

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΜΕΣΟΛΟΓΓΙΟΥ**

**ΤΜΗΜΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ**



**Τ.Ε.Ι ΜΕΣΟΛΟΓΓΙΟΥ**

## **ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**“Θεωρητική ανάλυση των φυσικών διαδικασιών απωλειών ισχύος εντός οπτικών ινών και πειραματική επιβεβαίωση του φαινομένου”**

**ΜΑΡΓΑΡΙΤΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ (468)**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ**

**ΑΣΑΡΙΔΗΣ ΗΛΙΑΣ  
ΛΟΥΒΡΟΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ**

**ΝΑΥΠΑΚΤΟΣ 2011**



**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΜΕΣΟΛΟΓΓΙΟΥ**

**ΤΜΗΜΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ**



**ΘΕΜΑ: «Θεωρητική ανάλυση των φυσικών διαδικασιών απωλειών  
ισχύος εντός οπτικής ίνας και πειραματική επιβεβαίωση του  
φαινομένου»**

## **ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

ΤΟΥ

Μαργαρίτη Αλέξανδρου

## **ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ**

ΑΣΑΡΙΔΗΣ ΗΛΙΑΣ  
ΛΟΥΒΡΟΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ

Η παρούσα Πτυχιακή εργασία υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων απόκτησης του Πτυχίου Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων και Δικτύων του Τ.Ε.Ι Μεσολογγίου του Παραρτήματος Ναυπάκτου.





## Περιεχόμενα

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ .....	1
Πρόλογος.....	9
Ιστορία Αναδρομή τηλεπικοινωνιών.....	9
Κεφάλαιο 1.....	13
Γενική Διάρθρωση ινοοπτικής ζεύξης.....	13
Οπτικές ίνες.....	14
Τύποι οπτικών ινών .....	15
Πλεονεκτήματα των ινοοπτικών επικοινωνιών.....	16
Μέτρηση Αριθμητικού Ανοίγματος.....	18
Κυματοδήγηση .....	20
Κυματοδήγηση υπό το πρίσμα της γεωμετρικής οπτικής .....	20
Κεφάλαιο 2.....	25
Εξασθένηση.....	25
Mode ‘scramble’ .....	26
Μέθοδος Cut-Back .....	29
Μέθοδος Οπισθοσκέδασης.....	30
Μέθοδος παρεμβολής.....	33
Σκέδαση (Scattering).....	33
Απορρόφηση .....	37
Συντελεστής εξασθένησης ίνας.....	38
Διασπορά.....	39
Διατροφική διασπορά .....	40
Ενδοτροφική διασπορά.....	41
Ίνες μετατοπισμένης και επίπεδης διασποράς.....	45
Ανάκλαση του Fresnel.....	50
Τυποποίηση των μονότροπων ινών ως μέσων μετάδοσης.....	52
Απώλειες Κάμψης.....	53
Μακροκάμψεις .....	53
Μικροκάμψεις .....	54
Απώλειες λόγω Συνδέσεων .....	55
Προβλήματα .....	55

Προβλήματα Συμβατότητας .....	55
Διάμετρος Πυρήνα .....	55
Αριθμητικές λειτουργούσες διελεύσεις .....	56
Προβλήματα Απώλειας Κενού .....	57
Προβλήματα Ευθυγράμμισης .....	58
Παράλληλη λάθος ευθυγράμμιση .....	58
Ευθυγράμμιση πυρήνα (απώλεια εκκεντρικότητας) .....	58
Γωνιακή λάθος ευθυγράμμιση .....	59
Απώλειες συνδετήρων .....	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....	61
Εξοπλισμός .....	61
OTDR .....	61
Όργανο Μέτρησης Ανακλάσεων Οπτικής Ισχύος στο πεδίο του χρόνου .....	61
Αρχή Λειτουργίας του OTDR .....	62
Μέτρηση Απόστασης Ίνας .....	63
Ρυθμίσεις ενός OTDR .....	64
<b>Νεκρή Ζώνη</b> .....	64
Εύρος παλμών .....	65
Δυναμική περιοχή .....	66
CMA5000 .....	67
Λειτουργία Module .....	68
Wizard Εγκατάστασης Ίνας και Χρήση OTDR .....	68
Οπτικός Ανιχνευτής Λάθους .....	71
Συνολικός Έλεγχος Απωλειών (Loss Test Set) .....	72
Τηλεοπτικός καθετήρας επιθεώρησης connector .....	76
Διαγράμματα από Μετρήσεις OTDR .....	77
Εφαρμογή 1 <sup>η</sup> .....	77
Εφαρμογή 2 <sup>η</sup> .....	78
Εφαρμογή 3 <sup>η</sup> .....	79
Εφαρμογή 4 <sup>η</sup> .....	79
Εφαρμογή 5 <sup>η</sup> .....	80
Συγκολλήσεις Οπτικών Ίνών .....	80
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....	93
Εργαστηριακό πείραμα .....	93

Κεφάλαιο 5.....	103
Συμπεράσματα.....	103
Βιβλιογραφία.....	105





## Πρόλογος

### Ιστορία Αναδρομή τηλεπικοινωνιών

Με τον όρο φωτονική εννοούμε την τεχνολογία που ασχολείται με την παραγωγή και αξιοποίηση του φωτός ή άλλων μορφών ακτινοβολούμενης ενέργειας που έχουν κβαντική μονάδα το φωτόνιο. Η επιστήμη περιλαμβάνει την εκπομπή του φωτός, τη διάδοση, την ενίσχυση και τη φώραση από οπτικά εξαρτήματα και όργανα, laser ή άλλες πηγές φωτός, οπτικές ίνες, ηλεκτρο-οπτικό εξοπλισμό, κατάλληλο hardware και ηλεκτρονικά, καθώς και εξειδικευμένα συστήματα.

Από την αρχαιότητα ακόμη το φως έπαιξε σπουδαίο ρόλο στις επικοινωνίες των ανθρώπων με διάφορους τρόπους. Η εξέλιξη των φωτεινών σημάτων και του οπτικού τηλεγράφου είχε μεγάλη σημασία στη ζωή των ανθρώπων κυρίως κατά τη διάρκεια των πολεμικών επιχειρήσεων. Αν μελετήσει κάποιος τις τεχνικές, τα μέσα και τους τρόπους επικοινωνίας κατά την αρχαιότητα, απορεί και θαυμάζει τη φαντασία που ανέπτυξαν αρκετοί λαοί, και ειδικότερα οι Έλληνες, στο θέμα της από μακριά επικοινωνίας, δηλαδή της τηλεπικοινωνίας. Θα εκπλαγεί μάλιστα όταν διαπιστώσει ότι αρκετές μέθοδοι επικοινωνίας που χρησιμοποιούνταν έως χθες ή χρησιμοποιούνται ακόμη και σήμερα, δεν είναι τίποτε άλλα παρά βελτιώσεις παλαιότερων μεθόδων τηλεπικοινωνίας με την προσθήκη κατάλληλων μηχανικών μέσων.

Η μεγάλη επανάσταση στις νέες μεθόδους οπτικών επικοινωνίες έγινε το 1960 με την εφεύρεση του laser (Mainman 1960) που κατέστησε διαθέσιμη μία σύμφωνη (μονοχρωματική) πηγή ακτινοβολίας με συχνότητες  $10^4$  -  $10^5$  φορές μεγαλύτερες από τις ήδη υπάρχουσες μικροκυματικές, οι οποίες ήταν τις τάξεις  $10^{10}$  Hz. Από τότε πολλές προσπάθειες έχουν γίνει με στόχο την χρησιμοποίηση της επικοινωνίας μέσω laser. Ένα σύστημα επικοινωνίας που λειτουργεί στις οπτικές συχνότητες μπορεί να αυξήσει την χωρητικότητα των πληροφοριών που μεταφέρει κατά 100.000 φορές σε

σύγκριση με τα μικροκυματικά συστήματα εκείνης της εποχής. Παράλληλα, έχουμε μικρές αποσβέσεις στα οπτικά συστήματα σε σύγκριση με άλλους τρόπους διάδοσης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ιδέα να χρησιμοποιηθεί η ατμόσφαιρα σαν μέσο διάδοσης εξετάστηκε αλλά διάφοροι παράγοντες, όπως πχ οι καιρικές συνθήκες, αποτελούσαν εμπόδιο και δημιουργήθηκε η ανάγκη για ένα κατάλληλο μέσο αξιόπιστης μεταφοράς των δεδομένων. Το μέσο αυτό ήταν η οπτική ίνα και οι διηλεκτρικοί κυματοδηγοί. Στο 1996, η οπτική ίνα από γυαλί θα μπορούσε να θεωρηθεί σαν κατάλληλο και αποτελεσματικό μέσο διάδοσης, αλλά οι απώλειές της ήταν υψηλές. Στο 1970 ο Kapron από το Corning Glass Works κατασκεύασε την πρώτη οπτική ίνα από διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ) με απόσβεση 20 dB/km. Σε αυτό το επίπεδο εξασθένισης, τα συστήματα των οπτικών ινών έγιναν συγκρίσιμα με τα συστήματα των χάλκινων αγωγών, καθιστώντας την τεχνολογία των οπτικών συχνοτήτων μια πρακτική εναλλακτική επιλογή. Στις επόμενες δύο δεκαετίες, η μετάδοση των δεδομένων μέσω των οπτικών ινών έγινε όλο και πιο ελκυστική διότι η απόσβεση στις οπτικές ίνες ήταν κάτω από 0.2 dB/km σε μήκος κύματος 1550 nm. Στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα οι συσκευές που χρησιμοποιούνται είναι ένας συνδυασμός ηλεκτρονικής και οπτικής τεχνολογίας.

Η μεγάλη αύξηση της ανάγκης για τηλεπικοινωνιακές συνδέσεις υψηλής χωρητικότητας καθώς και ο περιορισμός στη ταχύτητα των ηλεκτρονικών που χρησιμοποιούταν για επικοινωνίες με ένα μήκος κύματος οδήγησε στην ανάπτυξη της πολυπλεξίας στο μήκος κύματος (Wavelength Division Multiplexing, WDM) που θα καταστήσει ικανή την ταυτόχρονη διέλευση πολλών καναλιών μέσα από το ίδιο οπτικό σήμα. Ένα τέτοιο σύστημα φαίνεται στο σχήμα 1.1. Παράλληλα οι τεχνικές πολυπλεξίας στο χρόνο (Time Division Multiplexing, TDM) βρίσκονται σε σημείο ωρίμανσης.

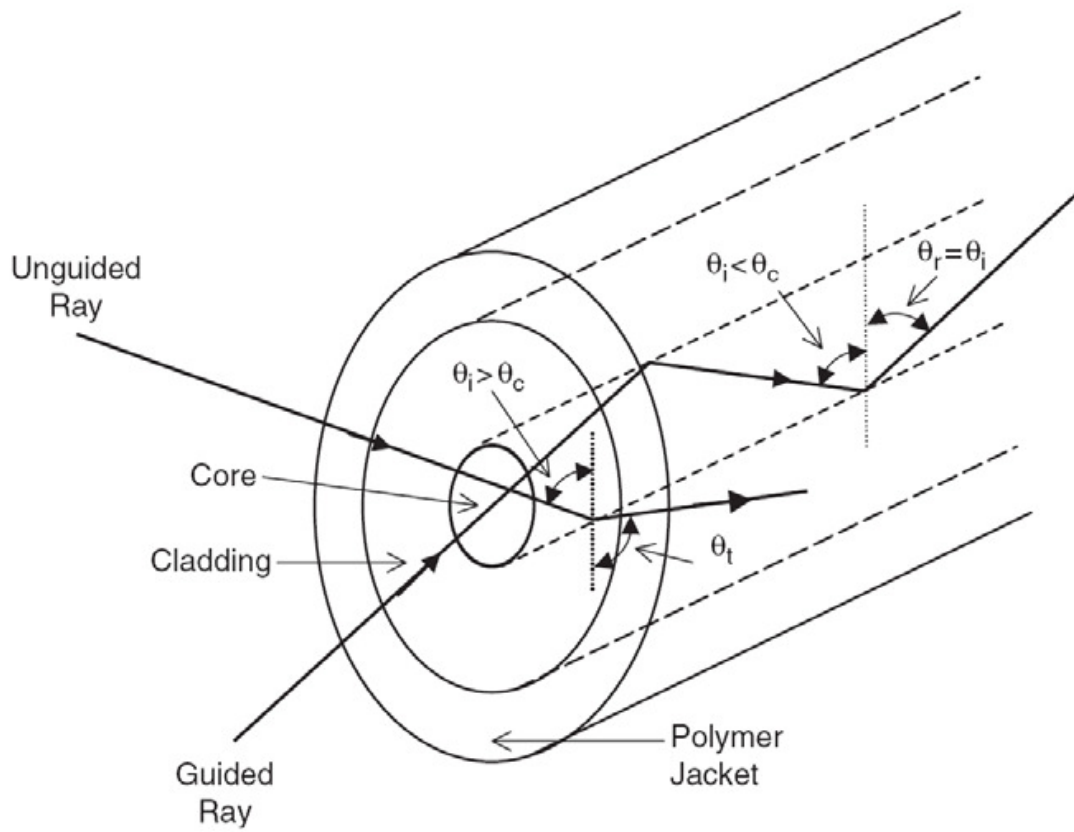
Η φωτονική τεχνολογία μπορεί να έχει αντίκτυπο τόσο σε βιομηχανικές όσο και στρατιωτικές εφαρμογές. Θεωρητικά κάθε φυσική ή περιβαλλοντική παράμετρος μπορεί να μετρηθεί χρησιμοποιώντας το φως, συμπεριλαμβανομένου της θερμοκρασία, της πίεσης, της ροής ηλεκτρικού ρεύματος, της δόνηση, χημικούς και βιολογικούς ρύπους ή ήχο. Ένας άλλος τομέας είναι η βιοφωτονική, στην οποία η

φωτονική αναπτύσσει νέες μεθόδους και τεχνικές στη βιοτεχνολογία, μικροβιολογία, φαρμακευτική και άλλες επιστήμες υγείας.

Η επικοινωνία είναι το μέσο που επιτρέπει να εξελισσόμαστε να συντηρούμαστε να δημιουργούμε και να απολαμβάνουμε.. Η ιδέα της χρήσης του φωτός για την επικοινωνία δεν είναι κάτι νέο, αλλά έχει τις ρίζες της στην αρχαιότητα. Οι αρχαίοι έλληνες άναβαν φωτιές σε ψηλά σημεία για να ανταλλάζουν πληροφορίες μεταξύ τους άμεσα σε αποστάσεις χιλιομέτρων. Ήταν το ταχύτερο μέσο απομακρυσμένης επικοινωνίας και τελικά φαίνεται ακόμα και σήμερα ισχύει το ίδιο, καθώς δεν υπάρχει τίποτα μέχρι στιγμής που να μπορεί να ξεπεράσει την ταχύτητα του φωτός. Χαρακτηριστικά παραδείγματα των νεώτερων χρόνων που χρησιμοποιούνταν το φως για την επικοινωνία είναι οι καπετάνιοι των πλοίων που χρησιμοποιούσαν ισχυρούς φακούς που αναβόσβηναν σύμφωνα με τον κώδικα μορς και με αυτό τον τρόπο επικοινωνούσαν.

Από τα προαναφερθέντα παραδείγματα μπορούμε να εξάγουμε τρία κοινά στοιχεία και έχουν να κάνουν με την δημιουργία, αποστολή και λήψη της πληροφορίας. Το πρώτο είναι ο αποστολέας του φωτεινού σήματος (πομπός), το δεύτερο είναι το μέσο μετάδοσης, κυρίως ως μέσο μετάδοσης έχουμε τον αέρα, και τέλος είναι ο παραλήπτης του φωτεινού σήματος (δέκτης).

Σήμερα η φωτεινή ενέργεια εξακολουθεί να διαδραματίζει κυρίαρχο ρόλο στις τηλεπικοινωνίες και κατ' επέκταση στην καθημερινή μας ζωή. Αν στα προηγούμενα χρόνια το φως μεταδίδονταν μέσω της ατμόσφαιρας, για την μεταφορά φωτός μέσω της ατμόσφαιράς ήταν μια λύση που δεν μπορούσε να έχει επικρατήσει καθώς την ημέρα το φως χάνεται – εξαφανίζεται στο δυνατότερο ηλιακό φως ενώ την νύχτα φαινόμενα όπως η ομίχλη ή υγρασία κάνανε την παρατήρηση ανέφικτη, έτσι σήμερα η ατμόσφαιρα αντικαταστάθηκε με γυαλί που προστατεύεται από ειδικό ανακλαστικό υλικό. Συνεχίζουμε λοιπόν να είμαστε σε θέση να μεταφέρουμε πληροφορία με μεγάλες ταχύτητες σε μακρινές αποστάσεις με την μικρότερη δυνατή αλλοίωση.



Εικόνα . Σχηματική αναπαράσταση εγκάρσιας τομής οπτικής ίνας κατά την ολική εσωτερική ανάκλαση. Οι γωνίες  $\theta_i$ ,  $\theta_r$  και  $\theta_t$  είναι αντίστοιχα οι γωνίες πρόσπτωσης, ανάκλασης και διάδοσης. Η γωνία  $\theta_c$  αποτελεί την κρίσιμη γωνία

## Κεφάλαιο 1

### Γενική Διάθρωση ινοοπτικής ζεύξης

Η γενική δομή μιας <σημείου προς σημείου> (point to point) αμφίδρομης ζεύξης παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα. Τα βασικά δομοστοιχεία μιας τέτοιας ζεύξης είναι ανά κατεύθυνση τα εξής:

Ο οπτικός πομπός: Στην διάταξη αυτή, εισέρχεται το ηλεκτρικό σήμα (αναλογικό ή ψηφιακό) και διαμορφώνει το οπτικό φέρον που προέρχεται από μια οπτική πηγή (LED ημιαγωγού ή Laser). Το οπτικό διαμορφωμένο σήμα μπορεί, στη συνέχεια, να ενισχυθεί από έναν οπτικό ενισχυτή ισχύος.

Η οπτική ίνα, το μέσω μετάδοσης: ίνα κατασκευασμένη κυρίως από γυαλί με προστασία εξωτερικά από ανακλαστικό υλικό και μονωτικό υλικό. Συνήθως εντάσσεται σε οπτικά καλώδια.

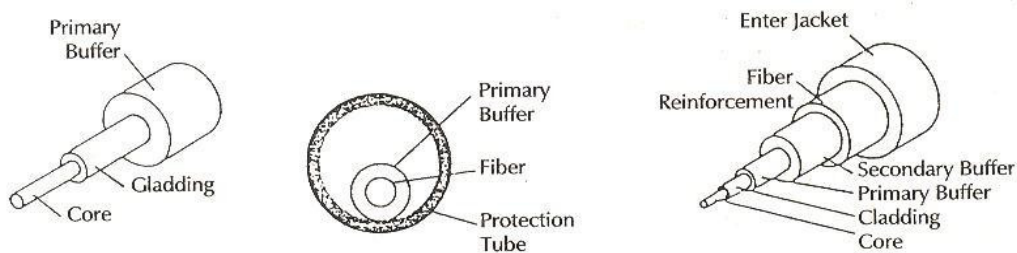
Οι ενδιάμεσοι οπτικοί ενισχυτές: οι οπτικοί ενισχυτές χρησιμοποιούνται εάν το μήκος της ζεύξης είναι τέτοιο (συνήθως άνω των 100 Χιλ.) που το οπτικό σήμα εξασθενεί υπερβολικά και χρειάζεται ενδιάμεση ενίσχυση. Οι οπτικοί ενισχυτές ενισχύουν το σήμα «αμιγώς οπτικά», δηλαδή δεν μετατρέπουν το σήμα σε ηλεκτρικούς παλμούς ώστε να το ξαναμετατρέψουν σε φωτεινούς παλμούς.

Ο οπτικός δέκτης: η διάταξη αυτή διαθέτει εκτός των άλλων μια φωτοδίοδο, η οποία λαμβάνει το οπτικό σήμα και το μετατρέπει σε ηλεκτρισμό, εξάγοντας την αρχική πληροφορία. (Συνήθως πριν την λήψη από την φωτοδίοδο το οπτικό σήμα προενισχύεται με την βοήθεια του οπτικού προενισχυτή).

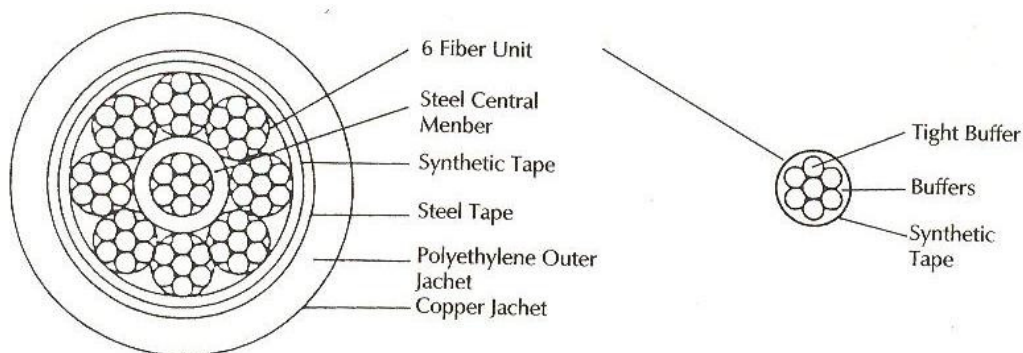
## Οπτικές ίνες

Οι οπτικές ίνες είναι διηλεκτρικοί κυματοδηγοί κυκλικής συνήθως διατομής και ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζονται μπορεί να είναι κατασκευασμένες από πλαστικό ή γυαλί. Συνήθως, αποτελούνται από 2 περιοχές, μια εσωτερική που ονομάζεται πυρήνας (core) και μια εξωτερική που ονομάζεται περίβλημα (cladding). Για λόγους προστασίας το περίβλημα της ίνας περιβάλλεται από πλαστική επένδυση (coating) η οποία δεν συμμετέχει στην διάδοση του οπτικού σήματος αλλά προστατεύει την ίνα από επιδράσεις του περιβάλλοντος. Το απλό οπτικό καλώδιο που περιέχει την ίνα συνίσταται από τον πυρήνα, το περίβλημα και τον πρωταρχικό απομονωτή μπορεί να δημιουργηθεί με δύο διαφορετικά είδη δομών:

- Χαλαρή δομή
- Πυκνή δομή



Σχήμα 1.1: Δομή ενός απλού οπτικού καλωδίου



Σχήμα 1.2: Δομή μιας δέσμης οπτικών καλωδίων

Σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο κατασκευής κάθε οπτική ίνα περιέχεται μέσα σε προστατευτικό σωλήνα. Μέσα στο σωλήνα μια συνθετική ύλη

πολυουρεθάνης περιβάλλει την ίνα και αποτρέπει την διείσδυση του νερού. Επίσης αυτή η δομή χρησιμοποιείται για τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων καθώς δεν περιορίζει την ίνα έτσι ώστε αυτή να μπορεί να διαστέλλεται και να συστέλλεται ανάλογα με τις μεταβολές της θερμοκρασίας και της μηχανικές διακυμάνσεις. Η δεύτερη δομή της οπτικής ίνας είναι εμπλουτισμένη και με άλλες προστασίες και ενισχύσεις. Τα στρώματα που είναι διαφορετικά, είναι:

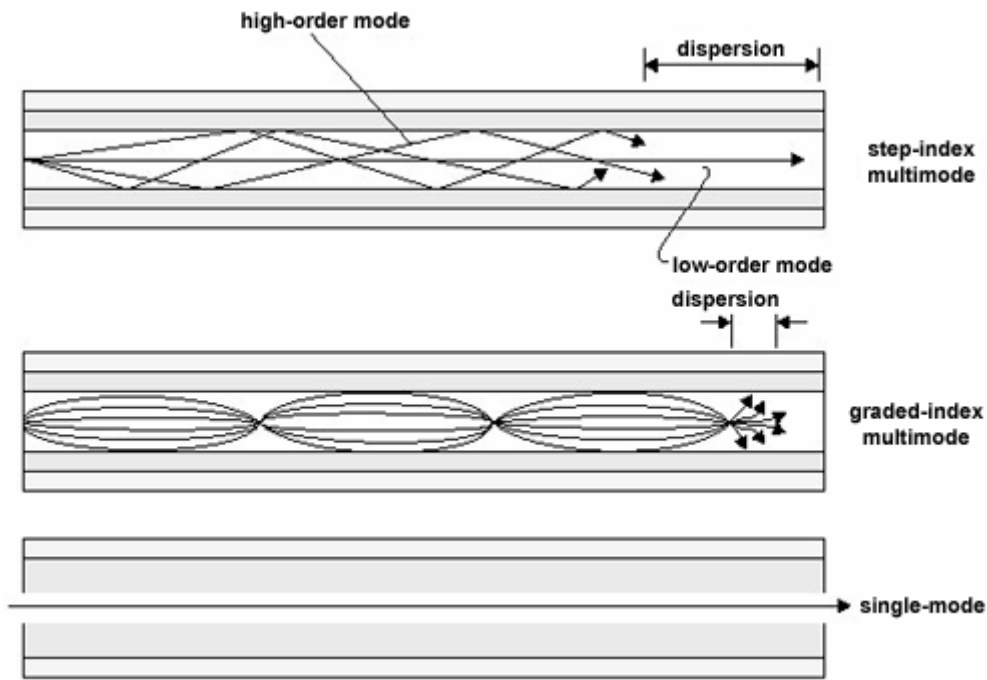
- Ο δευτερεύων απομονωτής
- Η ενίσχυση της ίνας
- Η εξωτερική επένδυση

Δεν κατασκευάζονται μόνο απλά οπτικά καλώδια αλλά και δέσμη από οπτικά καλώδια που μπορεί να περιέχει μέχρι μερικές εκατοντάδες οπτικές ίνες. Ως μέσο μετάδοσης οι οπτικές ίνες κυματοδηγούν οπτικά κύματα τα οποία έχουν παραχθεί από μια οπτική πηγή. Τα κύματα αυτά χρησιμοποιούνται ως φέροντα (κύματα εξαιρετικά υψηλής συχνότητας) επί τον οποίον έχουν προστεθεί ψηφιακά σήματα πληροφορίας. Υπάρχουν διάφοροι τύποι οπτικών ινών οι οποίοι μεταξύ άλλων διαφέρουν ως προς το υλικό κατασκευής, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους αλλά και αυτές καθαυτές τις παραμέτρους διάδοσης.

### **Τύποι οπτικών ινών**

Η κατηγοριοποίηση των οπτικών ινών σε συγκεκριμένους τύπους γίνεται κυρίως με βάση τα παρακάτω κριτήρια:

- ❖ Αριθμός καθοδηγούμενων τρόπων → μονότροπές και πολύτροπές
- ❖ Υλικό ίνας → Γυάλινες ή πλαστικές
- ❖ Δείκτης Διάθλασης → ίνες βηματικού και ίνες βαθμωτού δείκτη διάθλασης



Εικόνα 1.1: Παρουσίαση τύπων οπτικών ινών (1 πολύτροπη, 3 μονότροπη), καθώς και συνδυασμός διαφορετικών τύπων σε μία (2 πολύτροπή με βηματικού δείκτη διάθλασης).

### Πλεονεκτήματα των ινοοπτικών επικοινωνιών

Τα βασικά πλεονεκτήματα των ινοοπτικών ζεύξεων σε σχέση τόσο με της συμβατικές καλωδιακές ζεύξης όσο και με τις ραδιοζεύξεις προκύπτουν από τις επιδόσεις των ινών ως μέσων μετάδοσης. Πράγματι, οι οπτικές ίνες αφενός παρέχουν τεράστιο εύρος ζώνης για την μετάδοση πληροφοριών και αφετέρου είναι πρακτικά απρόσβλητες σε οποιοδήποτε είδους ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Πιο συγκεκριμένα ως κύρια πλεονεκτήματα των ινοοπτικών ζεύξεων μπορούν να θεωρηθούν:

- Το τεράστιο εύρος ζώνης που παρέχουν. Για παράδειγμα μια ίνα που λειτουργεί στην περιοχή 1525-1565 nm παρέχει ένα εύρος συχνοτήτων λειτουργίας της τάξης των 5000 GHz (Προκύπτει βάσει του τύπου  $|\Delta f| = (c/\lambda^2)$  όπου το  $\lambda = 1550$  nm περίπου και  $\Delta\lambda = 40$  nm). Παρ' όλο το εύρος αυτό απέχει πολύ από το να αξιοποιηθεί ολόκληρο, οι σημερινές ίνες έχουν την δυνατότητα για μεταφορά σημάτων ρυθμού 2,5 Gbit/s (περί τα 30,000 τηλεφωνικά κυκλώματα) σε αποστάσεις της τάξης των 100 Km. Αναφορικά



με τεχνολογίες όπως η WDM (ζεύξη πολυπλεξίας μήκους κύματος) η χωρητικότητα μπορεί να αυξηθεί στα 320 Gbit/s.

