

**ΤΕΙ ΠΕΛΟΠΟΝΗΣΣΟΥ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

Πτυχιακή εργασία

ΘΕΜΑ:

**« Μελέτη της επίδρασης οπτικού ενισχυτή και οπτικού φίλτρου στην ποιότητα μετάδοσης ενός οπτικού συστήματος »**

Κατσιώλη Μαρία

A.M: 2007041

Επιβλέπων Καθηγητής:

Τσαρούχας Ανδρέας

-2013-

## ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Η παρούσα εργασία αφορά την μελέτη οπτικών συστημάτων με χρήση οπτικού ενισχυτή και οπτικού φίλτρου. Γίνεται εκτεταμένη αναφορά στις οπτικές ίνες, τους οπτικούς ενισχυτές και τα οπτικά φίλτρα. Στόχος είναι η αξιολόγηση του οπτικού σήματος που εκπέμπεται από κάποιο οπτικό σύστημα που εμπεριέχει τα παραπάνω. Στη συνέχεια, περιγράφεται η πειραματική διαδικασία μελέτης, η οποία επιτεύχθηκε μέσω κατάλληλου λογισμικού. Τέλος, αναλύονται τα αποτελέσματα των δοκιμών γύρω από την λειτουργία των μέσων που χρησιμοποιήθηκαν.

## ABSTRACT

This work involves the research of optical systems using optical amplifier and optical filter. Extensive reference done to optical fibers, optical amplifiers and optical filters. Objective is to evaluate the optical signal emitted from an optical system that incorporates the above. The experimental procedure described in the study through appropriate software. Finally, the test results analyzed around the operation of the instruments that used.

## Περιεχόμενα

### ΟΠΤΙΚΗ ΙΝΑ

1.1 Οπτικές Ίνες – Χαρακτηριστικά και Ιδιότητες .....	7
1.2 Τι Επιτυγχάνεται με τις Οπτικές Ίνες .....	7
1.3 Τρόπος Λειτουργίας Οπτικών Ινών .....	8
1.4 Τρόπος Κατασκευής μιας Οπτικής Ίνας .....	8
1.5 Καλωδίωση .....	10
1.6 Πόσο Μακριά Μπορεί να Φτάσει το Φως Μέσα σε μια Οπτική Ίνα.....	12
1.7 Πού Χρησιμοποιούνται οι Όπτικές Ίνες .....	13
1.8 Είδη οπτικών ινών .....	14
1.8.1 Πολύτροπες οπτικές ίνες (Multimode fiber optics).....	14
1.8.2 Μονότροπες οπτικές ίνες (single mode fiber optics).....	18

### ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΑΛΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

2.1 Λειτουργία Οπτικών Ινών στα Οπτικά Δίκτυα .....	20
2.2 Γενικά για τα Οπτικά Δίκτυα Πρόσβασης .....	22
2.3 Πέντε γενιές οπτικών συστημάτων.....	23
2.4 Οπτικά συστήματα WDM .....	25
2.4.1 DWDM - Dense Wavelength Division Multiplexing .....	26
2.4.2 CWDM – Coarse Wavelength Division Multiplexing.....	29
2.5 Αναλογικά και ψηφιακά σήματα .....	30
2.6 Οπτικοί Δέκτες.....	31
2.6.1 Φωτοανίχνευση.....	31
2.6.2 Φωτοδίοδος χιονοστιβάδας APD .....	32

ΟΠΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	34
3.2 Χαρακτηριστικά .....	35
3.3 Απολαβή- Κόρος απολαβής .....	35
3.4 Θόρυβος Ενισχυτή .....	36
3.5 Εφαρμογές και Πλεονεκτήματα Ενισχυτών.....	37
3.6 Τύπο οπτικών ενισχυτών .....	38
3.6.1 Οπτικοί Ενισχυτές γραμμής: .....	39
3.6.2 Προενισχυτές: .....	39
3.6.3 Ενισχυτές ισχύος .....	39
3.6.4 . Οπτικός Ενισχυτής Ημιαγωγού (Semiconductor Optical Amplifier (SOA)).....	40
3.6.5 Ενισχυτές laser ημιαγωγού (SLA).....	41
3.6.6 Ενισχυτές οπτικών ινών με προσμίξεις.....	43
3.6.6.1 Εισαγωγή.....	43
3.6.7 Οπτικοί Ενισχυτές με Προσμίξεις Erbίου (EDFA).....	46
3.6.8 Ενισχυτές οπτικών ινών με εμπλουτισμένων με pr (πρασεοδύμιο).....	57
3.6.10 Ενισχυτές ινών οπτικών Brillouin .....	60

ΟΠΤΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ

4.1 Εισαγωγή .....	62
4.2 Χαρακτηριστικά .....	62
4.3 Ρυθμιζόμενα Οπτικά Φίλτρα και τα είδη τους.....	63
4.3.1 Etalon (Fabry-Perot Filters ή Interferometers) .....	63
4.3.2 Φίλτρα ίνας Fabry-Perot με προσθήκη πιεζοηλεκτρικών στοιχείων υπό τάση .....	63

4.3.3 Αλυσίδα Mach-Zehner .....	64
4.3.4 Ακουστό-οπτικά φίλτρα .....	64
4.3.5 Ήλεκτρο-οπτικά φίλτρα .....	64
4.4 Σταθερά Οπτικά Φίλτρα .....	64
4.4.1 Grating Filters .....	65
4.4.2 Thin Film Interference Filters .....	65
4.4.3 Φίλτρα Φράγματος Μεταγωγής.....	65
4.5 Φίλτρα Διηλεκτρικών Επιστρώσεων .....	65
4.6 Έλεγχος Διασποράς.....	66
<b>ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ</b>	
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 1 .....	67
ΠΡΟΣΩΜΕΙΩΣΗ 2.....	78
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>83</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>84</b>

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

**Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>:** Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στις οπτικές ίνες προκειμένου να εξοικειωθεί ο αναγνώστης στη θεωρία των οπτικών επικοινωνιών. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται εκτενή ανάλυση των οπτικών ινών και όλων των χαρακτηριστικών τους.

**Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>:** Στο δεύτερο κεφάλαιο υπάρχει μια γενική αναφορά στη λειτουργία των οπτικών συστημάτων.

**Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>:** Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στους οπτικών ενισχυτές και είδη αυτών. Όμως κυρίως αναπτύσσεται στους ενισχυτές ινών Erbium, καθώς είναι ο ενισχυτής που θα χρησιμοποιηθεί στο πειραματικό μέρος της εργασίας και των προσομοιώσεων για την κατάλληλη μελέτη.

**Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>:** Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα οπτικά φίλτρα, τα είδη τους και η λειτουργία του καθενός.

**Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>:** Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται πειραματικά το εργαστηριακό μέρος της μελέτης, χρησιμοποιώντας το κατάλληλο λογισμικό. Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν δύο προσομοιώσεις οπτικών κυκλωμάτων που μας δίνουν τα αποτελέσματα χρήσης του οπτικού ενισχυτή και του οπτικού φίλτρου σε ένα οπτικό κύκλωμα.

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΟΠΤΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

Η ιδέα της χρήσης του φωτός για την επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις δεν είναι κάτι νέο, αλλά έχει τις ρίζες της στην αρχαιότητα. Οι αρχαίοι Έλληνες άναβαν φωτιές σε ψηλά σημεία, όπως κορυφές βουνών, για να ανταλλάξουν πληροφορίες μεταξύ τους άμεσα, σε αποστάσεις πολλών χιλιομέτρων. Ήταν τότε το ταχύτερο μέσο απομακρυσμένης επικοινωνίας και τελικά φαίνεται ότι ακόμη και σήμερα ισχύει το ίδιο, καθώς δεν υπάρχει τίποτα μέχρι στιγμής που να μπορεί να ξεπεράσει την ταχύτητα του φωτός. Στα τέλη του 19ου αιώνα και στις αρχές του 20ου οι καπετάνιοι των πλοίων χρησιμοποιούσαν ειδικούς ισχυρούς φακούς τους οποίους αναβόσβηναν, σύμφωνα με τον κώδικα Μορς, επικοινωνώντας άμεσα μεταξύ τους. Αυτός ο τρόπος επικοινωνίας χρησιμοποιήθηκε εν μέρει και στην ξηρά, παρόλο που οι πρώτες συσκευές ενσύρματης επικοινωνίας είχαν κάνει την εμφάνισή τους την εποχή εκείνη.

Στα δύο παραπάνω παραδείγματα έχουμε τρία κοινά στοιχεία. Το πρώτο είναι ο αποστολέας του φωτεινού σήματος, το δεύτερο ήταν το μέσο μετάδοσης, δηλαδή ο αέρας και το τρίτο ήταν ο παραλήπτης που το αποκωδικοποιούσε και το μετέτρεπε σε κατανοητή μορφή. Φυσικά οι προαναφερθείσες μέθοδοι είχαν ως σημαντικότερο μειονέκτημα το πρόβλημα της ορατότητας. Το φως μιας φωτιάς ή ενός τεχνητού μέσου δεν μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την επικοινωνία κατά τη διάρκεια της ημέρας, καθώς δεν μπορούσε κανείς να το ξεχωρίσει από το πολύ ισχυρότερο ηλιακό φως. Ακόμη και τη νύχτα όμως, διάφορες συνθήκες όπως η αυξημένη υγρασία ή η ομίχλη, μπορούσαν να καταστήσουν ανέφικτη την παρατήρηση του φωτεινού σήματος σε μεγάλη απόσταση.

Σήμερα η φωτεινή ενέργεια εξακολουθεί να διαδραματίζει κυρίαρχο ρόλο στις τηλεπικοινωνίες και κατ' επέκταση στην καθημερινή μας ζωή. Αν στα προηγούμενα χρόνια το φως μεταδιδόταν μέσω της ατμόσφαιρας, σήμερα αυτό έδωσε τη θέση του στο γυαλί και σε ειδικό ανακλαστικό υλικό που το περιβάλλει. Κάπως έτσι έχουν σχηματιστεί οι οπτικές ίνες, οι οποίες είναι σε θέση να μεταφέρουν πληροφορίες σε αποστάσεις πολλών χιλιομέτρων, αποτελώντας έτσι αναπόσπαστο κομμάτι των σύγχρονων τηλεπικοινωνιών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

### ΟΠΤΙΚΗ ΙΝΑ

#### 1.1 Οπτικές Ίνες – Χαρακτηριστικά και Ιδιότητες

Όπως είναι γνωστό, τα καλώδια κατασκευάζονται από χαλκό ή κράματά του. Όμως ο χαλκός παράγεται σε λίγες μόνο χώρες του κόσμου. Έτσι οι υπόλοιπες χώρες είναι εξαρτημένες από αυτές που τον παράγουν. Οι ερευνητές ωθήθηκαν στο να προτείνουν πιο συμφέρουσες εναλλακτικές λύσεις παρακινούμενοι και από την προσπάθεια ανεξάρτησης από τις χώρες παραγωγής χαλκού και από την προσπάθεια αποτροπής υποκλοπών στις τηλεπικοινωνίες καθώς και μεταφοράς μεγαλύτερου “όγκο” πληροφοριών.

Έτσι οι άνθρωποι οδηγήθηκαν στην κατασκευή των οπτικών ινών. Οι οπτικές ίνες είναι πολύ λεπτές κυλινδρικές ίνες γυαλιού ή πλαστικού με διάμετρο κάτω των 8μm (δηλαδή πιο λεπτές από μια τρίχα). Είναι διαφανείς και εύκαμπτες. Κατασκευάζονται από εξαιρετικά καθαρό γυαλί, με τρόπο ώστε να αντανακλούν το φως προς τον άξονά τους – να το κρατούν στο εσωτερικό τους. Έτσι ,οι δέσμες φωτός μεταδίδονται εύκολα και γρήγορα.

Με τις ακτίνες λέιζερ, ένα σήμα μπορεί να μεταδοθεί δια μέσου οπτικών ινών σε απόσταση μεγαλύτερη από 50 χλμ. Χωρίς ενδιάμεση ενίσχυση. Αυτό σημαίνει ότι οι οπτικές ίνες είναι πιο αποτελεσματικές από τα χάλκινα καλώδια. Με ένα μόνο ζεύγος οπτικών ινών μπορούν να πραγματοποιηθούν ταυτόχρονα εκατοντάδες τηλεφωνικές συνδιαλέξεις.

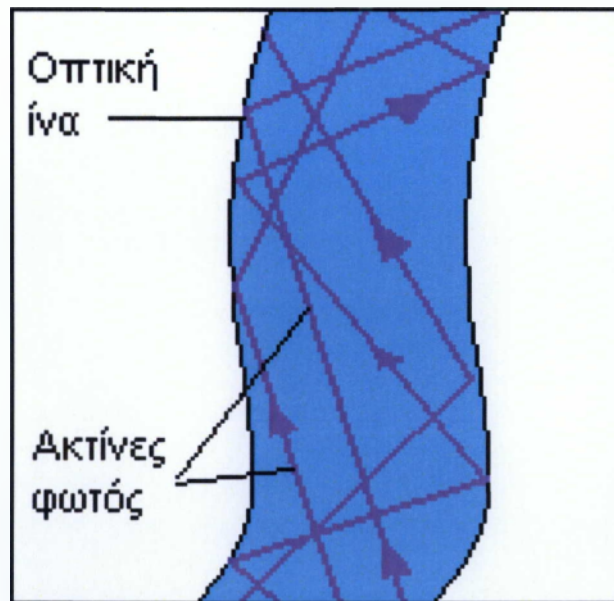
#### 1.2 Τι Επιτυγχάνεται με τις Οπτικές Ίνες

Με την βοήθεια των οπτικών ινών μπορεί κανείς να “αναγκάσει” μια φωτεινή δέσμη να ακολουθήσει όποια διαδρομή επιθυμεί. Θα μπορούσε να αναφερθεί ότι, όπως με ένα εύκαμπτο λάστιχο ποτίσματος μπορεί κανείς να οδηγήσει το νερό από την βρύση σε ένα σημείο του κήπου του, έτσι και με τις οπτικές ίνες μπορεί να “οδηγήσει” το φως από μια ακίνητη πηγή σε οποιοδήποτε σημείο επιθυμεί. Για αυτό αναφέρεται ότι μια οπτική ίνα είναι ένας φωτοαγωγός ή φωτοοδός.



## 1.3 Τρόπος Λειτουργίας Οπτικών Ίνών

Κλείνεται ένας λαμπτήρας σε ένα αδιαφανές κουτί και ανάβει. Αυτός δε φωτίζει το περιβάλλον. Τώρα με μια λεπτή βελόνα ανοίγεται μια οπή στο κουτί. Από αυτό ξεπηδά μια λεπτή ακτίνα φωτός, που διαδίδεται ευθύγραμμα. Στη συνέχεια λαμβάνεται μια οπτική ίνα και “σφηνώνεται” στην οπή. Το φως που φτάνει στην άκρη της ίνας προσπίπτει στην κυλινδρική της επιφάνεια, από μέσα, με γωνία μεγαλύτερη από την οριακή γωνία και παθαίνει ολική ανάκλιση. Έτσι το φως μετά από συνεχείς ολικές ανακλήσεις βγαίνει από το άλλο άκρο της οπτικής ίνας, ακόμα και αν αυτή είναι καμπυλωμένη.



**Εικόνα 1.1:** Τρόπος διάδοσης φωτός σε μία οπτική ίνα

## 1.4 Τρόπος Κατασκευής μιας Οπτικής Ίνας

Στην πράξη χρησιμοποιείται δέσμη οπτικών ινών. Αν οι ίνες αποτελούνταν μόνο από ένα υλικό, τότε το φως που “ταξιδεύει” στο εσωτερικό τους θα περνούσε, όταν θα έρχονταν σε επαφή, από την μία ίνα στην άλλη. Για αυτό κάθε ίνα επικαλύπτεται με ένα λεπτό στρώμα υλικού μικρότερου δείκτη διάθλασης ή με πολλά λεπτά στρώματα, έτσι ώστε κάθε επόμενο στρώμα να έχει μικρότερο δείκτη διάθλασης από τον προηγούμενο. Τέλος στο σύστημα της γυάλινης ίνας τοποθετείται ένα περίβλημα που την προστατεύει και την κάνει πιο ανθεκτική σε μηχανικές καταπονήσεις. Όπως γίνεται φανερό από τα παραπάνω, κάθε οπτική ίνα αποτελείται από τρία μέρη.

