτή επιτρέπεται στο χρήστη να εντοπίσει οπτικά αν υπάρχει κάποιο σπάσιμο ή απότομη καμπύλη της ίνας. Το μόνο που χρειάζεται είναι να συνδεθεί η ίνα που θέλουμε να ελέγξουμε με το μηχάνημα και μετά επιλέγουμε Fault Locate, ώστε η συσκευή μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα να μας παρέχει λεπτομέρειες της βλάβης, όπως σε ποιο χιλιόμετρο υπάρχει βλάβη και συνολικές απώλειες. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει βλάβη μας εμφανίζει τις συνολικές απώλειες και το μέγεθος του δικτύου που μετράμε (σε χλμ).



Έτσι μόλις επιλέξουμε module στο μενού που εμφανίζεται επιλέγουμε One Button Automated Testing. Αμέσως μετά ελέγχει αν συνδέθηκε σωστά οι σύνδεσμοι (connectors) και ξεκινάει ο έλεγχος.



Εικόνα 43. Συνολικός Έλεγχος Απωλειών (Loss Test Set)

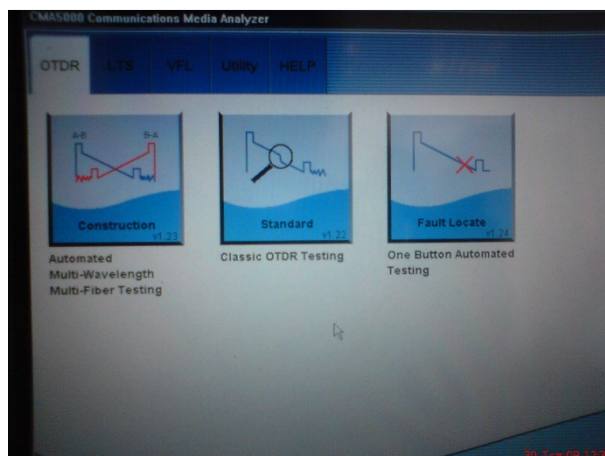
Στον συνολικό έλεγχο απωλειών προσφέρεται μια 'προαιρετική' πηγή φωτός και ένας μετρητής ισχύος για να έχουμε πιο ακριβείς μετρήσεις απωλειών λόγω ανοίγματος. Παρέχει ένα GUI που είναι εύκολο να χρησιμοποιηθεί, με χρήσιμα χαρακτηριστικά όπως ενδείξεις PASS/FAIL (επιτυχίας/αποτυχίας) που βασίζονται στις ρυθμίσεις του κατωφλίου που έχει ορίσει ο χρήστης και ένα πλήρως ρυθμιζόμενο πίνακα δεδομένων που υποστηρίζει πολλαπλά μήκη κύματος και αμφίδρομο averaging (τεχνική κατά την οποία, το ίδιο σήμα μεταδίδεται πολλές φορές και καταγράφεται η μέση τιμή του).



Εικόνα 44. Standard OTDR

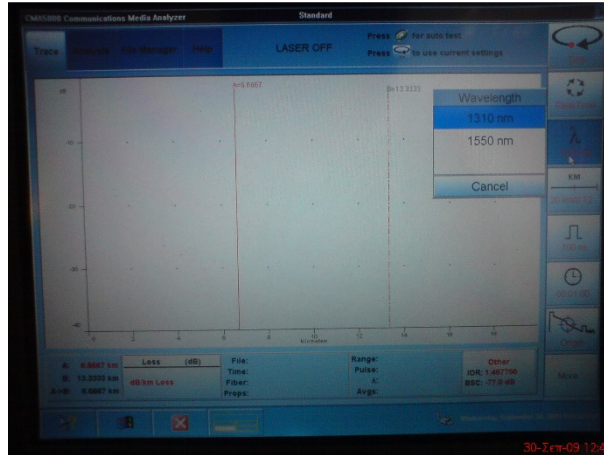


Επιλέγουμε το επιθυμητό module και μεταβαίνουμε στο παρακάτω μενού όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:

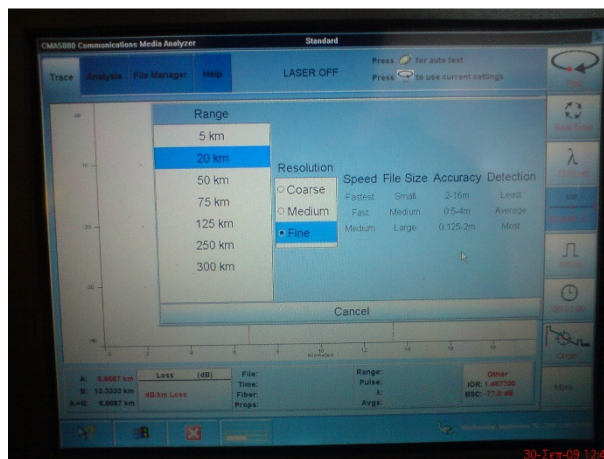


Στο μενού που εμφανίζεται επιλέγουμε Classic OTDR Testing και πιέζουμε την οθόνη αφήs. Μέσω του standard OTDR μπορούμε να κάνουμε, ανάλογα με τις ανάγκες μερικές ή όλες τις ρυθμίσεις χειροκίνητα παρέχοντας τη δυνατότητα βελτιστοποίησης των παραμέτρων. Προϋποθέτει να υπάρχει εμπειρία από το χρήστη ώστε να μπορεί να έχει μεγαλύτερο έλεγχο στις λειτουργίες του OTDR. Έτσι κάποιες παράμετροι όπως μήκος κύματος, μέγεθος παλμού, εμφάνιση/ανάλυση και κατάσταση averaging μπορούν εύκολα να ρυθμιστούν μέσω της οθόνης αφήs και το ειδικό interface με πλήκτρα του CMA5000. Επίσης η αποθήκευση δεδομένων μπορεί να ρυθμιστεί με μεγάλη ευκολία με τον σκληρό δίσκο 20 Gb που περιλαμβάνει χωρίς να υπάρχουν περιορισμοί στα ονόματα των αρχείων ή τη χωρητικότητα. Ακόμα ο χρήστηs μπορεί να επιλέξει το format του αρχείου που επιθυμεί. Επιπλέον

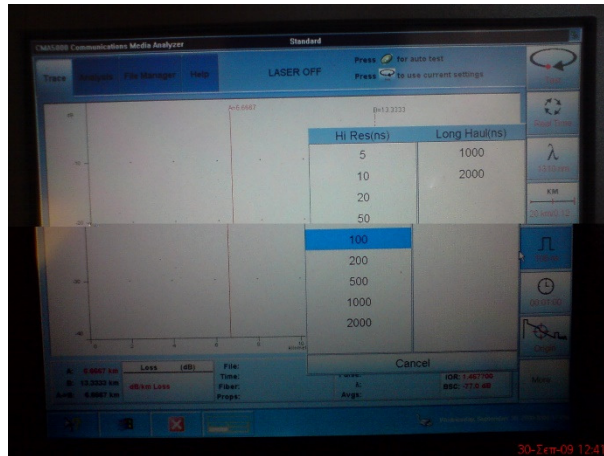
χαρακτηριστικά που παρέχονται όπως η ταυτόχρονη *επικάλυψη(overlay) 8 ιχνών(traces), 4 επιλογές εμφάνισης στην οθόνη και η δυνατότητα από το χρήστη να επιλέξει την κατάσταση απωλειών που χρειάζεται διασφαλίζει στο χρήστη όλα τα εργαλεία που χρειάζεται για να ελέγξει ένα δίκτυο.



Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται το μενού επιλογής για το μήκος κύματος.



Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται το μενού επιλογής για την εμβέλεια που θα μετρήσει το OTDR.



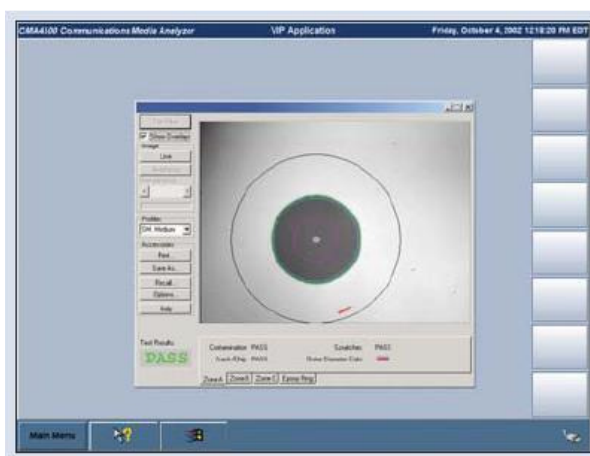
Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται το μενού επιλογής για το παλμό που θα στέλνει το μηχανήμα.



Εικόνα 45. Τηλεοπτικός καθετήρας επιθεώρησης connector

Έρευνες έδειξαν ότι το 75% της αποτυχίας για όλα τα οπτικά δίκτυα οφείλεται στο γεγονός της μη επαρκούς ποιότητας του συνδέσμου. Η εφαρμογή του τηλεοπτικού καθετήρα επιθεώρησης δίνουν τη δυνατότητα στο χειριστή να αναλύσει και να καταγράψει την κατάσταση του συνδέσμου (connector) με ασφάλεια και μεγάλη ευκολία. Ο τηλεοπτικός καθετήρας επιθεώρησης χρησιμοποιεί μία κάμερα 1/3" ίντσες για να μετατρέψει τις εικόνες του συνδέσμου σ' ένα ψηφιακό σήμα το οποίο εμφανίζεται μετά στην οθόνη. Τις εικόνες του συνδέσμου μπορούμε να τις δούμε ή να τις αποθηκεύσουμε σε ποικίλους τύπους γραφικών αρχείων για να τις ξαναδούμε αργότερα ή να καταγράψουμε την ποιότητα του συνδέσμου. Ο τηλεοπτικός καθετήρας επιθεώρησης connector έχει διάφορους adapter διαθέσιμους, ώστε να υπάρχει δυνατότητα να δούμε απευθείας το άκρο ενός καλωδίου patch καθώς και τα καλώδια που είναι ήδη συνδεδεμένα σ' ένα patch panel. Με την εφαρμογή αυτή μπορούμε να

αποφύγουμε πιθανούς τραυματισμούς των ματιών καθώς δεν χρειάζεται να χρησιμοποιήσουμε ειδικά μικροσκόπια για τους συνδέσμους και έτσι δεν έρχεται σε επαφή το ανθρώπινο μάτι με το σύνδεσμο.