- Η πολύ χαμηλή εξασθένηση των σημάτων κατά την μετάδοση τους μέσω οπτικών ινών, δεδομένου ότι μια ίνα, είναι στα 1550 nm, παρουσιάζει συντελεστή εξασθένησης της τάξης των 0,2db/Km, είναι εφικτή η υλοποίηση ζεύξεων μήκους άνω των 100 Km χωρίς την ανάγκη ενδιάμεσων ενισχυτών.
- Η «αναισθησία» των οπτικών ινών σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Τα οπτικά καλώδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε επιβαρυμένα βιομηχανικά περιβάλλοντα, κατά μήκος σιδηροτροχιών ή παράλληλα με τα καλώδια του ενεργειακού δικτύου χωρίς υποβάθμιση της ποιότητας μετάδοσης. Επίσης οι οπτικές ίνες αποτελούνται από διηλεκτρικό (μονωτικό) υλικό, τα οπτικά καλώδια μπορούν να διατρέχουν εκρηκτικά ή τοξικά περιβάλλοντα, στα οποία η χρήση ηλεκτρικών καλωδίων είναι προβληματική. Επιπλέον οι ινοοπτικές ζεύξεις είναι απρόσβλητες σε κεραυνούς.
- Η ασφάλεια που παρέχουν. Δεδομένου ότι η μετάδοση του σήματος συντελείται, κυρίως, στον πυρήνα της ίνας, η υποκλοπή είναι δύσκολη έως αδύνατη ενώ (ακόμα και εάν επιτευχθεί ) θα συνοδεύεται από υποβάθμιση της οπτικής ισχύος του σήματος που θα είναι αντιληπτή στο δέκτη.
- Οι μικρές διαστάσεις και το μικρό βάρος των οπτικών ινών, που επιτρέπουν την κατασκευή καλωδίων μεγάλης χωρητικότητας (π.χ. 60 ή 96 ινών) μικρού, όμως βάρους και διατομής κάτω των 2 cm.

## Μέτρηση Αριθμητικού Ανοίγματος

Γνωρίζουμε ότι για να έχουμε κυματοδηγήση πρέπει να ισχύει η συνθήκη της ολικής ανάκλασης στην ίνα. Δηλαδή, η προσπίπτουσα ακτίνα στην ενδοεπιφάνεια πυρήνα-μανδύα πρέπει να είναι ίση ή μεγαλύτερη της κρίσιμης γωνίας. Από τη γεωμετρία του σχήματος 1.3 βλέπουμε ότι αυτό συμβαίνει μόνο όταν η φωτεινή ακτίνα εισέλθει στην ίνα υπό γωνία μικρότερη της γωνίας  $\theta_a$ . Ακτίνες φωτός που εισέρχονται στην ίνα εκτός του κώνου που καθορίζεται από την  $\theta_a$ , προσπίπτουν στην ενδοεπιφάνεια πυρήνα-μανδύα υπό γωνία μικρότερη της κρίσιμης γωνίας  $\theta_c$  και δεν μπορούν να συνεχίσουν τη διάδοσή τους κατά μήκος της ίνας. Αυτές οι ακτίνες προοδευτικά διαφεύγουν εκτός της οπτικής ίνας. Η γωνία  $\theta_a$  λοιπόν θα είναι η μέγιστη γωνία που επιτρέπεται να έχει μια εισερχόμενη ακτίνα φωτός με τον άξονα της ίνας, ώστε να πληρή τη συνθήκη της ολικής ανάκλασης και να περιοριστεί στο εσωτερικό της ίνας. Η γωνία αυτή ονομάζεται γωνία αποδοχής της ίνας. Ο αντίστοιχος τρισδιάστατος κώνος που σχηματίζεται από την  $\theta_a$  ονομάζεται κώνος αποδοχής ή κρίσιμος κώνος (critical cone ή acceptance cone). Ο κώνος αποδοχής όπως θα δούμε και παρακάτω είναι σημαντικός παράγοντας στη διαδικασία της σύζευξης (εισαγωγής) του φωτός στην ίνα.

Θεωρώντας ότι η οπτική ίνα είναι κυλινδρική χωρίς ατέλειες και αποκλίσεις στη σύνθεσή της, η συμμετρία της γεωμετρίας του σχήματος 1.3 επιβάλλει η φωτεινή ακτίνα να εξέρχεται από το άλλο άκρο της ίνας με την ίδια γωνία με την οποία εισέρχεται. Με άλλα λόγια το φως εξέρχεται της οπτικής ίνας υπό μορφή κώνου με άνοιγμα ίσο με αυτό του κρίσιμου κώνου της ίνας. Για να υπολογίσουμε τη μέγιστη γωνία σύζευξης του φωτός (γωνία αποδοχής) θα θεωρούμε ότι το φως εισέρχεται από τον αέρα (δείκτης διάθλασης  $n_0 = 1$ ) στον πυρήνα της οπτικής ίνας (δείκτης διάθλασης  $n_1$ ). Ο νόμος του Snell και η γεωμετρία του σχήματος 1.3 μας δίνουν:

$$n_0 \sin \theta_a = n_1 \sin \theta_c$$

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

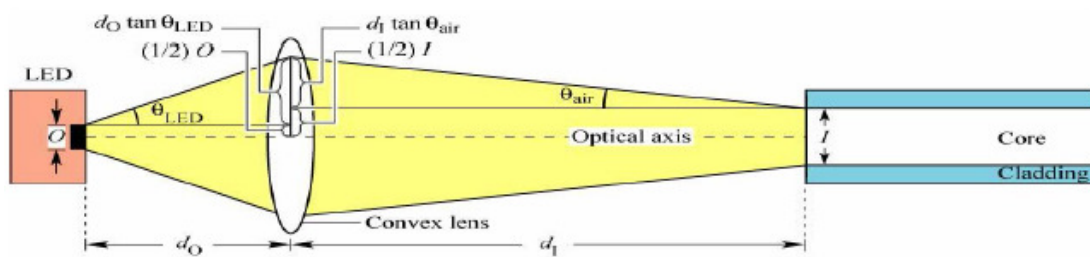
$$\sin \theta_a = \frac{n_1}{n_0} \sin \theta_c = \frac{n_1}{n_0} \sqrt{1 - \sin^2 \theta_c}$$

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

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

Η παράμετρος **NA** είναι μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους της οπτικής ίνας. Ονομάζεται **αριθμητικό άνοιγμα** (numerical aperture) της ίνας και ουσιαστικά εκφράζει την ικανότητα σύζευξης φωτός στην οπτική ίνα αφού συνδέεται άμεσα με την γωνία αποδοχής  $\theta_a$ . Περιγράφει δηλαδή την δυνατότητα συλλογής φωτός της ίνας ή της δέσμης οπτικών ιών. Όσο μεγαλύτερο το NA τόσο πιο εύκολη η εισαγωγή του φωτός στην ίνα άρα μεγαλύτερη και η ποσότητα φωτός που μεταφέρεται με αυτήν.

Για την εισαγωγή του φωτός μιας φωτεινής πηγής μέσα στην ίνα απαιτείται η χρήση μικροφακών. Δηλαδή φακών πολύ μικρών διαστάσεων και κατάλληλης καμπυλότητας ώστε να συλλέγουν τις αποκλίνουσες ακτίνες που εκπέμπονται από τη φωτεινή πηγή (laser ή LED) και να τις μετατρέπουν σε συγκλίνουσες με NA μικρότερο από το NA της ίνας. Επειδή το NA των πηγών LED είναι αρκετά μεγαλύτερο από αυτό των πηγών laser οι πρώτες δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν με μονότροπες ίνες που έχουν μικρή διάμετρο πυρήνα και άρα μικρό NA.



Σχήμα 1.3: Σύζευξη φωτός LED σε οπτική ίνα με χρήση αμφίκυρτου φακού (convex lens). Η θέση και οι διαστάσεις του φακού εξαρτώνται από το NA της πηγής και της ίνας

**Αριθμητικό άνοιγμα (NA) μιας οπτικής ίνας:**

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

$$NA = n_0 \sin \theta_\alpha = n_1 \sqrt{2\Delta}$$

Όπου

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$$

$\Delta$ = σχετική διαφορά των δεικτών διάθλασης

Στον αέρα  $n_0=1$  και προκύπτει  $NA = \sin \theta_\alpha$

Μέσα στην οπτική ίνα οι ακτίνες που προσπίπτουν με γωνία  $0 \leq \theta_1 \leq \theta_\alpha$

## Κυματοδήγηση

Για την πλήρη ανάλυση του φαινομένου της κυματοδήγησης είναι απαραίτητη η χρήση των εξισώσεων του Maxwell και της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας. Ωστόσο, μια απλοποιημένη παρουσίαση του φαινομένου είναι δυνατή με χρήση απλής γεωμετρικής οπτικής. Παρουσιάζονται και οι 2 τρόποι χωρίς όμως να δίνεται ιδιαίτερη σημασία στην πλήρη ανάλυση καθώς απομακρύνεται του σκοπού της εργασίας.

### Κυματοδήγηση υπό το πρίσμα της γεωμετρικής οπτικής

Η μετάδοση της πληροφορίας δια μέσου μιας οπτικής ίνας μπορεί να εξηγηθεί ως ένα βαθμό από το φαινόμενο της ολικής ανάκλασης. Οπτικές ακτίνες που προέρχονται από οπτικές πηγές (Laser or LED) εισέρχονται στην οπτική ίνα και στην συνέχεια μεταδίδονται δια μέσου αυτής, ανακλώμενες ολικά στην διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα – περιβλήματος. Προϋπόθεση «εγκλωβισμού» οπτικής ισχύος εντός και γύρο από τον πυρήνα της ίνας μπορεί να επιτευχτεί μόνον αν ο δείκτης διάθλασης  $n_{\text{core}}$  του πυρήνα είναι υψηλότερος από το δείκτη διάθλασης του περιβλήματος  $n_{\text{clad}}$ . Προκειμένου μια οπτική ακτίνα να ανακλαστεί ολικά στην διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα – περιβλήματος πρέπει να εισέλθει υπό κατάλληλη

γωνία. Με διαδοχική εφαρμογή του νόμου του Snell στην είσοδο της ίνας και την διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα - περιβλήματος, προκύπτει ότι:

$$n_{air} \sin \theta_{core} = n_{core} \sin \theta_{core} \quad (1.1)$$

$$n_{core} \sin(90^\circ - \theta_{core}) = n_{clad} \sin \theta_{clad} \quad (1.2)$$

Δεδομένου ότι  $n_{air} = 1$ ,

$$\sin(90^\circ - \theta_{core}) = \cos \theta_{core} = (1 - \sin^2 \theta_{core})^{\frac{1}{2}} \quad (1.3)$$

Από 1.1 και 1.2

$$\sin \theta_{in} = n_{core} \sin \theta_{core} \quad (1.4)$$

$$n_{core} (1 - \sin^2 \theta_{core})^{\frac{1}{2}} = n_{clad} \sin \theta_{clad} \quad (1.5)$$

Η μέγιστη αποδεκτή γωνία εισαγωγής  $\theta_{in,max}$  για την διατήρηση του φαινομένου της ολικής ανάκλασης, θα είναι εκείνη για την οποία η ακτίνα, μετά την ολική ανάκλαση στην διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα – περιβλήματος, μεταδίδεται κατά μήκος της επιφάνειας αυτής (δεν επιστρέφει στο εσωτερικό του πυρήνα). Στην περίπτωση αυτή:

$$\theta_{clad} = 90^\circ \Leftrightarrow \sin \theta_{clad} = 1 \quad (1.6)$$

Οπότε οι (1.4) και (1.5) γίνονται:

$$\sin \theta_{in,max} = n_{core} \sin \theta_{core} \Leftrightarrow \sin \theta_{core} = \sin \frac{\theta_{in,max}}{n_{core}} \quad (1.7)$$

$$n_{core} (1 - \sin^2 \theta_{core})^{\frac{1}{2}} = n_{clad} \quad (1.8)$$

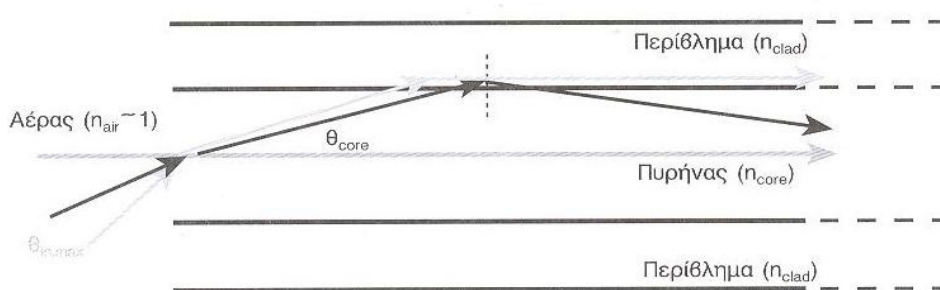
Εισάγοντας την 1,7 στην 1,8 προκύπτει ότι:

$$\sin \theta_{in,max} = (n_{core}^2 - n_{clad}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (1.9)$$

Το συμπέρασμα το οποίο προκύπτει από την παραπάνω ανάλυση είναι το εξής: Προκειμένου μια ακτίνα να ανακλασθεί ολικά στην διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα – περιβλήματος πρέπει να εισέλθει στην ίνα, υπό γωνία  $\theta_{in}$  τέτοια ώστε

$$\theta_{in} \leq \theta_{in,max} = \arcsin(n_{core}^2 - n_{clad}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (1.10)$$

Δηλαδή η ακτίνα, πρέπει να βρίσκεται μέσα σε κώνο γωνίας  $\theta_{in,max}$



Σχημα 1.4 Η κυματοδότηση υπό το πρίσμα της γεωμετρικής οπτικής (ολική ανάκλαση οπτικών ακτινών στη διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα - περιβλήματος)

Το μέγεθος  $\sin \theta_{in,max} = (n_{core}^2 - n_{clad}^2)^{\frac{1}{2}}$  ονομάζεται αριθμητικό παράθυρο (numerical aperture) NA (όπου και έχουμε αναφερθεί παραπάνω) της οπτικής ίνας.

Εφαρμόζοντας των ορισμό αυτόν, η σχέση (1,9) αποκτά τη μορφή

$$NA \equiv \sin \theta_{in,max} = (n_{core}^2 - n_{clad}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (1.11)$$

Ενώ η 1.11 γίνεται

$$\theta_{in} \leq \theta_{in,max} = \arcsin(NA) \quad (1.12)$$

Άλλη σημαντική παράμετρος για την οπτική ίνα (η οποία σχετίζεται άμεσα με το αριθμητικό παράθυρο NA) είναι η παράμετρος  $\Delta$ . Η παράμετρος αυτή ορίζεται ως

$$\Delta = \frac{(n_{core}^2 - n_{clad}^2)^{\frac{1}{2}}}{2n_{core}^2} = \frac{NA}{2n_{core}^2} \quad (1.13)$$

Όταν η διαφοροποίηση μεταξύ  $n_{core}$  και  $n_{clad}$  είναι μικρή (όπως συμβαίνει και στην συντριπτική πλειοψηφία των χρησιμοποιούμενων ινών) ισχύει, με ικανοποιητική προσέγγιση, ότι

$$\Delta \approx \frac{(n_{core} - n_{clad})^{\frac{1}{2}}}{n_{core}} \quad (1.14)$$

Αξίζει να σημειωθούν τα εξής:

- Η εισαγωγή, στη ίνα, μιας οπτικής ακτίνας με γωνία  $\theta_{in} < \theta_{in, max}$  (και η επακόλουθη ολική ανάκλαση της στην διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα – περιβλήματος) είναι αναγκαία συνθήκη για την μεταφορά πληροφορίας άλλα όχι και ικανή. Μπορεί να αποδειχθεί ότι, από τις ακτίνες που εισέρχονται στην οπτική ίνα (και εν συνεχεία ανακλώνται ολικά) μόνον ακτίνες με συγκεκριμένες γωνίες εισαγωγής μπορούν να διατηρηθούν και, συνεπώς, να μεταφέρουν πληροφορία. Οι ακτίνες αυτές αντιστοιχούν στους «τρόπους μετάδοσης».
- Ο αριθμός των οπτικών ακτινών η διάδοση των οποίων μπορεί να υποστηριχθεί από μια οπτική ίνα, εξαρτάται από την παράμετρο

$$V = \left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right) \cdot \left(\frac{d}{2}\right) \cdot (n_{core}^2 - n_{clad}^2)^{\frac{1}{2}} = \pi \cdot \left(\frac{d}{\lambda_0}\right) \cdot NA \quad (1.15)$$

που ονομάζεται κανονικοποιημένη συχνότητα ( $d$  η διάμετρος ου πυρήνα της ίνας και  $\lambda_0$  το μήκος κύματος της οπτικής πηγής). Μπορεί να αποδειχθεί ότι, αν ο αριθμός  $N$  των μεταδιδόμενων οπτικών ακτινών είναι επαρκώς μεγάλος, τότε

$$N \approx \frac{V^2}{2} \quad (1.16)$$

- Τέλος μπορεί να αποδειχθεί ότι, αν σε μια οπτική ίνα ισχύει ότι

$$V < 2,405 \quad (1.17)$$

(ιδιότητα που στην πράξη επιτυγχάνεται με τη διατήρηση της διαμέτρου του πυρήνα κάτω των 10  $\mu\text{m}$  και της διαφοράς των δεικτών διάθλασης σε τιμές κάτω του 1%), στην ίνα θα μεταδίδεται μόνο μια οπτική ακτίνα (παράλληλα με το διαμήκη άξονα της ίνας). Η διατήρηση μιας μόνο μεταδιδόμενης ακτίνας βελτιώνει θεαματικά τις επιδόσεις της οπτικής ίνας και αποτελεί βασική απαίτηση στις ίνες που χρησιμοποιούνται σε τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές.



## Κεφάλαιο 2

Παρά τις μεγάλες δυνατότητες των οπτικών ινών για μεταφορά σημάτων, οι επιδόσεις τους υποβαθμίζονται από διάφορους μηχανισμούς οι οποίοι περιορίζουν τόσο το μέγιστο δυνατό μήκος  $L_{\max}$  μιας ζεύξης όσο και το εύρος ζώνης  $B$  ή το ρυθμό μετάδοσης  $R$  που μπορεί να επιτευχθεί στη ζεύξη για δεδομένο μήκος  $L$ .

Τα δύο βασικά φαινόμενα που καθορίζουν τις επιδόσεις των οπτικών ινών ως μέσων μετάδοσης είναι η εξασθένηση και η διασπορά. Η εξασθένηση εκδηλώνεται ως μείωση της κυματοδηγούμενης οπτικής ισχύος κατά μήκος της οπτικής ίνας ενώ η διασπορά ως χρονική διαπλάτυνση των ψηφιακών παλμών στην έξοδο του οπτικού δέκτη. Άλλο περιοριστικό φαινόμενο είναι η τετρακυματική μίξη η οποία όμως εκδηλώνεται όταν στην οπτική ίνα επιδιώκεται η ταυτόχρονη μετάδοση περισσότερων του ενός ψηφιακών σημάτων μέσω χρήσης διαφορετικού μήκους κύματος για κάθε σήμα (τεχνική **WDM**).

### Εξασθένηση

Η εξασθένηση (attenuation) εκδηλώνεται ως μείωση της κυματοδηγούμενης οπτικής ισχύος κατά μήκος της ίνας και θέτει περιορισμούς στο μέγιστο δυνατό μήκος  $L_{\max}$  μιας ινοοπτικής ζεύξης. Τα κυριότερα φαινόμενα που την προκαλούν είναι:

- Η σκέδαση (π.χ. σκέδαση Rayleigh, Mie, Raman, Brillouin)
- Η απορρόφηση ισχύος (είτε από το ίδιο το υλικό της ίνας είτε από προσμίξεις που εισχώρησαν σε αυτό)
- Άλλα φαινόμενα (όπως Μικροκάμψεις, εισχώρηση υγρασίας, γήρανση) κ.τ.λ.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι να μετρήσουμε την εξασθένηση μιας οπτικής ίνας, μεταξύ των οποίων είναι:

- Μέθοδος cut-back

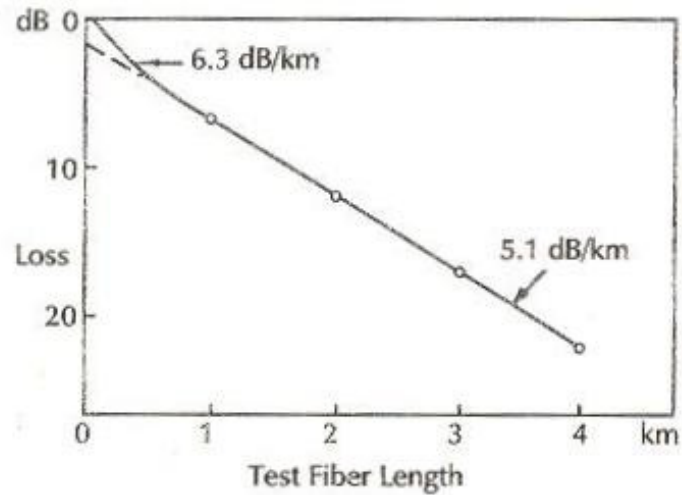
- Μέθοδος οπισθοσκέδασης
- Μέθοδος παρεμβολών

Στο εργαστήριο λόγου χάρη, για να διαπιστώσουμε μερικές παραμέτρους της οπτικής ίνας με αξιόπιστες μετρήσεις, απαιτείται η χρήση του τρόπου “scrambler” που περιγράφουμε στην συνέχεια. Αυτό το εξάρτημα δεν χρησιμοποιείται, όταν δεν απαιτείτε μεγάλη αξιοπιστία. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί η λεγόμενη «εκτοξεύουσα οπτική ίνα», με πολύ καλά αποτελέσματα.

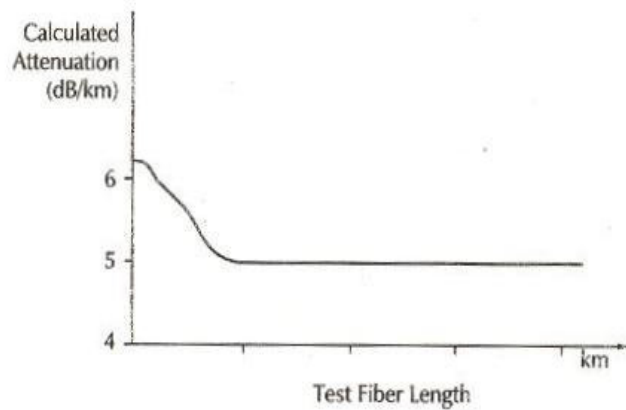
### **Mode ‘scramble’**

Πριν περιγράψουμε τις μεθόδους μέτρησης για την εξασθένηση, πρέπει να περιγράψουμε τις συνθήκες διάδοσης, που πρέπει να ισχύουν για να πάρουμε μια αξιόπιστη μέτρηση. Το κύριο πρόβλημα, που αφορά στις πολυτροπικές ίνες, είναι το γεγονός, ότι στο κομμάτι που ξεκινά η οπτική ίνα και που ονομάζεται ‘περιοχή μεταβατικής κατάστασης’, κάθε mode έχει διαφορετικό συντελεστή εξασθένησης. Αυτό σημαίνει ότι η εξασθένηση εξαρτάται από τις συνθήκες διέγερσης, δηλαδή από ποια είναι τα διεγερμένα modes και πώς αυτά μοιράζουν την ισχύ. Η κατανομή ισχύος είναι ορισμένη μόνο στο εσωτερικό στην ονομαζόμενη ‘περιοχή σταθερής κατάστασης’, οπου όλα τα modes έχουν τους ίδιους συντελεστές απωλειών και τότε αποκτά νόημα η εξασθένηση.

Επειδή η ‘περιοχή μεταβατικής κατάστασης’ μπορεί να φτάσει μέχρι μερικές εκατοντάδες μέτρα, οι μετρήσεις εξασθένησης για μικρά κομμάτια οπτικών ινών μπορεί να είναι λάθος. Το σχήμα που ακολουθεί δείχνει το διάγραμμα της χιλιομετρικής εξασθένησης, που μετρήθηκε σε οπτικές ίνες διαφορετικών μηκών. Σημειώνουμε ότι αν το μήκος της υπό έλεγχο οπτικής ίνας είναι μικρότερο από 1 χιλιόμετρο, η χιλιομετρική εξασθένηση βρέθηκε μεγαλύτερη απ’ το αν παίρναμε την εξασθένηση για οπτικές ίνες μεγαλύτερου μήκους που λειτουργούν στις ίδιες συνθήκες.

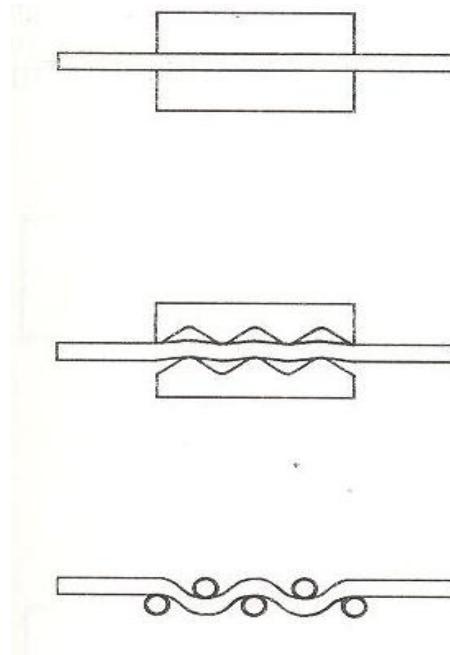


Σχήμα 2.1



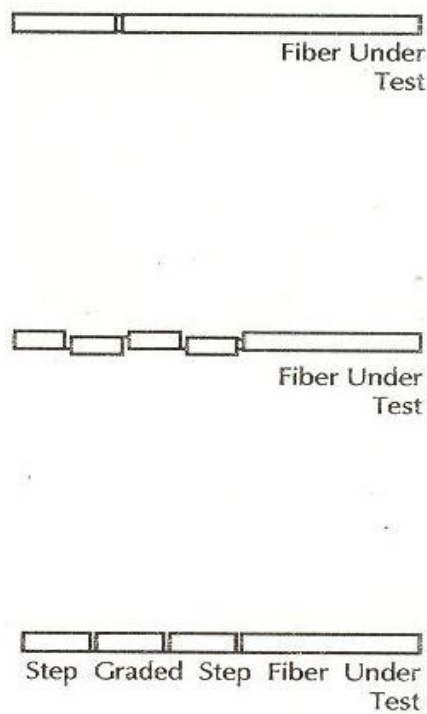
Σχήμα 2.2

Για να εξετάσουμε την οπτική ίνα κάτω από συνθήκες ρύθμισης, μπορούμε να εισάγουμε ένα 'mode scrambler' μεταξύ της πηγής και της οπτικής ίνας που θέλουμε να ελέγξουμε. Αυτό γίνεται αιτία ισχυρών διαταραχών στην οπτική ίνα εξαναγκάζοντας την να φτάσει στην σταθερή κατάσταση της σε μερικά μέτρα. Υπάρχουν διάφορα 'mode scramblers' που δρουν στην κορυφή ή στην βάση της οπτικής ίνας. Τα πρώτα δημιουργούν μικρόκομπους από τα πρώτα κομμάτια της οπτικής ίνας συμπιέζοντας την ίδια την ίνα κατά των ρυτιδωμένων επιφανειών βλέπουμε (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3

Τα δεύτερα χρησιμοποιούν μικρό κομμάτι της οπτικής ίνας με ζαρωμένα άκρα ή μέρη της οπτικής ίνας μερικώς επεξεργασμένα, με εναλλαγές κομματιών με βηματικό δείκτη διάθλασης και διαβαθμισμένο δείκτη διάθλασης της ίνας (Σχήμα 2.4)



Σχήμα 2.4

Ένα πρόχειρο αλλά ενεργό ‘mode scrambler’ μπορούμε να έχουμε δημιουργώντας με το χέρι τα ζαρώματα (ακτίνας περίπου 10 cm) στο πρώτο κομμάτι της οπτικής ίνας (σχεδόν 1m). Όπως ήδη είπαμε, σε μετρήσεις που δεν εκτελούνται στο εργαστήριο, το ‘mode scrambler’ αντικαθίσταται με μία εκτοξεύουσα οπτική ίνα. Αυτό εισάγει το επαρκές ‘μείγμα’ για μια αποδεκτή μέτρηση. Η εκτοξεύουσα οπτική ίνα είναι ένα οπτικό καλώδιο συγκεκριμένου μήκους (3-5 μέτρων περίπου) φτιαγμένο από οπτική ίνα του ίδιου είδους με εκείνη που θέλουμε να μετρήσουμε.