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

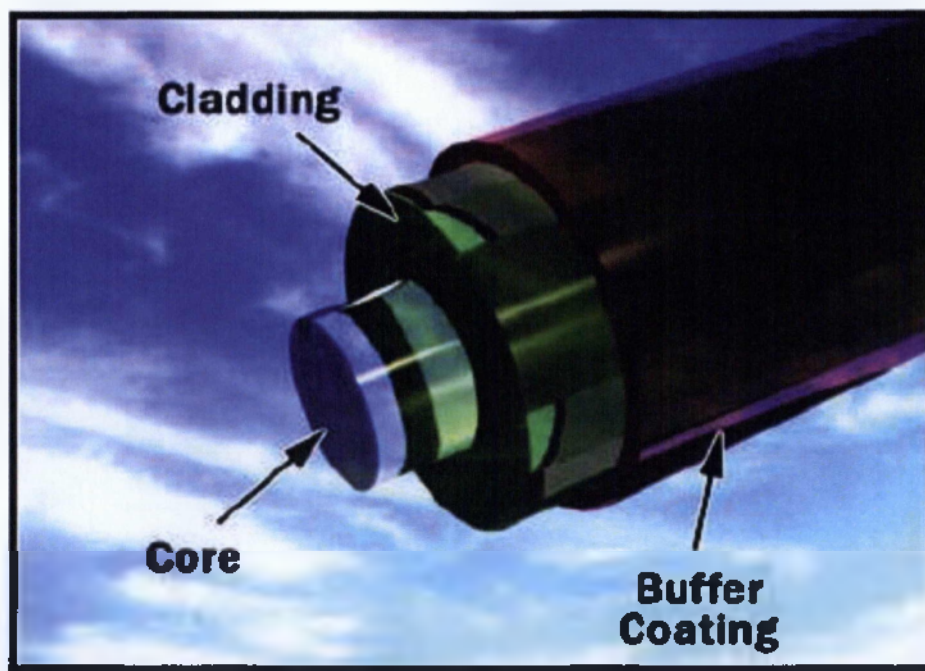
Η κατασκευή καλωδίων οπτικών ινών, κατάλληλων για εγκατάσταση σε πραγματικά οπτικά συστήματα, συμπεριλαμβάνει εξελιγμένη τεχνολογία και δίνει πολύ μεγάλη βαρύτητα σε αρκετές πρακτικές λεπτομέρειες.

Στην απλούστερη μορφή της, μία οπτική ίνα βηματικού δείκτη διάθλασης αποτελείται από έναν κυλινδρικό πυρήνα, που περιβάλλεται από ένα στρώμα περιβλήματος, του οποίου ο δείκτης διάθλασης είναι λίγο μικρότερος από τον δείκτη διάθλασης του πυρήνα. Τόσο ο πυρήνας, όσο και το περίβλημα χρησιμοποιούν το πυρίτιο σαν βασικό υλικό. Η διαφορά στους δείκτες διάθλασης πραγματοποιείται εμπλουτίζοντας τον πυρήνα ή το περίβλημα, ή και τα δύο. Στοιχεία πρόσμειξης όπως τα  $\text{GeO}_2$  (γερμάνιο) και  $\text{P}_2\text{O}_5$  (πεντοξείδιο του φωσφόρου) αυξάνουν το δείκτη διάθλασης του πυριτίου και είναι κατάλληλα για τον πυρήνα. Από την άλλη, στοιχεία όπως το  $\text{B}_2\text{O}_3$  (τριοξείδιο του βορίου) και το φθόριο μειώνουν τον δείκτη διάθλασης του πυριτίου και είναι κατάλληλα για το περίβλημα. Τα ζητήματα σχεδιασμού έχουν να κάνουν με το προφίλ του δείκτη διάθλασης, την ποσότητα των προσμειξεων και τις διαστάσεις του πυρήνα και του περιβλήματος. Η διάμετρος του εξώτατου στρώματος περιβλήματος έχει πρότυπη τιμή 125μm για όλες τις οπτικές ίνες που χρησιμοποιούνται για επικοινωνία.

Η κατασκευή οπτικών ινών πυριτίου που χρησιμοποιούνται για επικοινωνίες αποτελείται από δύο στάδια. Στο πρώτο, χρησιμοποιούμε την μέθοδο απόθεσης ατμού για να δημιουργήσουμε μία κυλινδρική προμορφή με το προφίλ δείκτη διάθλασης που επιθυμούμε. Τυπικά έχει μήκος 1m και διάμετρο 2cm, ενώ παράλληλα περιέχει πυρήνα και στρώματα περιβλήματος με τις κατάλληλες σχετικές διαστάσεις. Στο δεύτερο στάδιο, η προμορφή αυτή γίνεται οπτική ίνα χρησιμοποιώντας ένα μηχανισμό ακριβούς τροφοδοσίας, που τροφοδοτεί την προμορφή σε κλίβανο με την κατάλληλη ταχύτητα. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε διάφορες μεθόδους για την κατασκευή της προμορφής. Οι τρεις πιο συνηθισμένες μέθοδοι είναι η χημική απόθεση τροποποιημένων ατμών (MCVD), η εξωτερική απόθεση ατμών (OVD) και η απόθεση ατμών στον άξονα (VAD).

Η διαδικασία MCVD είναι γνωστή και σαν μέθοδος εσωτερικής εναπόθεσης ατμών, αφού ο πυρήνας και τα στρώματα περιβλήματος εναποτίθενται στο εσωτερικό ενός σωλήνα τηγμένου πυριτίου. Σε μία παρόμοια διαδικασία, γνωστή σαν διαδικασία χημικής εναπόθεσης ατμών με ενεργοποίηση πλάσματος, η χημική αντίδραση ξεκινά από ένα μικροκυματικό πλάσμα. Αντίθετα, στις διαδικασίες OVD και VAD ο πυρήνας και τα στρώματα περιβλήματος τοποθετούνται στο εξωτερικό ενός περιστρεφόμενου άξονα με την τεχνική της υδρόλυσης με φλόγα. Ο άξονας απομακρύνεται πριν την τήξη. Τότε, η πορώδης αυτή συνθετική απομίμηση τοποθετείται σε ένα κλίβανο τήξης για να σχηματιστεί συνθετικό γυαλί.

Η τρύπα που υπάρχει στο κέντρο επιτρέπει την μείωση των υδρατμών μέσω της αφυδάτωσης σε ελεγχόμενη ατμόσφαιρα μείγματος  $\text{Cl}_2\text{-He}$ , παρόλο που έχει σαν αποτέλεσμα ένα βαθύλωμα στο κέντρο του προφίλ δείκτη. Το βαθύλωμα μπορεί να περιοριστεί αν κατά την τήξη κλείσουμε την τρύπα στο κέντρο. Τα στάδια εφελκυσμού (μορφοποίησης) της οπτικής ίνας είναι ουσιαστικά το ίδιο ανεξάρτητα από την διαδικασία που χρησιμοποιήσαμε για να κατασκευάσουμε την προμορφή.



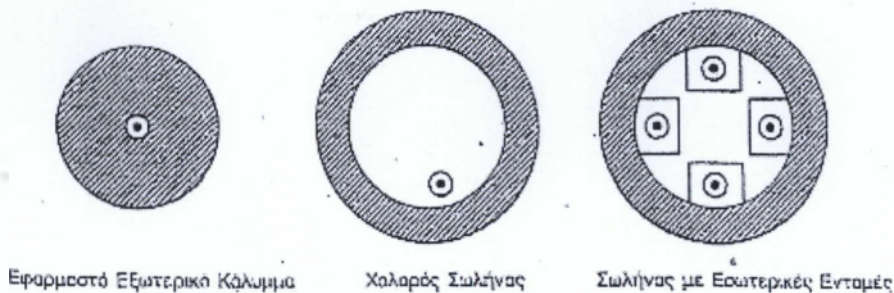
**Εικόνα1. 2:** Η δομή της οπτικής ίνας

### 1.5 Καλωδίωση

Η καλωδίωση των οπτικών ιών είναι απαραίτητη για να τις προστατεύει από φθορές κατά την μεταφορά και την εγκατάστασή τους. Η σχεδίαση του καλωδίου εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής. Σε μερικές εφαρμογές, μπορεί να είναι αρκετό να απομονώσουμε την οπτική ίνα τοποθετώντας την μέσα σε ένα πλαστικό εξωτερικό κάλυμμα. Σε άλλες πάλι, το καλώδιο θα πρέπει να γίνει μηχανικά ισχυρό χρησιμοποιώντας ενισχυτικά στοιχεία, όπως ατσάλινες ράβδους.

Ένα καλώδιο μικρής αντοχής κατασκευάζεται εάν περιβάλλουμε την οπτική ίνα με ένα μονωτικό εξωτερικό κάλυμμα από σκληρό πλαστικό. Η **Εικόνα 1.3** παρουσιάζει τρία απλά σχέδια καλωδίων. Μπορούμε να έχουμε ένα εφαρμοστό εξωτερικό κάλυμμα εφαρμόζοντας ένα μονωτικό πλαστικό περίβλημα πάχους 0.5mm - 1mm πάνω στο πρώτο στρώμα επικάλυψης, που εφαρμόστηκε κατά τη διαδικασία μορφοποίησης της οπτικής ίνας. Με μία άλλη μέθοδο η οπτική ίνα απλώνεται χαλαρά στο εσωτερικό ενός πλαστικού σωλήνα. Οι απώλειες

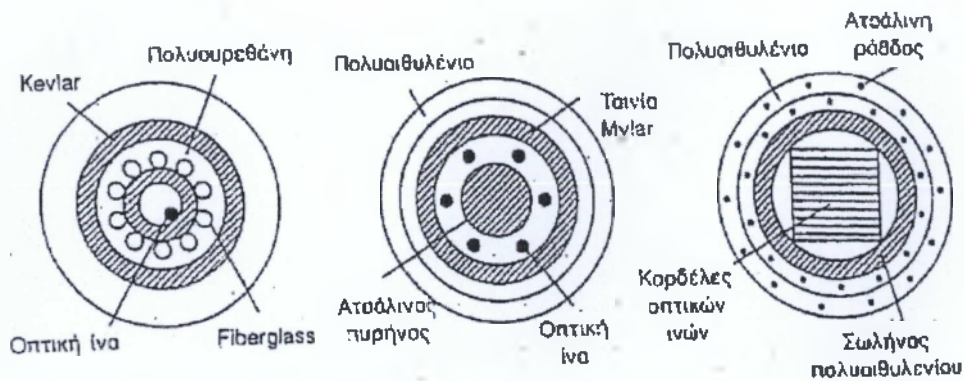
μικροκάμψης σχεδόν εξουδετερώνονται με την κατασκευή αυτή, αφού η οπτική ίνα μπορεί να πάρει την θέση που θέλει στο εσωτερικό του σωλήνα. Μπορούμε επίσης να εφαρμόσουμε την κατασκευή αυτή και για την δημιουργία καλωδίων πολλών οπτικών ινών, αν χρησιμοποιήσουμε σωλήνα με εσωτερικές εντομές για κάθε οπτική ίνα.



**Εικόνα 1.3:** Τυπικά σχέδια καλωδίων οπτικών ινών μικρής αντοχής

Στα καλώδια μεγάλης αντοχής χρησιμοποιούμε ατσάλι ή ένα ανθεκτικό πολυμερές, για παράδειγμα και Kevlar, για να έχουμε μηχανική αντοχή. Η **Εικόνα 1.4** παρουσιάζει σχηματικά τρία είδη καλωδίων. Στη κατασκευή χαλαρού σωλήνα, ράβδοι fiber glass μονωμένοι με πολυουρεθάνη καθώς και ένα κάλυμμα Kevlar παρέχουν την απαραίτητη μηχανική αντοχή. Το ίδιο σχέδιο μπορεί να επεκταθεί σε καλώδια πολλών οπτικών ινών, αν τοποθετήσουμε πολλές οπτικές ίνες, η καθεμία από τις οποίες βρίσκεται μέσα σε χαλαρό σωλήνα, γύρω από ένα κεντρικό ατσάλινο πυρήνα. Όταν πρέπει να τοποθετήσουμε έναν μεγάλο αριθμό οπτικών ινών μέσα σε ένα απλό καλώδιο χρησιμοποιούμε καλώδιο – κορδέλα. Η κορδέλα αυτή κατασκευάζεται πακετάροντας τυπικά δώδεκα οπτικές ίνες ανάμεσα σε δύο πολυεσθερικές ταινίες. Κατόπιν, πολλές ταινίες τοποθετούνται μαζί σε ορθογώνια διάταξη και μέσα σε πολυαιθυλενικό σωλήνα. Θα έχουμε μηχανική αντοχή, αν χρησιμοποιήσουμε ατσάλινες ράβδους στα εξώτατα καλύμματα πολυαιθυλενίου. Η εξωτερική διάμετρος των καλωδίων αυτών είναι περίπου 1 έως 1.5cm.

Πρέπει να χρησιμοποιούμε τους συνδετήρες για να μπορέσουμε να χρησιμοποιήσουμε τις οπτικές ίνες σε πραγματικά συστήματα επικοινωνίας. Αυτοί χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Μία μόνιμη ζεύξη μεταξύ των δύο ινών είναι γνωστή σαν σύνδεση δύο ινών, ενώ μία προσωρινή ζεύξη μεταξύ τους χρησιμοποιεί συνδετήρα οπτικών ινών. Οι συνδετήρες αυτοί συνήθως χρησιμοποιούνται για να ενώνουν το καλώδιο οπτικών ινών με τον πομπό (ή τον δέκτη), ενώ οι ενώσεις χρησιμοποιούνται για να συνδέουμε τμήματα καλωδίων (συνήθως μήκους 5-10Km). Το κύριο ζήτημα στη χρήση ενώσεων και συνδετήρων έχει να κάνει με την απώλεια. Πάντα έχουμε απώλεια κάποιας ποσότητας ισχύος αφού τα δύο άκρα της οπτικής ίνας ποτέ δεν ευθυγραμμίζονται τέλεια στη πράξη. Μπορούμε εύκολα να έχουμε απώλεια στις ενώσεις κάτω από 0.1 dB, αν χρησιμοποιήσουμε την τεχνική της σύντηξης στην περιοχή της ένωσης. Η απώλεια των συνδετήρων είναι γενικά μεγαλύτερη. Η τεχνικά εξελιγμένοι συνδετήρες έχουν μέση απώλεια περίπου 0.3 dB. Η τεχνολογία της σχεδίασης τόσο των ενώσεων όσο και των συνδετήρων είναι αρκετά προηγμένη.



**Εικόνα 1.4:** Τυπικά σχέδια καλωδίων οπτικών ινών μεγάλης αντοχής

## 1.6 Πόσο Μακριά Μπορεί να Φτάσει το Φως Μέσα σε μια Οπτική Ίνα

Το φως κατά το “ταξίδι” του σε μια οπτική ίνα εξασθενεί. Αυτό συμβαίνει συνήθως για τους παρακάτω λόγους:

- Λόγω απορρόφησης, που οφείλεται στις ξένες προσμείξεις που υπάρχουν στο γυαλί
- Λόγω σκέδασης το φως διεισδύει στο μανδύα και διασκορπίζεται. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται εντονότερα, αν στην οπτική ίνα υπάρχουν συνδέσεις.
- Λόγω κακής κατασκευής υπάρχουν στην διάμετρο του πυρήνα, για παράδειγμα, μικροδιακυμάνσεις.
- Λόγω μεγάλης καμπής της οπτικής ίνας.