Εικόνα 46. Διαγράμματα από Μετρήσεις OTDR

4.6 Συγκόλληση Οπτικών Ινών

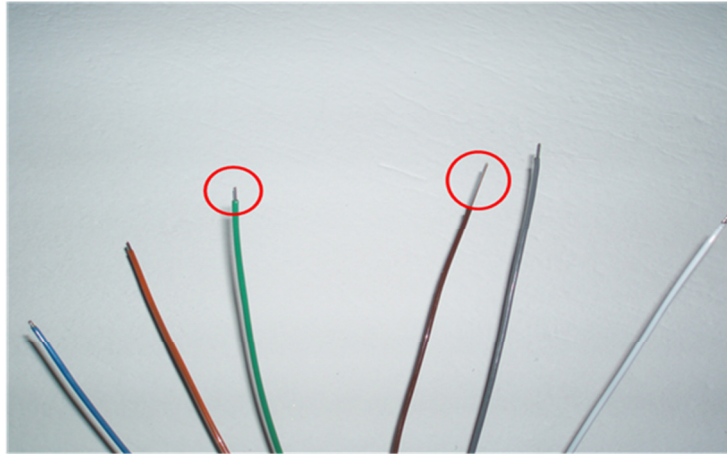
Οι συγκολλήσεις είναι μία διαδικασία σημαντική διότι κρίνεται κατά μεγάλο μέρος η ποιότητα του δικτύου στο οποίο κάνουμε συγκολλήσεις. Οι συγκολλήσεις γίνονται σε κόμβους στους οποίους υπάρχουν κουλούρες με 72 ίνες (σωλήνας τυλιγμένος κυκλικά στον οποίο εμπεριέχονται 72 ίνες). Ο τύπος της ίνας που χρησιμοποιείται στους κόμβους και κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης είναι single-mode (μονότροπη). Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε μια ενδεικτική συσκευή συγκόλλησης. Ο συγκολλητής χρησιμοποιείται για τη δημιουργία χαμηλών απωλειών συνδέσεων οπτικών ινών μέσω τήξης ώστε να επιτυγχάνεται η όσο το δυνατόν καλύτερη συνέχεια μίας ζεύξης. Η σωστή λειτουργία ενός fusion splicer προϋποθέτει την ύπαρξη κάποιων συνθηκών. Οι συνθήκες αυτές αφορούν τον τύπο των οπτικών ινών που θα τοποθετηθούν (single mode, multi mode, κτλ), τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτών, την απόσταση μεταξύ τους, την καθαρότητά τους κτλ. Η διάταξη λειτουργίας ενός συγκολλητή απεικονίζεται στη παρακάτω εικόνα. Η διαδικασία της συγκόλλησης σε ένα fusion splicer επιτυγχάνεται με την εφαρμογή υψηλής τάσης σε δύο ακίδες και ως εκ τούτου τη δημιουργία τόξου που λιώνει τις δύο ίνες τοπικά. Σε μία οπτική ίνα λόγω της διαφορετικότητας του υλικού του πυρήνα σε σχέση με αυτό του μανδύα ισχύουν διαφορετικές θερμοκρασίες τήξης για το κάθε υλικό και εν προκειμένω η

θερμοκρασία τήξης του πυρήνα είναι χαμηλότερη αυτής του μανδύα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο πυρήνας της ίνας να είναι αρκετά πιο μαλακός από το μανδύα κατά τη διάρκεια της τήξης και έτσι να επιτυγχάνεται η συγκόλληση μεταξύ δύο ινών ενώ παράλληλα ο μανδύας τους να παραμένει ανεπηρέαστος.