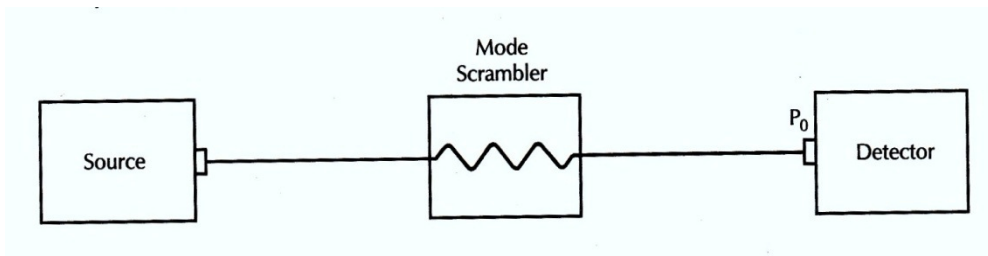
### Μέθοδος Cut-Back

Η μέτρηση της εξασθένησης με την μέθοδο του cut-back εκτελείται σε δύο φάσεις:

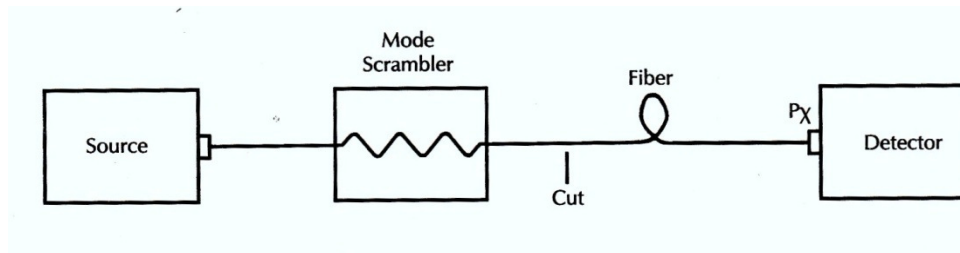
1. Η προς μέτρηση οπτική ίνα συνδέεται με την πηγή και τον ανιχνευτή, με την προφανή σύνδεση ενός ‘mode scrambler’ στην κορυφή της οπτικής ίνας. Τότε μετράμε την λαμβανόμενη ισχύ (σχήμα 2.5)
2. Κόβουμε την οπτική ίνα μετά το ‘mode scrambler’ (ή αν δεν υπάρχει ‘mode scrambler’, σε μερικά μέτρα από την πηγή) και μετράμε την οπτική ισχύ  $P_0$  στην έξοδο του παραμένοντος κομματιού της οπτικής ίνας (εικόνα 2.6). Η ολική εξασθένηση  $A_{db}$  που εισάγεται στην οπτική ίνα, μετρούμενη σε db δίνεται με τον ακόλουθο τρόπο:

$$A_{db} = 10 \cdot \log \frac{P_0}{P_x} \quad (2.1)$$

Η χιλιομετρική εξασθένηση υπολογίζεται διαιρώντας το  $A_{db}$  με το μήκος της οπτικής ίνας.



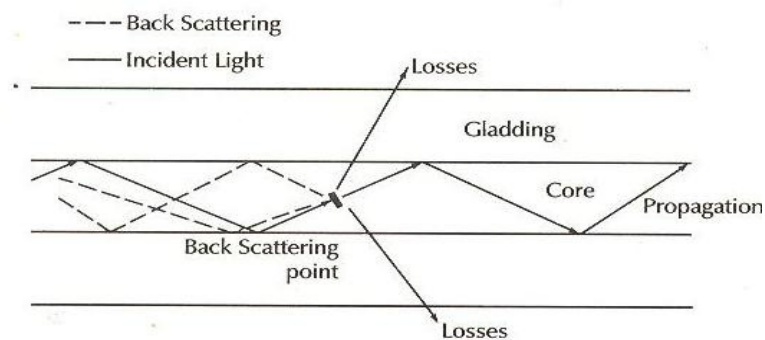
Σχήμα 2.5



Σχήμα 2.6

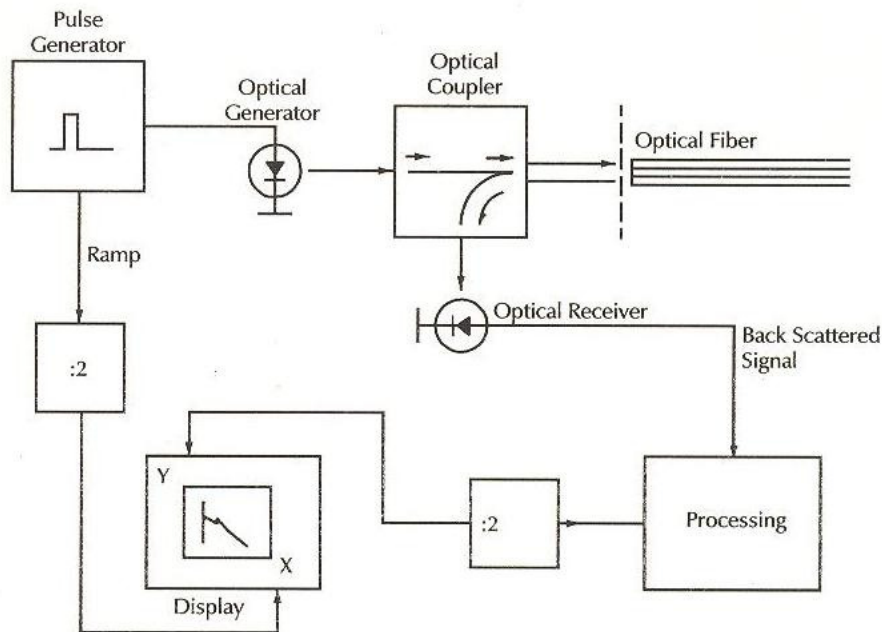
### Μέθοδος Οπισθοσκέδασης

Αυτή βασίζεται στο φυσικό αξίωμα σύμφωνα με το οποίο όταν φως διαδίδεται σε ένα μέσο με μικροσκοπικές ανομοιογένειες τότε το φως απλώνεται προς όλες τις κατευθύνσεις ακόμα και προς τα πίσω. (σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.7

Το όργανο που εκτελεί αυτή την μέτρηση είναι το 'οπτικό ανακλασίμετρο' (OTDR), που φαίνεται με block διάγραμμα στο παρακάτω (σχήμα 2.8).



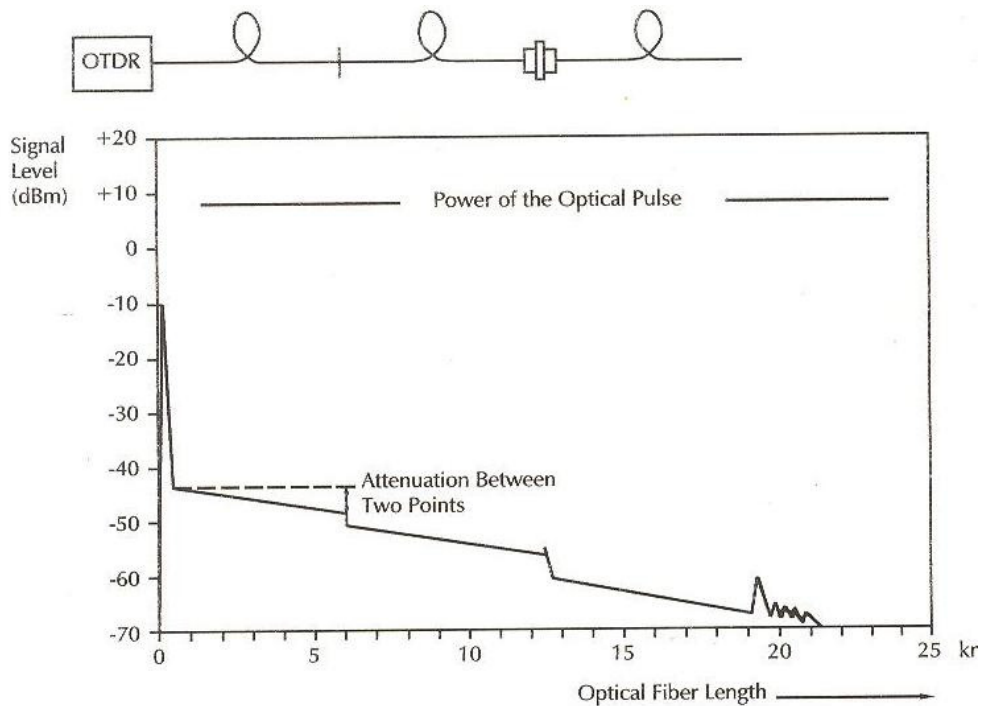
Σχήμα 2.8

Η τεχνική μέτρησης συνίσταται στην εκτόξευση μιας ακολουθίας περιοδικών φωτεινών παλμών μέσα στην οπτική ίνα και στην μέτρηση της αντίστοιχης ισχύος, που οπισθοσκεδάζει. (Αυτό είναι ανάλογο με την τεχνική που χρησιμοποιείται στους παλμούς ραντάρ, στα οποία ένας βραχύς παλμός ραδιοσυχνότητας εκπέμπεται για να ανιχνεύσει την ηχώ). Οι απώλειες στην οπτική ίνα μπορούν να υπολογιστούν και να ανιχνευτούν μετρώντας την ισχύ, που οπισθοσκεδάζει διασχίζοντας την οπτική ίνα.

Υπολογίζουμε έτσι το χρόνο που η φωτεινή ενέργεια κάνει να διασχίσει την οπτική ίνα στις δυο διευθύνσεις (μπρος - πίσω) η μέτρηση τότε αναπαρίσταται σε ένα X-Y επίπεδο, στο οποίο η οπισθοσκεδάζουσα ισχύς σημειώνεται στον Y – άξονα, συνήθως σε dbm, και η απόσταση στον X – άξονα ( σαν γινόμενο της ταχύτητας διάδοσης του φωτός μέσα στην οπτική ίνα επί τον χρόνο που πέρασε).

Στο block διάγραμμα, σημειώνουμε ότι υπάρχουν δύο διαιρέτες του δύο, στον έλεγχο του X – άξονα (χρόνος) και τον Y – άξονα (εξασθένιση). Οι διαιρέτες αυτοί χρειάζονται διότι ο μετρούμενος χρόνος μετάδοσης ουσιαστικά αντιστοιχεί σε μία διπλή διάδοση, το ίδιο επίσης ισχύει και για την εξασθένιση.

Το σχήμα 2.9 δείχνει ένα τυπικό διάγραμμα που αποκτάτε με το OTDR. Ξεκινώντας από το μηδέν, εκείνο που μπορούμε να δούμε είναι ο εκπεμπόμενος παλμός από την γεννήτρια. Αυτός ο παλμός πρακτικά σβήνει τις αντηχήσεις που δημιουργήθηκαν στο πρώτο μέρος του καλωδίου. Ο στενότερος είναι ο οπτικός παλμός εκπεμπόμενος από το OTDR, ενώ ο μικρότερος θα είναι αυτός που σημειώνεται στην καλυπτόμενη απόσταση. Συνήθως ένα OTDR δεν μπορεί να δράσει σε καλώδια μικρότερα από μερικές δεκάδες μέτρα. (Σχήμα 2.9)



Σχήμα 2.9

Οι σταθερές κλίσεις των κομματιών αναπαριστούν τις φαινομενικές απώλειες της οπτικής ίνας. Οι χιλιομετρική εξασθένηση μπορεί να δειχθεί παίρνοντας την διαφορά των μετρουμένων ισχύων σε δύο σημεία και διαιρώντας με την απόσταση των ίδιων των σημείων. Τα άλματα στην καμπύλη δείχνουν τα σημεία που εισέρχονται κολλήσεις και συνδετήρες. Στην κολλήση φαίνεται ένα μικρό άλμα, ενώ στον συνδετήρα φαίνεται ένα μεγαλύτερο άλμα και αναπαριστά ένα ισχυρότερο δείκτη ανάκλασης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το φως, μεταξύ των συνδετήρων, αναπήδα ακόμα και εκτός της οπτικής ίνας στα σημεία που υπάρχει σαν διαχωριστικό ο αέρας. Στα άκρα της οπτικής ίνας υπάρχει μια κορυφή με ισχυρή ανάκλαση.

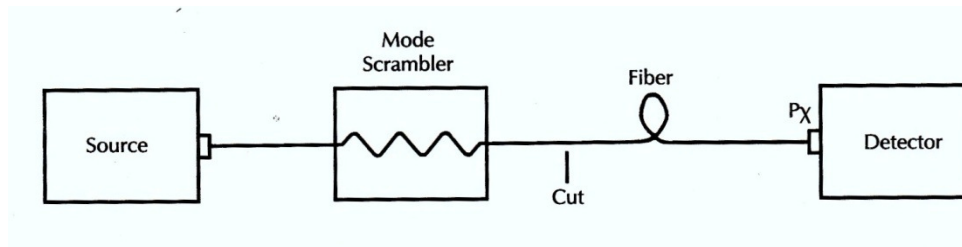


## Μέθοδος παρεμβολής

Είναι η απλούστερη και ταχύτερη μέθοδος, ειδικά για μετρήσεις κατά την διάρκεια της εγκατάστασης και του έλεγχου, στο πεδίο. Αυτή συνίσταται στην σύνδεση μιας οπτικής ίνας με την πηγή και μίας άλλης με τον οπτικό ανιχνευτή (σχήμα 2.10). Το 'mode scrambler' ή η εκτοξεύουσα οπτική ίνα μπορεί να μπει μεταξύ της πηγής και της υπό εξέταση οπτικής ίνας. Σημειώνουμε ότι η ισχύς που μπαίνει στην είσοδο της υπό εξέταση οπτικής ίνας υπολογίζεται αφαιρώντας από την ισχύ την εκπεμπόμενη από την πηγή εξασθένιση, που εισάγει το 'mode scrambler'.

Στην συνέχεια μετράμε την λαμβανόμενη οπτική ισχύ και έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε την ολική εξασθένιση εξ αιτίας της εισαγωγής της οπτικής ίνας. Αν οι πηγές και ο ανιχνευτής δεν καλιμπράρονται ακριβώς με την συγκεκριμένη μέθοδο γίνεται η αντικατάσταση με μια οπτική ίνα έλεγχου ώστε να επιτευχθεί το καλιμπράρισμα πηγής και ανιχνευτή

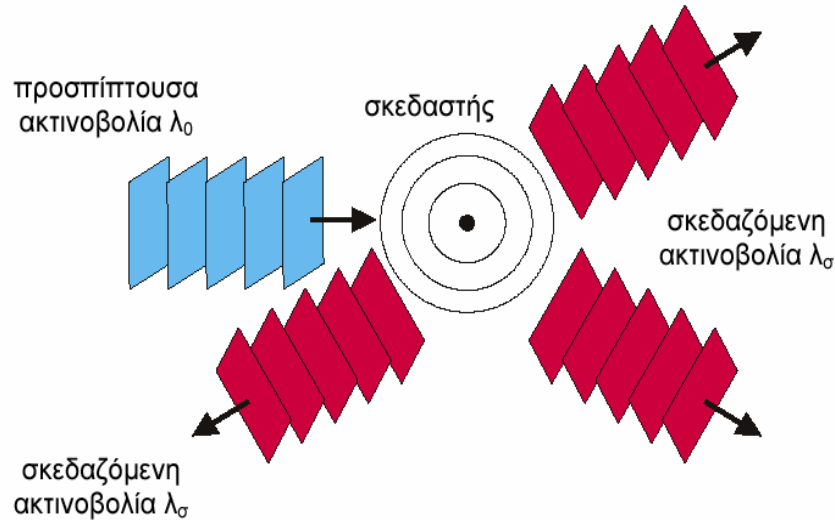
Αυτή η ίνα έλεγχου είναι ίδιου είδους με εκείνη που θα μετρηθεί. Όλα αυτά γίνονται πριν εκτελέσουν οι μετρήσεις. (Σχήμα 2.10)



Σχήμα 2.10

## Σκέδαση (Scattering)

Με τον όρο **σκέδαση** ή *σκέδαση του φωτός* ονομάζεται ο διασκορπισμός των φωτεινών ακτινών που ακολουθεί όταν προσπέσουν σε μικροσκοπικά σωματίδια, έτσι ώστε να διαχέονται στο χώρο χωρίς να φαίνονται αυτές. Η σκέδαση είναι προϊόν πολλαπλής ανάκλασης. Η λέξη ετυμολογικά προέρχεται από το αρχαίο ρήμα *σκεδάννυμι* ή *σκεδῶ* = διασκορπίζω.



*Εικόνα 2.1: Η σκεδαζόμενη ακτινοβολία μπορεί να έχει διαφορετικό μήκος κύματος  $\lambda\sigma$ , ένταση, φάση, διεύθυνση διάδοσης και πόλωση από την προσπίπτουσα ακτινοβολία.*

Παρακάτω αναλύονται τα είδη σκέδασης καθώς και μια σύγκριση μεταξύ τους. Τα είδη είναι τα εξής:

### 1. Σκέδαση Rayleigh

Η σκέδαση φωτός Rayleigh παρατηρείται για σκεδαστές με μέγεθος μικρότερο του μήκους κύματος  $\lambda_0$  της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Το εκπεμπόμενο φωτόνιο μπορεί να έχει την ίδια ή μικρότερη ενέργεια σε σχέση με το προσπίπτον φωτόνιο.

Η ένταση  $I_R$  της Rayleigh-σκεδαζόμενης ακτινοβολίας είναι αντιστρόφως ανάλογη με την τέταρτη δύναμη του μήκους κύματος της ακτινοβολίας :

$$I_R \propto \frac{1}{\lambda_0^4} \quad (2.2)$$

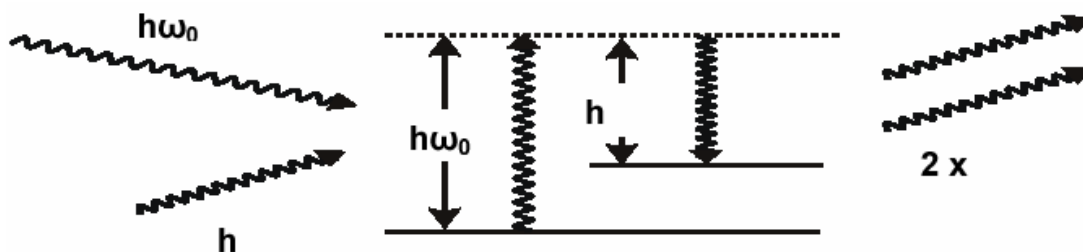
Παραδείγματα φαινομένων σχετιζόμενων με τη σκέδαση Rayleigh:

- Κυανό χρώμα ουρανού, αλλαγή χρωματισμού ουρανού κατά τη δύση και ανατολή του ηλίου.
- Απώλειες ενέργειας κατά τη διάδοση ακτινοβολίας σε διάφανα στερεά (οπτικά στοιχεία, κρυστάλλους, οπτικές ίνες).

## 2. Σκέδαση Raman

Η σκέδαση Raman παρατηρείται κατά την ταυτόχρονη διέλευση δύο φωτονίων συχνοτήτων  $\omega_0$  και  $\omega_s$  ( $\omega_s < \omega_0$ ) από το οπτικό μέσο, όπου το φωτόνιο  $\omega_0$  απορροφάται και ένα μέρος του επανεκπέμπεται με την συχνότητα  $\omega_s$ , του αρχικού συνοδού φωτονίου.

Η ενέργεια  $h(\omega_0 - \omega_s)$  εκπέμπεται ως φωτόνιο (phonon). Η σκέδαση Raman ουσιαστικά αποτελεί διεργασία ενίσχυσης του πληθυσμού φωτονίων  $\omega_s$ , μέσω των φωτονίων  $\omega_0$ .



Εικόνα 2.2: Η διεργασία ενίσχυσης του πληθυσμού των φωτονίων

Η σκέδαση Raman παρατηρείται σε στερεά, υγρά και αέρια μέσα διάδοσης και λαμβάνει χώρα κατά την χρήση υψηλών εντάσεων ακτινοβολίας. Τα προσπίπτοντα και σκεδαζόμενα φωτόνια βρίσκονται σε συμφωνία φάσης.

## 3. Σκέδαση Mie

- Ισχυρή σκέδαση από σωματίδια με διαστάσεις μεγαλύτερες του  $\lambda_0$

- Ισχυρή εξάρτηση εντάσεως σκέδασης από τη γωνία παρατήρησης
- Το σκεδαζόμενο φως έχει χαρακτηριστική κατάσταση πόλωσης
- Η ένταση της σκέδασης IM ισούται με την σκέδαση που προκύπτει από μοναδιαίο σκεδαστή επί το πλήθος των σκεδαστών

#### 4. Σκέδαση Stokes και Anti-Stokes

Παρατηρείται κατά την απορρόφηση ενός φωτονίου  $\omega_0$  από ένα μόριο, και την ακόλουθη διέγερση του μορίου σε ένα δονητικό επίπεδο  $v=1$ , με την ταυτόχρονη εκπομπή ενός φωτονίου  $\omega_s$ , όπου  $\omega_s = \omega_0 - \omega_n$  ενώ στην Anti-Stokes έχουμε την αποδιέγερση ενός δονητικού επιπέδου ενός μορίου από μια κατάσταση  $v=1$ , σε μία άλλη χαμηλότερη  $v=0$ , με την ταυτόχρονη απορρόφηση ενός φωτονίου  $\omega_s$ , η οποία οδηγεί στην εκπομπή ενός φωτονίου  $\omega_0 = \omega_s + \omega_n$ .

#### 5. Σκέδαση Brillouin

Παρατηρείται κατά την διάδοση ενός φωτονίου  $\omega_0$  σε κρυσταλλικά μέσα, όπου το αρχικό φωτόνιο απορροφάται από το κρυσταλλικό πλέγμα και επανεκπέμπεται σαν συνδυασμός ενός φωτονίου χαμηλότερης συχνότητας  $\omega_s$  και ενός φωτονίου  $\omega_f$ , όπου  $\omega_0 = \omega_s + \omega_f$ .

Από τους διαφόρους τύπους η σκέδαση Rayleigh (που οφείλεται σε ανομοιογένειες του υλικού της ίνας) και η σκέδαση Mie (που οφείλεται σε ατέλειες της κοινής επιφάνειας πυρήνα – περιβλήματος) είναι γραμμικές ενώ η σκέδαση Raman και η σκέδαση Brillouin συσχετίζονται με μη γραμμικά φαινόμενα τα οποία εκδηλώνονται όταν η ισχύς του καθοδηγούμενου σήματος είναι της τάξης των 100 mW και άνω.

Από τα παραπάνω φαινόμενα σκέδασης, το σημαντικότερο είναι η σκέδαση Rayleigh η οποία εκφράζεται μέσω του συντελεστή

$$\alpha_R = \frac{K_R}{\lambda^4} \text{ (dB/Km)} \quad (2.3)$$

Οπού  $K_R$  σταθερά που κυμαίνεται από 0,8 έως 1,0 (dB/Km).  $(\mu\text{m})^4$  και είναι συνάρτηση της διαφοράς  $n_{\text{core}}-n_{\text{clad}}$ , της διαμέτρου του πυρήνα και των υλικών νόθευσης της ίνας. Η σκέδαση Rayleigh είναι αυτή που θέτει και το κάτω όριο στην τιμή του συντελεστή εξασθένησης που μπορεί να επιτευχθεί σε μια οπτική ίνα.

Τόσο η σκέδαση Rayleigh όσο και η σκέδαση Mie είναι γραμμικές διεργασίες και ουσιαστικά εκδηλώνονται μέσω της ακτινοβολήσης (και συνεπώς απώλειας) κυματοδηγούμενης ισχύος. Αντίθετα η σκέδαση Raman και η σκέδαση Brillouin είναι μη γραμμικά φαινόμενα τα οποία εκδηλώνονται μέσω μερικής μεταφοράς ισχύος σε τρόπους διαφορετικής συχνότητας. Οι δυο αυτοί τύποι σκέδασης προϋποθέτουν την εισαγωγή στην ίνα οπτικών σημάτων μεγάλης ισχύος (της τάξης των 100 mW για την σκέδαση Brillouin και 1W για την σκέδαση Raman) και συνήθως δεν συνιστούν πρόβλημα αφού οι μεταδιδόμενες στην ίνα οπτικές ισχύς δεν υπερβαίνουν τα λίγα mW<sup>12</sup>.

### Απορρόφηση

Αναφέρεται στη διαδικασία κατά την οποία ή ενέργεια ενός φωτονίου απορροφάται από ένα άλλο σωματίδιο, για παράδειγμα ένα άτομο του οποίου τα ηλεκτρόνια σθένους μεταβαίνουν από μια ενεργειακή στάθμη σε κάποια υψηλότερη, απορροφώντας την ενέργεια του, το οποίο έτσι εξαφανίζεται. Τα σωματίδια αυτά, μπορούν να χάσουν την απορροφούμενη ενέργεια είτε μέσω ανταλλαγής θερμότητας είτε λόγω ακτινοβολίας. Η απορρόφηση (absorption) οπτικής ισχύος προκαλείται από συντονισμούς σε ατομικό επίπεδο, μέσω των οποίων ένα μέρος της μεταδιδόμενης οπτικής ισχύος μετατρέπεται σε θερμότητα. Οι συντονισμοί αυτοί δημιουργούνται είτε από το ίδιο το υλικό της ίνας (ενδογενής απορρόφηση) είτε από ξένα στοιχεία (π.χ. ρίζες υδροξυλίου OH και ιόντα σιδήρου  $\text{Fe}^{3+}$ , χαλκού  $\text{Cu}^{2+}$ , νικελίου  $\text{Ni}^{2+}$ , χρωμίου  $\text{Cr}^{3+}$  κ.τ.λ.) τα οποία παρεισφρέουν στην ίνα κατά τις διεργασίες κατασκευής ( εξωγενής απορρόφηση). Από αυτές ιδιαίτερα σημαντική είναι η απορρόφηση εξαιτίας της ρίζας OH η οποία έχει μήκος κύματος συντονισμού τα 2720 nm και παρουσιάζει μέγιστα και στις αρμονικές 2720/(ν+1) nm (π.χ. στα 1360, 930 και 680 nm).