Αν ο πυρήνας ήταν κατασκευασμένος από κοινό γυαλί, όπως αυτό των τζαμιών των σπιτιών, τότε το φως θα “ταξίδευε” μέσα στην ίνα το πολύ ένα μέτρο. Για το λόγο αυτό το γυαλί που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του πυρήνα είναι μεγάλης καθαρότητας. Έτσι το φως μεταφέρεται σε απόσταση πολλών χιλιομέτρων με πολύ μικρές απώλειες. Η καθαρότητα του γυαλιού είναι τέτοια, ώστε, αν θέλαμε να αντικαταστήσουμε το κοινό τζάμι ενός παραθύρου με τζάμι κατασκευασμένο από υλικό ίδιο με αυτό των οπτικών ινών, τότε αυτό, για να έχει την ίδια απορρόφηση φωτός, θα έπρεπε να έχει πάχος 1km περίπου

### 1.7 Πού Χρησιμοποιούνται οι Οπτικές Ίνες

Οι οπτικές ίνες βρίσκουν πάρα πολλές εφαρμογές. Οπτικές ίνες μεγάλης διαμέτρου και μικρής καθαρότητας (συνήθως πλαστικές) χρησιμοποιούνται στην κατασκευή φωτεινών επιγραφών, στην διακόσμηση και στο φωτισμό των πισινών. Έτσι αποτρέπεται ο κίνδυνος ηλεκτροπληξίας. Δέσμη οπτικών ινών (με μια μόνο λάμπα) φωτίζει πολλές προθήκες καταστημάτων ή πολλούς πίνακες ζωγραφικής στις γκαλερί, ώστε να εξοικονομούμε ηλεκτρική ενέργεια. Με την βοήθεια των οπτικών ινών μπορούμε να παρατηρήσουμε αντικείμενα απρόσιτα σε άμεση παρατήρηση. Έτσι κατασκευάστηκε το ενδοσκόπιο, όργανο που χρησιμοποιείται στην Ιατρική, για να κάνει ορατές ορισμένες εσωτερικές περιοχές του σώματός μας. Παρόμοια συστήματα χρησιμοποιούνται από τους μηχανικούς για να εντοπίσουν βλάβες στο εσωτερικό των μηχανών. Η πιο σημαντική εφαρμογή των οπτικών ινών αφορά τις τηλεπικοινωνίες. Ίσως όλοι έχουμε ακούσει για την χρήση των οπτικών ινών στις ψηφιακές (digital) τηλεπικοινωνίες. Η χρήση τους έφερε την επανάσταση στο χώρο αυτό για τους λόγους που αναφέρουμε παρακάτω:

- Με την βοήθεια μιας ίνας μπορεί κανείς να μεταφέρει ταυτόχρονα και χωρίς παρεμβολές χιλιάδες τηλεφωνήματα, δεκάδες εκπομπές τηλεοπτικών καναλιών και μεγάλο αριθμό δεδομένων υπολογιστών.
- Οι διαστάσεις των καλωδίων των οπτικών ινών και το βάρος τους είναι πολύ μικρότερα από τα αντίστοιχα του χαλκού. Λόγου χάρη, ένα καλώδιο οπτικών ινών μπορεί να αντικαταστήσει χάλκινο καλώδιο δεκαπλάσιας, περίπου, διαμέτρου και τριανταπλάσιου, περίπου, βάρους.
- Κατά τη μεταφορά των πληροφοριών δεν υπάρχουν παράσιτα.
- Είναι πολύ δύσκολη η υποκλοπή (τοποθέτηση “κοριών”) ή η συνακρόαση.
- Δεν χρειάζονται γείωση.
- Μπορούν να παραχθούν από κάθε χώρα με συνέπεια την ανεξάρτησή της από χώρες που παράγουν χαλκό. Έτσι επιτυγχάνεται και τεχνολογική διάχυση. Στην Ελλάδα υπάρχουν εργοστάσια παραγωγής οπτικών ινών, δηλαδή επεξεργασίας του διοξειδίου του πυριτίου, με πρώτη ύλη την άμμο.

Όπως ήδη αναφέρθηκε λοιπόν, οι οπτικές ίνες, θεωρούνται ειδικά νήματα τα οποία έχουν κατασκευαστεί από γυαλί και με μια διάμετρο περίπου όσο μια ανθρώπινη τρίχα. Το υλικό από το οποίο έχουν κατασκευαστεί οι ίνες αυτές επιτρέπει τη μετάδοση του φωτός από το εσωτερικό τους, ενώ συνήθως τις συναντάμε συγκεντρωμένες κατά χιλιάδες σε δέσμες, που σχηματίζουν τα λεγόμενα οπτικά καλώδια σε άλλες εφαρμογές της τεχνολογίας.

Οι οπτικές ίνες ή οι ίνες γυαλιού, οι οποίες είναι πολύ λεπτά, μακριά νήματα πολύ καθαρού γυαλιού περίπου στη διάμετρο μιας ανθρώπινης τρίχας και οι οποίες αποτελούν μια ακόμα λύση στη δημιουργία των έξυπνων κλωστοϋφαντουργικών

προϊόντων και «έξυπνων» ενδυμάτων. Διευθετούνται επίσης σε δέσμες και χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση φωτεινών σημάτων σε μεγάλες αποστάσεις.

Οι οπτικές ίνες αποτελούνται επίσης από τον πυρήνα (core), δηλαδή το λεπτό γυάλινο κέντρο και στο οποίο ταξιδεύει το φως, την επικάλυψη (cladding), το εξωτερικό οπτικό υλικό που περιβάλλει τον πυρήνα και αντανακλά το φως σε αυτόν, και το επικαλυπτικό στρώμα (buffer coating), το πλαστικό επικαλυπτικό στρώμα που προστατεύει την ίνα από τη φθορά και την υγρασία.

Υπάρχουν ουσιαστικά δύο τύποι οπτικών ινών, οι *single-mode* και οι *multi-mode*. Οι *single-mode* έχουν μικρούς πυρήνες και μεταδίδουν ένα υπέρυθρο λέιζερ φως. Οι *multi-mode* ίνες διαθέτουν μεγαλύτερους πυρήνες και μεταδίδουν ένα υπέρυθρο φως μέσω LEDs. Κάποιες οπτικές ίνες μπορεί να είναι κατασκευασμένες από πλαστικό. Αυτές έχουν μεγάλο πυρήνα και μεταδίδουν ορατό κόκκινο φως μέσω LEDs. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες, στα τοπικά δίκτυα, στην καλωδιακή τηλεόραση και σε αισθητήρες για τη μεταφορά σημάτων με τη μορφή παλμών ή φωτός.

Οι οπτικές ίνες διαθέτουν επίσης το πλεονέκτημα της ανθεκτικότητας, αλλά ταυτόχρονα θεωρούνται φτωχές σε ευκαμψία και αντοχή στο γρατζούνισμα. Επίσης, το κόστος τους είναι σχετικά υψηλό. Ένα παράδειγμα χρήσης οπτικών ινών σε κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα είναι η εύκαμπτη οθόνη, που ανέπτυξε η France Telecom, σε μερικά πρωτότυπα είδη ματισμού.

Τα μεταλλικά νήματα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικά αγωγίων υφασμάτων. Για πολλά χρόνια, η βιομηχανία κλωστοϋφαντουργίας ύφαινε μεταλλικά νήματα, όπως από φύλλο χρυσού και από ασήμι, για καθαρά διακοσμητικούς λόγους. Ένα παράδειγμα αποτελεί η μεταξωτή οργάντζα (silk organza), η οποία περιέχει δυο τύπους ινών, στη μία κατεύθυνση (στημόνι) αποτελείται από απλό νήμα μεταξιού και στην άλλη κατεύθυνση (υφάδι) από νήμα μεταξιού περιβεβλημένο από λεπτό φύλλο χαλκού (copper foil).

Το νήμα με το χάλκινο περιτύλιγμα, είναι ιδιαίτερα αγωγίμο, ελαστικό και επιπλέον διαθέτει αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, επιτρέποντας την επεξεργασία, π.χ. κέντημα, με βιομηχανικά μηχανήματα παραγωγής ενδυμάτων. Τα κυκλώματα που κατασκευάζονται από οργάντζα, πρέπει μόνο να προστατευτούν από την επαφή με τον εαυτό τους, για την αποφυγή βραχυκυκλώματος. Η προστασία επιτυγχάνεται εύκολα με την επικάλυψη ή την υποστήριξη του υφάσματος με ένα μονωτικό στρώμα, το οποίο μπορεί να είναι ακόμα και κάποιο άλλο ύφασμα.

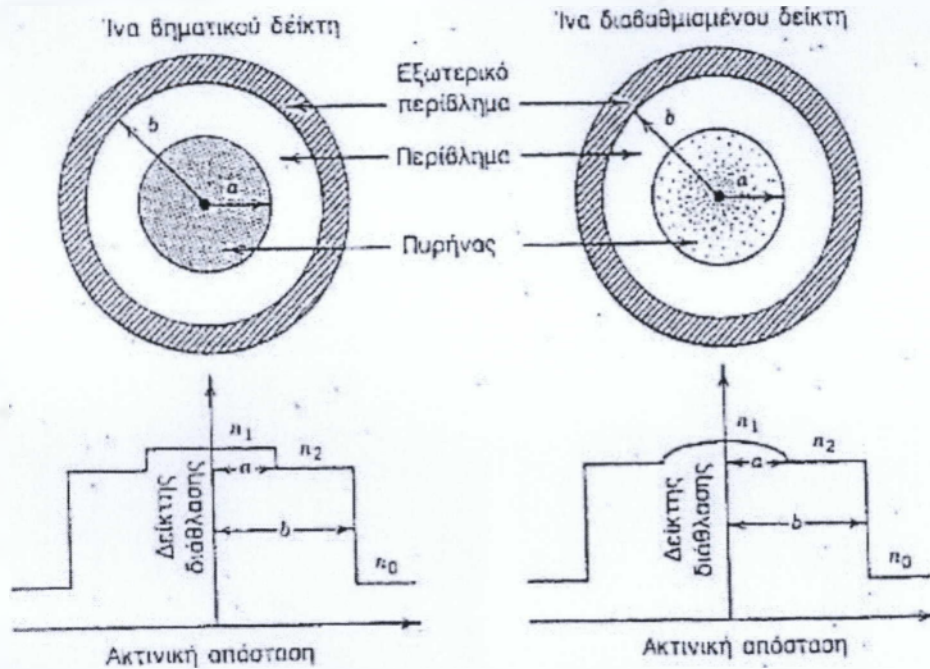
## 1.8 Είδη οπτικών ινών

### 1.8.1 Πολύτροπες οπτικές ίνες (Multimode fiber optics)

Ο τρόπος αναφοράς των μεγεθών για τις οπτικές ίνες είναι να αναφέρουμε πρώτα τη διάμετρο του πυρήνα (γυαλιού) και στη συνέχεια τη διάμετρο της επίστρωσης (cladding). Οι μετρήσεις των παραπάνω μεγεθών γίνονται σε  $10^{-6}$  μέτρα. Οι πολύτροπες οπτικές ίνες έχουν τυπικά μεγέθη 50μm/ 125μm, 62,5/125, 85/125 ή 100/140. Ο συνηθέστερος τύπος, ο οποίος κυκλοφορεί, είναι ο 62,5/125. Η ολική διάμετρος της οπτικής ίνας συμπεριλαμβανομένων των ενισχυτικών συνθετικών ινών και του εξωτερικού περιβλήματος φτάνει τα 900μm. Η αρχή μετάδοσης σε

## Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής

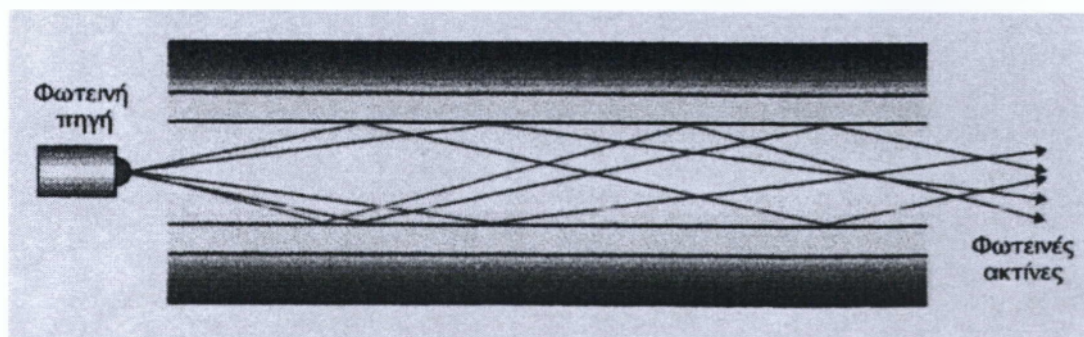
πολύτροπη οπτική ίνα είναι ότι οι διάφορες ακτίνες του οπτικού σήματος ανάλογα με την είσοδο τους στην οπτική ίνα ταξιδεύουν ανακλώμενες υπό διαφορετικές γωνίες, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1.6** και **Εικόνα 1.8**. Αυτός ο τρόπος μετάδοσης ονομάζεται πολύτροπος (multimode), επειδή έχουμε πολλούς δρόμους μετάδοσης, που αντιστοιχούν στις διαφορετικές γωνίες ανάκλασης. Οι πολύτροπες οπτικές ίνες διακρίνονται σε δυο κατηγορίες: τις διακριτού βήματος (step index) και τις βαθμιαίου βήματος (graded index).



**Εικόνα 1.5:** Τομή και προφίλ του δείκτη διάθλασης μίας ίνας βηματικού και διαβαθμισμένου δείκτη

### Οπτική ίνα διακριτού δείκτη (step index)

Στις ίνες αυτές συμβαίνει απότομη μεταβολή του δείκτη διάθλασης μεταξύ της κεντρικής ίνας και του υλικού επίστρωσης. Στην περίπτωση αυτή, η πορεία των ακτινών εμφανίζεται στην **Εικόνα 1.6**.



**Εικόνα 1.6:** Οπτική ίνα διακριτού δείκτη



Πιο συγκεκριμένα. Θεωρούμε την γεωμετρία της **Εικόνας 1.6** όπου μία ακτίνα δημιουργεί γωνία  $\theta_i$  με τον άξονα της ίνας που συμπίπτει με το κέντρο του πυρήνα. Εξαιτίας της διάθλασης στη επαφή ίνας-αέρα, η ακτίνα κάμπτεται προς τη κάθετο. Η γωνία  $\theta_r$  της διαθλωμένης ακτίνας δίνεται από την σχέση:

$$n_0 \sin \theta_i = n_1 \sin \theta_r, \quad \{1.1\}$$

Όπου  $n_1$  και  $n_0$  είναι οι δείκτες διάθλασης του πυρήνα της ίνας και του αέρα, αντίστοιχα. Η ακτίνα αυτοδιάθλασης προσκρούει στην επαφή του πυρήνα περιβλήματος και διαθλάται εκ νέου. Ωστόσο, η διάθλαση είναι δυνατή μόνο για μια γωνία πρόσπτωσης  $\varphi$  τέτοια ώστε  $\sin \varphi < n_2/n_1$ . Για γωνίες μεγαλύτερες από μια κρίσιμη γωνία  $\varphi_c$ , που καθορίζεται από την σχέση:

$$\sin \varphi_c = n_2/n_1, \quad \{1.2\}$$

Όπου  $n_2$  είναι ο δείκτης διάθλασης του περιβλήματος, η ακτίνα υφίσταται ολική εσωτερική ανάκλαση στη επιφάνεια επαφής πυρήνα περιβλήματος. Από την στιγμή που τέτοιου είδους ανακλάσεις εμφανίζονται κατά μήκος ολόκληρης της ίνας, όλες οι ακτίνες με γωνία  $\varphi > \varphi_c$  περιορίζονται στον πυρήνα της ίνας. Αυτός είναι ο βασικός μηχανισμός πίσω από τον περιορισμό του φωτός μέσα στις οπτικές ίνες.