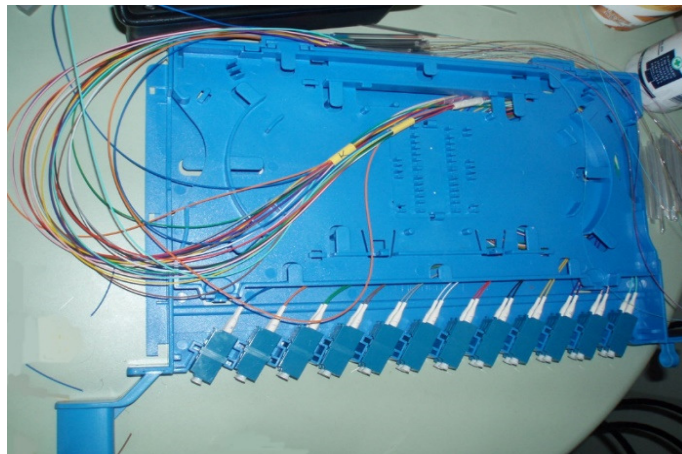
Εικόνα 47. Fujicura FSM-60s

Οι ίνες είναι πολύ εύθραυστες. Υπάρχει ο κίνδυνος να “σπάσουν” ή να “τραυματιστούν” και το αποτέλεσμα θα είναι να μην μεταφέρουν δεδομένα. Γι’αυτό το λόγο πάντα υπάρχει προστασία γύρω από τις ίνες, οι λεγόμενοι απομονωτές. Οι απομονωτές χωρίζονται σε 6 ομάδες χρωμάτων: μπλε-πορτοκαλί-πράσινο-καφέ-γκρι-άσπρο και ο καθένας περιέχει 12 ίνες. Οι ίνες για να τις ξεχωρίζουμε έχουν ένα λεπτό χρωματιστό περίβλημα που προστατεύει το μανδύα. Τα χρώματα που διακρίνονται στις ίνες είναι τα εξής:μπλε-πορτοκαλί-πράσινο-καφέ-γκρι-άσπρο-μαύρο-κόκκινο-κίτρινο-ροζ-βιολετί-θαλασσι. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε τους 6 απομονωτές και στην άκρη τους διακρίνονται ελάχιστα οι ίνες.(Ενδεικτικά στους 2 απομονωτές είναι κυκλωμένο το σημείο όπου είναι οι ίνες).



Εικόνα 48. Χρωματική ομάδα 6 απομονωτών

Σαν επιπλέον προστασία οι απομονωτές περικλείονται από ένα εξωτερικό κάλυμμα (jacket) το οποίο είναι ένα σκληρό και καθόλου εύκαμπτο υλικό για λόγους προστασίας των οπτικών ινών από τυχόν φθορές. Μια 72άρα ίνα δηλαδή είναι το σύνολο 6 απομονωτών που εμπεριέχει ο καθένας τους 12 ίνες και όπως προαναφέρθηκε νωρίτερα η 72άρα χρησιμοποιείται στη διαδικασία της συγκόλλησης. Η συγκόλληση είναι μια διαδικασία κατά την οποία γίνεται κόλληση οπτικών ινών με rigtail όπου το τελευταία καταλήγουν σε συνδετήρες (connectors).



Εικόνα 49. Κασετίνα με 24 rigtails που καταλήγουν σε συνδέσμους

Υπάρχουν αρκετές απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούνται ώστε να είμαστε σε θέση να υλοποιήσουμε μία καλή συγκόλληση.

α) Ποιότητα της ίνας: Ο τερματισμός της ίνας πρέπει να είναι κάθετος στον διαμήκη άξονα της ίνας. Ο τερματισμός της ίνας πρέπει να είναι επίπεδος χωρίς ανομοιομορφίες. Εάν οι παραπάνω συνθήκες δεν ικανοποιούνται ο πυρήνας θα παραμορφωθεί κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.

β) Οι πυρήνες των ινών προς συγκόλληση δεν πρέπει να είναι έκκεντροι.

γ) Κατά τη διάρκεια της σύντηξης οι ίνες πρέπει να οδηγούνται η μία προς την άλλη. Το πλησίασμα της μία ίνας προς την άλλη πρέπει να είναι περίπου 2-3 μm μεγαλύτερο από το κενό που είχαν οι δύο ίνες πριν ξεκινήσει η τήξη τους. Αν το πλησίασμα είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο από την παραπάνω απόσταση τότε οι πυρήνες θα παραμορφωθούν.

δ) Ο τερματισμός της κάθε ίνας πρέπει να είναι απόλυτα καθαρός. Οποιαδήποτε σκόνη μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα.

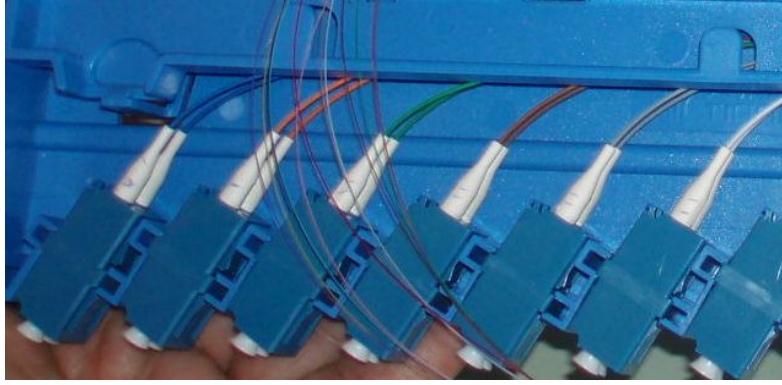
ε) Πρέπει να γίνει πολύ καλή ευθυγράμμιση μεταξύ των ινών.