## Συντελεστής εξασθένησης ίνας

Χαρακτηριστική παράμετρος για την εξασθένηση του οπτικού σήματος σε μία ίνα είναι ο συντελεστής εξασθένησης (attenuation coefficient)  $\alpha_f$  που συνήθως εκφράζεται σε dB/Km. Λαμβανομένων υπόψη των κυριότερων μηχανισμών οπτικής εξασθένησης, ο συντελεστής εξασθένησης μπορεί, με ικανοποιητική προσέγγιση να γραφεί ως

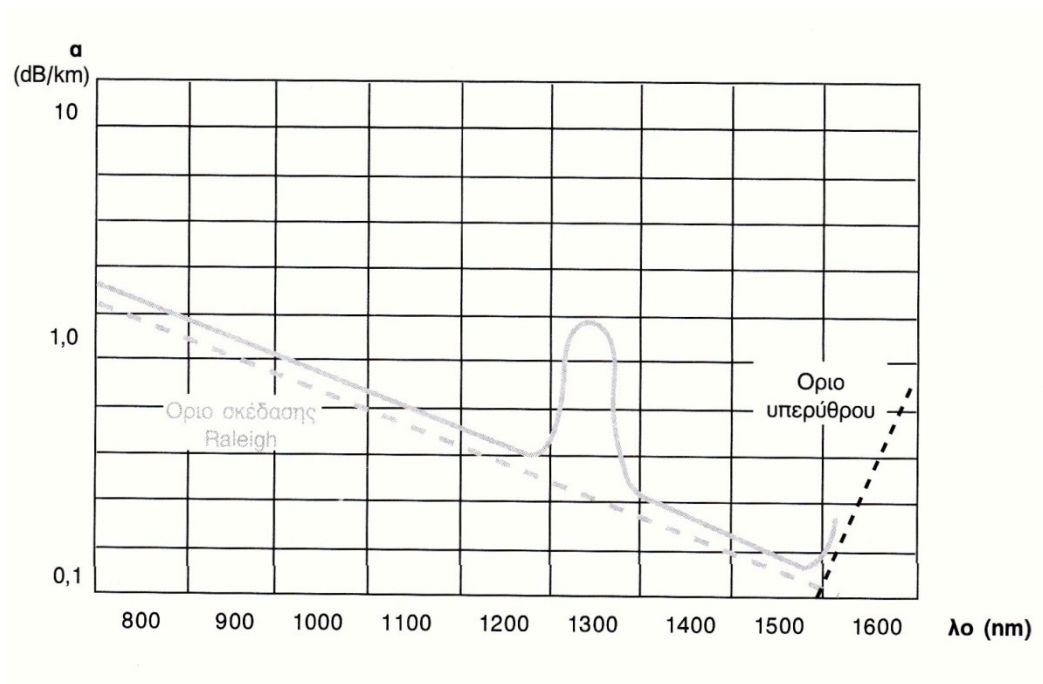
$$\alpha_f = \frac{K_R}{\lambda^4} + K_a(\lambda) + K_m \left( \frac{db}{Km} \right) \quad (2.4)$$

Όπου ο όρος  $\frac{K_R}{\lambda^4}$  εκφράζει την σκέδαση Rayleigh (εξίσωση εξασθένησης Rayleigh), ο όρος  $K_a(\lambda)$  εκφράζει την απορρόφηση (συνάρτηση του μήκους κύματος) και ο όρος  $K_m$  εκφράζει τυχόν άλλες απώλειες (π.χ. λόγω γήρανσης) που μπορεί να προκύψουν.

Η εξίσωση  $\xi_{01} = V_{c,01} = 2,405$  καταδεικνύει το γεγονός ότι ο συντελεστής εξασθένησης  $\alpha_f$  είναι συνάρτηση του μήκους κύματος λειτουργίας  $\lambda_0$ . Μάλιστα, λόγω του όρου  $c_a(\lambda)$ , ο συντελεστής εξασθένησης παρουσιάζει τοπικά μέγιστα και ελάχιστα σε συγκεκριμένα μήκη κύματος. Ειδικότερα, τα ελάχιστα, εμφανίζονται στα μήκη κύματος των 850, 1310, 1550 nm και αποτελούν τα λεγόμενα παράθυρα ελάχιστης εξασθένησης (attenuation windows) στα οποία επιδιώκεται η λειτουργία των ινοοπτικών ζεύξεων.

Στην μονότροπες οπτικές ίνες, ο συντελεστής εξασθένησης λαμβάνει τιμές περί τα 2,5 dB/Km στα 850 nm, περί τα 0.35 dB/Km στα 1310 nm και περί τα 0.20 dB/Km στα 1550 nm. (Σχήμα 2.11). Σήμερα, το πρώτο <παράθυρο> των 850 nm έχει σχεδόν εγκαταλειφθεί και η συντριπτική πλειοψηφία των ινοοπτικών ζεύξεων λειτουργεί στο δεύτερο και στο τρίτο <παράθυρο> (των 1310 nm και 1550 nm αντιστοίχως). Από τα <παράθυρα> αυτά, το δεύτερο (1310 nm) πλεονεκτεί ως προς το κόστος του ενεργού εξοπλισμού (οπότε προτιμάτε στις αστικές και χερσαίες και υπεραστικές ζεύξεις όπου οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων είναι μικρές), το δε

τρίτο (1550 nm) πλεονέκτη ως προς την ελαχιστοποίηση της εξασθένησης και προτιμάται στις υποβρύχιες ζεύξεις.



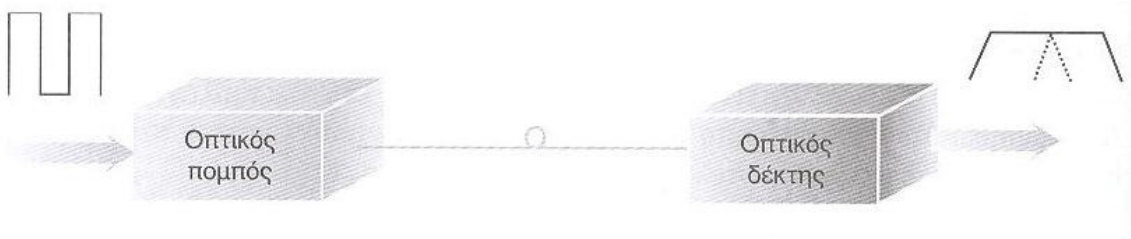
Σχήμα 2.11: Μεταβολή του συντελεστή εξασθένησης  $\alpha$  (dB/Km) συνάρτηση του μήκους κύματος για μονότροπη ίνα. Στην γραφική παράσταση φαίνονται τα παράθυρα ελάχιστης εξασθένησης στις περιοχές 1310 και 1550 nm καθώς και τα ελάχιστα όρια εξασθένησης που θέτουν η σκέδαση Rayleigh (μπλε εστιγμένη γραμμή) και η απορρόφηση στο υπέρυθρο (κόκκινη εστιγμένη γραμμή).

## Διασπορά

Διασπορά (dispersion) είναι το φαινόμενο διαπλάτυνσης ενός σήματος πληροφορίας, καθώς αυτό μεταδίδεται μέσω μιας οπτικής ίνας, εξαιτίας της διαφορετικής ταχύτητας μετάδοσης των διαφορών τμημάτων του σήματος. Έτσι, σε ένα ψηφιακό ινοοπτικό σύστημα, οι παλμοί εξόδου εμφανίζονται διαπλατυσμένοι σχετικά με τους παλμούς εισόδου, γεγονός που δημιουργεί περιορισμούς στο ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να υλοποιηθεί, αφού υπερβολικά υψηλός ρυθμός μετάδοσης θα δημιουργούσε σημαντική διασυμβολική παρεμβολή (intersymbol interference) λόγω της αλληλοεπικάλυψης των παλμών εξόδου. (σχήμα 2.12)

Υπάρχουν γενικά 2 είδη διασποράς, η διατροπική διασπορά (intermodal) και η ενδοτροπική (intramodal) ή χρωματική (chromatic) διασπορά. Η πρώτη (διατροπική)

διασπορά οφείλεται στην διαφορά μεταξύ των ταχυτήτων μετάδοσης των διαφόρων τρόπων (και δημιουργείται σε μόνον σε πολύτροπες ίνες) ενώ η δεύτερη (ενδοτροπική) οφείλεται στην εξάρτηση των παραμέτρων κυματοδήγησης των σημάτων, από το μήκος κύματος μετάδοσης και δημιουργείται τόσο στις πολύτροπες όσο και στις μονότροπες. Περαιτέρω η ενδοτροπική διασπορά απαρτίζεται από δύο συνιστώσες, την διασπορά υλικού (material dispersion) που οφείλεται στην εξάρτηση του δείκτη διάθλασης της ίνας από το μήκος κύματος μετάδοσης και στην κυματοδηγητική διασπορά (waveguide dispersion) που δημιουργείται από την διαφορά των δεικτών διάθλασης του πυρήνα και του περιβλήματος.



Σχήμα 2.12: Εκδήλωση του φαινομένου της διασποράς (σχετική αναπαράσταση)

### Διατροπική διασπορά

Η διατροπική διασπορά (intermodal) εμφανίζεται μόνο στις πολύτροπες ίνες, όπου το σήμα εξόδου συντίθεται από τους διαφορετικούς τρόπους που μεταδίδονται στην ίνα. Αυτοί οι τρόποι έχουν διαφορετικές φασικές ταχύτητες (οι αντίστοιχες οπτικές ακτίνες ακολουθούν διαφορετικούς δρόμους προτού φθάσουν στην έξοδο της ίνας) με αποτέλεσμα το σήμα εξόδου να παρουσιάζει μεγαλύτερη χρονική διάρκεια συγκριτικά με το σήμα εξόδου.

Χαρακτηριστική παράμετρος για τη διατροπική διασπορά είναι ο συντελεστής διατροπικής διασποράς  $\tau_\delta$  (συνήθως σε ns/Km) που εκφράζει την χρονική καθυστέρηση μεταξύ των μεταδιδόμενων τρόπων ανά μονάδα μήκους ζεύξης. Ο συντελεστής αυτός δίνεται (για πολύτροπες ίνες βηματικού δείκτη διάθλασης) από το τύπο

$$\tau_\delta = \frac{n_{\text{core}} \Delta}{c} \quad (\text{σε ps/Km}) \quad (2.5)$$



Με την σειρά της, η διατροπική διασπορά  $D_\delta$  δίνεται από το τύπο

$$D_\delta = \tau_\delta \cdot L \quad (\text{σε ps}) \quad (2.6)$$

και είναι ανάλογη του μήκους  $L$  της ζεύξης.

### Ενδοτροπική διασπορά

Αντίθετα με τη διατροπική διασπορά, η ενδοτροπική διασπορά (intramodal) εμφανίζεται τόσο σε πολύτροπες ίνες όσο και σε μονότροπες. Η διασπορά αυτή οφείλεται κυρίως στην εξάρτηση του δείκτη διάθλασης της ίνας από το μήκος κύματος του οπτικού σήματος (διασπορά υλικού) το οποίο δεν είναι απόλυτα καθορισμένο, αλλά καταλαμβάνει μια στενή περιοχή τιμών ( $\lambda_0 - \Delta\lambda/2$ ,  $\lambda_0 + \Delta\lambda/2$ ) γύρω από το κεντρικό μήκος κύματος λειτουργίας  $\lambda_0$ , (ενδοτροπική διασπορά υλικού material dispersion) και υπάρχει και η κυματοδηγητική διασπορά (waveguide dispersion). Από αυτές, η διασπορά υλικού διαμορφώνεται μέσω της μεταβολής της νόθευσης του υλικού της ίνας ενώ η κυματοδηγητική διασπορά μπορεί να ρυθμιστεί μέσω κατάλληλης επιλογής της κατανομής (profile) του δείκτη διάθλασης. Χαρακτηριστική παράμετρος για την ενδοτροπική διασπορά είναι ο συντελεστής ενδοτροπικής διασποράς  $\tau_\varepsilon$  (συνήθως σε ps/nm.km) που εκφράζει χρονική διαπλάτυνση (παλμών) ανά μονάδα μήκους κύματος και μονάδα μήκους ζεύξης. Ο συντελεστής αυτός είναι άθροισμα των επιμέρους συντελεστών  $\tau_{\varepsilon, \nu}$  για την διασπορά υλικού και  $\tau_{\varepsilon, \kappa}$  για την κυματοδηγητική διασπορά. Ισχύει δηλαδή η σχέση

$$\tau_\varepsilon = \tau_{\varepsilon, \nu} + \tau_{\varepsilon, \kappa} \quad (\text{σε ps/ nm.Km}) \quad (2.7)$$

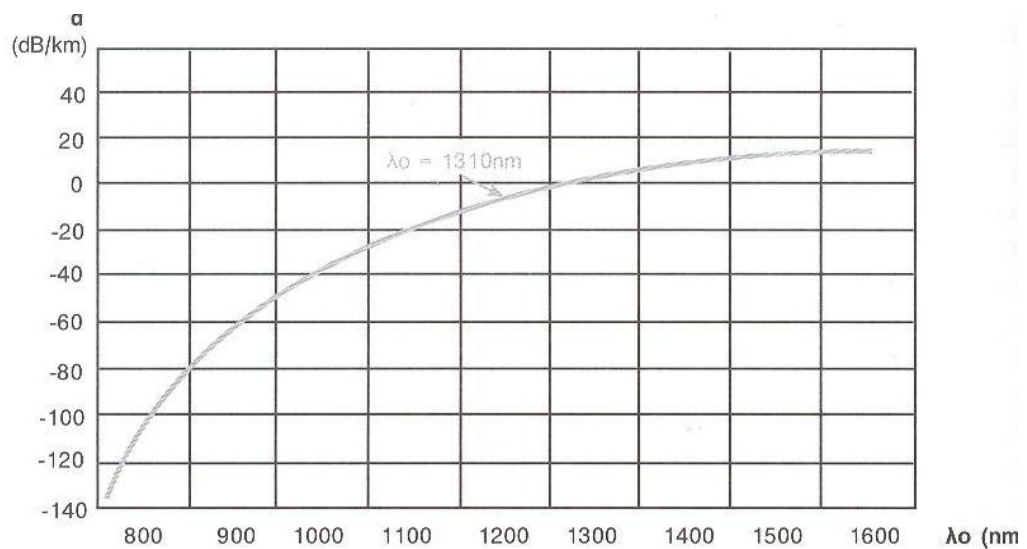
Ενώ η ενδοτροπική διασπορά  $D_\varepsilon$  δίνεται από τον τύπο

$$D_\varepsilon = \tau_\varepsilon \cdot \Delta\lambda \cdot L \quad (\text{σε ps}) \quad (2.8)$$

Και είναι ανάλογη, τόσο του φασματικού εύρους  $\Delta\lambda$  του οπτικού πομπού όσο και του μήκους  $L$  της ζεύξης. Ας σημειωθεί ότι, εκτός των γεωμετρικών παραμέτρων της ίνας, ο συντελεστής της ενδοτροπικής διασποράς  $\tau_\varepsilon$  εξαρτάται από το μήκος

κύματος  $\lambda_0$  (σχήμα 2.13) και για συμβατικές ίνες μηδενίζεται για μήκος κύματος  $\lambda_0=1310 \text{ nm}$ .

Η εξάρτηση της διασποράς από το φασματικό εύρος  $\Delta\lambda$  του οπτικού πομπού επιβάλει τη χρήση (ιδιαίτερα σε επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων) οπτικών πηγών με στενό φασματικό εύρος. Τέτοιες πηγές είναι οι διάφοροι τύποι Laser ημιαγωγού.



Σχήμα 2.13: Μεταβολή του συντελεστή ενδοτροπικής διασποράς  $\alpha$  συναρτήσει του μήκους κύματος λειτουργίας  $\lambda_0$ . Στην γραφική παράσταση, φαίνεται ο μηδενισμός του συντελεστή  $\alpha$  για  $\lambda_0=1310 \text{ nm}$ .

Η ταχύτητα ομάδος που σχετίζεται με το βασικό τρόπο μετάδοσης εξαρτάται από την συχνότητα εξαιτίας της χρωματικής διασποράς. Σαν αποτέλεσμα οι διαφορετικές φασματικές συνιστώσες του παλμού μεταδίδονται με ελαφρώς διαφορετικές ταχύτητες ομάδας (GVD). Εξετάζοντας ενδοτροπική διασπορά υλικού και την κυματοδηγητική διασπορά θα ανακαλύψουμε πως η GDV περιορίζει τη λειτουργικότητα των οπτικών συστημάτων που χρησιμοποιούν μονότροπες ίνες.

### Διασπορά ταχύτητας ομάδος

Έστω μια ίνα μήκους  $L$ . Στην έξοδο της Ίνας θα φτάσει συγκεκριμένη φασματική συνιστώσα με συχνότητα  $\omega$  μετά από χρονική καθυστέρηση  $T=L/u_g$  όπου  $u_g$  είναι η ταχύτητα ομάδας που ορίζεται ως εξής:

$$U_g = \left( \frac{d\beta}{d\omega} \right)^{-1} \quad (2.9)$$

Χρησιμοποιώντας  $\beta = nk_0 = n\omega/c$  στην παραπάνω εξίσωση αποδεικνύεται ότι  $u_g = c/n_g$ , όπου  $n_g$  είναι ο δείκτης διάθλασης ομάδας που δίνεται από την σχέση:

$$n_g = n + \omega \cdot \left( \frac{dn}{d\omega} \right) \quad (2.10)$$

Η εξάρτηση της ταχύτητας ομάδας από την συχνότητα οδηγεί σε παλμική διερεύνηση απλώς επειδή οι διαφορετικές φασματικές συνιστώσες του παλμού διασκορπίζονται κατά την διάρκεια της μετάδοσης και δεν φτάνουν ταυτόχρονα στην έξοδο της ίνας. Αν  $\Delta\omega$  είναι το φασματικό εύρος του παλμού, η έκταση της διερεύνησης του παλμού για μια ίνα μήκους  $L$  διέπεται από την σχέση:

$$\Delta T = dt \frac{dT}{d\omega} \Delta\omega = \frac{d}{d\omega} \left( \frac{L}{u_g} \right) \Delta\omega = L \frac{\beta d^2}{d\beta^2} \Delta\omega = L\beta_2 \Delta\omega \quad (2.11)$$

Όπου έγινε χρήση της εξίσωσης 1. Η παράμετρος  $\beta_2 = d^2\beta/d\omega^2$  είναι γνωστή και ως παράμετρος GVD. Αυτή καθορίζει το πόσο θα διερευνηθεί ένας οπτικός παλμός κατά την μετάδοση του μέσα στην ίνα. Σε μερικά οπτικά συστήματα επικοινωνιών η εξάπλωση της συχνότητας  $\Delta\omega$  καθορίζεται από την περιοχή των μήκων κύματος  $\Delta\lambda$  που εκπέμπονται από μια οπτική πηγή. Συνήθως χρησιμοποιούμε  $\Delta\lambda$  αντί για  $\Delta\omega$ .

Αν  $\omega = 2\pi c/\lambda$  και  $\Delta\omega = (-2\pi c/\lambda^2)\Delta\lambda$ , η εξίσωση 3 μπορεί να γραφτεί και ως εξής

$$\Delta T = \frac{d}{d\lambda} \left( \frac{L}{u_g} \right) = \frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \Delta\lambda \quad (2.12)$$

Όπου

$$D = \frac{d}{d\lambda} \left( \frac{1}{u_g} \right) = \frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (2.13)$$

$D$  είναι η παράμετρος διασποράς και εκφράζεται σε μονάδες συνήθως σε ps/(Km-nm). Η επίδραση της διασποράς στο ρυθμό μετάδοσης bit  $B$  υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το κριτήριο  $B\Delta T < 1$ . Αν από την εξίσωση 4 χρησιμοποιήσουμε το  $\Delta T$  η συνθήκη αυτή γίνεται

$$BL|D|\Delta\lambda < 1 \quad (2.14)$$

Η εξίσωση 7 παρέχει έναν υπολογισμό της τάξεως μεγέθους του γινομένου  $BL$  για τις μονότροπες ίνες. Στις συνιθισμένες ίνες πυριτίου η  $D$  είναι σχετικά μικρή στην περιοχή μήκους κύματος γύρω στα  $1,3 \mu\text{m}$  [ $D \sim 1\text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$ ]. Για έναν ημιαγωγό laser φασματικό εύρος  $\Delta\lambda$  είναι μεταξύ  $2-4 \mu\text{m}$  ακόμα και όταν το laser λειτουργεί με διαφόρους διαμήκεις τρόπους μετάδοσης. Το γινόμενο  $BL$  τέτοιου είδους οπτικών συστημάτων μπορεί να υπερβεί τα  $100 \text{ GB/s} - \text{Km}$ . Τα συστήματα τηλεπικοινωνιών  $1,3\mu\text{m}$  τυπικά λειτουργούν με ρυθμό μετάδοσης bit  $2 \text{ Gb/s}$  και με απόσταση μεταξύ επαναλήψεων σε απόσταση  $40-50 \text{ Km}$ . Το γινόμενο  $BL$  μιας μονότροπης ίνας μπορεί να υπερβεί το  $1 \text{ (Tb/s)}\cdot\text{km}$  και όταν χρησιμοποιούνται μονότροπες ημιαγωγούς laser για να μειώσουμε με αυτό τον τρόπο την  $\Delta\lambda$  κάτω από το  $1 \text{ nm}$ . Η παράμετρος διασποράς  $D$  μπορεί να μεταβάλλεται σημαντικά όταν το μήκος κύματος λειτουργίας μεταβληθεί από τα  $1,3 \mu\text{m}$ . Η εξάρτηση αυτής της  $D$  από το μήκος κύματος ρυθμίζεται από την εξάρτηση του τρόπου μετάδοσης  $v$  από την συχνότητα. Από την εξίσωση 6 η  $D$  μπορεί και να γραφτεί και ως εξής:

$$D = -2\pi c/\lambda^3 \frac{d/d\omega (1/v_g)}{v_g} = -2\pi/\lambda^3 (2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2n}{d\omega^2}) \quad (2.15)$$

Όπου η χρήση της εξίσωσης 2.10. Αν γίνει αντικατάσταση του  $v$  της εξίσωσης του βαθμού διαθλαστικότητας  $B = |n_x - n_y|$  και γίνει η χρήση της εξίσωσης της συνθήκης αποκοπής  $V = K_0 a (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \approx (2\pi/\lambda) a n_1 \sqrt{2\Delta}$  η  $D$  μπορεί να γραφτεί σαν το άθροισμα των δύο ορών.

$$D = D_M + D_W \quad (2.16)$$

Όπου η διασπορά υλικού  $D_M$  και η διασπορά κυματοδότησης  $D_W$  δίνονται από τις σχέσεις:

$$D_M = -\frac{2\pi}{\lambda^2} \frac{dn_{2g}}{d\omega} = \frac{1}{c} \frac{dn_{2g}}{d\lambda} \quad (2.17)$$

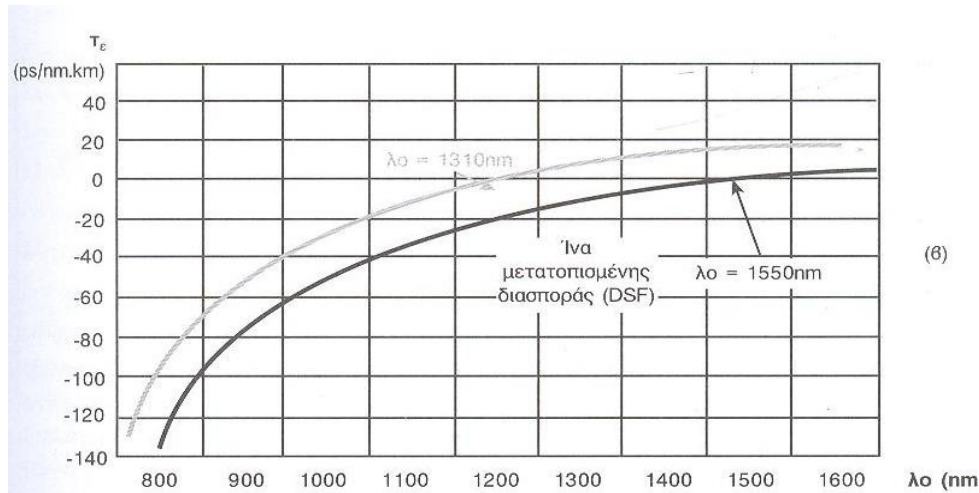
$$D_W = -\frac{2\pi\Delta}{\lambda^2} \left[ \frac{n_{2g}^2}{\omega n_2} \frac{Vd^2}{dV^2} (Vb) + \frac{dn_{2g}}{d\omega} \frac{d(Vb)}{dV} \right] \quad (2.18)$$

Σε αυτή την περίπτωση το  $n_{2g}$  είναι δείκτης διάθλασης ομάδας υλικού του περιβλήματος και οι παράμετροι  $V$  και  $b$  δίνονται από τις εξισώσεις της συνθήκης αποκοπής και της εξίσωσης κανονικοποιημένης σταθεράς μετάδοσης  $b$  αντίστοιχα.

Για να ισχύουν οι εξισώσεις η παράμετρος  $\Delta$  θεωρείται ότι εξαρτάται από την συχνότητα.

### Ύνες μετατοπισμένης και επίπεδης διασποράς

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.14, ο συντελεστής ενδοτροπικής διασποράς  $\tau_e$  μηδενίζεται στο φασματικό παράθυρο των 1310 nm. Σε πολλές εφαρμογές όμως, είναι επιθυμητή η χρήση του τρίτου «παραθύρου» (1550 nm) λόγω ελαχιστοποίησης, στο παράθυρο αυτό, του συντελεστή εξασθένησης. Για τον λόγο αυτό έχουν κατασκευαστεί οπτικές ίνες «μετατοπισμένης διασποράς» (dispersion-shifted fibers, DSF) στις οποίες το μήκος μηδενισμού του συντελεστή ενδοτροπικής διασποράς  $\tau_e$  έχει «μετατοπιστεί» στην φασματική περιοχή των 1550 nm, όπου παρουσιάζεται και ελάχιστη εξασθένηση. Στις ίνες αυτές, ο μηδενισμός του  $\tau_e$  στην περιοχή των 1550 nm επιτυγχάνεται με κατάλληλη διαμόρφωση της κατανομής του δείκτη διάθλασης έτσι ώστε να αυξάνεται η αρνητική κλίση του συντελεστή κυματοδηγητικής διασποράς  $\tau_{e,\kappa}$  (ως συνάρτηση του  $\lambda_0$ ) με αποτέλεσμα ο μηδενισμός του συντελεστή ενδοτροπικής διασποράς  $\tau_e$  να προκύπτει στα 1550 αντί για τα 1310 nm (σχήμα 2.14).



Σχήμα 2.14: α) τυπική κατανομή δείκτη διάθλασης πυρήνα σε ίνες μετατοπισμένης διασποράς (DSF)

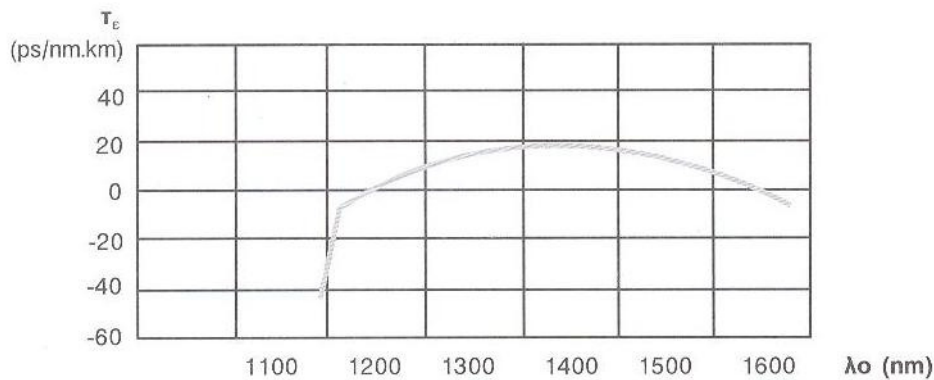
β) μεταβολή συντελεστή ενδοτροπική διασποράς  $T_e$  σε ίνες μετατοπισμένης διασποράς (DSF).

$$T_e=0, \lambda_0=1550 \text{ nm}$$

Αν και στις ίνες μετατοπισμένης διασποράς επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση, στην ίδια φασματική περιοχή, τόσο της εξασθένησης όσο και της ενδοτροπικής διασποράς, οι ίνες αυτές μειονεκτούν όταν στις οπτικές ζεύξεις επιδιώκεται η ταυτόχρονη μετάδοση περισσότερων σημάτων μέσω χρήσης διαφορετικού μήκους κύματος για κάθε σήμα, (τεχνική πολυπλεξίας μήκους κύματος, wavelength Division Multiplexing ή WDM). Ο λόγος είναι ότι, εξαιτίας του μηδενισμού της διασποράς (και της συνεπαγόμενης εξίσωσης των ταχυτήτων ομάδας των μεταδιδόμενων σημάτων) ευνοούνται μη γραμμικά φαινόμενα (π.χ. η τετρακυματική μίξη) που υποβαθμίζουν τις επιδόσεις των συστημάτων. Για το λόγο αυτόν, έχουν κατασκευαστεί ίνες μετατοπισμένης διασποράς, στις οποίες ο συντελεστής ενδοτροπικής διασποράς, στα 1550 nm, διατηρείται σε χαμηλές τιμές (περίπου 2

ps/nm.km) οι ίνες αυτές είναι γνωστές ως ίνες μετατοπισμένης, μη μηδενικής διασποράς (non-zero dispersion-shifted fibers, NZ-DSF).