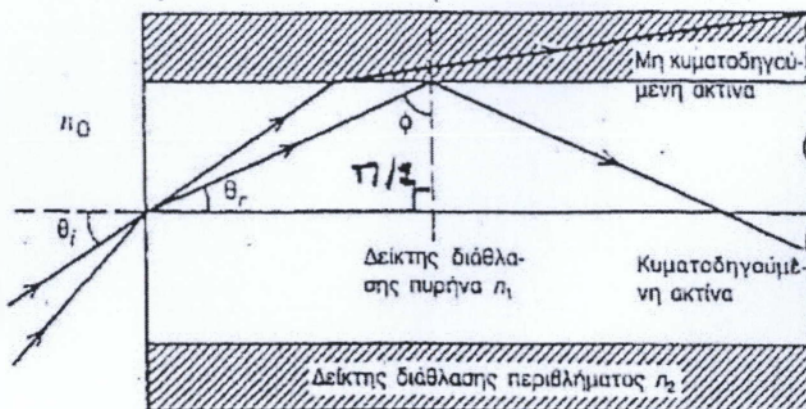
Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις εξισώσεις 1.1 και 1.2 για να βρούμε τη μέγιστη γωνία, που θα έπρεπε η προσπίπτουσα ακτίνα σχηματίζει με τον άξονα της ίνας, έτσι ώστε να περιοριστεί η ακτίνα μέσα στην ίνα. Έχοντας υπόψη ότι  $\theta_r = \pi/2 - \varphi_c$  για μία τέτοια ακτίνα και αντικαθιστώντας την στην εξίσωση 1.1 παίρνουμε

$$n_0 \sin \theta_i = n_1 \cos \varphi_c = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad \{1.3\}$$

Σε αναλογία με τους φακούς, η  $n_0 \sin \theta_i$  είναι γνωστή σαν αριθμητικό άνοιγμα (NA) της ίνας. Αντιπροσωπεύει την χωρητικότητα φωτός σε μία οπτική ίνα. Για  $n_1 \sim n_2$  μπορούμε να εκτιμήσουμε προσεγγιστικά το NA μέσω της σχέσης:

$$NA = n_1 (2\Delta)^{1/2}, \quad \Delta = (n_1 - n_2)/n_1, \quad \{1.4\}$$

Όπου  $\Delta$  είναι η κλασματική μεταβολή του δείκτη διάθλασης στην επαφή επιφάνειας πυρήνα περιβλήματος. Είναι ευνόητο ότι η  $\Delta$  θα πρέπει να γίνει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη για να συζεύξουμε την μεγαλύτερη δυνατή ποσότητα φωτός στην ίνα. Ωστόσο αυτές οι ίνες δεν χρησιμεύουν στις οπτικές επικοινωνίες εξαιτίας ενός φαινομένου γνωστού σαν διασπορά πολλαπλών διαδρομών, που ονομάζεται διατροπική διασπορά.

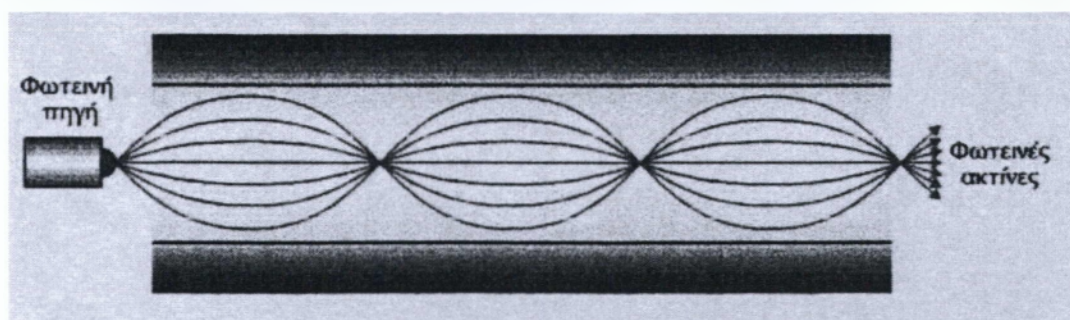


**Εικόνα 1.7:** Ο περιορισμός του φωτός μέσω της ολικής εσωτερικής ανάκλασης στις ίνες βηματικού δείκτη. Ακτίνες με  $\phi < \phi_c$  διαθλώνται εκτός πυρήνα.

Μπορούμε να κατανοήσουμε την διασπορά πολλαπλών διαδρομών αν ανατρέξουμε στην **Εικόνα 1.7**, όπου διαφορετικές ακτίνες μετακινούνται σε διαδρομές διαφορετικού μήκους. Σαν αποτέλεσμα οι ακτίνες αυτές κάποια στιγμή θα διασκορπιστούν στη έξοδο της ίνας. Ένας σύντομος παλμός (κρουστικός παλμός) θα διευρυνθεί σημαντικά λόγω των διαφορετικών μήκων διαδρομής.

### Οπτική ίνα βαθμιαίου δείκτη (graded index)

Οι ίνες αυτές χαρακτηρίζονται από βαθμιαία μεταβολή του δείκτη διάθλασης του υλικού της κεντρικής ίνας. Συμβαίνει βαθμιαία μείωση όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο προς την εξωτερική επιφάνεια του γυαλιού. Η πορεία των ακτινών σε μια τέτοια ίνα είναι αυτή, που φαίνεται στην **Εικόνα 1.8**.

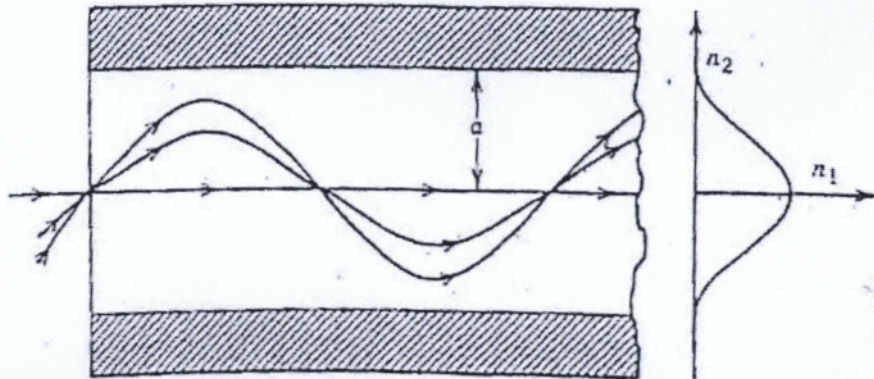


**Εικόνα 1.8:** Οπτική ίνα βαθμιαίου δείκτη

Πιο συγκεκριμένα, Ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα στις ίνες διαβαθμισμένου δείκτη δεν είναι σταθερός, αλλά μειώνεται σταδιακά από τη μέγιστη τιμή του  $n_1$  στην επαφή του πυρήνα περιβλήματος. Οι περισσότερες ίνες διαβαθμισμένου δείκτη έχουν σχεδιαστεί ώστε να έχουν σχεδόν τετραγωνική μείωση και αναλύονται το προφίλ  $n$  που δίνεται από την σχέση:

$$n(\rho) = \begin{cases} n_1[1 - \Delta(\rho/\alpha)^a] : \rho < \alpha. \\ n_1(1 - \Delta) = n_2 : \rho \geq \alpha, \end{cases} \quad (1.5)$$

Όπου  $\alpha$  είναι η ακτίνα του πυρήνα. Η παράμετρος  $a$  καθορίζει το προφίλ του βηματικού δείκτη προσεγγίζεται στο όριο μεγάλης τιμής  $a$ . Μία ίνα παραβολικού δείκτη αντιστοιχεί σε  $a=2$ .



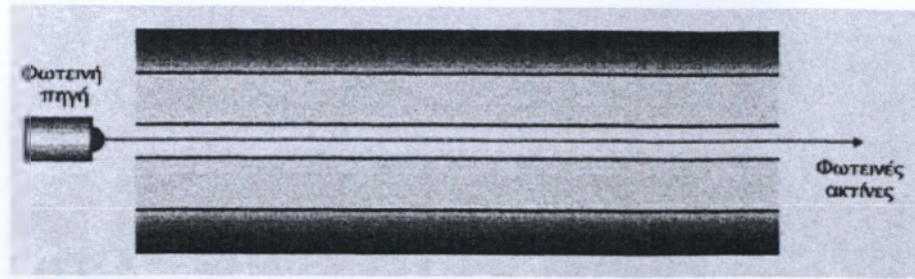
**Εικόνα 1.9:** οι τροχιές ακτινών σε ίνα διαβαθμισμένου δείκτη.

Στην **Εικόνα 1.9** παρουσιάζονται σχηματικά οι διαδρομές για τρεις διαφορετικές ακτίνες. Όπως και στην περίπτωση των ιών βηματικού δείκτη, η διαδρομή είναι μεγαλύτερη τις πιο πλάγιες ακτίνες. Ωστόσο, η ταχύτητα της ακτίνας μεταβάλλεται εξαιτίας διακυμάνσεων του δείκτη διάθλασης. Η ακτίνα που μεταδίδεται κατά μήκος του άξονα της ίνας ακολουθεί την συντομότερη διαδρομή, αλλά ταξιδεύει πιο αργά, αφού ο δείκτης διάθλασης μεγιστοποιείται κατά μήκος της διαδρομής. Οι πλάγιες ακτίνες έχουν μεγάλο μέρος της διαδρομής τους σε μέσω χαμηλού δείκτη διάθλασης, όπου και ταξιδεύουν γρηγορότερα. Για αυτό είναι δυνατόν όλες οι ακτίνες να φτάσουν μαζί στην έξοδο της ίνας, με την κατάλληλη επιλογή του προφίλ του δείκτη διάθλασης.

Παρόλο που οι ίνες διαβαθμισμένου δείκτη σπάνια χρησιμοποιούνται για ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων, η χρήση πλαστικών οπτικών ιών διαβαθμισμένου δείκτη για εφαρμογές ζεύξης δεδομένων έχει προσελκύσει αρκετά την προσοχή κατά την δεκαετία του 1990.

### 1.8.2 Μονότροπες οπτικές ίνες (single mode fiber optics).

Στις μονότροπες οπτικές ίνες η διάμετρος της κεντρικής ίνας είναι πολύ μικρή και πλησιάζει περίπου το επίπεδο του μήκους κύματος του εκπεμπόμενου σήματος. Στην περίπτωση αυτή, έχουμε έναν μόνο δυνατό τρόπο μετάδοσης του οπτικού σήματος, τον αξονικό. Η πορεία των ακτινών σε μια τέτοια οπτική ίνα φαίνεται στην **Εικόνα 1.10**. Η κεντρική ίνα στις μονότροπες οπτικές ίνες έχει διάμετρο από 5μm έως 10μm με συνηθέστερη τιμή τα 8,3 μm.



**Εικόνα 1.10:** Μονότροπη οπτική ίνα

Το βασικό πλεονέκτημα των μονότροπων ινών είναι ότι δεν έχουν διασπορά λόγω εσωτερικών τρόπων μετάδοσης, απλώς επειδή η ενέργεια του εκπεμπόμενου παλμού μεταφέρεται μέσω ενός και μόνο τρόπου μετάδοσης. Ωστόσο η παλμική διεύρυνση δεν εξαφανίζεται τελείως. Η ταχύτητα ομάδας, που σχετίζεται με τον 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, φαινόμενο που ονομάζεται διασπορά ταχύτητας ομάδας, ενδοτροπική διασπορά ή απλώς διασπορά στην ίνα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΆΛΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

#### 2.1 Λειτουργία Οπτικών Ινών στα Οπτικά Δίκτυα

Η εποχή την οποία διανύουμε, έχει χαρακτηριστεί δικαίως από πολλούς ως η εποχή της πληροφορίας. Οι μορφές πληροφόρησης που κατακλύζουν εδώ και κοντά έναν αιώνα την ανθρωπότητα είναι πολλές και ποικίλες. Η τηλεφωνία, το ραδιόφωνο, η τηλεόραση, το Internet κ.α. είναι μερικές από τις δυνατότητες επικοινωνίας και μεταφοράς πληροφορίας που πλαισιώνουν την καθημερινή μας ζωή. Η ανάπτυξη νέων μορφών πληροφόρησης και η περαιτέρω βελτίωση των δυνατοτήτων των ήδη γνωστών μορφών καθίσταται στις μέρες μας ως επιτακτική ανάγκη καθώς είναι γεγονός ότι η τάση της ανθρωπότητας για συνεχή και γρήγορη πληροφόρηση αυξάνει σε καθημερινή βάση.

Χαρακτηριστική απόδειξη αυτής της ανάγκης είναι η ραγδαία εξάπλωση του Διαδικτύου που έχει εκπλήξει ακόμα και τους πιο αισιόδοξους αναλυτές. Πέρα όμως από την ραγδαία εξάπλωση η συνεχής αύξηση των χρηστών καθώς και του χρόνου χρήσης του Διαδικτύου αποτελούν τον βασικότερο λόγο για τις ραγδαίες αλλαγές, που συμβαίνουν στην βιομηχανία των τηλεπικοινωνιών, καθώς η ανάγκη αυτή συντελεί στη συνεχή ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και στην κατασκευή δικτύων με πολύ υψηλές ταχύτητες μετάδοσης. Οι σημαντικότεροι παράγοντες, που έχουν συντελέσει στη συνεχή αναζωογόνηση αυτής της ανάγκης, είναι:

- Η εκπληκτική ανάπτυξη του Διαδικτύου (Internet) και του Παγκόσμιου Ιστού (World Wide Web) αναφορικά με τον αριθμό των χρηστών, αλλά κυρίως με το χρόνο χρήσης και κατ' επέκταση το εύρος ζώνης που αντιστοιχεί σε καθένα από αυτούς.
- Η συνεχής βελτίωση της παροχής υπηρεσιών με ταυτόχρονη ανάπτυξη εφαρμογών ιδιαίτερα φιλικών προς τους χρήστες όλων των ηλικιών και ιδιαιτεροτήτων.
- Η εμφάνιση εφαρμογών πολυμέσων και επικοινωνιών με ξεχωριστά και πολλές φορές πρωτοποριακά χαρακτηριστικά που κυριολεκτικά δίνουν νέες διαστάσεις σε ήδη υπάρχοντες μορφές διασκέδασης και ψυχαγωγίας.
- Η δυνατότητα ανάπτυξης εφαρμογών εμπορίου αλλά και αξιόπιστων υπηρεσιών ενημέρωσης και εξυπηρέτησης των χρηστών με υψηλά επίπεδα ασφάλειας και λειτουργικότητας.
- Οι υποσχέσεις των εταιριών για συνεχή βελτίωση του Διαδικτύου τόσο ως προς την αύξηση των ταχυτήτων μετάδοσης όσο και προς τις παρεχόμενες υπηρεσίες και τα επίπεδα ασφάλειας.
- Η αυξανόμενη ανάπτυξη τεχνολογιών ευρυζωνικής πρόσβασης, όπως για παράδειγμα η ψηφιακή συνδρομητική γραμμή (Digital Subscriber Line-DSL) και τα καλωδιακά modem, τα οποία μπορούν να προσφέρουν εύρος ζώνης της τάξης των μερικών Mb/s ανά χρήστη.
- Η συνεχής δικτύωση επιχειρήσεων με γραμμές μεταφοράς πολύ υψηλών ταχυτήτων. Τα δίκτυα αυτά χρησιμοποιούνται ευρέως είτε για εσωτερική

αλληλοσύνδεση των διαφόρων τμημάτων της επιχείρησης, είτε για επικοινωνία διαφορετικών επιχειρήσεων μεταξύ τους.

- Η μείωση του κόστους παροχής εύρους ζώνης. Η μείωση αυτή είναι αποτέλεσμα αφενός της προόδου των τηλεπικοινωνιών, και αφετέρου της κατάργησης του μονοπωλίου μεμονωμένων παροχών υπηρεσιών (service providers), ως αποτέλεσμα της απελευθέρωσης του χώρου. Η εισροή πολλών ακόμα χρηστών, σύμφωνα με τις αναλύσεις, θα οδηγήσει σε ακόμα μεγαλύτερη μείωση του κόστους παροχής εύρους ζώνης.
- Οι αλλαγές στον τύπο της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, καθώς τα τελευταία χρόνια τα δίκτυα κατακλύζονται από πληροφορίες δεδομένων. Μεγάλες τηλεπικοινωνιακές εταιρίες, όπως η MCI WorldCom και η AT&T αναφέρουν ετήσια αύξηση στη μετάδοση δεδομένων 1000% και 300%, αντίστοιχα. Η αντίστοιχη αύξηση για τη μετάδοση φωνής είναι μόλις 10% ετησίως.