Για να γίνει επιτυχημένα μια συγκόλληση πρέπει να ακολουθηθούν πιστά τα παρακάτω βήματα:

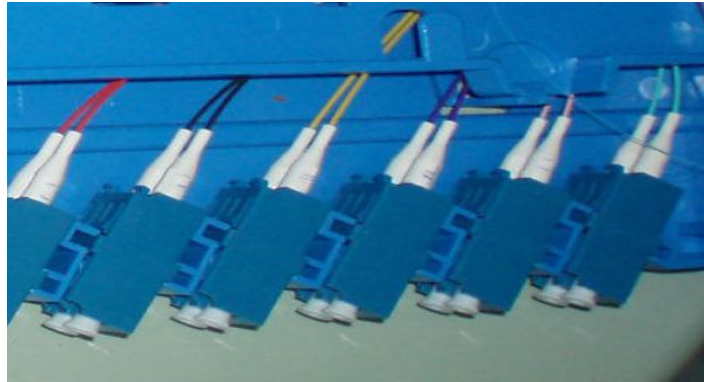
- ΠΡΟΣΟΧΗ: Πρέπει να υπάρχει καλός φωτισμός και στερεή επιφάνεια, καθώς και επαρκής χώρος!

Πρώτο βήμα είναι η απογύμνωση της 72άρας από το εξωτερικό κάλυμμα με ειδικό κοφτάκι. Μετά αφαιρούμε προσεκτικά το σχοινί που συγκρατεί τους απομονωτές καθώς και το ενισχυτικό καλώδιο. Έχοντας στα χέρια μας τους 6 απομονωτές υπολογίζουμε σε ποιο μήκος θα κοπούν και αυτό μετριέται έχοντας μπροστά μας την κασετίνα με τους συνδετήρες (connectors). Αφού κοπούν στο κατάλληλο μήκος χωρίζουμε τους απομονωτές σε τρία ζεύγη: μπλε-πορτοκαλί, πράσινο-καφέ και γκρι-άσπρο.

Μία κασετίνα αποτελείται από 24 συνδετήρες των οποίων όπως προαναφέρθηκε τα άκρα είναι συνδεδεμένα με rígtail με την εξής χρωματολογία ανά ζευγάρι: μπλε-πορτοκαλί-πράσινο-καφέ-γκρι-άσπρο- κόκκινο-μαύρο-κίτρινο-βιολετί-ροζ-θαλασσί. Για να γίνει η συγκόλληση μιας 72αρας θα χρειαστούμε 3 κασετίνες (3X24=72). Ο μπλε, πράσινος και γκρι απομονωτής συνδέονται στα πρώτη 6 ζευγάρια συνδετήρων της κασετίνας και ο πορτοκαλί, καφέ, και άσπρος απομονωτής στα απόμενα 6 ζευγάρια. Στις παρακάτω εικόνες βλέπουμε τα ζεύγη συνδετήρων με τα rígtail τους των οποίων η άκρη τους θα συνδεθεί με τις οπτικές ίνες που εμπεριέχονται στους απομονωτές.



Εικόνα 50. Πρώτη 12άδα(μπλε, πράσινος και γκρι απομονωτής)



Εικόνα 51. Δεύτερη 12άδα(πορτοκαλί, καφέ, και άσπρος απομονωτής)

Με βάση το πρότυπο TIA/EIA-598 “Χρωματικός κώδικας οπτικών ινών” ο χρωματικός κώδικας που θα ακολουθηθεί είναι ο εξής:

- Για τα παρακάτω πινακάκια θεωρούμε ότι 1^ο pigtail είναι η πάνω οριζόντια σειρά συνδετήρων και 2^ο pigtail η κάτω οριζόντια σειρά συνδετήρων.

ΜΠΛΕ ΠΡΑΣΙΝΟΣ	ΓΚΡΙ ΑΠΟΜΟΝΩΤΗΣ
<u>Pigtail</u>	<u>Ίνα</u>
1 ^ο μπλε	μπλε
2 ^ο μπλε	πορτοκαλί
1 ^ο πορτοκαλί	πράσινο
2 ^ο πορτοκαλί	καφέ
1 ^ο πράσινο	γκρι
2 ^ο πράσινο	άσπρο
1 ^ο καφέ	κόκκινο
2 ^ο καφέ	μαύρο
1 ^ο γκρι	κίτρινο
2 ^ο γκρι	βιολετί
1 ^ο άσπρο	Ροζ
2 ^ο άσπρο	θαλασσί