Τέλος, έχουν κατασκευαστεί ίνες στις οποίες, με κατάλληλη διαμόρφωση του δείκτη διάθλασης, έχει επιτευχθεί ο μηδενισμός του συντελεστή ενδοτροπικής διασποράς  $\tau_e$  σε δύο μήκη κύματος. Με τον τρόπο αυτόν, δημιουργείται μια φασματική περιοχή (1300 – 1600 nm) στην οποία ο  $\tau_e$  παραμένει περίπου σταθερός (με τιμές 2 - 6 ps/nm.km) και, για το λόγο αυτόν, οι ίνες αυτές χαρακτηρίζονται ως ίνες επίπεδης διασποράς. (σχήμα 2.15) Ενόψει της καθιέρωσης της χρήσης WDM στις ινοοπτικές ζεύξεις έχει σταματήσει η εγκατάσταση οπτικών καλωδίων με ίνες μετατοπισμένης διασποράς.



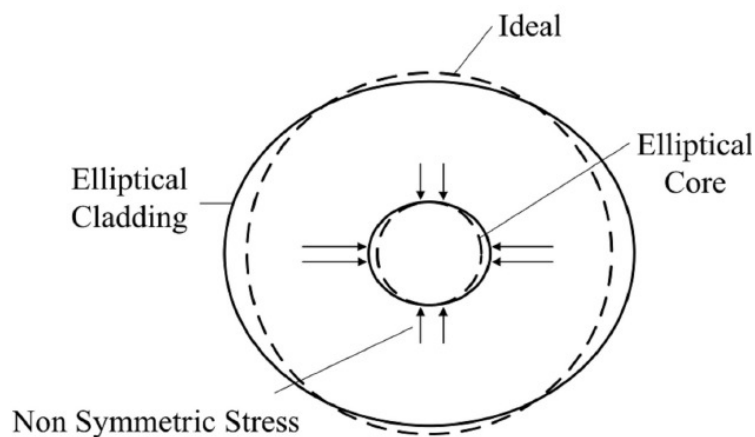
Σχήμα 2.15: μεταβολή συντελεστή ενδοτροπικής διασποράς  $\tau_e$  σε ίνες επίπεδης διασποράς

Γενικά στις σημερινές ίνες ειδικού σχεδιασμού (όπως οι NZ-DSF και οι ίνες επίπεδης διασποράς) ταυτόχρονα με την επιλογή της συμπεριφοράς των ινών ως προς την ενδοτροπική διασπορά, λαμβάνεται μέριμνα και για την βελτίωση των επιδόσεων τους ως προς τα μη γραμμικά φαινόμενα. Τα φαινόμενα αυτά εκδηλώνονται όταν, δια μέσου των οπτικών ινών, μεταδίδονται σήματα με μεγάλη ισχύ (περιπτώσεις χρήσης WDM) και ένας τρόπος για την καταστολή τους είναι η αύξηση, στις ίνες, της επιφάνειας κυματοδότησης (ενεργός επιφάνεια ή active area) προκειμένου να μειώνεται η μεταδιδόμενη ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας. Τέτοια είναι π.χ. η ίνα LEAF (large effective area fiber) η οποία έχει ενεργό επιφάνεια  $72 \mu\text{m}^2$  ενώ η διασπορά της κυμαίνεται από 2 έως 6 ps/nm.km

## 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 2.16. 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.





Σχήμα 2.16: Η ίνα λόγω μη συμμετρικών μηχανικών φορτίων αποκτά ένα ελαφρώς ελλειπτικό σχήμα.

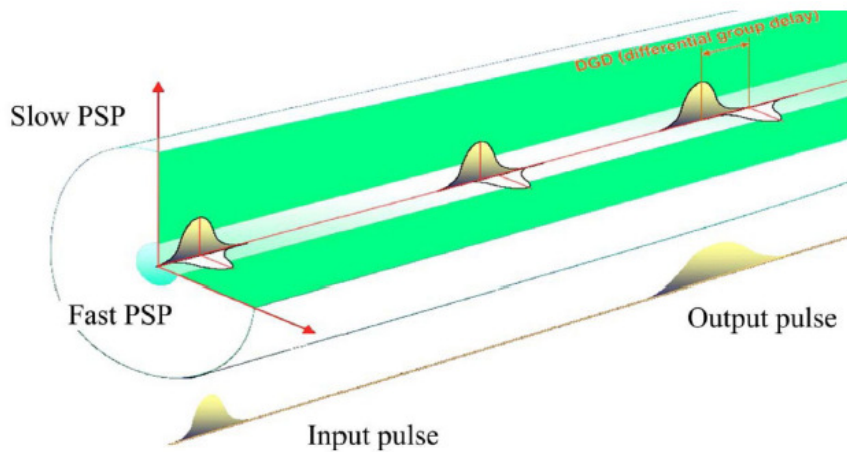
Η σχέση που δίνει τη χρονική καθυστέρηση λόγω PMD είναι:

$$\Delta\tau = DPMD \cdot L \quad (2.19)$$

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.



Σχήμα 2.17: 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.



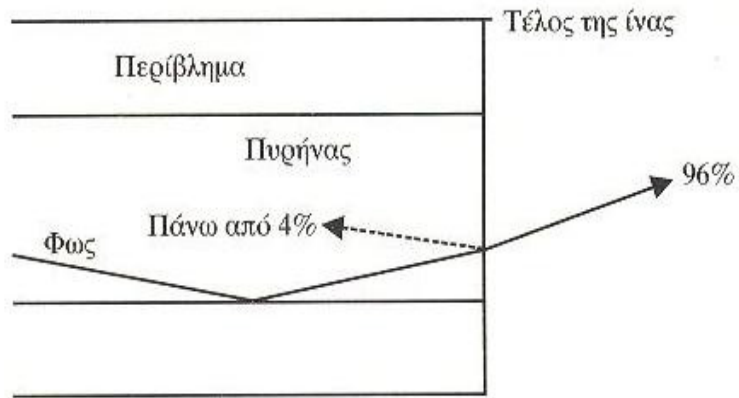
Σχήμα 2.18: Τρεις βασικοί τύποι ινών που διατηρούν την κατάσταση πόλωσης του φωτός ίδια με αυτή που είχε κατά την είσοδο του στην ίνα. Οι σκιασμένες περιοχές έχουν διαφορετικό συντελεστή διαστολής και κατά την ψύξη της ίνας προκαλούν πιέσεις στον πυρήνα κάνοντας τον έντονα διπλοθλαστικό.

### Ανάκλαση του Fresnel

Πριν περάσουμε στις απώλειες εκτός του πυρήνα της ίνας και ανοίγοντας μια μεγάλη παρένθεση στην ενδοτροπική διασπορά θα αναφερθούμε στην ανάκλαση του Fresnel. Όταν μια ακτίνα φωτός πέσει πάνω σε άλλο συντελεστή διάθλασης και προσεγγίζει σε γωνία κοντά στην κάθετο, το μεγαλύτερο μέρος ότι φωτός διαπερνάει το υλικό.

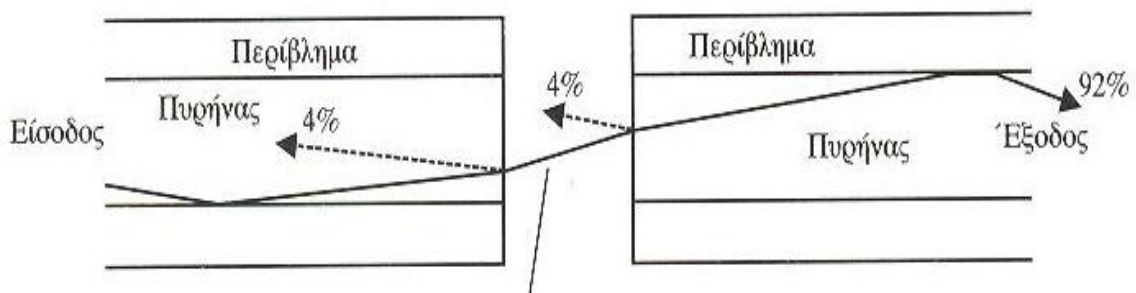
Το μεγαλύτερο ποσοστό, όχι όμως όλο. Μια πολύ μικρή, ποσότητα ανακλάται πίσω από την διαχωριστική επιφάνεια. Έχουμε δει το φαινόμενο αυτό με ένα απλό τζάμι παραθύρου, κοιτώντας σε ένα καθαρό παράθυρο, βλέπουμε δύο εικόνες. Μπορούμε να δούμε την αντανάκλαση από αυτό που βρίσκεται πίσω μας. Επομένως το φως περνάει μέσα από το τζάμι, αλλά ανακλάται κιόλας στην επιφάνεια.

Ενδιαφερόμαστε ιδιαίτερα για αυτή την απώλεια όταν αφορά το φως που βγαίνει από το άκρο, της οπτικής ίνας (σχήμα 2.19).



Σχήμα 2.19: Ανάκλαση Fresnel

Στο σημείο αυτό, έχουμε μια ξαφνική μετάβαση από το συντελεστή διάθλασης του πυρήνα και αυτό του περιβάλλοντος αέρα. Το φαινόμενο συμβαίνει και από την άλλη κατεύθυνση εξίσου. Η ίδια μικρή ποσότητα που προσπαθεί να εισέλθει στην ίνα ανακλάται έξω (σχήμα 2.20).



Σχήμα 2.20: Ανάκλαση Fresnel από κάθε επιφάνεια

Η ακριβής ποσότητα φωτός που καθορίζεται από την ποσότητα κατά την οποία αλλάζει ο συντελεστής διάθλασης στην διαχωριστική επιφάνεια δίνεται από τον τύπο:

$$\text{ανακλώμενη ισχύς} = \left[ \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right]^2 \quad (2.20)$$

Στο σχήμα 2,6 το 96% της ισχύος του προσπίπτοντος φωτός διαπερνά την διαχωριστική επιφάνεια και το υπόλοιπο 4% ανακλάται. Αυτή η ανακλώμενη ισχύς αντιπροσωπεύει μια απώλεια της τάξης του 0,177 db.

## Τυποποίηση των μονότροπων ινών ως μέσων μετάδοσης

Ανάλογα με τις ιδιότητες τους ως μέσων μετάδοσης (και κυρίως με βάση τη συμπεριφορά τους ως προς την ενδοτροπική διασπορά), οι μονότροπες ίνες (και κατ' επέκταση τα αντίστοιχα οπτικά καλώδια), τυποποιούνται με βάση, κυρίως, τις παρακάτω συστάσεις της ITU-T:

- Σύσταση G.652: Συνήθεις μονότροπες ίνες με φασματική περιοχή μηδενισμού της ενδοτροπικής διασποράς το δεύτερο παράθυρο (1310 nm)
- Σύσταση G.653: Μονότροπες ίνες μετατοπισμένης διασποράς με φασματική περιοχή μηδενισμού της ενδοτροπικής διασποράς το τρίτο παράθυρο (1550 nm). Η χρήση τέτοιων ινών τείνει να εγκαταλειφθεί
- Σύσταση G.655: Μονότροπες ίνες μετατοπισμένης μη μηδενικής διασποράς (συντελεστής ενδοτροπικής διασποράς στα 1550 nm ίσος με 2 ps/nm.km).

Τυπικές τιμές παραμέτρων μετάδοσης για μονότροπες ίνες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Συντελεστής εξασθένησης, 1310 nm	0,5 - 0,8 dB/km
Συντελεστής εξασθένησης, 1550 nm	0,2 - 0,3 dB/km
Συντελεστής ενδοτροπικής διασποράς, 1310 nm, τυπική ίνα (G.652)	< 3,5 ps/nm.km
Συντελεστής ενδοτροπικής διασποράς, 1550 nm, τυπική ίνα (G.652)	17 ps/nm.km
Συντελεστής ενδοτροπικής διασποράς, 1310 nm, ίνα μετατοπισμένης διασποράς (G.653)	17 ps/nm.km
Συντελεστής ενδοτροπικής διασποράς, 1550 nm, ίνα μετατοπισμένης διασποράς (G.653)	< 3,5 ps/nm.km
(Εύρος ζώνης).(απόσταση), 1310 nm	20+ GHz.km
(Εύρος ζώνης).(απόσταση), 1550 nm	4-20+ GHz.km

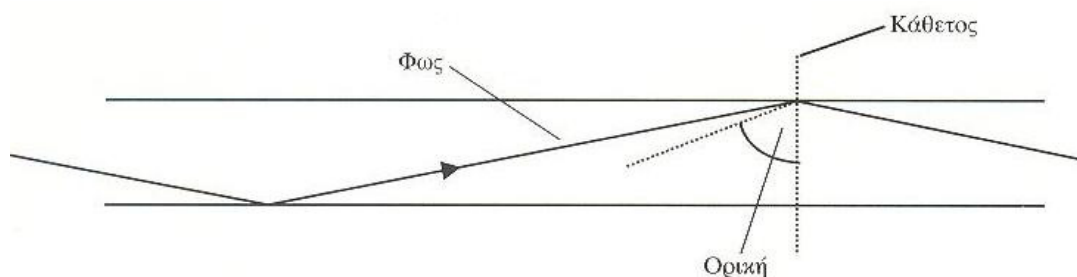
Πίνακας 2.1: τυπικές τιμές παραμέτρων μετάδοσης οπτικών ινών

## Απώλειες Κάμψης

Έκτος από τις απώλειες που έχουμε λόγω φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την διάδοση του φωτός μέσα στον πυρήνα της ίνας, μπορούμε να έχουμε και από κάμψεις ινών, κακές ενώσεις, συνδεσμολογίες, συμβατότητες μεταξύ ινών.

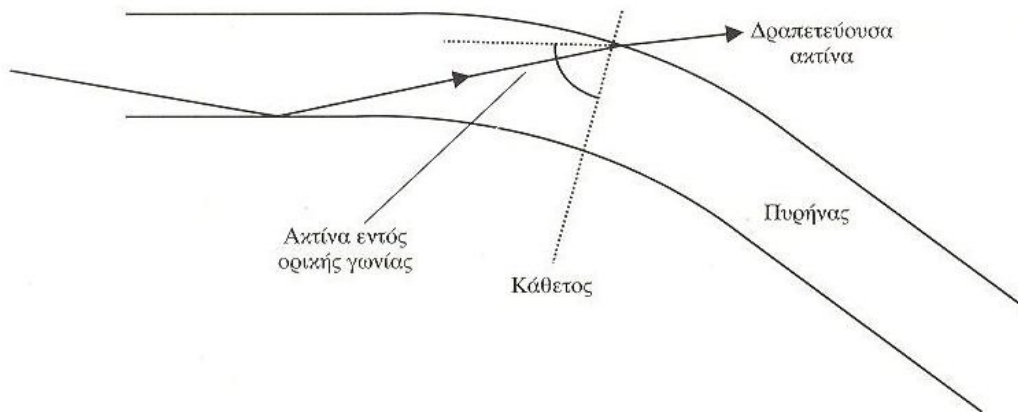
### Μακροκάμψεις

Μια αιχμηρή καμπή της ίνας μπορεί να προκαλέσει σημαντικές απώλειες καθώς και την πρόκληση μηχανικής αποτυχίας. Είναι πιο εύκολο να κάμψεις ένα μικρό κομμάτι οπτικής ίνας για να προκαλέσεις μεγάλες απώλειες από ότι ένα χιλιόμετρο οπτικής ίνας σε κανονική λειτουργία. Η ακτίνα που φαίνεται στο σχήμα 2.21 βρίσκεται έξω από την ορική γωνία και επομένως ορθά διαδιδόμενη.



Σχήμα 2.21: Κανονική Κατάσταση

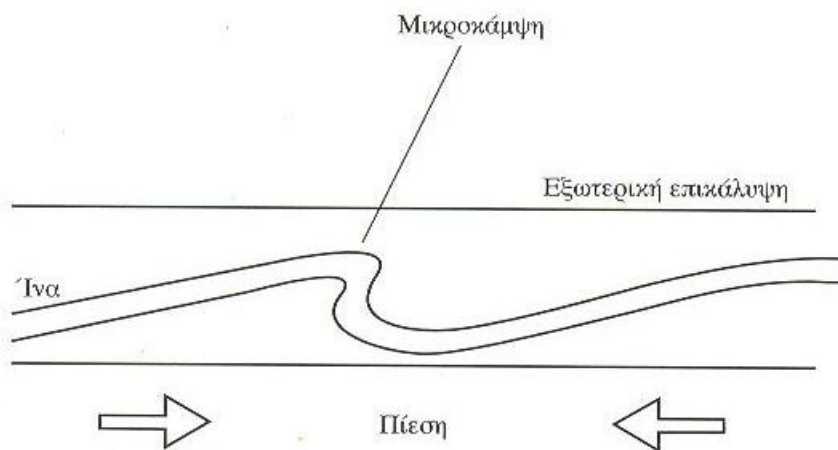
Αν τώρα ο πυρήνας καμφθεί όπως στο σχήμα 2.22 η ακτίνα θα βρεθεί σε λάθος πλευρά της ορικής γωνίας και θα δραπετεύσει. Επομένως, πολύ συμπίεσμένες κάμψεις είναι καλό να αποφεύγονται, αλλά πως προσδιορίζουμε το πολύ συμπίεσμένες; Η πραγματική απάντηση βρίσκεται στα χαρακτηριστικά του καλωδίου οπτικής ίνας. Μια γυμνή οπτική ίνα είναι ασφαλής εάν η ακτίνα κάμψης είναι τουλάχιστον 50 mm. Όσο συμπίεσμένη είναι η καμπή τόσο χειρότερες θα είναι οι απώλειες.



Σχήμα 2.22: Αποτέλεσμα Μακροκάμψεων

### Μικροκάμψεις

Αυτές είναι πανομοιότυπες σε αποτέλεσμα με τις μακροκάμψεις αλλά διαφέρουν σε μέγεθος και σκοπό. Ο λόγος τους είναι μικρότερος ή ίσος με τη διάμετρο της γυμνής ίνας και γενικά αποτελεί κατασκευαστικό πρόβλημα. (Σχήμα 2.23).



Σχήμα 2.23: Μικροκάμψεις

## Απώλειες λόγω Συνδέσεων

### Προβλήματα

Υπάρχουν μόνο τρία πραγματικά προβλήματα που σχετίζονται με τη σύνδεση των οπτικών ινών:

- Οι ίνες θα πρέπει να είναι συμβατού τύπου
- Τα άκρα των ινών θα πρέπει να τοποθετούνται το ένα κοντά στο άλλο
  - Θα πρέπει οι ίνες να είναι ευθυγραμμισμένες με ακρίβεια

### Προβλήματα Συμβατότητας

Ένα περίεργο χαρακτηριστικό αυτών των προβλημάτων συμβατότητας είναι ότι έχουν σαν αποτέλεσμα ο βαθμός απώλειας να εξαρτάται από την κατεύθυνση στην οποία το φως ταξιδεύει μέσα στην ίνα. Μέχρι τώρα θεωρούσαμε πάντα την κατεύθυνση του φωτός άσχετη.

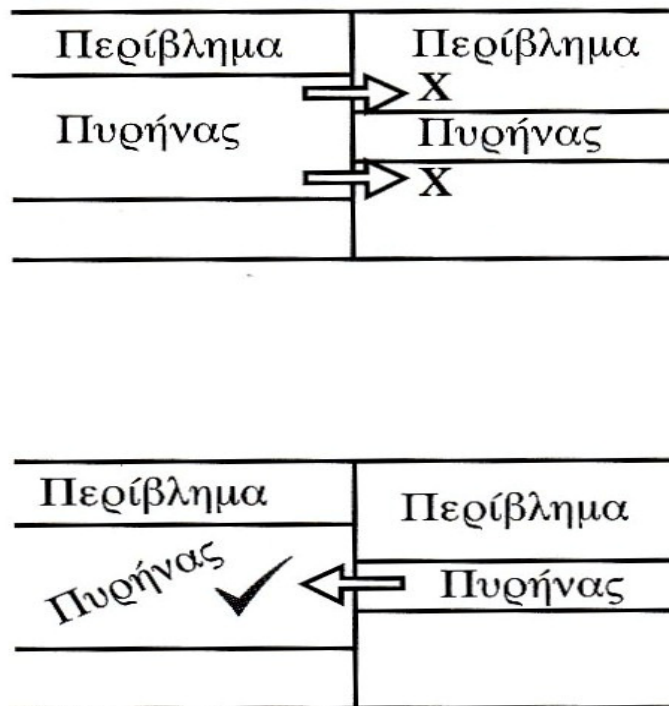
### Διάμετρος Πυρήνα

Οι πολύτροπες ίνες κυκλοφορούν σε μεγάλη ποικιλία μεγέθους πυρήνα μεταξύ 7  $\mu\text{m}$  και 2 mm, από τα οποία τα πιο συνηθισμένα είναι τα 50, 62.5, 85, 100 και 200  $\mu\text{m}$ . Παρομοίως, οι ίνες από πλαστικό κυμαίνονται από 0,25 mm μέχρι 3 mm από τα οποία το 1 mm είναι το πιο συνηθισμένο.

Όταν αγοράζουμε εξαρτήματα, όπως ένα λείζερ, αυτά συχνά είναι προσαρμοσμένα σε ένα κομμάτι ίνας που ονομάζεται σπειροειδής σύνδεσμος (rigtail), το οποίο δεν μπορούμε να αποσυνδέσουμε. Αν η ίνα αυτή έχει χαρακτηριστικά διαφορετικά από εκείνα του κύριου συστήματος, τότε θα πρέπει να γνωρίζουμε πως πρέπει να έχουμε απώλεια ισχύος στο σημείο σύνδεσης.

Οι μονότροπες ίνες περιορίζονται σε μέγεθος περίπου 8 μm, έτσι τα προβλήματα μεγέθους πυρήνα δεν είναι συνηθισμένα.

Αν συνδέσουμε μια πολύτροπη ίνα με μεγάλο πυρήνα με μια άλλη με μικρότερο πυρήνα, όπως διακρίνουμε και στο σχήμα 2.24 μόνο λίγο από το φως που εκπέμπεται από τον μεγαλύτερο πυρήνα θα εισέλθει στον μικρότερο πυρήνα, λόγω της πιο μικρής περιοχής, και θα έχουμε απώλεια ισχύος. Αν, όμως το φως ταξιδεύει από το μικρότερο πυρήνα προς τον μεγαλύτερο, δεν θα παρουσιαστεί καθόλου απώλεια ισχύος.



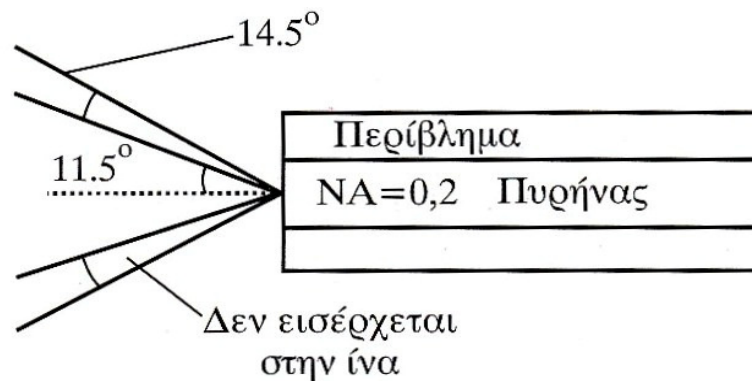
Σχήμα 2.24: Απώλειες λόγω άνισου μεγέθους πυρήνα

### Αριθμητικές λειτουργούσες διελεύσεις

Μια πολύ παρόμοια επίδραση κάνει την εμφάνιση της, στις αριθμητικές λειτουργούσες διελεύσεις. Ο λόγος είναι ότι η αριθμητική λειτουργούσα διέλευση καθορίζει τον κώνο λήψης.



Ας υποθέσουμε ότι μια συνηθισμένη ίνα με αριθμητική λειτουργούσα διέλευση 0,2 με κώνο λήψης  $11,5^\circ$  συνδέεται με μια ίνα με  $NA=0,25$  με κώνο λήψης  $14,5^\circ$  (σχήμα 2.25). Χρησιμοποιώντας αυτήν την κατεύθυνση εκπομπής, όλες οι γωνίες ακτίνας θα ήταν αποδεκτές από την άλλη ίνα και δεν θα εμφανίζονταν καθόλου απώλειες. Αν όμως μεταδώσουμε φως προς την άλλη κατεύθυνση, οι ακτίνες του φωτός μεταξύ των  $11,5^\circ$  και  $14,5^\circ$  βρίσκονται έξω από τον κώνο λήψης της ίνας λήψης, δεν θα γίνονταν αποδεκτές και θα κατέληγαν σε απώλειες.



Σχήμα 2.25 Μία συνηθισμένη ίνα

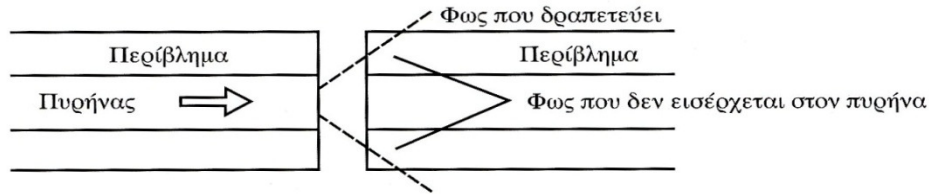
Τι γίνεται αν τα μεγέθη των πυρήνων και τα NA δεν είναι οι ιδανικές; Μπορούμε να βρούμε την συνολική απώλεια αν προσθέσουμε άπλα τις δύο επιμέρους απώλειες.

### Προβλήματα Απώλειας Κενού

Καθώς τα άκρα της ίνας χωρίζονται, το φως από το πυρήνα διαχέεται έξω σε γωνία ίση με την γωνία λήψης. Λιγότερο φως χτυπά την περιοχή του πυρήνα της ίνας λήψης και εμφανίζεται απώλεια.

Ο βαθμός απώλειας δεν είναι μεγάλος με τιμή μικρότερη από 0,5 dB όταν τα άκρα της ίνας διαχωρίζονται από απόσταση ίση με την διάμετρο του πυρήνα. Η απώλεια μειώνεται ακόμη περισσότερο με την χρήση ειδικού ζελέ, που προστίθεται στην σύνδεση για να κάνει τον πυρήνα της ίνας να μοιάζει συνεχής. Συνήθως

προστίθεται για να μειώσουμε τις ανακλάσεις Fresnel αλλά βοηθάει ταυτόχρονα και στην απώλεια κενού.



Σχήμα 2.26 Απώλεια Κενού

## Προβλήματα Ευθυγράμμισης

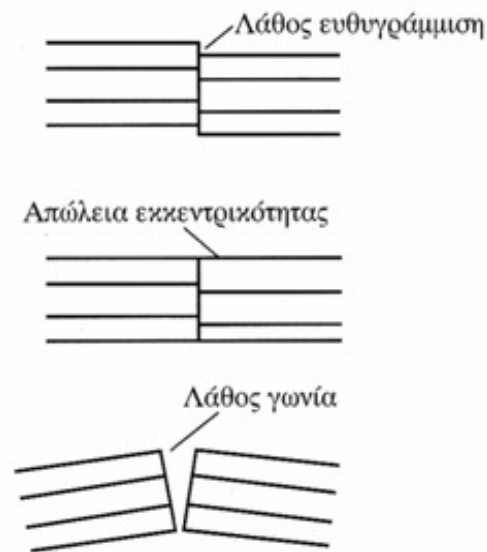
### Παράλληλη λάθος ευθυγράμμιση

Αυτή μοιάζει κάπως με την απώλεια λόγω διαφορών στο μέγεθος πυρήνα.