Η ανάγκη για όλο και μεγαλύτερη αύξηση των ταχυτήτων μετάδοσης, δηλαδή μεγαλύτερου εύρους συχνοτήτων, οδήγησε στην χρήση της οπτικής ίνας αντί του καλωδίου χαλκού. Η οπτική ίνα παρέχει σημαντικότερα πλεονεκτήματα σε σχέση με το απλό χάλκινο καλώδιο που χρησιμοποιείται εδώ και δεκαετίες στις ενσύρματες επικοινωνίες. Ορισμένα από αυτά τα πλεονεκτήματα αλλά και τα μειονεκτήματα είναι:

- Το τεράστιο εύρος ζώνης. Η οπτική ίνα παρέχει εύρος συχνοτήτων για μετάδοση περίπου ίσο με 25THz ή 25000GHz στην φασματική περιοχή του 1.5μm. Το εύρος αυτό είναι 1000 φορές μεγαλύτερο από ολόκληρο το διαθέσιμο φάσμα ραδιοσυχνοτήτων.
- Οι μικρές απώλειες κατά την διάδοση του σήματος. Η οπτική ίνα σε σχέση με το χάλκινο καλώδιο παρουσιάζει περιορισμένες απώλειες γεγονός που επιτρέπει την μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς να είναι αναγκαία η ενδιάμεση ενίσχυση του σήματος. Αλλά ακόμα και στην περίπτωση που απαιτείται ενίσχυση και αναγέννηση του σήματος δεδομένων η διαδικασία λαμβάνει χώρα σπανιότερα.
- Ακόμα η οπτική ίνα είναι πιο «ανθεκτική» όσον αφορά τον θόρυβο σε σύγκριση με το χάλκινο καλώδιο καθώς ο μανδύας της οπτικής ίνας λειτουργεί ταυτόχρονα και ως προστατευτικό ενώ το κυματοδηγούμενο οπτικό σήμα δεν επηρεάζεται (λόγω της φύσης του) από τις ποικίλες πηγές θορύβου.
- Τέλος στα πλεονεκτήματα συγκαταλέγονται και οι τεχνικές πολυπλεξίας που μπορούν να αυξήσουν σημαντικά την αποδοτικότητα της οπτικής ίνας επιτρέποντας την ταυτόχρονη μετάδοση πληροφορίας μέσω πολλών διαφορετικών καναλιών. Οι δύο τεχνικές πολυπλεξίας είναι η WDM (πολυπλεξία κατά μήκος κύματος) και OTDM (πολυπλεξία στο χρόνο).

Μειονεκτήματα που παρουσιάζουν οι οπτικές ίνες είναι οι παραμορφώσεις που μπορεί να υποστεί το μεταδιδόμενο οπτικό σήμα εξαιτίας φαινομένων διασποράς, μη γραμμικότητας και διπλοθλαστικότητας. Η επίδραση όμως αυτών των φαινομένων επιλύεται χρησιμοποιώντας συγκεκριμένη ίνα, για αντιστάθμιση της διασποράς, μειώνοντας την μεταδιδόμενη ισχύς, για τις μη γραμμικότητες και

φροντίζοντας να μην τσαλακωθεί η ίνα κατά την εγκατάσταση της, για την διπλοθλαστικότητα. Το εύρος ζώνης είναι αναμφισβήτητα ο βασικότερος λόγος εξάπλωσης της οπτικής ίνας παρόλα αυτά δεν μπορούμε να αμελήσουμε και τα υπόλοιπα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει σαν καλώδιο.

Το γεγονός όμως ότι η οπτική ίνα παρουσιάζει μεγάλο εύρος ζώνης και ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (υπάρχουν αυτή την στιγμή εμπορικά διαθέσιμα συστήματα που λειτουργούν στα 10Gbps και σε λίγο καιρό θα υπάρχουν και τα αντίστοιχα στα 40Gbps) δεν σημαίνει ότι εν τέλει μπορούμε να έχουμε πρακτικά τέτοιους ρυθμούς. Ο λόγος είναι ότι σε κάθε κόμβο το οπτικό σήμα πρέπει να μετατρέπεται σε ηλεκτρικό και να επεξεργάζεται καθώς δεν υπάρχει η δυνατότητα επεξεργασίας του στην οπτική μορφή. Αυτό προσθέτει σημαντική καθυστέρηση στην διαδικασία της μετάδοσης ενώ αν προσθέσουμε και το γεγονός ότι τα ηλεκτρονικά δεν μπορούν να δουλέψουν σε τόσο υψηλούς ρυθμούς οδηγούμαστε στην διαπίστωση ότι μένουν ανεκμετάλλευτες οι δυνατότητες που μας παρέχει η οπτική ίνα.

Για την αντιμετώπιση αυτού του σοβαρού προβλήματος η τεχνολογία προωθεί την δημιουργία και ανάπτυξη διατάξεων επεξεργασίας οπτικού σήματος σε ρυθμούς αντίστοιχους των ρυθμών μετάδοσης. Οι διατάξεις αυτές πρέπει να πραγματοποιούν όλες τις αναγκαίες ενέργειες που θα καθιστούν δυνατή την μετάδοση οπτικού σήματος χωρίς τη ενδιάμεση παρεμβολή ηλεκτρονικών. Οι διατάξεις αυτές θα παρέχουν δυνατότητες ενίσχυσης, αναγέννησης, μεταγωγής και επεξεργασίας του οπτικού σήματος. Απώτερος στόχος είναι η δημιουργία των αμιγώς οπτικών δικτύων, δηλαδή δικτύων όπου όλες οι λειτουργίες θα πραγματοποιούνται σε οπτικό επίπεδο εξασφαλίζοντας ταχύτητα και λειτουργικότητα. Αναφορικά ως προς αυτή κατεύθυνση έχει παρουσιαστεί μεγάλη εξέλιξη και τα δεδομένα είναι ενθαρρυντικά για το μέλλον.

Η εμφάνιση των φτηνών οπτικών ενισχυτών ίνας ερβίου που παρουσιάζουν ικανοποιητικό κέρδος σε ένα αρκετά μεγάλο φάσμα συχνοτήτων καθώς και η ύπαρξη πολυπλεκτών/αποπολυπλεκτών σε συνδυασμό με διατάξεις αναγέννησης, μετατροπής μήκους κύματος αλλά και των πρώτων οπτικών πυλών που βασίζονται σε συμβολόμετρα αποτελούν την καλύτερη παρακαταθήκη για το μέλλον της φωτονικής τεχνολογίας. Σήμερα η έρευνα επικεντρώνεται στην δημιουργία και βελτίωση εκείνων των επιμέρους διατάξεων που στο μέλλον θα είναι η βάση για την δημιουργία των πρώτων αμιγώς οπτικών δικτύων.

## 2.2 Γενικά για τα Οπτικά Δίκτυα Πρόσβασης

Αν και η καθιέρωση των οπτικών ινών (με το συναφή ενεργό και παθητικό εξοπλισμό) ξεκίνησε από το ζευκτικό δίκτυο (ή αλλιώς δίκτυο κορμού), τα τελευταία χρόνια η οπτοηλεκτρονική τεχνολογία έχει αρχίσει να εισχωρεί και στο συνδρομητικό μέρος του δικτύου. Στις περιπτώσεις αυτές τα συμβατικά (και περιορισμένων δυνατοτήτων) συνδρομητικά κυκλώματα υποκαθίστανται από τα λεγόμενα οπτικά δίκτυα πρόσβασης. Ένα οπτικό δίκτυο πρόσβασης μπορεί να θεωρηθεί ως η οπτοηλεκτρονική τηλεπικοινωνιακή υποδομή η οποία μεσολαβεί μεταξύ του χρήστη – συνδρομητή αφενός και του τηλεφωνικού δικτύου ή των δικτύων δεδομένων αφετέρου.

Το οπτικό δίκτυο πρόσβασης υποκαθιστά τα συμβατικά συνδρομητικά δίκτυα χαλκού και παρέχει μια ενοποιημένη υποδομή μέσω της οποίας ο χρήστης αποκτά

πρόσβαση σε όλες τις διαθέσιμες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες (τηλεφωνία ISD, υπηρεσίες δεδομένων). Υπό την έννοια αυτή ένα οπτικό δίκτυο πρόσβασης :

- Προς την πλευρά του συνδρομητή, πρέπει να διαθέτει όλες τις απαραίτητες διεπαφές για την παροχή των διαθέσιμων τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών (διεπαφές χρήστη – user interface). Οι υπηρεσίες αυτές είναι αρχικά οι ενσύρματα παρεχόμενες υπηρεσίες στενής ζώνης (narrow-band services) όπως οι επιλεγόμενες (dial-up) υπηρεσίες και συγκεκριμένα :
  - Η απλή τηλεφωνία και οι συναφείς τηλεφωνικές υπηρεσίες (καρτοτηλεφωνία)
  - Οι υπηρεσίες ISDN, τόσο η βασική πρόσβαση ( ISDN basic Rate Acces- ISDN- BRA) όσο και η πρωτεύουσα πρόσβαση ( ISDN Primary Rate Access-ISDN-PRA). Οι υπηρεσίες δεδομένων και συγκεκριμένα :
  - Υπηρεσίες δεδομένων που παρέχονται μέσω αναλογικών γραμμών (Analog Leased Lines-ALLs)
  - Οι υπηρεσίες Hellas Com (κυκλώματα 64-128 Kbit και Nx64 kIbts/s, N>3).
  - Οι υπηρεσίες Helas Pack (συνδέσεις μέσω επιλεγόμενων, φωνοσύχων ή βασικής ζώνης διαμορφωτών)

Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι ο χρήστης διατηρεί τον τερματικό του εξοπλισμό (τηλεφωνικές συσκευές, συσκευές ISDN- BRA και διάταξη NT1, διαμορφωτές παντός είδους)

- Προς την πλευρά του τηλεπικοινωνιακού δικτύου πρέπει να διαθέτει τις απαραίτητες διεπαφές δικτύου για τη σύνδεση με το τηλεφωνικό δίκτυο (παροχή επιλεγόμενων υπηρεσιών) και τα δίκτυα δεδομένων ( Hellas Com και Hellas Pack).
- Τέλος ένα οπτικό δίκτυο πρόσβασης πρέπει να διαθέτει διεπαφές για την επικοινωνία του με το δίκτυο διαχείρισης. Η διαχείριση να γίνεται τόσο τυπικά (με τη βοήθεια του φορητού υπολογιστή) όσο και κεντρικά. Λόγω της πληθώρας και ποικιλίας των διαθέσιμων τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών τα οπτικά δίκτυα πρόσβασης πρέπει να χαρακτηρίζονται από ευελιξία και επεκτασιμότητα.

### 2.3 Πέντε γενιές οπτικών συστημάτων

Η εμπορική ανάπτυξη των οπτικών συστημάτων επικοινωνίας ακολούθησε η έρευνα. Μετά από πολλές δοκιμές, η πρώτη γενιά οπτικών συστημάτων λειτουργούσε κοντά στα 0,8μm έγινε εμπορικά διαθέσιμη το 1980. Τα συστήματα αυτά λειτούργησαν σε ρυθμό bit 45 Mb/s και επέτρεψαν απόσταση μεταξύ επαναληπτών στα 10km περίπου.

Η μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ επαναληπτών συγκρινόμενη με εκείνη ενός ομοαξονικού συστήματος ήταν ένα σπουδαίο κίνητρο για σχεδιαστές συστημάτων. Έτσι μειώθηκε το κόστος εγκατάστασης που σχετίζεται με κάθε επαναληπτή.



Έγινε ξεκάθαρο κατά την διάρκεια του 1970, ότι η απόσταση μεταξύ επαναληπτών μπορούσε να αυξηθεί σημαντικά για λειτουργία των οπτικών συστημάτων με μήκη κύματος στην περιοχή του 1,3μm, όπου οι απώλειες των οπτικών ινών ήταν κάτω από 1db/Km. Επιπλέον οι οπτικές ίνες παρουσιάζουν ελάχιστη διασπορά σε αυτή την περιοχή μηκών κυμάτων. Αυτό το γεγονός οδήγησε σε μεγάλη προσπάθεια για την ανάπτυξη laser και ανιχνευτών από ημιαγωγούς InGaAsP που λειτουργούν κοντά στα 1,3μm.

Η δεύτερη γενιά συστημάτων επικοινωνίας με οπτικές ίνες εμφανίστηκε πριν το 1980, αλλά ο ρυθμός μετάδοσης των συστημάτων αυτών περιορίστηκε κάτω από 100Mb/s λόγω διασποράς σε πολύτροπες οπτικές ίνες. Αυτό ο περιορισμός ξεπεράστηκε με την χρήση μονότροπων οπτικών ινών. Το 1981 ένα εργαστηριακό πείραμα απέδειξε μετάδοση με ρυθμό 2Gb/s σε μονότροπη οπτική ίνα, ακολούθησε η εμπορική παραγωγή των συστημάτων αυτών. Από το 1987 έγινε και εμπορικά διαθέσιμη η δεύτερη γενιά των οπτικών συστημάτων στα 1,3μm, που λειτουργούσε με ρυθμούς μετάδοσης στα 1.7Gb/s με απόσταση μεταξύ επαναληπτών περίπου 50Km. Η απόσταση μεταξύ επαναληπτών των οπτικών συστημάτων δεύτερης γενιάς περιορίστηκε από τις απώλειες της οπτικής ίνας σε λειτουργία στα 1.3μm (0.5 dB/Km). Οι απώλειες στις γυάλινες οπτικές ίνες είναι ελάχιστες κοντά στα 1.55μm. Πράγματι το 1979 διαπιστώθηκαν απώλειες σε αυτή την περιοχή του φάσματος στα 0.2db/Km.

Όμως, η εισαγωγή οπτικών συστημάτων τρίτης γενιάς που λειτουργούσαν στα 1.55μm καθυστέρησε σημαντικά, από μεγάλες διασπορές της ίνας κοντά στα 1.55μm. Συμβατικά lasers ημιαγωγού InGaAsP δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν εξαιτίας του απλώματος του παλμού που συνέβαινε σαν αποτέλεσμα ταυτόχρονης ταλάντωσης πολλών διαμηκών τρόπων μετάδοσης. Το πρόβλημα της διασποράς μπορούσε να ξεπεραστεί είτε χρησιμοποιώντας ίνες με ολίσθηση στη διασπορά, σχεδιασμένες να έχουν ελάχιστη διασπορά κοντά στα 1.55μm ή περιορίζοντας το φάσμα του laser σε ένα απλό διαμήκη τρόπο ταλάντωσης. Και οι δύο προσεγγίσεις πραγματοποιήθηκαν την δεκαετία του 1980.

Η Τρίτη γενιά συστημάτων στα 1.55μm που λειτούργησε στα 2.5 Gb/s εμφανίστηκε στο εμπόριο το 1990. Τέτοια συστήματα είναι ικανά να λειτουργούν σε ρυθμούς bit μέχρι 10Gb/s. Η καλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας οπτικές ίνες με ολίσθηση στη διασπορά μαζί με laser διάμηκους τρόπου μετάδοσης. Ένα μειονέκτημα των συστημάτων τρίτης γενιάς στα 1.55μm είναι ότι το σήμα αναγεννάται περιοδικά με την χρήση ηλεκτρονικών επαναληπτών που απέχουν μεταξύ τους αποστάσεις τυπικά περίπου 60 έως 80Km. Η απόσταση μεταξύ επαναληπτών μπορεί να αυξηθεί χρησιμοποιώντας ομόδυνη ή ετερόδυνη τεχνική φώρασης, αφού η χρήση της βελτιώνει την ευαισθησία του δέκτη. Τέτοια συστήματα αναφέρονται σαν σύμφωνα συστήματα οπτικών επικοινωνιών. Τα σύμφωνα συστήματα ήταν υπό ανάπτυξη παγκοσμίως κατά την διάρκεια της δεκαετίας του 1980 και τα δυναμικά τους πλεονεκτήματα αποδείχθηκαν σε πολλά πειράματα συστημάτων. Όμως, η εμπορική εισαγωγή αυτών των συστημάτων είχε καθυστερήσει λόγω της εμφάνισης των ενισχυτών οπτικών ινών το 1989.