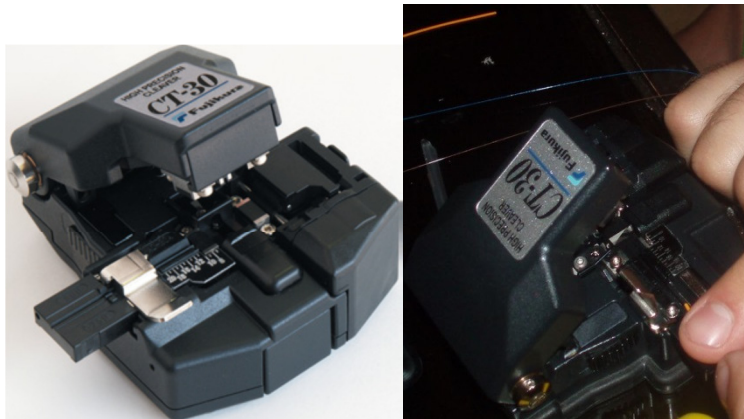
ΠΟΡΤΟΚΑΛΙ ΚΑΦΕ	ΑΣΠΡΟΣ ΑΠΟΜΟΝΩΤΗΣ
<u>Pigtail</u>	<u>Ίνα</u>
1 ^ο κόκκινο	μπλε
2 ^ο κόκκινο	πορτοκαλί
1 ^ο μαύρο	πράσινο
2 ^ο μαύρο	καφέ
1 ^ο κίτρινο	γκρι
2 ^ο κίτρινο	άσπρο
1 ^ο βιολετί	κόκκινο
2 ^ο βιολετί	μαύρο
1 ^ο ροζ	κίτρινο
2 ^ο ροζ	βιολετί
1 ^ο θαλασσί	ροζ
2 ^ο θαλασσί	θαλασσί

Εφόσον κοπούν τα pigtails στο κατάλληλο μήκος για να τοποθετηθούν αργότερα σε συγκεκριμένη υποδοχή στη κασετίνα και έχουν περαστεί τα θερμοσυστελόμενα αρχίζει η διαδικασία της απογύμνωσης των pigtail και των ινών με ειδικούς απογυμνωτές. Επίσης πρέπει τα απογυμνωμένα σημεία της ίνας και pigtail να καθαριστούν με καθαρό οινόπνευμα από το ειδικό τζελ που τα προφυλάσσει. Εφόσον γίνει η απογύμνωση και ο καθαρισμός το επόμενο βήμα είναι με ειδικό κοφτάκι κόβονται οι ίνες στα 12mm και τα pigtail στα 18mm (απογυμνωμένο μέρος). Παρακάτω βλέπουμε στις εικόνες το ειδικό κοφτάκι.



Εικόνα 52. Ειδικοί απογυμνωτές rigtail και ίνας

Μόλις γίνει η κοπή τοποθετούμε το rigtail και την ίνα στην ειδική υποδοχή του μηχανήματος. Μόλις τα τοποθετήσουμε κλείνουμε τα ειδικά “κλιπς” που κρατάνε σταθερά το rigtail και την ίνα την ώρα της συγκόλλησης. Εφόσον έχει γίνει η τοποθέτηση κλείνουμε το καπάκι και πατάμε το πλήκτρο set στο συγκολλητή.



Εικόνα 53. Ο συγκολλητής

Ο συγκολλητής αρχικά ευθυγραμμίζει το rigtail και την ίνα που είναι στις ειδικές υποδοχές. Αν δεν έχει γίνει σωστή τοποθέτηση θα εμφανιστεί στην οθόνη μήνυμα σφάλματος. Σε περίπτωση σφάλματος ανοίγουμε τα καπάκι και τοποθετούμε ξανά το rigtail και την ίνα στην ειδική υποδοχή. Εφόσον γίνει σωστή τοποθέτηση ξαναπατάμε το πλήκτρο set και μόλις ευθυγραμμιστούν η ίνα και το rigtail γίνεται η συγκόλληση και μας εμφανίζει τα εξής στην οθόνη του συγκολλητή:



Στις παραπάνω εικόνες παρατηρούμε ότι η συγκόλληση έγινε με επιτυχία και μας εμφανίζει τις απώλειες. Πρέπει να τονιστεί ότι για ευρυζωνικά δίκτυα το μέγιστο επιτρεπτό

όριο απωλειών των συγκολλήσεων πρέπει να είναι της τάξεως των 0,08 dB. Αν ξεπεραστεί το συγκεκριμένο όριο θα πρέπει να ξαναγίνει η συγκόλληση, εφόσον πρώτα απογυμνώσουμε ξανά την ίνα και το pigtail τα καθαρίσουμε και τα κόψουμε με το ειδικό κοφτάκι. Παρακάτω φαίνεται στις εικόνες το μήνυμα λάθους κατά την διαδικασία της συγκόλλησης.