Καθώς οι ίνες μετακινούνται η περιοχή επικάλυψης μεταξύ των δύο πυρήνων μειώνεται και επομένως έχουμε μεταφορά λιγότερου φωτός. Η ευθυγράμμιση αυτή είναι αρκετά σημαντική, πολύ περισσότερο από την απώλεια κενού, και μια λάθος ευθυγράμμιση ενός τετάρτου της διαμέτρου του πυρήνα θα προκαλέσει απώλεια 1,5 dB. Επομένως, η απώλεια αυξάνεται πολύ γρήγορα μη γραμμικά.

### Ευθυγράμμιση πυρήνα (απώλεια εκκεντρικότητας)

Αυτή συμβαίνει όταν ο πυρήνας δεν βρίσκεται ακριβώς στο κέντρο της ίνας. Όταν οι οπτικές ακτίνες συνδέονται, συνήθως είναι ευθυγραμμισμένες ως προς το εξωτερικό τους περίβλημα. Αν ο πυρήνας δεν τοποθετείται κεντρικά μέσα στην ίνα, το αποτέλεσμα θα είναι λάθος ευθυγράμμιση του πυρήνα, με αποτέλεσμα παρόμοια με εκείνα που προκαλεί η παράλληλη λάθος ευθυγράμμιση. Χρησιμοποιώντας σύγχρονες τεχνικές κατασκευής, σπάνια έχουμε σοβαρά παραδείγματα αυτής της βλάβης (σχήμα 2.27).



Σχήμα 2.27: Απώλειες ευθυγράμμισης

### Γωνιακή λάθος ευθυγράμμιση

Καθώς μεγαλώνει η λάθος θέση της γωνίας, το φως από τον πυρήνα σιγά-σιγά δεν βρίσκει τον άλλον. Με ένα κενό αέρος, οι γωνίες με λάθος ευθυγράμμιση μέχρι 3 ή 4 μοίρες προκαλεί απώλειες μικρότερες από 1 dB. Στις μεγάλες γωνίες, οι απώλειες αυξάνονται πολύ γρηγορότερα μη γραμμικά. Η χρήση ζελέ συνδυασμού δείκτη στην πράξη χειροτερεύει την κατάσταση, αφού εμποδίζει την διάχυση του κώνου λήψης, η οποία κανονικά θα εμφανιζόταν σε ένα κενό αέρος.

### Απώλειες συνδετήρων

Οι οπτικοί συνδετήρες (optical connectors) είναι μηχανικά εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται για την επαναλαμβανόμενη σύνδεση είτε οπτικών ινών απευθείας μεταξύ τους είτε οπτικών ινών με τις εξόδους των οπτικών πομποδεκτών.

Η κύρια παράμετρος χαρακτηρισμού των οπτικών συνδετήρων είναι η απώλεια εισαγωγής (insertion loss ή IL) δηλαδή η απώλεια ισχύος στο σημείο της

σύνδεσης ως ποσοστό της εισερχόμενης ισχύος. Σημαντική παράμετρος είναι και η απώλεια επιστροφής (optical return loss ή ORL), δηλαδή η ισχύς που επιστρέφει, λόγω ανακλάσεων στο σημείο της σύνδεσης, ως ποσοστό της εισερχόμενης ισχύος.

$$\text{Απώλεια εισαγωγής: } IL = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{in}}{P_{out}}\right) \text{ (dB)} \quad (2.21)$$

$$\text{Απώλεια επιστροφής: } ORL = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{in}}{P_{refl}}\right) \text{ (dB)} \quad (2.22)$$

όπου  $P_{in}$   $P_{out}$   $P_{refl}$  είναι η εισερχόμενη, η διερχόμενη και η ανακλώμενη ισχύς αντίστοιχα.

Με τον τρόπο που ορίζονται παραπάνω, η μεν απώλεια εισαγωγής  $IL$  πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη (η διερχόμενη ισχύς να είναι σχεδόν ίση με την εισερχόμενη), η δε απώλεια επιστροφής  $ORL$  όσο το δυνατόν υψηλότερη (η ανακλώμενη ισχύς να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη).

Από τους διάφορους τύπους (περί τους 70) τύπους οπτικών συνδετήρων, χρησιμοποιούνται ευρύτατα οι τύποι FC-PC (Fibre Connector – Physical Contact) και SC-APC (Subscriber Connector – Angled Physical Contact). Οι FC-PC επιτυγχάνουν απώλεια εισαγωγής  $IL$  της τάξης του 0,2 - 0,4 dB και απώλεια επιστροφής  $ORL$  περί τα 40 dB. Με την σειρά τους οι SC-APC παρουσιάζουν παρόμοια απώλεια εισαγωγής ενώ έχουν επιφάνεια επαφής με μικρή κλίση ( $8^\circ$  -  $9^\circ$ ) με την βοήθεια της οποίας επιτυγχάνουν απώλεια επιστροφής  $ORL$  της τάξης των 60 dB.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Εξοπλισμός

#### 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:



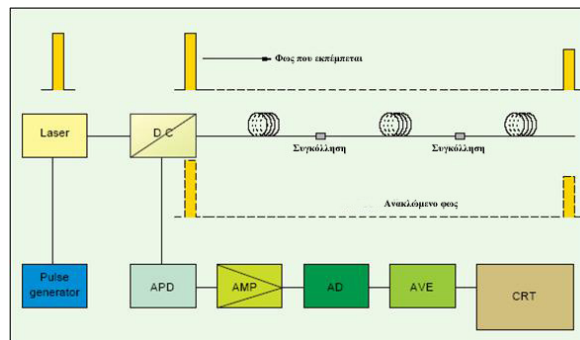
Εικόνα 3.1 Φορητή Συσκευή OTDR

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.

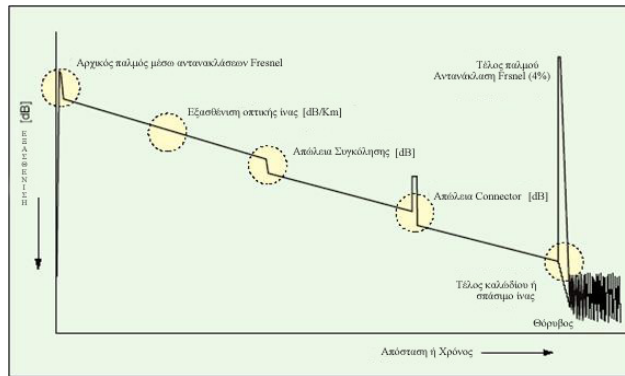
### Αρχή Λειτουργίας του OTDR

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 ασυνέχειας (συνδετήρες, συγκολλήσεις, τέλος μίας ζεύξης) κατά τη διάδοση συγκεκριμένη ποσότητα φωτός θα επιστρέψει στο όργανο μέσω σκέδασης Rayleigh ή ανακλάσεων. Η επιστρεφόμενη δέσμη θα ανιχνευθεί από μία φωτοδίοδο χιονοστιβάδας (Avalanche Photodiode, APD) και το ηλεκτρικό σήμα που θα παραχθεί από αυτή ενισχύεται από ενισχυτική βαθμίδα και γίνεται αντικείμενο επεξεργασίας από εσωτερικό μικροϋπολογιστή. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται πολλές φορές και έτσι τα αποτελέσματα που προβάλλονται στην οθόνη του οργάνου προκύπτουν από στατιστική επεξεργασία. Η ισχύς του σήματος απεικονίζεται στον κάθετο άξονα του οργάνου και η απόσταση, που έχει υπολογισθεί από το χρόνο διάδοσης στον οριζόντιο.



Σχήμα 3.1 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.



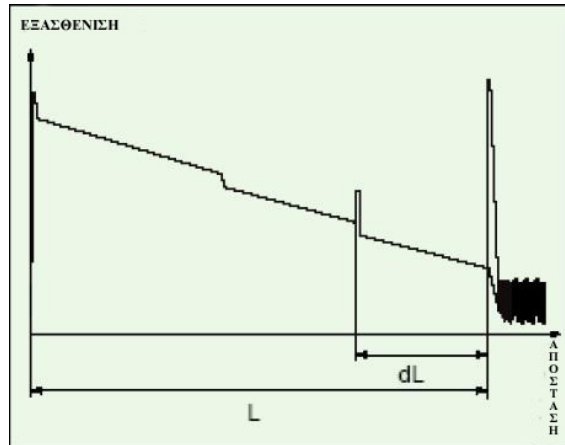
Σχήμα 3.2 Απλοποιημένο διάγραμμα από OTDR.

### 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.



Σχήμα 3.3 OTDR καμπύλη και η χρήση της για τον υπολογισμό μήκους ζεύξης

## Ρυθμίσεις ενός OTDR

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

### Νεκρή Ζώνη

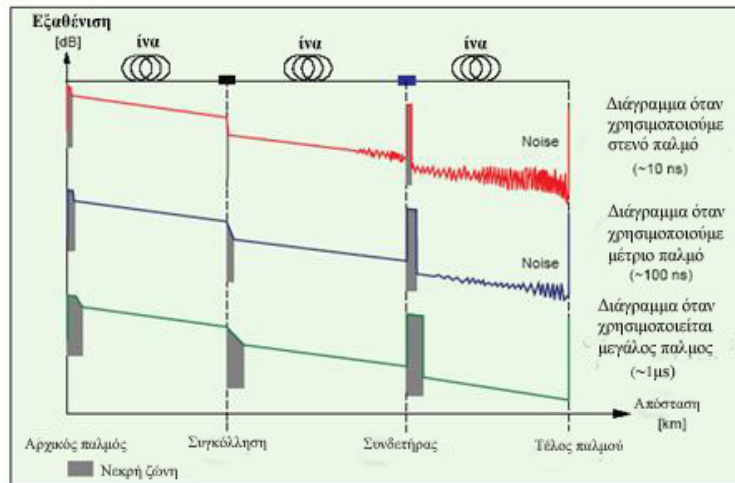
Κάθε συγκόλληση ή συνδετήρας προκαλούν μία παρενόχληση στο διαδιδόμενο και ανακλώμενο οπτικό σήμα. Αυτού του είδους η επίδραση επιβάλλει μία ζώνη συγκεκριμένου μήκους μετά την ένωση για την οποία δεν είναι δυνατό να μελετήσουμε το οτιδήποτε. Για παράδειγμα η συγκόλληση που βρίσκεται στο εσωτερικό ενός 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.

### **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 τον 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.



Σχήμα 3.4 Διαγράμματα μεταβάλλοντας το εύρος του παλμού.

### 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 κατανεμητή, 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.

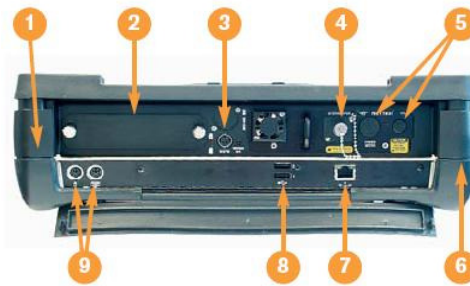
### Συμβουλές για την αποδοτική χρήση ενός OTDR

- Η σμίκρυνση της «νεκρής ζώνης» επιτυγχάνεται με τη χρήση στενών παλμών
  - Η ελαχιστοποίηση του θορύβου στη μέτρηση (σχήμα) επιτυγχάνεται με ευρύτερους παλμούς.
  - Πιο ευκρινή διαγράμματα επιφέρει η χρήση της επιλογής στατιστικής επεξεργασίας (averaging)
- Για απόλυτο χαρακτηρισμό μίας ζεύξης, μπορεί να πραγματοποιηθεί μέτρηση σε στάδια ανάλογα με το τι επιθυμούμε να ανιχνεύσουμε. Π.χ. αν μας ενδιαφέρει ο ακριβής χαρακτηρισμός του πρώτου άκρου της, χρησιμοποιούμε στενούς παλμούς για την όσο το δυνατό εξάλειψη των «νεκρών ζωνών». Σε δεύτερη προσέγγιση για το χαρακτηρισμό του μήκους της χρησιμοποιούμε ευρείς παλμούς, ανθεκτικούς στις απώλειες. Έτσι η πραγματοποίηση της μέτρησης σε περισσότερα από ένα στάδια, συμβάλλει στον ακριβή καθορισμό των ιδιοτήτων της ζεύξης σε όλο το μήκος της.

### **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.

## 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

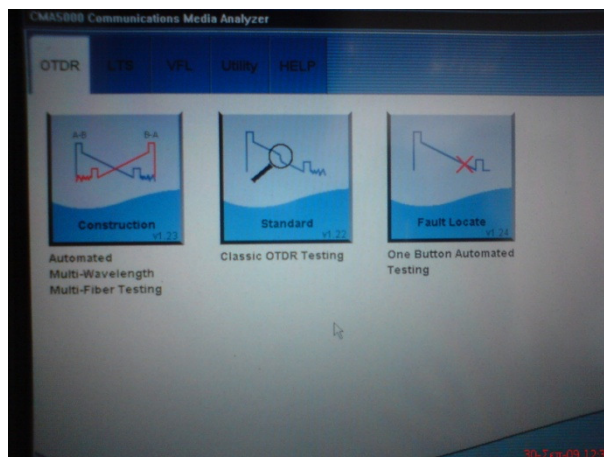
### Wizard Εγκατάστασης Ίνας και Χρήση OTDR

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 ινών. Έχοντας ανοικτό το μενού του OTDR θα εμφανιστεί το εξής:



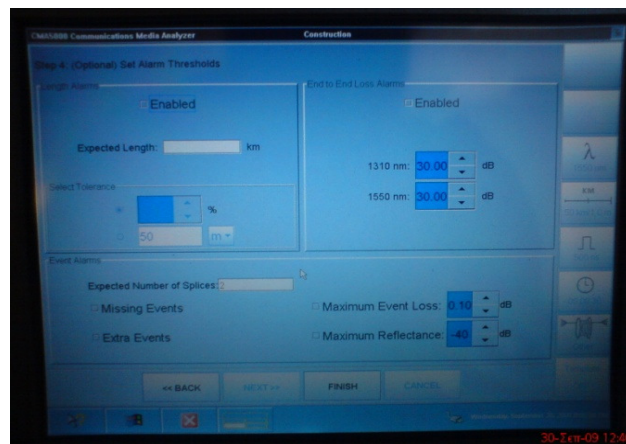
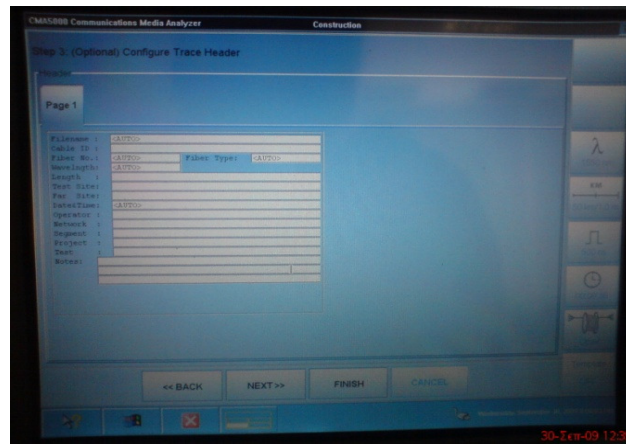
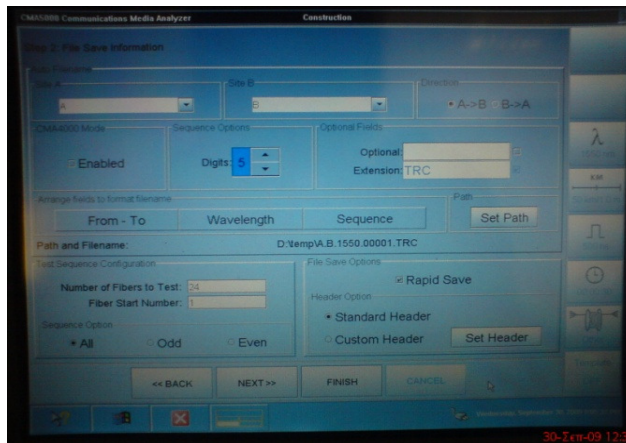
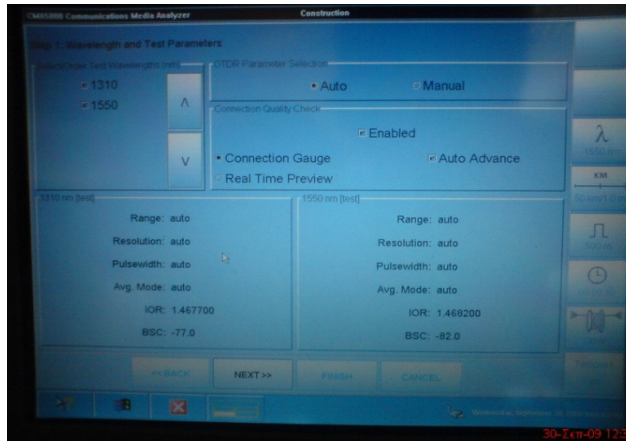
Εικόνα 3.2: Διαθέσιμα module συσκευής

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:



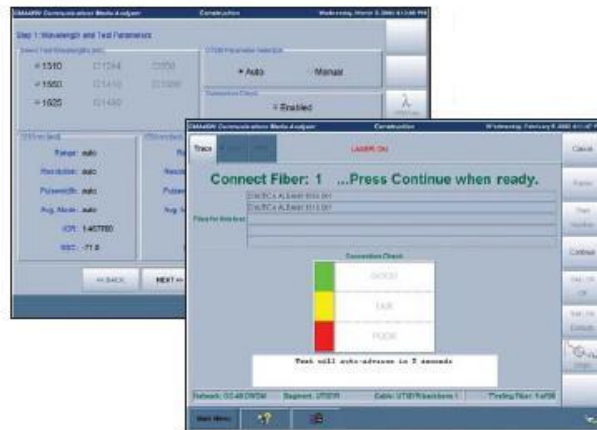
Εικόνα 3.3: Διαθέσιμες επιλογές για την χρήση της λειτουργίας OTDR του CMA 500

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.



Εικόνες 3.4, 3.5, .3.6, 3.7 Ρυθμίσεις βασικών παραμέτρων

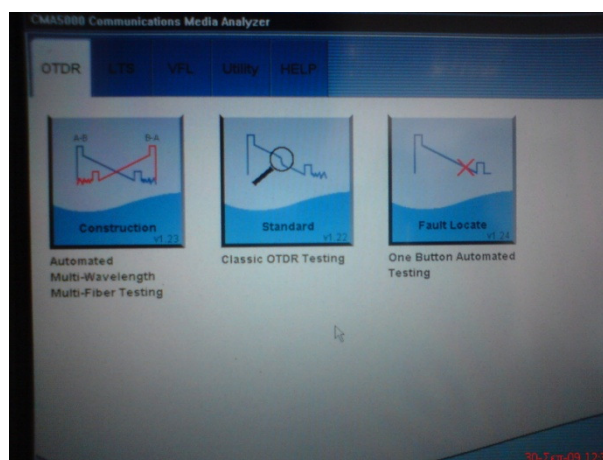
Μόλις γίνει η ρύθμιση των παραμέτρων στο επόμενο μενού εμφανίζει αν η σύνδεση των συνδέσμων (connectors) έχει γίνει σωστά. Αν έχει γίνει σωστά μετά από λίγα δευτερόλεπτα ξεκινάει ο έλεγχος.



Εικόνα 3.8: Εμφάνιση διαθέσιμου υλικού και αναμονή εκκίνησης ελέγχου

### 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).



Εικόνα 3.9: Από τις διαθέσιμες επιλογές η μέθοδος οπτικού ανιχνευτή λάθους είναι η τρίτη επιλογή

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.

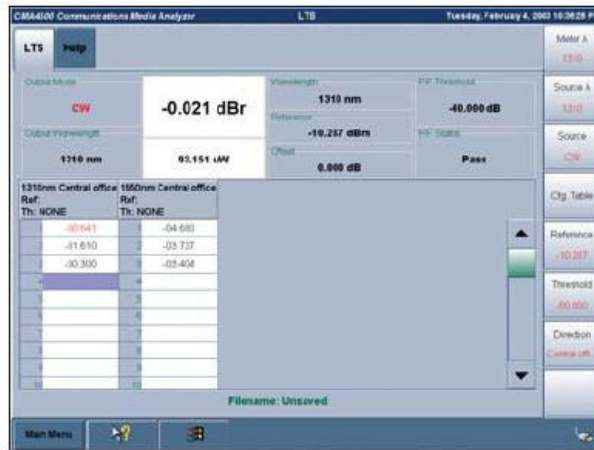


Εικόνα 3.10: Αποτελέσματα οπτικού ανιχνευτή λάθους

### 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).





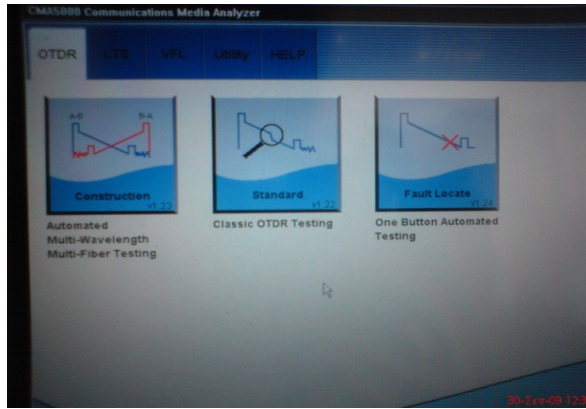
Εικόνα 3.11: Οθόνη αποτελεσμάτων ελέγχου απωλειών

### Standard OTDR



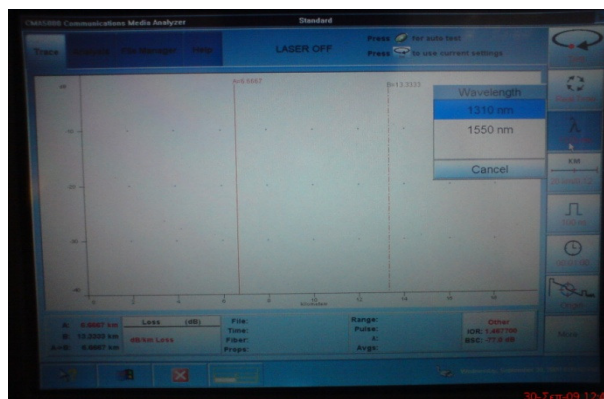
Εικόνα 3.12: Διαθέσιμα module

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

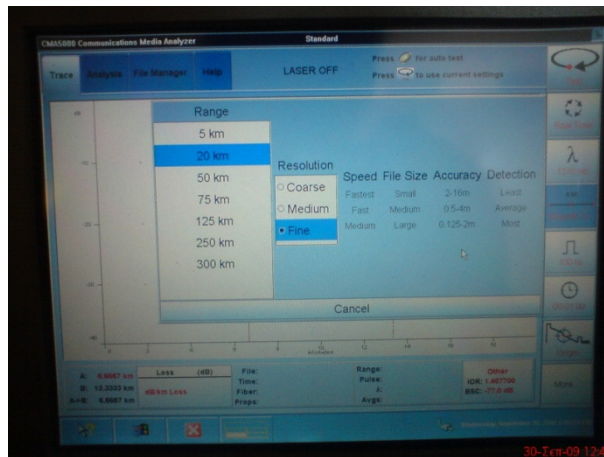


Εικόνα 3.13: Διαθέσιμες λειτουργίες συσκευής OTDR

Στο μενού που εμφανίζεται επιλέγουμε Classic OTDR Testing και πιέζουμε την οθόνη αφής. 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, εμβέλεια/ανάλυση και κατάσταση averaging μπορούν εύκολα να ρυθμιστούν μέσω της οθόνης αφής 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 χρήστης 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.

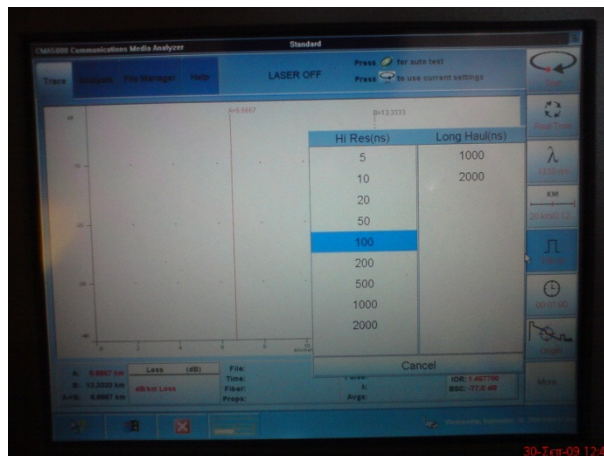


Εικόνα 3.14: Οθόνη εισαγωγής τιμής μήκους κύματος



Εικόνα 3.15: Οθόνη εισαγωγής τιμής μήκους οπτικής ίνας

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

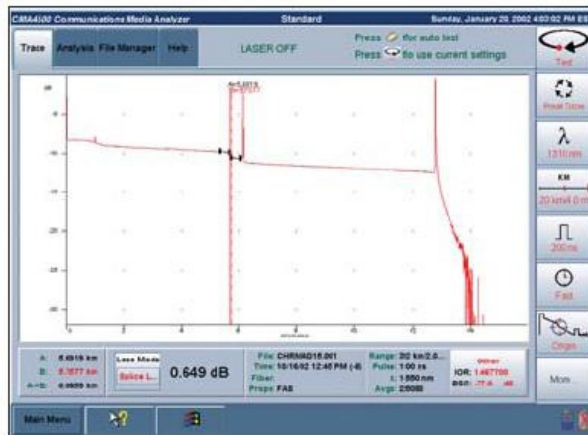


Εικόνα 3.16: οθόνη εισαγωγής τιμής παλμού

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

(Overlay\*Η τεχνική, η οποία επιτρέπει την εκτέλεση μεγάλου μήκους προγραμμάτων σε μνήμη μικρής χωρητικότητας. Βασίζεται στη διάσπαση του αρχικού προγράμματος σε επιμέρους τμήματα, φόρτωση στην κύρια μνήμη μόνο των απαιτούμενων τμημάτων, εναλλαγή των διαφόρων τμημάτων κατά τη στιγμή της εκτέλεσης του προγράμματος και κάλυψη των παλαιότερων που πλέον δε

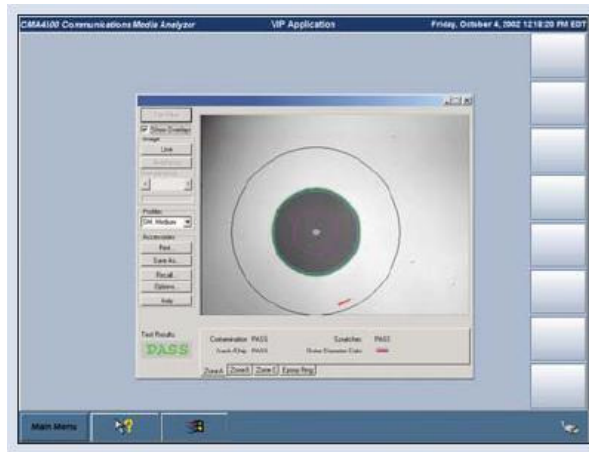
χρειάζονται. Ο συνδυασμός των τμημάτων αυτών και η τελική εκτέλεση του προγράμματος πραγματοποιείται σε μια κοινή περιοχή της κύριας μνήμης.\*)



Εικόνα 3.17: Οθόνη αποτελεσμάτων

### Τηλεοπτικός καθητήρας επιθεώρησης connector

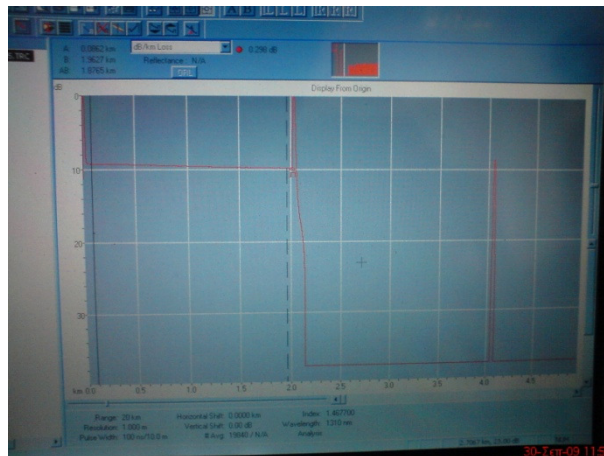
Έρευνες έδειξαν ότι το 75% της αποτυχίας για όλα τα οπτικά δίκτυα οφείλεται στο γεγονός της μη επαρκούς ποιότητας του συνδέσμου. Η εφαρμογή του τηλεοπτικού καθητήρα επιθεώρησης δίνουν τη δυνατότητα στο χειριστή να αναλύσει και να καταγράψει την κατάσταση του συνδέσμου (connector) με ασφάλεια και μεγάλη ευκολία. Ο τηλεοπτικός καθητήρας 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 καθητήρας 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 3.18: Εμφάνιση αποτελεσμάτων τηλεοπτικού καθετήρα επιθεώρησης connector

## Διαγράμματα από Μετρήσεις OTDR

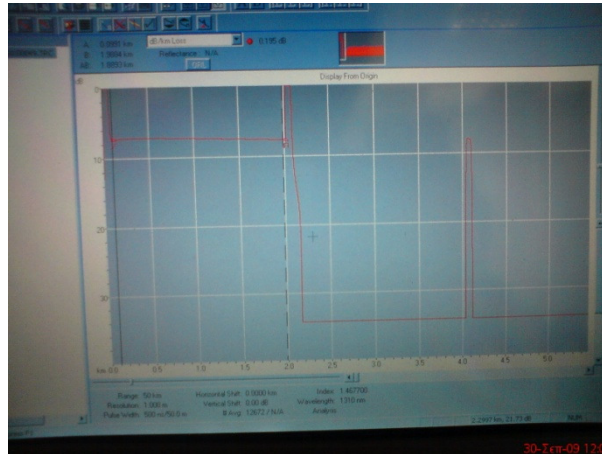
### Εφαρμογή 1<sup>η</sup>



Στο παραπάνω διάγραμμα κάνουμε μέτρηση ενός δικτύου οπτικής ίνας 2 χιλιομέτρων. Το μήκος κύματος που χρησιμοποιήσαμε είναι 1310 nm και το μέγεθος παλμού 100 ns. Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζονται τα χιλιόμετρα του δικτύου και στον κάθετο άξονα τα επίπεδα ισχύος σε dB. Επίσης παρατηρούνται στο σχήμα 2 κάθετοι(μαύροι) άξονες ο A και B αντίστοιχα. Οι άξονες χρησιμοποιούνται λίγο μετά την αρχή της μέτρησης(A) και λίγο πριν κοπεί η σύνδεση (B) για να μετρήσουμε τις απώλειες του συγκεκριμένου δικτύου. Έτσι στο συγκεκριμένο δίκτυο έχουμε απώλεια 0,298 dB/χλμ και στο τέλος της σύνδεσης υπάρχει σύνδεσμος(connector). Μετά το σύνδεσμο δεν υπάρχει οπτική ίνα και το δίκτυο “κόβεται”. Με βάση τα

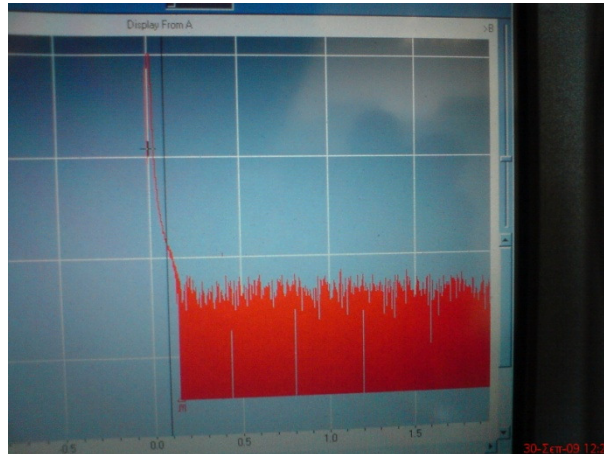
πρότυπα ένα καλώδιο οπτικής ίνας στα 1310 nm πρέπει να έχει απώλειες μέχρι 0,35 dB/χλμ . Συμπερασματικά το δίκτυο πληροί τις προϋποθέσεις για να τεθεί σε λειτουργία.