Η τέταρτη γενιά οπτικών συστημάτων χρησιμοποιεί ενίσχυση για αύξηση της απόστασης μεταξύ επαναληπτών και πολυπλεξία με διαίρεση του μήκους κύματος (WDM) για αύξηση του ρυθμού μετάδοσης bit. Σε τέτοια συστήματα οι απώλειες

των οπτικών ινών αντισταθμίζονται περιοδικά με την χρήση ενισχυτών οπτικών ινών με εμπλουτισμό με έρβιο, οι οποίοι τοποθετούνται σε αποστάσεις 60-100 Km. Τέτοιοι ενισχυτές αναπτύχθηκαν κατά την δεκαετία του 1980 και διατέθηκαν στο εμπόριο το 1990. Το χαρακτηριστικό γνώρισμα των οπτικών συστημάτων τέταρτης γενιάς είναι η αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος με την μετάδοση πολλών καναλιών μέσω της τεχνικής WDM. Οι οπτικοί ενισχυτές είναι ιδανικοί για πολυκαναλικά συστήματα οπτικών επικοινωνιών αφού όλα τα κανάλια μπορούν να ενισχυθούν ταυτόχρονα χωρίς να απαιτείται αποπολυπλεξία ξεχωριστών καναλιών.

Η Πέμπτη γενιά συστημάτων επικοινωνίας με οπτικές ίνες ασχολείται με την εύρεση μιας λύσης στο πρόβλημα της διασποράς των οπτικών ινών. Οι οπτικοί ενισχυτές λύνουν το πρόβλημα των απωλειών αλλά ταυτόχρονα κάνουν το πρόβλημα της διασποράς χειρότερο, αφού τα φαινόμενα της διασποράς συσσωρεύονται λόγω πολλαπλών σταδίων ενίσχυσης. Αρκετές τεχνικές αντιστάθμισης της διασποράς έχουν αναπτυχθεί.

Μια τελική λύση βασίζεται σε μια πρωτότυπη ιδέα των οπτικών σολιτονίων, οπτικών παλμών που συντηρούν το σχήμα τους κατά την διάρκεια της μετάδοσης σε μία οπτική ίνα με απώλειες αντισταθμίζοντας την επίδραση της διασποράς μέσω της μη γραμμικότητας της οπτικής ίνας. Παρόλο που η βασική ιδέα προτάθηκε από το 1973, μόνο το 1988 ένα εργαστηριακό πείραμα απέδειξε την δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων σε απόσταση πάνω από 4000Km αντισταθμίζοντας τις απώλειες της οπτικής ίνας λόγω της εξαναγκασμένης σκέδασης Raman. Για την ενίσχυση των σολιτονίων χρησιμοποιήθηκαν ενισχυτές οπτικών ινών εμπλουτισμένοι με έρβιο μετά το 1989. Από τότε πολλά πειράματα έχουν αποδείξει την προφανή δυναμική των συστημάτων επικοινωνίας με σολιτόνια. Από το 1994, σολιτόνια μεταδόθηκαν σε αποστάσεις πάνω από 24.000Km με ρυθμό 15Gb/s. Παρόλο που η τεχνολογία της επικοινωνίας με οπτικές ίνες καλύπτει μόνο δύο δεκαετίες έχει εξελιχθεί ραγδαία και έχει φτάσει σε ένα συγκεκριμένο στάδιο ωρίμανσης.

### 2.4 Οπτικά συστήματα WDM

Αν και τα οπτικά δίκτυα υιοθετήθηκαν αρχικά μόνο για τη μετάδοση των δεδομένων, πολύ γρήγορα διαπιστώθηκε ότι έχουν τις δυνατότητες για την υλοποίηση περισσότερων λειτουργικών διεργασιών. Μεταφέροντας ορισμένες από τις διεργασίες μεταγωγής και δρομολόγησης που επιτελούνταν από ηλεκτρονικά κυκλώματα απευθείας στο οπτικό επίπεδο, προκύπτουν ορισμένα πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς έτσι ορισμένες λειτουργίες γίνονται σε συντομότερο χρονικό διάστημα και ταυτόχρονα απαλλάσσονται τα ηλεκτρονικά κυκλώματα από την επεξεργασία όλου του όγκου δεδομένων. Η διαπίστωση αυτή οδήγησε στα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς, τα οποία έχουν ήδη αρχίσει να εγκαθίστανται σταδιακά. Στα δίκτυα αυτά είναι δυνατή και κυριαρχεί η χρήση της WDM πολυπλεξίας.

Ο συνδυασμός μεταγωγής κυκλώματος και πολυπλεξίας WDM, βρίσκει σημαντική εφαρμογή στα μεγάλης έκτασης δίκτυα ευρείας περιοχής (WDM-WANs), τα οποία είναι γνωστά και ως οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς. Με βάση τα προαναφερθέντα

χαρακτηριστικά της πολυπλεξίας WDM, αλλά και τα χαρακτηριστικά της μεταγωγής κυκλώματος, προκύπτει αναμφισβήτητα το συμπέρασμα, ότι τα δίκτυα αυτά παρέχουν τη δυνατότητα για ευζωνικές συνδέσεις υψηλής ταχύτητας δεδομένων και μεγάλης χρονικής διάρκειας, καθώς και τη δυνατότητα για αποδοτική διαχείριση ενός τεράστιου όγκου δεδομένων απευθείας στο οπτικό επίπεδο.

Οι αυξημένες λειτουργικές δυνατότητες των δικτύων αυτών, οφείλονται στη χρήση των οπτικών πολυπλεξιών προσθήκης/αφαίρεσης δεδομένων (OADMs) και των οπτικών στοιχείων διασύνδεσης (OXCs). Τα στοιχεία αυτά τοποθετούνται σε ενδιάμεσα σημεία της ζεύξης και ο βασικός τους ρόλος είναι η δρομολόγηση των εισερχόμενων WDM καναλιών. Οι OADMs επιλεκτικά «αφαιρούν» ορισμένα κανάλια από τη ζεύξη και επιτρέπουν τη διέλευση των υπολοίπων καναλιών, ενώ ταυτόχρονα μπορούν να «προσθέτουν» νέα κανάλια στη ζεύξη στη θέση αυτών που «αφαιρέθηκαν».

Ανάλογη λειτουργία επιτελούν και οι OXCs, αλλά με πολύ μεγαλύτερο αριθμό καναλιών. Για την υλοποίηση και των δύο μπορούν να χρησιμοποιηθούν 2x2 διακόπτες μεταγωγής ή οπτικοί ενισχυτές ημιαγωγού (Semiconductor Optical Amplifier-SOA), μικρό-ηλεκτρο-μηχανικοί διακόπτες (Micro-Electro-Mechanical Switches-MEMS) ή μετατροπείς μήκους κύματος (wavelength converters).

Με βάση την παραπάνω ανάλυση τα WDM οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς παρέχουν συνδέσεις μήκους κύματος μεταξύ των τερματικών, και για το λόγο αυτό αποκαλούνται και δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος (wavelength-routed networks). Κατά συνέπεια, οι συνδέσεις μεταξύ των τερματικών γραμμής είναι υψηλής χωρητικότητας και παρέχονται σε σταθερή βάση. Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό αυτής της αρχιτεκτονικής είναι η τεχνική μετατροπής μήκους κύματος (wavelength conversion): Η διαδικασία αυτή συνίσταται στην αντιγραφή των δεδομένων ενός μήκους κύματος, έστω  $\lambda_1$ , σε ένα νέο, έστω  $\lambda_2$ , και τη μετάδοση του νέου μήκους κύματος μέσα από το δίκτυο.

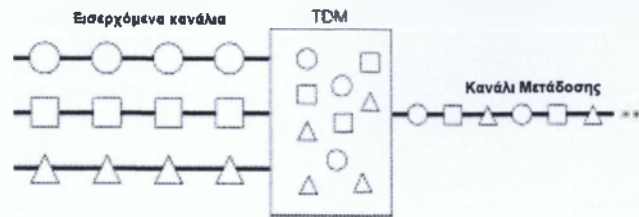
Η μετατροπή μήκους κύματος επιτρέπει την αποδοτικότερη εκμετάλλευση των διαθέσιμων μηκών κύματος στο δίκτυο. Τα βασικότερα οπτικά στοιχεία, που χρησιμοποιούνται ως μετατροπείς μήκους κύματος, είναι οι οπτικοί ημιαγωγάμοι ενισχυτές (SOAs) και οι οπτικές συμβολομετρικές πύλες. Παρόλα αυτά, τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς δεν παρέχουν τη δυνατότητα για χειρισμό οντοτήτων δεδομένων μικρού μεγέθους (granularity), αφού επιτελούν μεταγωγή κυκλώματος. Ταυτόχρονα, η επέμβαση στη μεταδιδόμενη πληροφορία περιορίζεται, σε επίπεδο μήκους κύματος και ο χρόνος μεταγωγής της πληροφορίας (switching period) είναι της τάξης δεκάδων λεπτών.

Αποτέλεσμα είναι η δέσμευση ενός τεράστιου εύρους ζώνης σε μία σύνδεση να διατηρείται στατική για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα μετά την εδραίωση της σύνδεσης, ακόμα και αν αυτή είναι ανενεργή. Κατά συνέπεια, τα δίκτυα αυτά δεν είναι σε θέση να παρέχουν εύρος ζώνης κατ' απαίτηση και είναι πλήρως αδύνατη η εξυπηρέτηση εκρηκτικών ροών δεδομένων

### 2.4.1 DWDM - Dense Wavelength Division Multiplexing

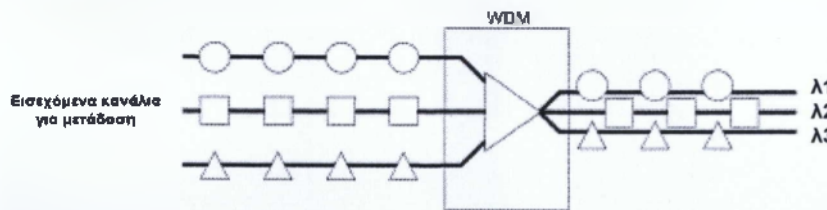
Η Πυκνή Πολυπλεξία Διαχωρισμού Μήκους Κύματος (DWDM) είναι μια τεχνολογία οπτικών δικτύων η οποία χρησιμοποιείται για να αυξηθεί η χωρητικότητα του μέσου μεταφοράς των δεδομένων (οπτικές ίνες). Η DWDM λειτουργεί με εντελώς διαφορετικό τρόπο σε σχέση με την Πολυπλεξία

Διαχωρισμού Χρόνου (TDM – Time Division multiplexing). Η TDM χρησιμοποιεί ένα μήκος κύματος το οποίο διαχωρίζει σε διακριτές χρονοθυρίδες (time slots) ίσου μεγέθους τις οποίες χρησιμοποιεί για να μεταδώσει τα εισερχόμενα σήματα χρησιμοποιώντας κυκλική δειγματοληψία<sup>1</sup> (round – robin).



**Εικόνα 2.1:** Πολυπλεξία TDM.

Όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 2.1**, αν και δίκαια ως προς το τρόπο που μεταχειρίζεται τα προς μετάδοση σήματα, αυτή η μέθοδος πολυπλεξίας είναι αναποτελεσματική διότι η χρονοθυρίδες παραμένουν δεσμευμένες για τα συγκεκριμένα κανάλια ακόμα και αν δεν υπάρχουν δεδομένα προς μετάδοση. Η WDM αντίθετα διαμορφώνει τα εισερχόμενα οπτικά σήματα σε συγκεκριμένες συχνότητες φωτός (μήκη κύματος, ή λάμδα) μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων.



**Εικόνα 2.2:** Πολυπλεξία WDM.

Αυτός ο τρόπος μετάδοσης είναι όμοιος με τον τρόπο μετάδοσης ραδιοφωνικού σήματος με διαμόρφωση συχνότητας (FM), όπου κάθε κανάλι έχει τη δική του συχνότητα και μπορούμε λάβουμε το περιεχόμενό του συντονίζοντας το δέκτη στη συχνότητα αυτή. Αντί για τη λέξη «λάμδα» πολλές φορές χρησιμοποιείται η λέξη «χρώμα» για να περιγράψει τα διακριτά κανάλια ενός WDM διαμορφωμένου σήματος, αφού διαφορετικά μήκη κύματος του φωτός αντιστοιχούν σε διαφορετικά χρώματα.

Σε ένα WDM σύστημα, κάθε ένα από τα μήκη κύματος προωθείται στην ίνα, και τα σήματα αποπολυπλέκονται στο λαμβάνον άκρο. Όπως στο TDM, η προκύπτουσα χωρητικότητα είναι ένα σύνολο των εισερχόμενων σημάτων, αλλά το WDM μεταφέρει κάθε εισερχόμενο σήμα ανεξάρτητα από τα άλλα. Αυτό σημαίνει ότι κάθε κανάλι έχει το δικό του αφιερωμένο εύρος ζώνης και όλα τα

<sup>1</sup> **Δειγματοληψία:** (αγγλ.: sampling) είναι η μετατροπή ενός συνεχούς σήματος σε διακριτό. Ένα συνηθισμένο παράδειγμα δειγματοληψίας είναι η μετατροπή ενός ηχητικού σήματος (συνεχές σήμα) σε μια σειρά από δείγματα (που ονομάζεται σήμα διακριτού χρόνου).

σήματα φθάνουν συγχρόνως αντί να διαχωρίζονται και να μεταφέρονται σε χρονοθυρίδες.

Η διαφορά μεταξύ του WDM και του DWDM είναι απλώς διαφορά μεγέθους. Το DWDM τοποθετεί τα μήκη κύματος πιο κοντά μεταξύ τους από το WDM, και επομένως έχει μεγαλύτερη συνολική χωρητικότητα. Τα όρια αυτού του διαστήματος δεν είναι ακριβώς γνωστά, και πιθανώς δεν έχουν επιτευχθεί, αν και από το μέσο του έτους 2000 είναι διαθέσιμα συστήματα με μια ικανότητα μεταφοράς 128 λάμδα σε μια ίνα.

Το DWDM έχει και διάφορα άλλα ξεχωριστά χαρακτηριστικά. Αυτά περιλαμβάνουν τη δυνατότητα ενίσχυσης όλων των μηκών κύματος αμέσως χωρίς να μεσολαβήσει η μετατροπή τους σε ηλεκτρικά σήματα, και τη δυνατότητα μεταφοράς σημάτων διαφορετικών ταχυτήτων και ειδους διαφανώς πάνω από μία ίνα (ανεξαρτησία στο είδος πρωτοκόλλου και στο ρυθμό μετάδοσης).

Τα οπτικά σήματα αποσβένονται καθώς ταξιδεύουν μέσω της ίνας και πρέπει να αναπαραχθούν περιοδικά στα δίκτυα κορμού. Στα οπτικά δίκτυα SONET/SDH που χρησιμοποιούνταν ευρέως πριν από την εισαγωγή του DWDM, κάθε ξεχωριστή ίνα που μεταφέρει ένα μοναδικό οπτικό σήμα - τυπικά στα 2.5 Gbps - απαιτεί έναν χωριστό αναγεννητή ηλεκτρικού σήματος κάθε 60 έως 100 χλμ. Η τεχνολογία που επιτρέπει την άμεση ενίσχυση ενός σήματος DWDM, είναι οι οπτικοί ενισχυτές. Οι οπτικοί ενισχυτές λειτουργούν σε μια συγκεκριμένη ζώνη του φάσματος συχνοτήτων και βελτιστοποιούνται για τη λειτουργία με τις υπάρχουσες ίνες, που καθιστά δυνατή την ενίσχυση των κυμάτων φωτός και με αυτόν τον τρόπο την αύξηση της διαδρομής τους χωρίς να είναι αναγκαία η μετατροπή τους ξανά σε ηλεκτρική μορφή.