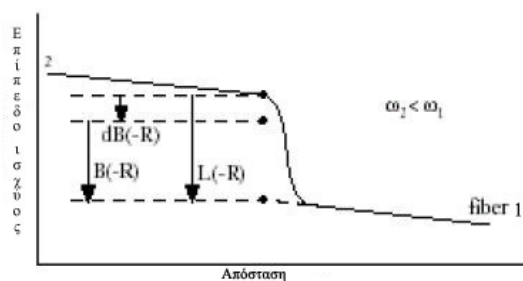


Εικόνα 54. Μήνυμα λάθους λόγω φθοράς στο μανδύα του pigtail(μεγάλη γωνία κοπής)

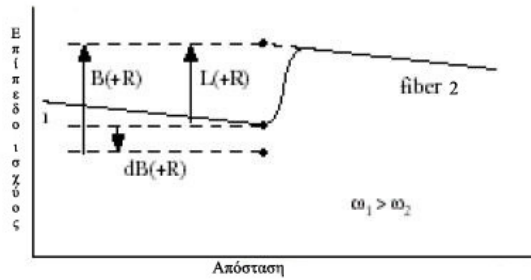
4.7 Μέτρηση Συγκολλήσεων με OTDR

Όταν θέλουμε να κάνουμε μέτρηση των συγκολλήσεων με βάση το πρότυπο ANSI/TIA/EIA-455-8-2000 οι μετρήσεις πρέπει να γίνονται και προς τις δυο κατευθύνσεις (A-B & B-A) για να έχουμε πιο ακριβείς μετρήσεις συγκολλήσεων. Παρακάτω βλέπουμε τα διαγράμματα των “gainers” και των “exaggerated απωλειών”.

ΣΧΗΜΑ EXAGGERATED ΑΠΩΛΕΙΑΣ



ΣΧΗΜΑ GAINER



Εικόνα 55. Το διαγράμματα “gainers” και το “exaggerated απωλειών”.

Όπου $dB(\pm R)$ αναπαριστά τις πραγματικές ή αληθινές απώλειες, $L(\pm R)$ αναπαριστά τις απώλειες όπως φαίνονται στο OTDR, $B(\pm R)$ αναπαριστά την απώλεια (backscatter) λόγω του κακού συνδυασμού της διαμέτρου του οπτικού πεδίου (M.F.D.) όπως φαίνεται στο OTDR, και τα ω_1 και ω_2 αναπαριστούν τις διαμέτρους οπτικού πεδίου των αντίστοιχων ινών. Αυτές οι διαφορές των διαμέτρων (M.F.D.) έχουν ως αποτέλεσμα τις “Gainers” και “Exaggerated απώλειες” σε ένα OTDR μονής διεύθυνσης. Όταν μετράμε από την ίνα με το μεγαλύτερο M.F.D προς την ίνα με το μικρότερο M.F.D. η διαφορά θα φανεί ως μια αύξηση στην οπτική ισχύ (“Gainer”), ενώ ακολουθώντας την αντίθετη φορά θα πάρουμε ένα διάγραμμα διογκωμένων απωλειών (“Exaggerated απώλειες”). Ο τύπος μέτρησης των συγκολλήσεων που προκύπτει είναι ο εξής:

Απώλεια Συγκόλλησης(dB):

$$\frac{\text{Απώλεια Συγγόλλησης}_{A \text{ σε } B} + \text{Απώλεια Συγγόλλησης}_{B \text{ σε } A}}{2}$$

Υπάρχουν κάποιες παράμετροι που επηρεάζουν τις απώλειες συγκόλλησης. Αυτοί οι παράμετροι χωρίζονται σε ενδογενείς και εξωγενείς.

Η απώλεια οπτικής ισχύος σε ένα διάστημα μπορεί να υπολογιστεί αφαιρώντας τα επίπεδα ισχύος των δύο σημείων που ορίζουν το διάστημα με βάση την απλή σχέση.

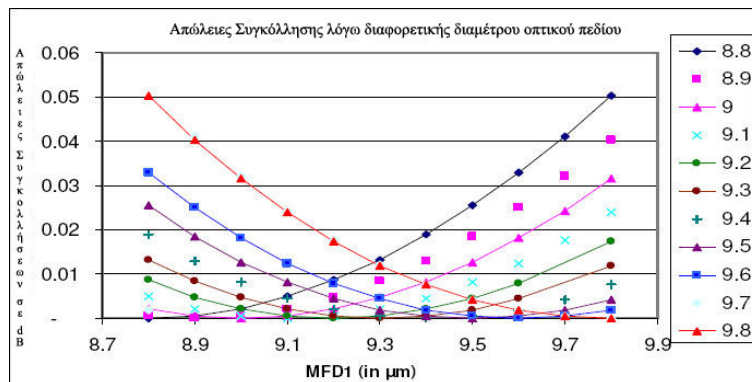
$$A = P - P(dB)$$

Η εξασθένηση αντίστοιχα υπολογίζεται διαιρώντας με το αντίστοιχο διάστημα

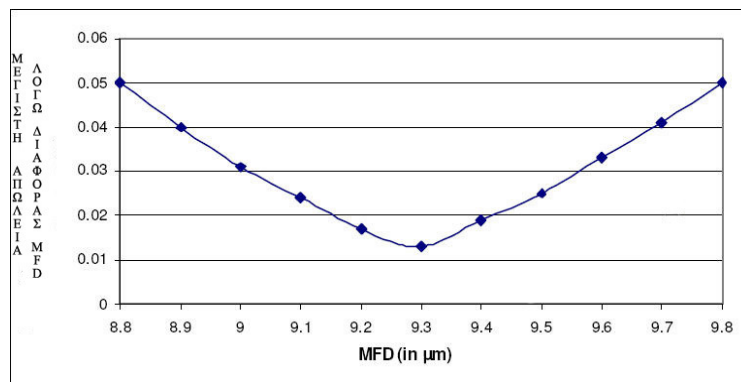
$$\alpha \left(\frac{dB}{Km} \right) = \frac{P_1 - P_2}{L}$$