## Εφαρμογή 2<sup>η</sup>



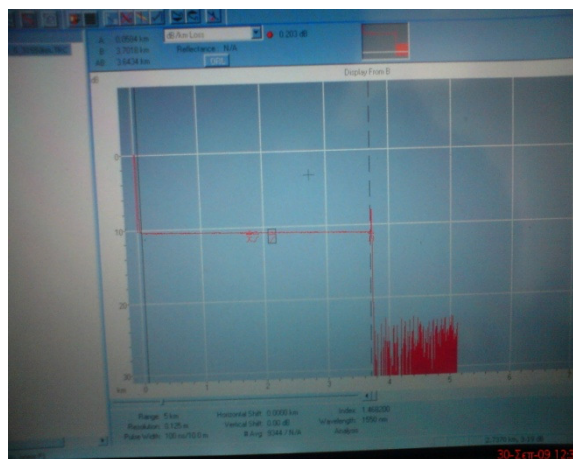
Στην συγκεκριμένη μέτρηση ελέγχουμε το ίδιο δίκτυο της εφαρμογής 1 με τη διαφορά ότι το μέγεθος του παλμού που στέλνουμε είναι στα 500 ns αντί για 100ns. Ο παλμός αυτός χρησιμοποιείται για μεγαλύτερες αποστάσεις και τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι ανακριβή. Πιο συγκεκριμένα οι απώλειες είναι 0,195 dB/χλμ πράγμα που είναι αναληθές. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι είναι πολύ σημαντικό να ορίζουμε τις παραμέτρους της μέτρησης σωστά ειδάλλως τα αποτελέσματα που θα εξάγουμε δεν θα είναι τα βέλτιστα. Πρέπει να τονιστεί ότι και στην συγκεκριμένη εφαρμογή και στη προηγούμενη το δίκτυο ξεκινάει από ένα κεντρικό κόμβο και καταλήγει σε τελικούς χρήστες.

### Εφαρμογή 3<sup>η</sup>



Στο συγκεκριμένο έλεγχο που κάνει το OTDR βλέπουμε ότι “κόβεται” η γραμμή. Σ’ αυτή τη περίπτωση η συγκόλληση δεν έχει γίνει σωστά διότι η βλάβη εμφανίζεται στην αρχή της σύνδεσης. Αν είχε εμφανιστεί αργότερα θα σήμαινε ότι υπήρχε σπάσιμο στην ίνα.

### Εφαρμογή 4<sup>η</sup>



Στο παραπάνω διάγραμμα κάνουμε μέτρηση ενός δικτύου οπτικής ίνας 3,8 χιλιομέτρων. Το μήκος κύματος που χρησιμοποιείται είναι 1550 nm και το μέγεθος παλμού 100 ns. Οι απώλειες στο συγκεκριμένο δίκτυο είναι 0,203 dB/χλμ. Το επιτρεπτό όριο απωλειών στα 1550 nm με βάση τα πρότυπα είναι 0,22 dB/χλμ πράγμα που σημαίνει ότι το δίκτυο πληροί τις προδιαγραφές για μελλοντική χρήση.

Επίσης το συγκεκριμένο δίκτυο που ελέγχουμε ξεκινάει από ένα κόμβο και καταλήγει σε άλλο κόμβο.

### Εφαρμογή 5<sup>η</sup>

Μετρήσατε το μήκος μίας οπτικής ζεύξης με τη βοήθεια ενός OTDR, και το βρήκατε ίσο με  $L_1=4980\text{m}$  έχοντας ρυθμίσει το δείκτη διάθλασης του πυρήνα να είναι ίσος με  $N=1.46$ . Πόσο περιμένετε να αλλάξει η τιμή του μήκους, αν μεταβάλλετε το δείκτη στην τιμή  $N=1.47$ .

$$L_1=4980\text{m} \rightarrow N=1.46$$

$$L_2=? \rightarrow N=1.47$$

$$\text{Ο τύπος είναι: } L = \frac{v \cdot t}{2} = \frac{c \cdot t}{2 \cdot n}$$

Πρέπει αρχικά να βρω το t:

$$L_1 = \frac{c \cdot t}{2 \cdot n} \Rightarrow L_1 \cdot 2 \cdot n = c \cdot t \Rightarrow t = \frac{2 \cdot L_1 \cdot n}{c} \Rightarrow t = \frac{2 \cdot 4980 \cdot 1.46}{3 \cdot 10^8} \Rightarrow t = 4847.2 \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

Αφού βρήκαμε το t μπορούμε με τον ίδιο τύπο να αντικαταστήσουμε το  $N=1.47$  για να βρούμε τη διαφορά

$$L_2 = \frac{c \cdot t}{2 \cdot n} \Rightarrow L_2 = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 4847.2 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 1.47} \Rightarrow L_2 = 4946\text{m}$$

$$\text{Άρα } L_1 - L_2 = 4980 - 4946 = 34\text{m}$$

### Συγκολλήσεις 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

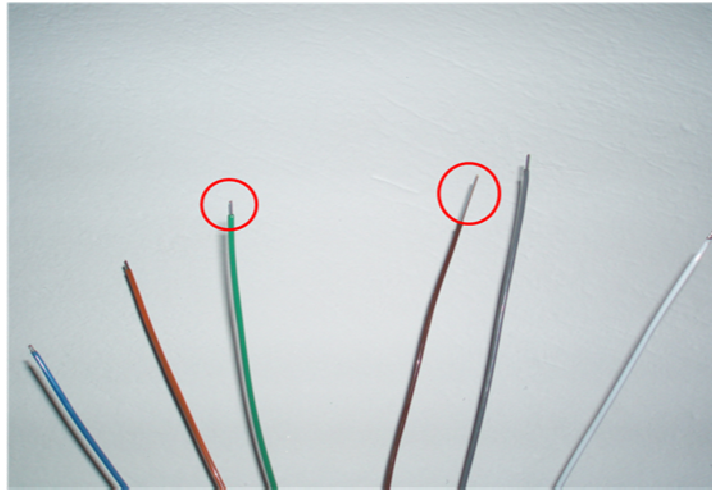


χρησιμοποιείται στους κόμβους και κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης είναι single-mode (μονότροπη). Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε μια ενδεικτική συσκευή συγκόλλησης.



Εικόνα 3.19: Fujicura FSM-60s

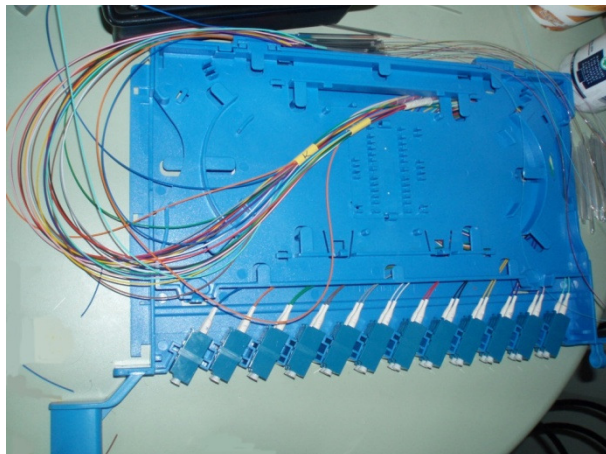
Οι ίνες είναι πολύ εύθραυστες. Υπάρχει ο κίνδυνος να “σπάσουν” ή να “τραυματιστούν” και το αποτέλεσμα θα είναι να μην μεταφέρουν δεδομένα. Γι’ αυτό το λόγο πάντα υπάρχει προστασία γύρω από τις ίνες, οι λεγόμενοι απομονωτές. Οι απομονωτές χωρίζονται σε 6 ομάδες χρωμάτων: μπλε-πορτοκαλί-πράσινο-καφέ-γκρι-άσπρο 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 3.20: 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 pigtail όπου το τελευταία καταλήγουν σε συνδετήρες (connectors).



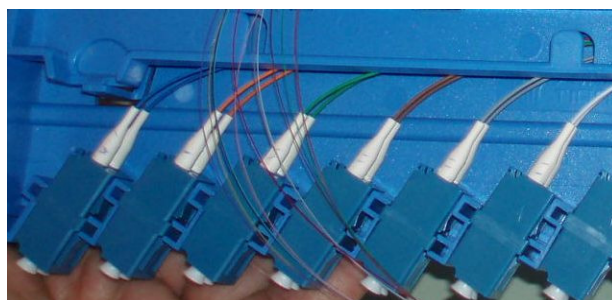
*Εικόνα 3.21: Κασετίνα με 24 pigtails που καταλήγουν σε συνδέσμους*

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

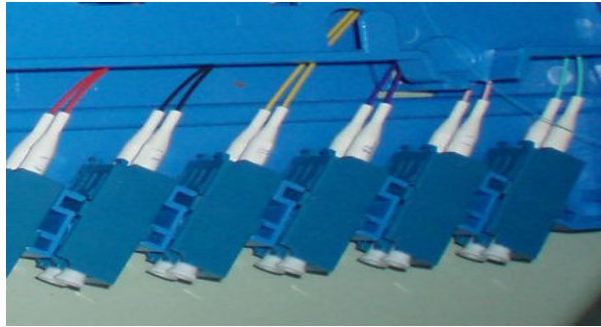
- ΠΡΟΣΟΧΗ: Πρέπει να υπάρχει καλός φωτισμός και στερεή επιφάνεια, καθώς και επαρκής χώρος!

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 rigtail 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 ( $3 \times 24 = 72$ ). 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 rigtail τους των οποίων η άκρη τους θα συνδεθεί με τις οπτικές ίνες που εμπεριέχονται στους απομονωτές.



*Εικόνα 3.22: Πρώτη 12άδα(μπλε, πράσινος και γκρι απομονωτής)*



Εικόνα 3.23: 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<sup>ο</sup> rígtail είναι η πάνω οριζόντια σειρά συνδετήρων και 2<sup>ο</sup> rígtail η κάτω οριζόντια σειρά συνδετήρων.

ΜΠΛΕ ΠΡΑΣΙΝΟΣ	ΓΚΡΙ ΑΠΟΜΟΝΩΤΗΣ
<u>Rígtail</u>	<u>Ίνα</u>
1 <sup>ο</sup> μπλε	μπλε
2 <sup>ο</sup> μπλε	πορτοκαλί
1 <sup>ο</sup> πορτοκαλί	πράσινο
2 <sup>ο</sup> πορτοκαλί	καφέ
1 <sup>ο</sup> πράσινο	γκρι
2 <sup>ο</sup> πράσινο	άσπρο
1 <sup>ο</sup> καφέ	κόκκινο
2 <sup>ο</sup> καφέ	μαύρο
1 <sup>ο</sup> γκρι	κίτρινο
2 <sup>ο</sup> γκρι	βιολετί
1 <sup>ο</sup> άσπρο	ροζ
2 <sup>ο</sup> άσπρο	θαλασσί

Πίνακας 3.1: Πάνω οριζόντια σειρά συνδετήρων

ΠΟΡΤΟΚΑΛΙ ΚΑΦΕ	ΑΣΠΡΟΣ ΑΠΟΜΟΝΩΤΗΣ
<u>Rígtail</u>	<u>Ίνα</u>
1 <sup>ο</sup> κόκκινο	μπλε
2 <sup>ο</sup> κόκκινο	πορτοκαλί
1 <sup>ο</sup> μαύρο	πράσινο
2 <sup>ο</sup> μαύρο	καφέ

1 <sup>ο</sup> κίτρινο	γκρι
2 <sup>ο</sup> κίτρινο	άσπρο
1 <sup>ο</sup> βιολετί	κόκκινο
2 <sup>ο</sup> βιολετί	μαύρο
1 <sup>ο</sup> ροζ	κίτρινο
2 <sup>ο</sup> ροζ	βιολετί
1 <sup>ο</sup> θαλασσί	ροζ
2 <sup>ο</sup> θαλασσί	θαλασσί

*Πίνακας 3.2: Κάτω σειρά συνδετήρων*

Εφόσον κοπούν τα *rigtails* στο κατάλληλο μήκος για να τοποθετηθούν αργότερα σε συγκεκριμένη υποδοχή στη κασετίνα και έχουν περαστεί τα θερμοσυστελόμενα αρχίζει η διαδικασία της απογύμνωσης των *rigtail* και των ινών με ειδικούς απογυμνωτές. Επίσης πρέπει τα απογυμνωμένα σημεία της ίνας και *rigtail* να καθαριστούν με καθαρό οινόπνευμα από το ειδικό gel που τα προφυλάσσει. Καλό είναι η απογύμνωση και ο καθαρισμός να μην γίνεται μαζικά για τις ίνες και τα *rigtail* διότι υπάρχει πιθανότητα φθοράς και έτσι δεν διασφαλίζεται η ακεραιότητα του καθαρού γυαλιού.

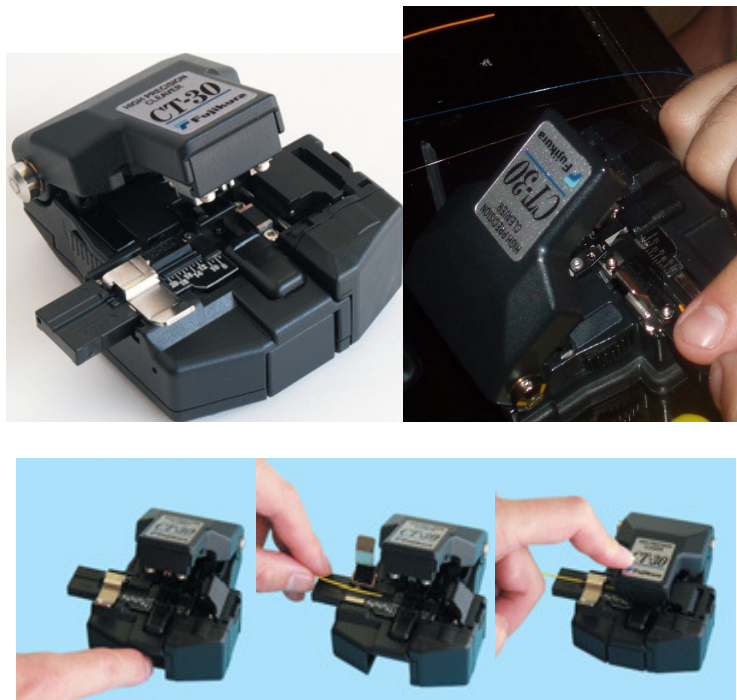


*Εικόνα 3.24: Θερμοσυστελόμενο*



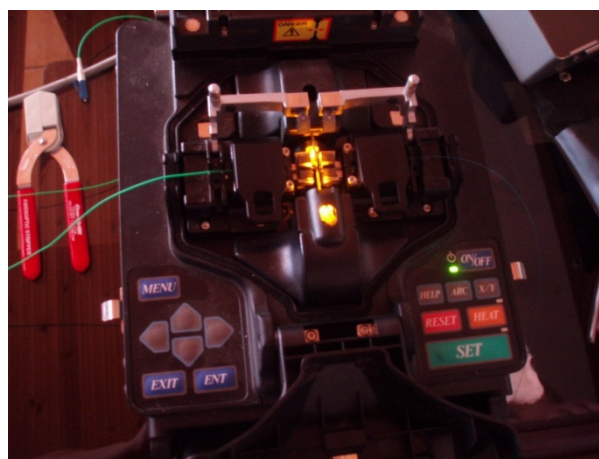
*Εικόνα 3.25: Ειδικοί απογυμνωτές rigtail και ίνας*

Εφόσον γίνει η απογύμνωση και ο καθαρισμός το επόμενο βήμα είναι με ειδικό κοφτάκι κόβονται οι ίνες στα 12mm και τα *rigtail* στα 18mm(απογυμνωμένο μέρος). Παρακάτω βλέπουμε στις εικόνες το ειδικό κοφτάκι.



*Εικόνα 3.26: Διαδικασία τοποθέτησης ίνας και rigtail*

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.



*Εικόνα 3.27: Τοποθέτηση rigtail και ίνας στην ειδική υποδοχή.*

Εφόσον έχει γίνει η τοποθέτηση κλείνουμε το καπάκι και πατάμε το πλήκτρο set στο συγκολλητή.

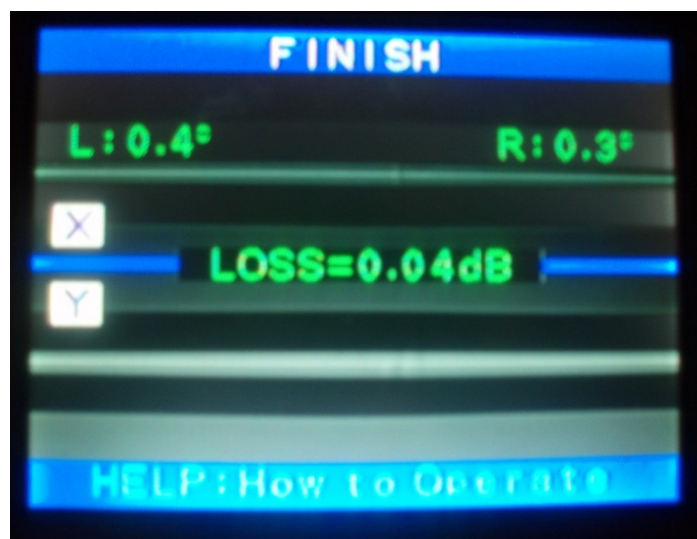


*Εικόνα 3.28: Οθόνη κατά την διάρκεια της συγκόλλησης*

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:



*Εικόνα 3.29: Οθόνη εμφάνισης απωλειών σύνδεσης μετά την συγκόλληση*



Εικόνες 3.30, 3.31: Ολοκλήρωση συγκόλλησης και εμφάνιση αποτελεσμάτων

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 3.32: Μήνυμα λάθους λόγω φθοράς στο μανδύα του rigtail(μεγάλη γωνία κοπής)

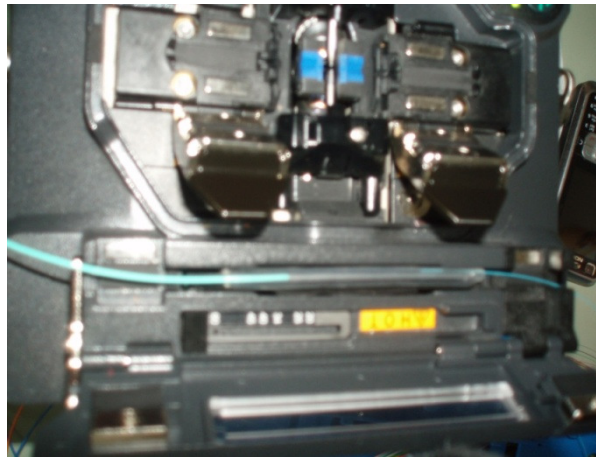


Εικόνα 3.34: φθοράς στο μανδύα της ίνας κατά την ευθυγράμμιση

Μόλις στεφθεί με επιτυχία η διαδικασία της συγκόλλησης τοποθετείται το rigtail και η ίνα στο φουρνάκι αφού τοποθετήσουμε στο γυμνό γυαλί το θερμοσυστελόμενο.

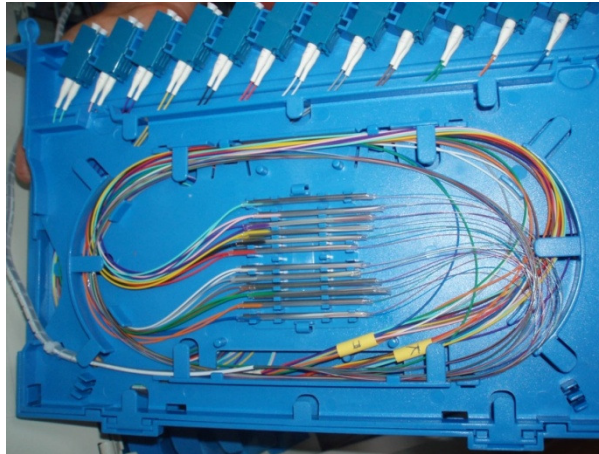


*Εικόνα 3.35: Φουρνάκι συγκολλητή*



*Εικόνα 3.36: Τοποθέτηση ίνας και rigtail στο φουρνάκι με θερμοσυστελόμενο*

Το φουρνάκι χρησιμοποιείται για να κολλήσει το θερμοσυστελόμενο με τις άκρες του απομονωτή και να προστατεύεται το γυμνό μέρος όπου έγινε η συγκόλληση. Μετά επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία για τα υπόλοιπα rigtail και ίνες και μόλις ολοκληρώσουμε την συγκόλληση τοποθετούμε τα rigtail και τις ίνες σε συγκεκριμένο σημείο της κασετίνας όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα



Εικόνα 3.37: Σημείο τοποθέτησης συγκολλημένων rigtail και ινών



Εικόνα 3.38: Εργαλεία Φροντίδας οπτικών ινών προς ετοιμασία συγκολλήσεως



*Εικόνα 3.39: Αποψη των διαθέσιμων θυρών σύνδεσης του OTDR.*

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Εργαστηριακό πείραμα

Παρακάτω περιγράφουμε η διαδικασία με την οποία γίνονται οι μετρήσεις σε οπτικό δίκτυο με το όργανο OTDR. Οι μετρήσεις έγιναν σε δίκτυο οπτικής ίνας σε εργαστηριακό χώρο του ΤΕΙ Μεσολογίου.

Το πείραμα μας περιλαμβάνει μονότροπη οπτική ίνα 10 μέτρων και την συσκευή μέτρησης ανακλάσεων οπτικής ισχύος στο πεδίο του χρόνου (OTDR).

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για όλες τις μετρήσεις είναι το Anritsu CMA-5000. Το οπτικό ανακλασίμετρο CMA-5000 χρησιμοποιείται από εξειδικευμένο προσωπικό για τις μετρήσεις των οπτικών ινών με σκοπό την διάγνωση βλαβών και την εποπτεία της καλής λειτουργίας του οπτικού δικτύου.

Πρώτο βήμα συνδέουμε τις άκρες από την οπτική ίνα στις κατάλληλες θέσεις στο OTDR και θέτουμε την συσκευή σε λειτουργία.

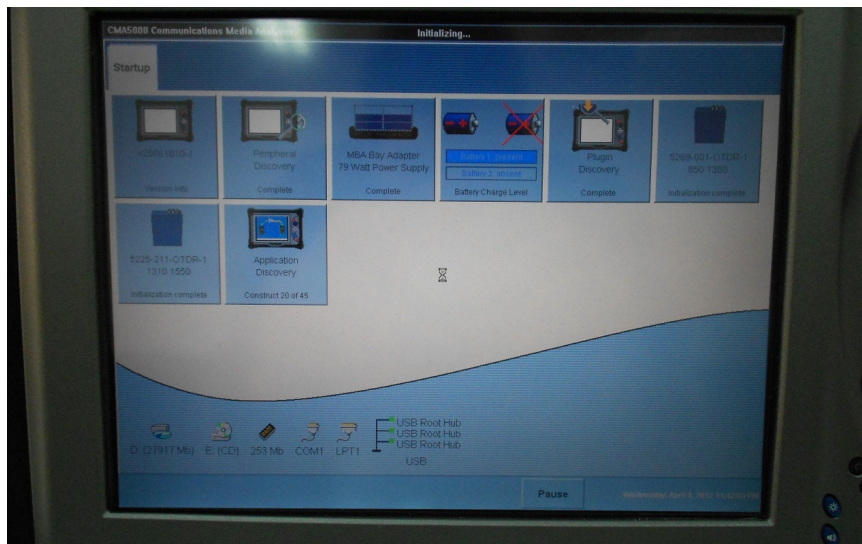


Εικόνα 4.1 : Ενεργοποίηση CMA 500



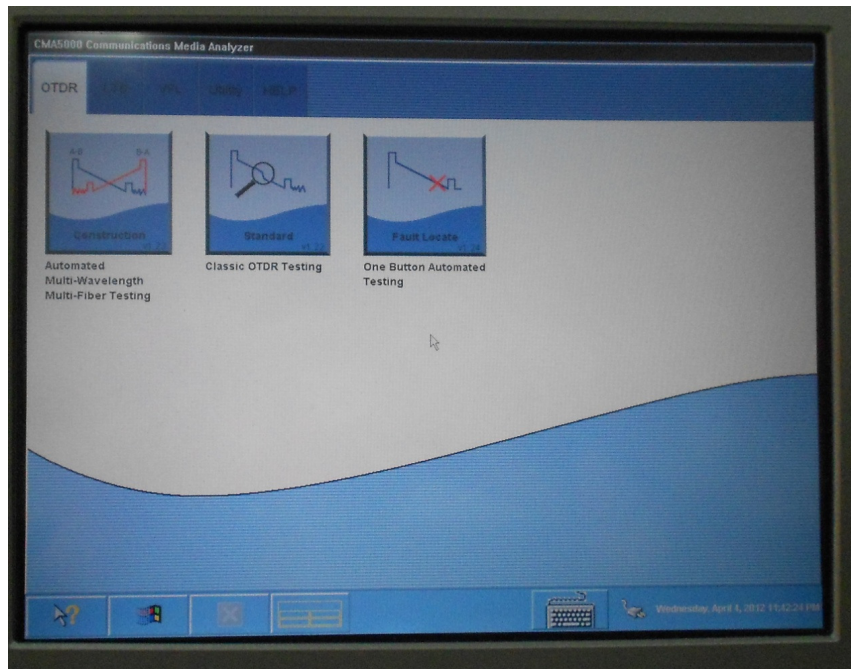
Εικόνα 4.2: Οθόνη φόρτωσης λειτουργικού σηκκευής

Μετά την αρχική φόρτωση του προγράμματος των windows XP πάνω στο οποίο τρέχει το πρόγραμμα του OTDR φορτώνει το λογισμικό για την λειτουργία των μετρήσεων (εικόνα 4.3).