Ένας μοναδικός οπτικός ενισχυτής μπορεί να ενισχύσει όλα τα κανάλια σε μια ίνα DWDM χωρίς να αποπολυπλέξει και να επεξεργαστεί το καθένα ξεχωριστά, με ένα κόστος που πλησιάζει αυτό ενός αναγεννητή. Ο οπτικός ενισχυτής ενισχύει μόνο τα σήματα - δεν τα αναδιαμορφώνει, επαναχρονίζει και δεν τα αναμεταδίδει όπως ένας αναγεννητής - έτσι τα σήματα μπορεί ακόμα να χρειάζονται περιοδική αναγέννηση. Όμως ανάλογα με το σχεδιασμό του δικτύου, τα σήματα μπορούν τώρα να διαβιβαστούν από 600 μέχρι χιλιάδες χιλιόμετρα χωρίς αναγέννηση. Οι οικονομίες κλίμακας που προκύπτουν από την μη ανάγκη για χρήση αναγεννητών είναι παραπάνω από προφανείς.

Έχουν γίνει επιδείξεις με ενισχυτές οπτικών-ινών εξαιρετικά ευρείας ζώνης που μπορούν να ενισχύσουν σήματα που μεταφέρουν πάνω από 100 κανάλια (ή μήκη κύματος) του φωτός. Ένα δίκτυο που χρησιμοποιεί έναν τέτοιο ενισχυτή θα μπορούσε εύκολα να χειριστεί ένα terabit πληροφορίας. Με αυτό το ρυθμό μετάδοσης, θα ήταν δυνατό να διαβιβαστούν τα σήματα των τηλεοπτικών καναλιών όλου του κόσμου ταυτόχρονα, ή περίπου μισό εκατομμύριο κινηματογραφικές ταινίες συγχρόνως.

Η σημασία του DWDM είναι τεράστια στο να δίνει την δυνατότητα στους πάροχους να παρέχουν όλο και περισσότερο εύρος ζώνης στους χρήστες. Το DWDM είναι κρίσιμο συστατικό των οπτικών δικτύων μιας και επιτρέπει μετάδοση video, πολυμέσων, δεδομένων και φωνής πάνω στην οπτική ίνα.

Φυσικά η έκρηξη στην ανάγκη των χρηστών για εύρος ζώνης, συνοδεύεται απαραίτητα κι από την αλλαγή των δικτύων των πάροχων. Μία έρευνα που διενεργήθηκε το 1995, έδειξε ότι 70-80% των δικτύων αποτελούνταν από ίνες. Σήμερα πολλοί πάροχοι υπηρεσιών διαδικτύου πλησιάζουν το 100%, σε πολλά σημεία του δικτύου τους. Εδώ παρουσιάζεται κι ένα ακόμα πρόβλημα, αυτό της

υλοποίησης πολλών διαφορετικών τεχνολογιών πάνω σ' ένα δίκτυο. Οι ανάγκες των χρηστών καθιστούν απαραίτητο στους πάροχους να έχουν διάφορες οικονομικές τεχνολογίες εξαπλωμένες σ' όλο τους το δίκτυο.

Η χρήση του DWDM επιτρέπει στους παροχείς υπηρεσιών να προσφέρουν e-mail, video και πολυμέσα που να μεταφέρονται σαν δεδομένα Internet Protocol (IP), με ασύγχρονο τρόπο μεταφοράς (ATM), καθώς και φωνή που να μεταφέρεται πάνω σε SONET/SDH. Παρόλο που αυτά τα formats (IP, ATM και SONET/SDH) προσφέρουν μοναδικές δυνατότητες διαχείρισης του εύρους ζώνης, μπορούν και οι τρεις να μεταφερθούν πάνω στο οπτικό στρώμα, χρησιμοποιώντας DWDM. Έτσι οι πάροχοι, έχουν την ευελιξία μέσω ενός δικτύου να απαντούν στις απαιτήσεις των χρηστών.

Αρχίζοντας με την τεχνολογία DWDM, οι πάροχοι υπηρεσιών διαδικτύου μπορούν να εγκαταστήσουν μια επεκτάσιμη υποδομή που τους επιτρέπει να προσθέσουν νέα συστήματα TDM για σχεδόν απεριόριστες δυνατότητες επέκτασης. Το DWDM δίνει επίσης την ευελιξία να αυξηθεί η χωρητικότητα σε οποιοδήποτε μέρος του δικτύου, κάτι που δεν προσφέρει καμία άλλη τεχνολογία. Έτσι οι πάροχοι μπορούν να αναγνωρίσουν συγκεκριμένες προβληματικές περιοχές που έχουν υπερφορτωθεί λόγω υψηλών αναγκών σε εύρος ζώνης.

Οι πάροχοι που ψάχνουν νέους και δημιουργικούς τρόπους κέρδους, ενώ παράλληλα να εξυπηρετούν και τις διαφορετικές ανάγκες των χρηστών τους, μπορούν επίσης να ωφεληθούν από την υποδομή του DWDM. Αυτό συμβαίνει γιατί μπορούν να διαχωρίσουν το δίκτυο τους, διατηρώντας διαφορετικά μήκη κύματος για διαφορετικούς χρήστες. Θα μπορούσαν για παράδειγμα να νοικιάσουν κάποια μήκη κύματος (αντί για ολόκληρη ίνα) σε πελάτες με υψηλές ανάγκες.

Η τεχνολογία DWDM είναι σχεδιασμένη για να δίνει την δυνατότητα στους πάροχους να ικανοποιούν τις ανάγκες των χρηστών τους για εύρος ζώνης. Αυτό σε συνδυασμό με το ότι είναι επεκτάσιμη, την καθιστούν ως τον καλύτερο τρόπο σχεδιασμού ενός δικτύου. Μάλιστα, οι συνεχείς εξελίξεις κι επεκτάσεις του δικτύου, ρίχνουν σημαντικά το αρχικό κόστος ενώ αναπτύσσουν και την υποδομή που θα τους υποστηρίξει μακροχρόνια.

Πολλοί αναλυτές έκριναν ότι το DWDM είναι η τέλεια επιλογή για δίκτυα με συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες εύρους ζώνης. Όμως για να ισχύει αυτό πρέπει να ισχύει μία συνθήκη: Το σύστημα DWDM πρέπει να έχει την δυνατότητα κλιμάκωσης. Για παράδειγμα, μπορεί ένα σύστημα με interface OC-48 και 8-16 κανάλια ανά ίνα να φαίνεται υπερβολικό σήμερα, αλλά μπορεί σε δύο χρόνια να κρίνεται απαραίτητο.

Κλείνοντας αυτή την ενότητα αναφέρουμε ότι τα οπτικά δίκτυα δίνουν την ραχοκοκαλιά για υποστήριξη των υπάρχουσών αλλά και των ανερχόμενων αναγκών για εύρος ζώνης. Η υποδομή που έχουν μας δίνει την δυνατότητα κάλυψης των σημερινών αλλά και των αυριανών μας αναγκών. Η ταυτόχρονη μεταφορά τεράστιας ποσότητας πληροφορίας αποτελεσματικά και οικονομικά, καθιστά τους πάροχους ικανούς για να ικανοποιήσουν ακόμα και τους πιο απαιτητικούς πελάτες.

### 2.4.2 CWDM – Coarse Wavelength Division Multiplexing

Η τραχύς πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (CWDM - Coarse Wavelength Division Multiplexing) είναι μια τεχνολογία μεταφοράς πολυπρωτοκόλλων, που

παρουσιάζει σημαντική ανάπτυξη στην αγορά λόγω των ιδιοτήτων χαμηλότερου κόστους και της απλότητας στον σχεδιασμό της.

Η CWDM τεχνολογία αντιπροσωπεύει μια τέλεια οικονομική τεχνολογία τόσο σε πρόσβαση όσο και στην αγορά δικτύων κορμού και ειδικά σε σχετικά μικρές αποστάσεις (έως 31 μίλια). Παραδίδει τα πολλαπλάσια μήκη κύματος μέσω μιας οπτικής ίνας σε ένα μέρος του κόστους και πολυπλοκότητας των συστημάτων DWDM. Ένας ακριβέστερος ορισμός του CWDM είναι "μια μορφή διαίρεσης και πολυπλεξίας μήκους κύματος που έχει ευρύτερα διαστήματα μεταξύ των μηκών κύματος από αυτά που χρησιμοποιούνται στο DWDM. Επίσης, αντίθετα από άλλες μορφές WDM, χρησιμοποιεί ένα πολύ ευρύτερο φωτονιακό φάσμα ζωνών από άλλα τέτοια συστήματα, τα οποία συχνά είναι περιορισμένα σε μια ή δύο ζώνες" (Μέχρι 18 μήκη κύματος μπορούν να σταλούν χρησιμοποιώντας μερικά σχέδια CWDM). Οι διαφορές μεταξύ CWDM και DWDM είναι στα εξής συστατικά:

- Οπτικό laser (πομπος)
- Οπτικός δέκτης
- Οπτικά φίλτρα πολύπλεξης και απόπλεξης
- Οπτικοί ενισχυτές μακρινής επέκτασης

Τυπικά το οπτικό laser που χρησιμοποιείται για μετάδοση ενός σήματος και ο αντίστοιχος δέκτης που χρησιμοποιείται για να λάβει το σήμα στο ίδιο μήκος κύματος που αυτό μεταδόθηκε, συνενώνονται σε ένα ενιαίο πομποδέκτη. Η πραγματική ποσότητα πληροφορίας που μεταδίδεται σε ένα μήκος κύματος αποφασίζεται από το bit rate του laser. Τα DWDM lasers, έχουν τυπικό bit rate μέχρι και 10Gbits/sec, ενώ τα CWDM lasers φτάνουν τα 2.5Gbits/sec. Η τιμή ενός DWDM πομποδέκτη είναι τυπικά 4 με 5 φορές μεγαλύτερη από ενός αντίστοιχου CWDM πομποδέκτη. Ακόμα, οι DWDM πομποδέκτες τείνουν να αυξάνουν τα λειτουργικά τους έξοδα, μιας και καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια, και αποβάλουν περισσότερη θερμότητα από τους CWDM.

Το τελευταίο κύριο συστατικό είναι ο add/drop πολυπλέκτης (OADM), που χρησιμοποιείται για να προσθέτει και να αφαιρεί μήκη κύματος σε ένα WDM δίκτυο. Για να μεταφέρει δεδομένα τα OADM, δέχεται ως είσοδο πολλά δεδομένα, μετατρέπει το κάθε κανάλι δεδομένων σε διαφορετικό μήκος κύματος, και το προσθέτει στο δίκτυο WDM. Όταν λαμβάνει δεδομένα, το OADM κάνει ακριβώς την αντίστροφη λειτουργία για να αποπλέξει τα μήκη κύματος στα αρχικά κανάλια δεδομένων.

Το κόστος ενός OADM σε DWDM είναι τυπικά 2 με 3 φορές μεγαλύτερο από το κόστος ενός μεγαλύτερου εύρους OADM σε CWDM. Αυτό συμβαίνει επειδή το περιβάλλον DWDM έχει ένα σημαντικά μικρότερο διάστημα μεταξύ μηκών κύματος (πχ 100GHz) από αυτό που χρησιμοποιείται στα συστήματα CWDM (2500 GHz). Πλησιέστερα μήκη κύματος, προκαλούν μεγαλύτερη θερμότητα. Έτσι η κατασκευή αυτών των μονάδων είναι ακριβότερη και πιο πολύπλοκη.

### 2.5 Αναλογικά και ψηφιακά σήματα

Σε κάθε τηλεπικοινωνιακό σύστημα, η πληροφορία που εκπέμπεται πρέπει να είναι διαθέσιμη σαν ηλεκτρικό σήμα, που μπορεί να πάρει αναλογική ή ψηφιακή μορφή. Στην αναλογική περίπτωση, το σήμα μεταβάλλεται συνέχεια με τον χρόνο. Αντιθέτως, το ψηφιακό σήμα παίρνει μόνο μερικές διακριτές τιμές. Στη δυαδική

αναπαράσταση ενός ψηφιακού σήματος είναι δυνατές μόνο δύο τιμές. Η απλούστερη περίπτωση ενός δυαδικού σήματος είναι εκείνη ενός ηλεκτρικού ρεύματος που είναι είτε ON είτε OFF. Αυτές οι δύο δυνατότητες ονομάζονται “bit 1” και “bit 0”. Κάθε bit διαρκεί ένα συγκεκριμένο χρόνο  $T_B$ , που είναι γνωστός σαν περίοδος του bit ή bit slot.

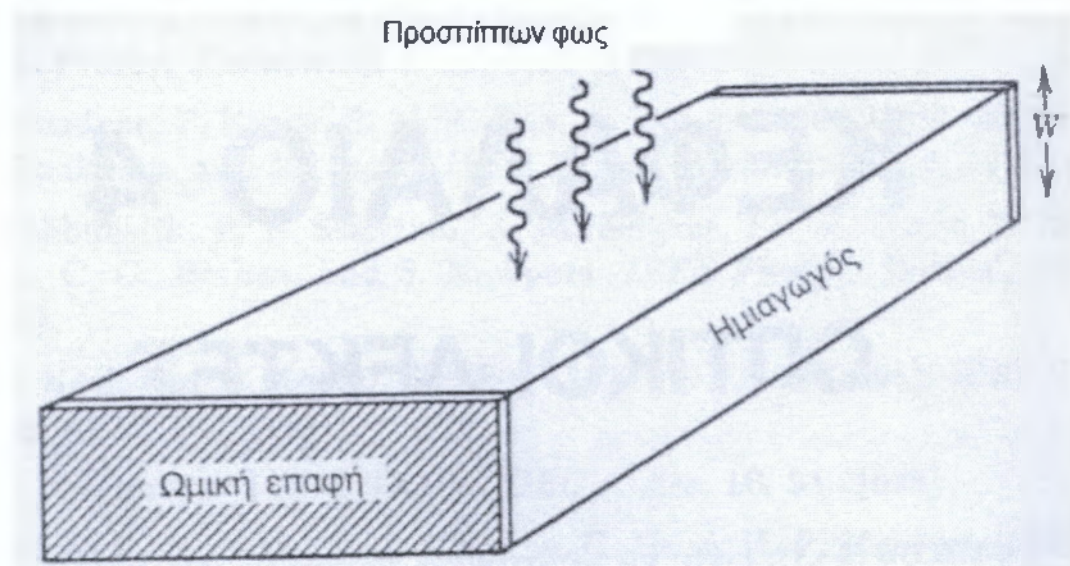
Αφού ένα bit πληροφορίας μεταφέρεται σε ένα χρόνο  $T_B$ , ο ρυθμός μετάδοσης bit  $B$ , που καθορίζεται σαν αριθμός των bit ανά δευτερόλεπτο, είναι απλά  $B = T_B^{-1}$ . Ένα πολύ γνωστό παράδειγμα ψηφιακών σημάτων είναι τα δεδομένα ηλεκτρονικού υπολογιστή. Κάθε γράμμα του αλφάβητου μαζί με άλλα κοινά σύμβολα προσδιορίζεται με ένα κωδικό αριθμό (κώδικας ASCII) στο διάστημα 0-127, του οποίου η δυαδική αναπαράσταση αντιστοιχεί σε ένα ψηφιακό σήμα των 7bit.

## 2.6 ΟΠΤΙΚΟΙ ΔΕΚΤΕΣ

### 2.6.1 Φωτοανίχνευση

Ο βασικός μηχανισμός της διαδικασίας φωτοανίχνευσης είναι η οπτική απορρόφηση.