Ενδογενείς Παράμετροι

Οι ενδογενείς παράμετροι καθορίζονται όταν οι ίνα κατασκευάζεται στο εργοστάσιο. Η διάμετρος οπτικού πεδίου (Mode Field Diameter) είναι η πιο σημαντική παράμετρος. Όταν η διάμετρος του οπτικού πεδίου (M.F.D.) διαφοροποιείται σε υψηλότερες τιμές παρατηρείται αύξηση στις απώλειες των συγκολλήσεων. Η διάμετρος του οπτικού πεδίου είναι ένα χαρακτηριστικό, το οποίο μας περιγράφει το μέγεθος του πεδίου που διασχίζει το φως μέσα σε μία ίνα σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος. Η διάμετρος οπτικού πεδίου των ινών μπορεί να είναι από 8,8 μέχρι 9,6 μm . Σύμφωνα με τη παραπάνω εξίσωση οι απώλειες συγκόλλησης μεταξύ 2 ακραίων τιμών της διαμέτρου οπτικού πεδίου είναι 0.035dB.



Εικόνα 56. Υπολογισμένες τιμές απωλειών λόγω συγκόλλησης με διάφορους συνδυασμούς M.F.D. της τάξεως των 8,8-9,8 μm .



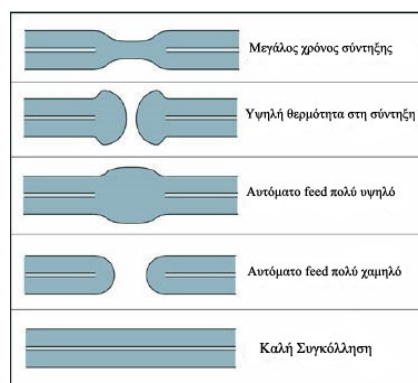
Εικόνα 57. Η μέγιστη απώλεια λόγω συγκολλήσεων σε μία ίνα με συγκεκριμένη διάμετρο οπτικού πεδίου και οποιαδήποτε ίνα με διάμετρο οπτικού πεδίου της τάξεως 8,8-9,8 μm .

Η απώλεια συγκόλλησης αυξάνεται σε καθεμία πλευρά της ζώνης και φθάνει τη τιμή 0,05 στα δύο ακραία σημεία. Παρατηρούμε λοιπόν ότι είναι καλύτερο να διατηρούμε τη τιμή

της διαμέτρου του οπτικού πεδίου κοντά στο 9,3μm για να ελαχιστοποιήσουμε τις απώλειες συγκόλλησης.

Εξωγενείς Παράμετροι

Οι εξωγενείς παράγοντες ή παράγοντες που σχετίζονται με τη διαδικασία της συγκόλλησης είναι αυτοί που περιλαμβάνονται στις μεθόδους και τις διαδικασίες συγκόλλησης. Οι παράμετροι της διαδικασίας της συγκόλλησης περιλαμβάνουν τις εγκάρσιες και γωνιακές ευθυγραμμίσεις, σκόνη ή βρομιά στο τέλος της ίνας και παραμόρφωση του πυρήνα λόγω της μη βέλτιστης θέρμανσης και πίεσης. Αυτοί οι εξωτερικοί παράγοντες μπορούν να ελεγχθούν/ελαχιστοποιηθούν βελτιώνοντας την ικανότητα στη συγκόλληση και την αυτοματοποίηση της διαδικασίας της ευθυγράμμισης και της σύντηξης.



Εικόνα58. διάφορες περιπτώσεις όπου οι άκρες της ίνας δεν συγκολλήθηκαν με σωστό τρόπο λόγω διάφορων παραμέτρων.

Βιβλιογραφία-Ιστότοποι

1. http://conta.uom.gr/conta/ekpaideysh/metaptyxiaka/technologies_diktywn/ergasies/2005/Optical%20Network%20Protocols.pdf
2. http://de.teikav.edu.gr/telematics/pdf/4o_Meros_OptikaSystimata.pdf
3. <http://artemis-new.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/bitstream/123456789/4608/1/DT2008-0092.pdf>
4. Οπτικά Δίκτυα Επικοινωνιών,σημειώσεις μαθήματος,Η.Ασαρίδης
5. Οπτικοί δέκτες, σημειώσεις μαθήματος,Η.Ασαρίδης
6. Δίκτυα Οπτικών Ινών,Green Paul E., Κ. Καρούμπαλος