Εικόνα 4.3: Έλεγχι περιφειακών

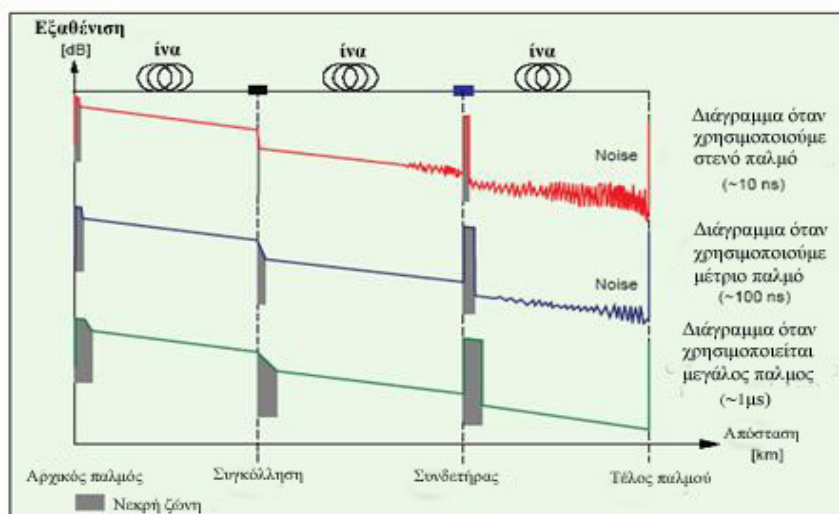
Αφού ολοκληρωθεί η φόρτωση του προγράμματος μετρήσεων, γίνονται κάποιοι αρχικοί έλεγχοι για την ορθή λειτουργία του OTDR. Η επόμενη οθόνη που βλέπουμε εφόσον δεν παρουσιαστεί πρόβλημα κατά τους αρχικούς ελέγχους είναι η οθόνη όπου επιλέγουμε την λειτουργία μετρήσεων.



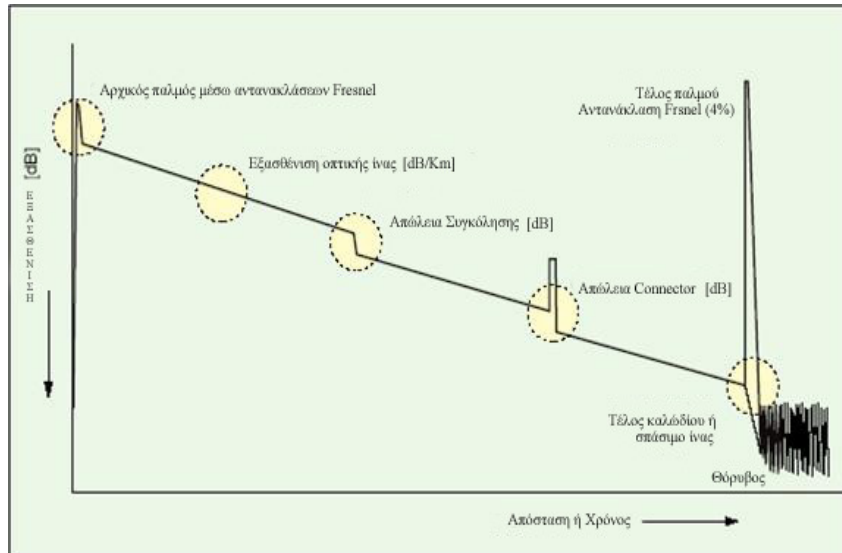
Εικόνα 4.4: Διαθέσιμες επιλογές συσκευής OTDR

Στις καρτέλες που δεν φαίνονται στην παραπάνω φωτογραφία υπάρχουν οι επιλογές OTDR - LTS - VFL - Utility – Help.

Πριν την εκτέλεση του πειράματος παρουσιάζουμε το φαίνονται στα διαγράμματα που εμφανίζει το OTDR οι συσκευές ενισχύσεις ή οι συγκολλήσεις που μπορεί να υπάρχουν κατά μήκος της ίνας.



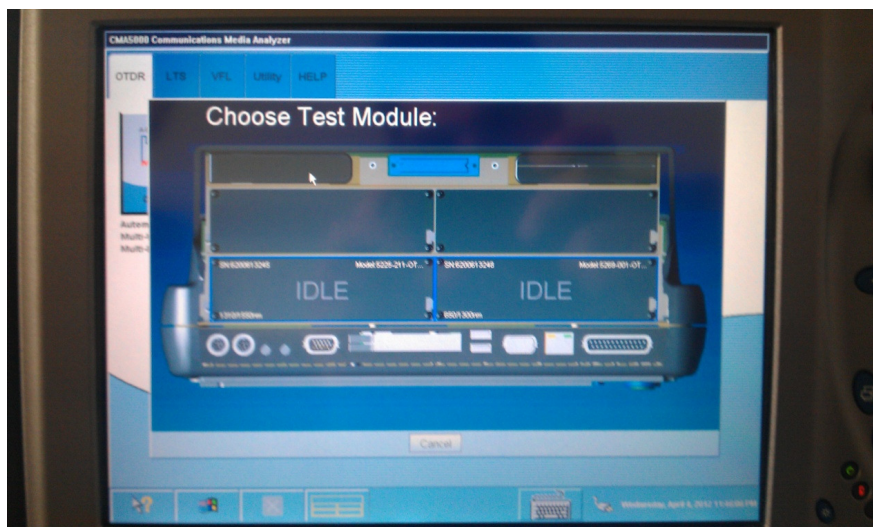
Σχήμα 4.1: Παρουσίαση από OTDR για συγκόλληση ή ενίσχυση σε διαφορετικά μήκη κύματος



Σχήμα 4.2: Έξοδος μέτρησης από OTDR σε ίνα με συγκόλληση και connector

Όπως διακρίνουμε από τις εικόνες παραπάνω η συγκόλληση εμφανίζεται σαν ένα σκαλοπάτι, το πόσο μεγάλο εξαρτάται από την ποιότητα της συγκόλλησης, για το συνδετήρα ισχύει το ίδιο εμφανίζεται σαν σκαλοπάτι αλλά με μία ιδιομοιό διαφορά ότι πριν το σκαλοπάτι υπάρχει μία αύξηση η οποία είναι η αντανάκλαση από τον τερματισμό της ίνας, τέλος η ενίσχυση με οπτικό ενισχυτή εμφανίζεται με ένα θετικό σκαλοπάτι.

Για το δικό μας πείραμα από την καρτέλα OTDR επιλέγουμε την μέτρηση Classic OTDR Testing.



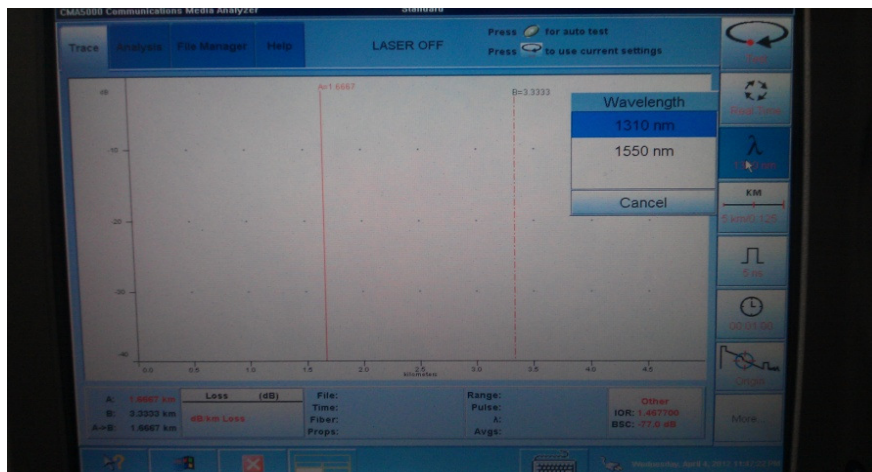
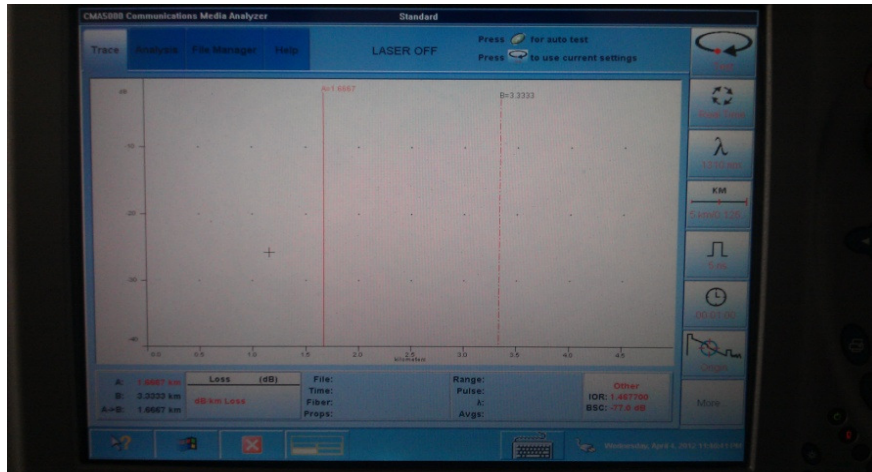
Εικόνα 4.5: διασέσιμα module συσκευής

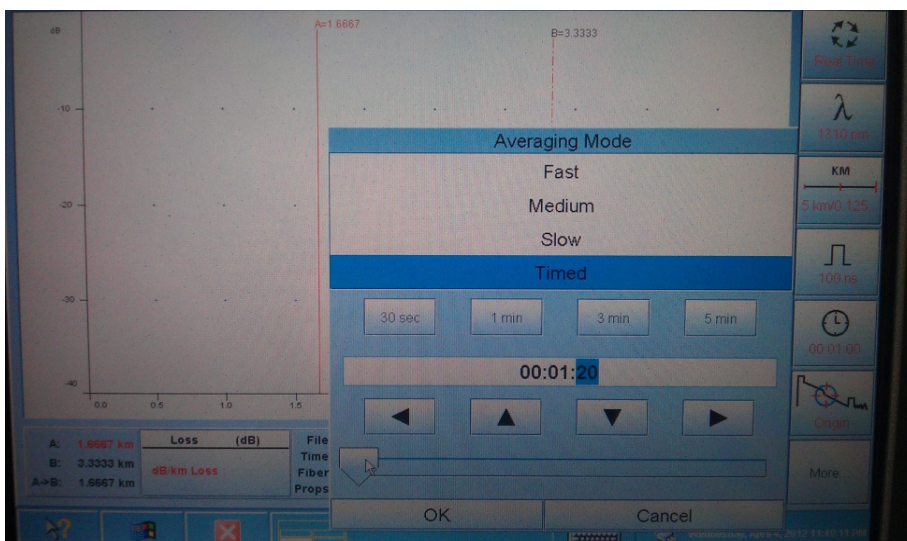
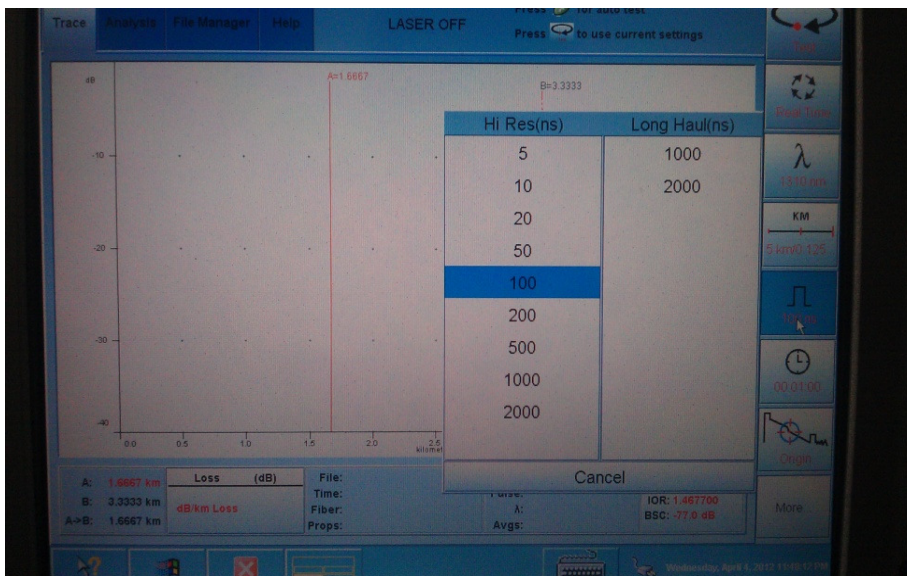


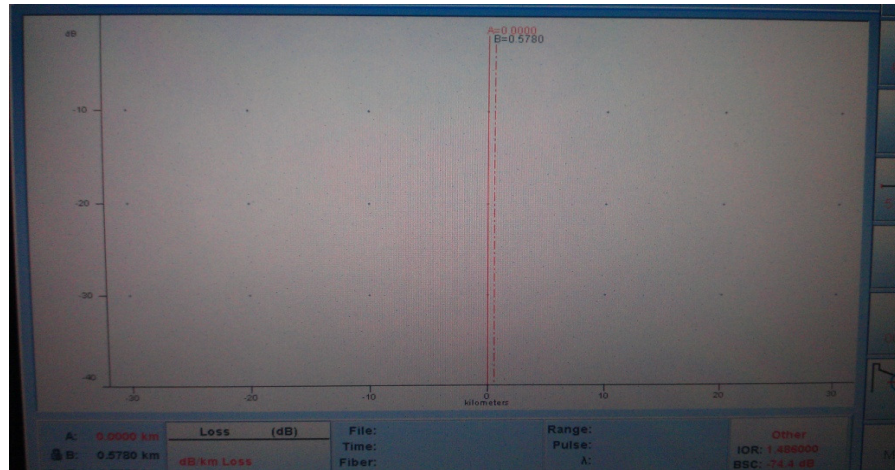
Αφού το επιλέξουμε μας εμφανίζει ένα παράθυρο με τα διαθέσιμα module που είναι εγκαταστημένα στην συσκευή.

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται κατά σειρά: η αρχική οθόνη του προγράμματος μέτρησης του OTDR Testing, Η διαδικασία των βασικών ρυθμίσεων που λαμβάνουν μέρος πριν την έναρξη του πειράματος. Για το πείραμα μας χρησιμοποιούμε τις παρακάτω τιμές

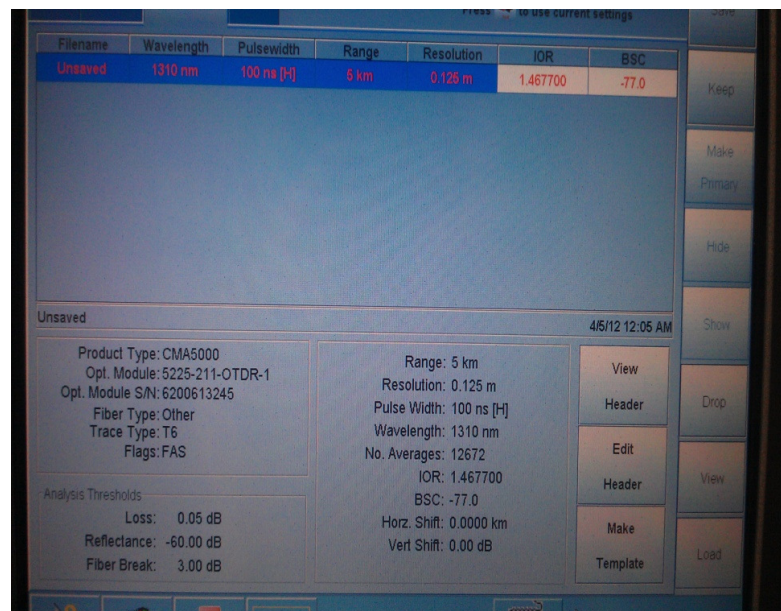
- $\lambda$ : 1310 nm
- Simulation Time: 01 minute & 20 seconds
- Range: 5 Km
- Resolution: Fine
- Hi Res: 100 ns





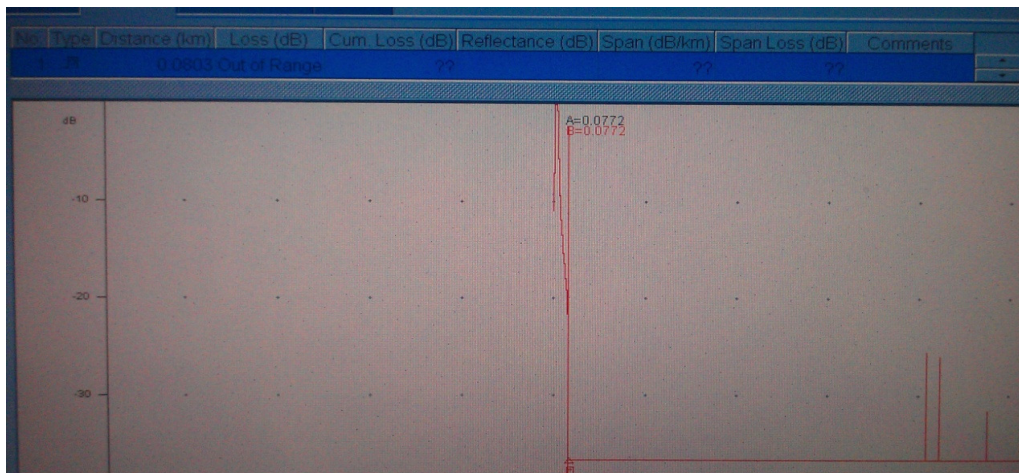
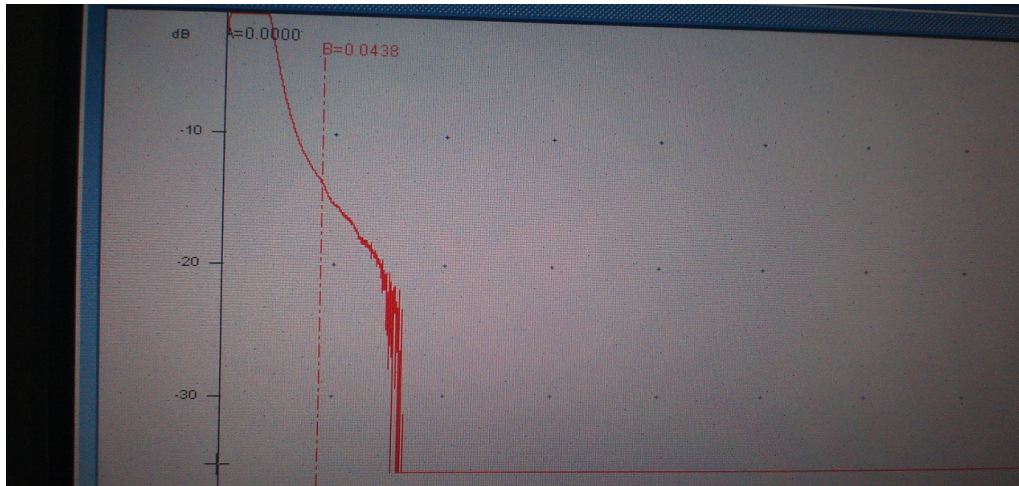


Ρυθμίζουμε τους 2 δείκτες που διαθέτει το πρόγραμμα στο εύρος τιμών αποστάσεων που θέλουμε να μελετήσουμε. Πρέπει σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε ότι ο εργαστηριακός εξοπλισμός που έχουμε στην διάθεση μας περιορίζει στο μήκος της ίνας που ήταν μόλις 5 μέτρα. Για να λειτουργήσει σωστά το OTDR και τα αποτελέσματα να είναι ακριβείας πρέπει κατ' ελάχιστο το μήκος της ίνας να ξεπέρνα τα 75 μέτρα. Ιδανικό μήκος για τον κατασκευαστή του μηχανήματος είναι τα 5 Χιλ. Επιστρέφουμε στο πείραμα μας και αφού το μήκος της ίνας είναι 5 μέτρα ρυθμίζουμε σαν περιοχή μελέτης το μήκος από την θέση 0 μέχρι και 0,5780 χιλιόμετρα.

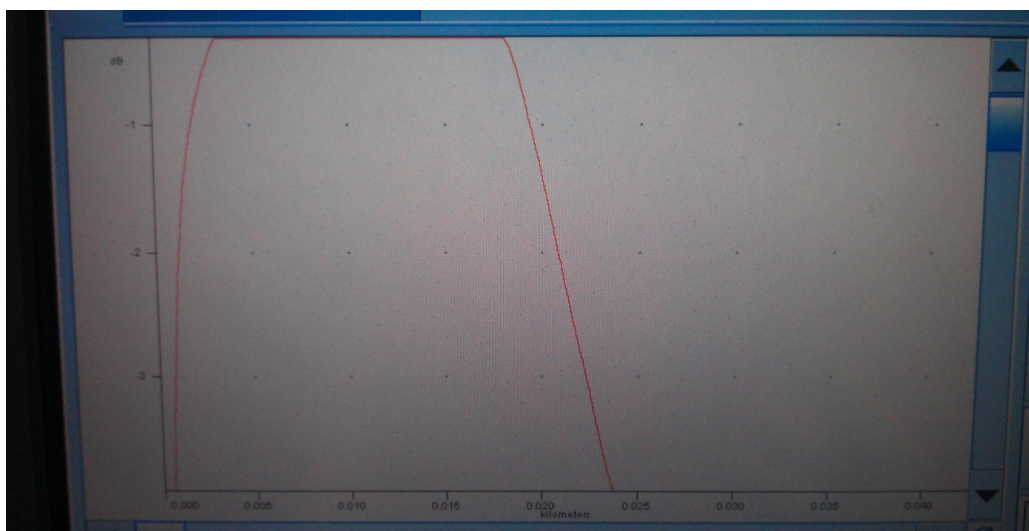


Εικόνα 4.11: Αρχείο αποθήκευσης πειράματος

Τα αποτελέσματα του πειράματος φαίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Μετά από μεγέθυνση της κορυφής της καμπύλης που διακρίνουμε στο παραπάνω σχήμα περνούμε



Από το γράφημα αυτό εξάγουμε ότι: χάνουμε αρκετά λόγω της ανάκλασης από την είσοδο του φωτός στην ίνα μετά από την γραμμή που βλέπουμε που είναι ίσια στο πάνω μέρος της οθόνης του γραφήματος, αυτή είναι οι απώλειες στην ίνα μας, λόγω ότι το πείραμα μας έγινε με ίνα που είναι μόλις 5 μέτρα δεν μπορούν να αναπαριστούν οι απώλειες λόγω του ιδιαίτερα μικρού μεγέθους της. Σε κάθε άλλη περίπτωση που η ίνα είχε το απαιτούμενο μήκος η γραμμή αυτή θα έπρεπε να έχει μια μικρή ελαφριά κλίση, που η κλίση υποδηλώνει τις εκαστωτε απώλειες της ίνας. Μετά από την κορυφή αυτή και την κλίση που έχει το διάγραμμα ξαφνικά τερματίζει στο κάτω άξονα, αυτό στην ανάλυση σημαίνει ότι έχουμε διακοπή του οπτικού καλωδίου (θραύση ίνας), λόγω όμως πολύ μικρού μήκους ίνας το OTDR δεν αντιλαμβάνεται ότι έχουμε μικρή ίνα αλλά σαν θραύση.



## Κεφάλαιο 5

### Συμπεράσματα

Η οπτική ίνα σαν μέσο μετάδοσης πληροφορίας και η χρήση της έχει δώσει νέες δυνατότητες όσο και προοπτικές τόσο σε δίκτυα επικοινωνιών όσο και σε πληθώρα άλλων εφαρμογών. Η δημιουργία ενός τέτοιου δικτύου απο την μελέτη και μόνο μέχρι την σχεδίαση περιλαμβάνει πληθώρα μεταβλητών που πρέπει να ληφθούν υπόψη, από τους διαθέσιμους τύπους οπτικών καλωδίων με τις ιδιαιτερότητες του καθ' ενός τις μεταβλητές του περιβάλλοντος όπου θα εγκατασταθεί μέχρι και τις συσκευές που θα πρέπει να << συνεργάζεται >> το οπτικό καλώδιο ή τα περιφερειακά του οπτικού καλωδίου. Οι παράμετροι πολύ το ίδιο και τα διαθέσιμα προϊόντα, συνήθως όμως μία μόνο παράμετρος κάνει την διαφορά το κόστος, ακόμα και σήμερα που οι τεχνικές για την δημιουργία οπτικών καλωδίων έχουν εξελιχθεί αρκετά το κόστος είναι αυξημένο. Στον αντίποδα όμως οι οπτικές επικοινωνίες δίνουν μια άλλη διάσταση στα δίκτυα, σε πρόσφατα εργαστηριακά πειράματα πέτυχαν ταχύτητες μετάδοσης πληροφορίας της τάξης των 1TB/s αριθμός που είναι εξωπραγματικός για οποιοδήποτε άλλο μέσο.

Διαβάζοντας για τα οπτικά καλώδια και τις ιδιότητες τους συνειδητοποίησα πως αναλύοντας ένα φαινόμενο ποτέ δεν μπορείς να το απομονώσεις καθώς όλα είναι αλληλένδετα μεταξύ τους. Η χρήση μηχανημάτων όπως το OTDR λύνουν πραγματικά τα χέρια σε μηχανικούς δικτύων, μεσα σε ελάχιστο χρόνο μπορούν να βρουν μέχρι και το σημείο που έχει βλάβη το οπτικό καλώδιο, χωρίς να χρειάζεται να ανοίξουμε την εγκαταστασή. Οι συγκεκριμένες συσκευές βρίσκονται πλέον σε κάθε εταιρία που ασχολήταιμε την υποστήριξη οπτικών δικτύων ή την εγκατάσταση.





## Βιβλιογραφία

Έντυπη μορφή:

1. Θεωρητική ανάλυση & πραγματικές μετρήσεις σε δίκτυο οπτικής μετάδοσης (Πτυχιακή εργασία Βραδέλης Ευδοκίας)
2. Οπτικές Ίνες (Αλέξανδρος Αλεξανδρής , Εκδόσεις Ίων)
3. Εργαστηριακές Ασκήσεις Οπτικών Επικοινωνιών (Δρ. Βασίλης Κώτσος , Εκδόσεις Ίων)
4. Ινοοπτικές Επικοινωνίες (Γεράσιμος Κ. Παγιατάκης, Εκδόσεις Τζιόλα)

Ηλεκτρονική μορφή

1. Σημειώσεις Εργαστηριακού Μαθήματος Οπτικών Επικοινωνιών (Ασαρίδης Ηλίας)
2. User Manual OTDR CMA 50 series
3. User Manual Fujicura FSM-60 series
4. Χρήση οργάνων οπτικών επικοινωνιών και σχεδιασμός εφαρμογών (Πτυχιακή εργασία Αναστάσιου Σταθόπουλου)
5. Χρήση OTDR και ενίσχυση Raman για χρήση σε μητροπολιτικά δίκτυα (Διπλωματική εργασία Γαλανάκη Μανούσου)
6. Investigation of the Fiber, Bulk and Surface Properties (IEEE library)