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



**Εικόνα 2.3:** Φωτοαγωγίμος ενισχυτής

Το φωτόρρευμα  $I_p$  είναι ανάλογο προς την προσπίπτουσα οπτική ισχύ  $P_{in}$ , δηλαδή,



$$I_p = RP_{in} \quad \{2.1\}$$

όπου R είναι η αποκρισιμότητα του φωτοανιχνευτή (σε μονάδες A/W). Η αποκρισιμότητα R μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της βασικής ποσότητας η, που ονομάζεται κβαντική απόδοση και ορίζεται ως εξής

$$\eta = \frac{\text{ρυθμός δημιουργίας ηλεκτρονίων}}{\text{ρυθμός πρόσπτωσης φωτονίων}} = \frac{I_p/q}{P_{in}/h\nu} R \quad \{2.2\}$$

Επομένως η αποκρισιμότητα R δίνεται από τη σχέση:

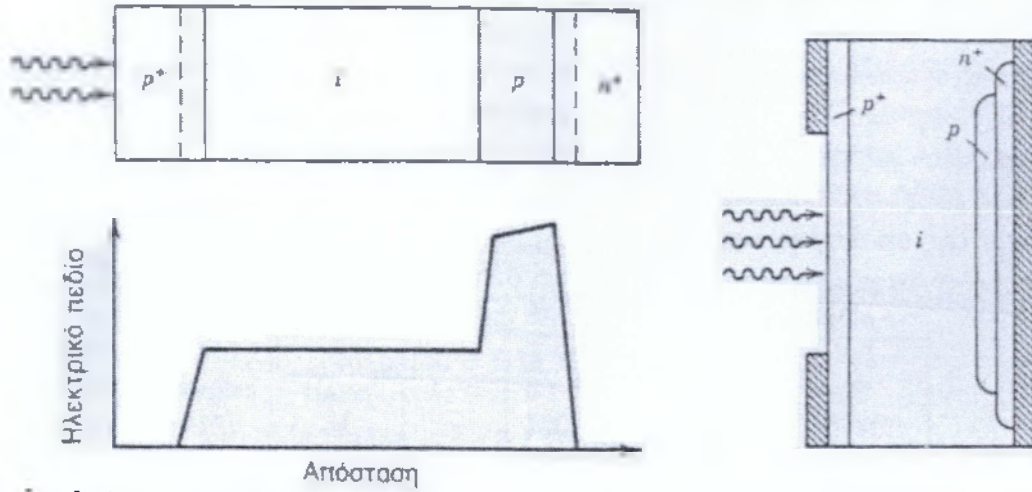
$$R = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta \lambda}{1,24} \quad \{2.3\}$$

Όπου το μήκος κύματος  $\lambda = c/\nu$  εκφράζεται σε μικρόμετρα.

### 2.6.2 Φωτοδίοδος χιονοστιβάδας APD

Οι APD έχουν πολύ μεγαλύτερες τιμές R, καθώς έχουν σχεδιαστεί να παρέχουν εσωτερική απολαβή ρεύματος όπως και στις λυχνίες με φωτοπολλαπλασιαστή. Χρησιμοποιούνται όταν η ποσότητα της οπτικής ισχύος, που φτάνει στο δέκτη είναι περιορισμένη. Το φυσικό φαινόμενο πίσω από την εσωτερική απολαβή ρεύματος είναι ο ιονισμός με κρούση. Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, ένα επιταχυνόμενο ηλεκτρόνιο μπορεί να απαιτήσει αρκετή ενέργεια, ώστε να δημιουργηθεί ένα νέο ζευγάρι ηλεκτρονίου-οπής. Το καθαρό αποτέλεσμα του ιονισμού με κρούση είναι ότι ένα μόνο αρχικό ηλεκτρόνιο, που δημιουργήθηκε μέσω της απορρόφησης ενός φωτονίου, δημιουργεί πολλά δευτερεύοντα ηλεκτρόνια και οπές, εκ των οποίων όλα συμβάλουν στο ρεύμα της φωτοδίοδου. Ο ρυθμός δημιουργίας των ζευγαριών αυτών διέπεται από δυο παραμέτρους, τις  $\alpha_e$  και  $\alpha_h$ , γνωστές και σαν συντελεστές ιονισμού με κρούση των ηλεκτρονίων και των οπών αντίστοιχα.

Η **Εικόνα 2.4** παρουσιάζει την δομή μιας APD μαζί με τη μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου μέσα σε διάφορα στρώματα. Κάτω από την ανάστροφη πόλωση, υπάρχει ένα υψηλό ηλεκτρικό πεδίο στο στρώμα τύπου-p που βρίσκεται μεταξύ των στρωμάτων τύπου-i και τύπου p+. Το στρώμα αυτό ονομάζεται στρώμα πολλαπλασιασμού, αφού δημιουργούνται εδώ δευτερογενή ζεύγη ηλεκτρονίου-οπής, μέσω ιονισμού με κρούση. Το στρώμα i λειτουργεί ακόμη σαν περιοχή αραίωσης, στην οποία τα περισσότερα από τα προσπίπτοντα φωτόνια απορροφώνται, ενώ παράλληλα δημιουργούνται αρχικά ζευγάρια ηλεκτρονίου-οπής.



**Εικόνα 2. 4:** Δομή μίας APD με μεταβολή ηλεκτρικού πεδίου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> ΟΠΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα οπτικά συστήματα χρησιμοποιούνται ευρύτατα στον τομέα των τηλεπικοινωνιών τα τελευταία χρόνια. Μάλιστα, λόγω των διαφόρων πλεονεκτημάτων τους, η χρήση τους μελλοντικά αναμένεται να διαδοθεί σε ακόμη σημαντικότερο βαθμό. Στα οπτικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα μεγάλων αποστάσεων, προκύπτουν προβλήματα εξαιτίας των απωλειών ισχύος και της διασποράς των εκπεμπόμενων παλμών. Μια

Οπτική ζεύξη, Όπως και κάθε άλλη ζεύξη, Σχεδιάζεται υπολογίζοντας ένα ισοζύγιο ισχύος. Εάν, Για οποιοδήποτε λόγο, Η ισχύς που καταλήγει στον δέκτη δεν είναι επαρκής, Τότε επιβάλλεται η ενίσχυση του σήματος με χρήση κατάλληλων αναμεταδοτών (repeaters). Σε Ένα συμβατικό αναμεταδότη το οπτικό σήμα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό, Αποκτά το σωστό χρονισμό και σχήμα παλμών, Ενισχύεται και εν συνεχεία μετατρέπεται και πάλι από ηλεκτρικό σε οπτικό. Η Διαδικασία αυτή είναι αποτελεσματική και έχει λογικό κόστος, Όταν εφαρμόζεται σε κανάλια χαμηλών ή μεσαίων ρυθμών μετάδοσης με τη χρήση ενός και μόνο μήκους κύματος για το σήμα πληροφορίας. Αντίθετα, Γίνεται ιδιαίτερα περίπλοκη και οικονομικά Ασύμφορη σε συστήματα με πολλά πολυπλεγμένα μήκη κύματος και υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Για Τη δεύτερη αυτή περίπτωση, Αποκτά σημαντικό ενδιαφέρον η χρήση του πλήρως οπτικού ενισχυτή που λειτουργεί αποκλειστικά στην οπτική συχνότητα και μπορεί να ενισχύσει οπτικά κανάλια στην περιοχή μηκών κύματος που χρησιμοποιούνται στις επικοινωνίες μακρινών αποστάσεων, Δηλαδή στις Περιοχές των 1.3 Και 1.55  $\mu\text{m}$ .

Το φαινόμενο της εξασθένησης θέτει άνω όρια στο μήκος της ίνας που μπορεί να καλύψει ένα σήμα χωρίς να υποστεί αλλοιώσεις προτού χρειαστεί να αναγεννηθεί. Πριν ανακαλυφθούν οι οπτικοί ενισχυτές, χρησιμοποιούνταν επαναλήπτες – repeaters για να αναγεννήσουν τα σήματα με ηλεκτρονικά μέσα προκειμένου να αντισταθμίσουν τις απώλειες που προκαλούσαν οι οπτικές συσκευές της γραμμής μετάδοσης. Οι ηλεκτρονικοί αναγεννητές – repeaters έχουν δύο βασικά μειονεκτήματα: έχουν μεγάλο κόστος και εισάγουν περιορισμούς στην απόδοση του συστήματος αφού ένας αναγεννητής μπορεί να λειτουργήσει μόνο σε έναν προκαθορισμένο ρυθμό. Τα δύο βασικά είδη οπτικών ενισχυτών είναι οι SOA – semiconductor optical amplifier και οι FOA – fiber optical amplifier. Οι SOA είναι οπτικοί ενισχυτές όπου κατά βάση χρησιμοποιούν κατά βάση ένα ημιαγωγό Laser ως ενεργό μέσον. Στην ουσία οι SOA είναι μια δίοδος λέιζερ χωρίς ή με πολύ χαμηλή οπτική ανάδραση. Ένας FOA από την άλλη είναι ένα κομμάτι εμπλουτισμένης ίνας με κατάλληλο υλικό η οποία κολλάτε – spiced fiber σε σειρά με την ίνα γραμμής ενισχύοντας το οπτικό σήμα. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν οι ενισχυτές EDFA τους οποίους θα μελετήσουμε πιο κάτω. Οι οπτικοί ενισχυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με την λειτουργία που έχουν να

επιτελέσουν. Ένας οπτικός ενισχυτής μπορεί να ενισχύσει ένα οπτικό σήμα στην αρχή της ίνας γραμμής – booster ή post amplifier σε απόσταση αρκετά μακριά από τον μεταδότη – line amplifier και λίγο πριν την έξοδο του οπτικού σήματος από την ίνα γραμμής – pre amplifier.

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

Ο pre amplifier ουσιαστικά καλείται να ενισχύσει ένα οπτικό σήμα με χαμηλή ισχύς και θα πρέπει να παρουσιάζει υψηλό κέρδος – high gain χαμηλά επίπεδα θορύβου – low noise και υψηλή ευαισθησία – high sensitivity.

### 3.2 Χαρακτηριστικά

Ο οπτικός ενισχυτής ενισχύει το προσπίπτον φως με τον ίδιο μηχανισμό που χρησιμοποιήθηκε από τα laser, δηλαδή μέσω της εξαναγκασμένης μετάδοσης. Είναι σημαντικό καθώς δεν χρειάζεται η μετατροπή του σήματος σε ηλεκτρικό πεδίο και αντίθετα. Το εύρος ζώνης των οπτικών ενισχυτών είναι τουλάχιστον τρεις τάξεις μεγαλύτερο από εκείνο ενός ηλεκτρονικού ενισχυτή.

Κύριο συστατικό του είναι η οπτική απολαβή που πραγματοποιείται όταν ο ενισχυτής υφίσταται άντληση.

Οι οπτικοί ενισχυτές χρησιμοποιούνται σαν ενισχυτές ισχύος, με αυτό τον τρόπο έχουν μεγάλη απολαβή και μικρές εσωτερικές απώλειες. Ιδιαίτερα οι ενισχυτές με ίνα παρουσιάζουν μικρή εξάρτηση από την πόλωση του σήματος εισόδου, μεγάλη ισχύς κορεσμού και μικρή διαφωνία μεταξύ των καναλιών. Σημαντικά προβλήματα όμως ενός οπτικού ενισχυτή είναι ο κορεσμός της απολαβής τους σε συνθήκες παλμικής λειτουργίας σε μεγάλες αποστάσεις, η διακύμανση του κέρδους και η απαίτηση μεγάλου εύρους ζώνης για δίκτυα WDM.

### 3.3 Απολαβή- Κόρος απολαβής

Η οπτική απολαβή, γενικά, εξαρτάται όχι μόνο από την συχνότητα (ή το μήκος κύματος) του προσπίπτοντος φωτός, αλλά και από την ένταση της τοπικής δέσμης σε οποιοδήποτε σημείο στο εσωτερικό του ενισχυτή. Λεπτομέρειες της εξάρτησης από την συχνότητα και την ένταση της οπτικής απολαβής εξαρτώνται από το μέσο του ενισχυτή. Στην περίπτωση όπου το μέσο απολαβής μοντελοποιείται σαν ένα ομοιογενώς διευρυμένο σύστημα δύο σταθμών τότε ο συντελεστής απολαβής μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1 + (\omega - \omega_0)^2 T_2^2 + P/P_S} \quad \{3.1\}$$

Όπου  $g_0$  είναι η μέγιστη τιμή της απολαβής,  $\omega$  η οπτική συχνότητα του προσπίπτοντος σήματος,  $\omega_0$  η ατομική συχνότητα μετάβασης και  $P$  η οπτική ισχύς του σήματος που ενισχύεται. Η ισχύς κόρου  $P_S$  εξαρτάται από τις παραμέτρους όπως ο χρόνος φθορισμού  $T_1$ <sup>2</sup> και η ενεργός διατομή της μετάβασης. Η παράμετρος  $T_2$  είναι γνωστή και σαν χρόνος διπολικής χαλάρωσης.

Η προέλευση του κόρου απολαβής βρίσκεται στην εξάρτηση της  $g(\omega)$  από την ισχύ. Αφού η απολαβή  $g$  μειώνεται όταν η  $P$  γίνεται συγκρίσιμη με την  $P_S$ , ο συντελεστής ενίσχυσης  $G$  μειώνεται με κάθε αύξηση της ισχύος του σήματος. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *κόρος απολαβής*.

### 3.4 Θόρυβος Ενισχυτή

Στον οπτικό ενισχυτή η κύρια πηγή θορύβου είναι η ενισχυμένη αυθόρμητη εκπομπή Amplified Spontaneous Emission, ASE. Ένα μοντέλο θορύβου αυθόρμητης εκπομπής μπορεί να κατασκευαστεί, θεωρώντας μια ροή από τυχαίες αφίξεις, που καθεμία ισοδυναμεί με ένα απείρως βραχύ παλμό, έτσι ώστε το φάσμα ισχύος του θορύβου στο σημείο παραγωγής μέσα στον ενισχυτή να είναι ομοιόμορφα κατανομημένο συναρτήσει της συχνότητας.

Όλοι οι ενισχυτές υποβαθμίζουν τον λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) του ενισχυμένου σήματος λόγω της αυθόρμητης μετάδοσης που προσθέτει θόρυβο στο σήμα, κατά την διάρκεια της ενίσχυσης. Η υποβάθμιση του SNR δίνεται ποσοτικά μέσω της παραμέτρου  $F_n$ , που ονομάζεται δείκτης θορύβου του ενισχυτή σε αναλογία με τους ηλεκτρονικούς ενισχυτές και ορίζεται ως εξής:

$$F_n = \frac{(SNR)_{in}}{(SNR)_{out}} \quad \{3.2\}$$

Όπου το SNR αναφέρεται στην ηλεκτρική ισχύ που υποβαθμίζεται όταν το οπτικό σήμα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό ρεύμα. Γενικά η  $F_n$  εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους του ανιχνευτή που διέπουν τον θερμικό θόρυβο, που σχετίζεται με τον ανιχνευτή. Η επίδραση της αυθόρμητης εκπομπής είναι η πρόσθεση διακυμάνσεων στην ενισχυμένη ισχύ, οι οποίες μετατρέπονται σε διακυμάνσεις ρεύματος κατά την διαδικασία φωτοανίχνευσης. Η βασική συνεισφορά στο θόρυβο του δέκτη προέρχεται από τον παλμικό κτύπο αυθόρμητης εκπομπής με το σήμα. Αυτό το φαινόμενο του παλμικού κτύπου μοιάζει με την ετερόδونه ανίχνευση από την άποψη ότι η αυθόρμητα εκπεμπόμενη ακτινοβολία αναμειγνύεται με το ενισχυμένο σήμα στο φωτοανιχνευτή και παράγει μια ετερόδونه συνιστώσα του φωτορεύματος.

<sup>2</sup> Ο χρόνος φθορισμού  $T_1$ , ονομάζεται επίσης και χρόνος πληθυσμιακής χαλάρωσης, μεταβάλλεται μεταξύ 100ps και 10ms, ανάλογα με το μέσο απολαβής.

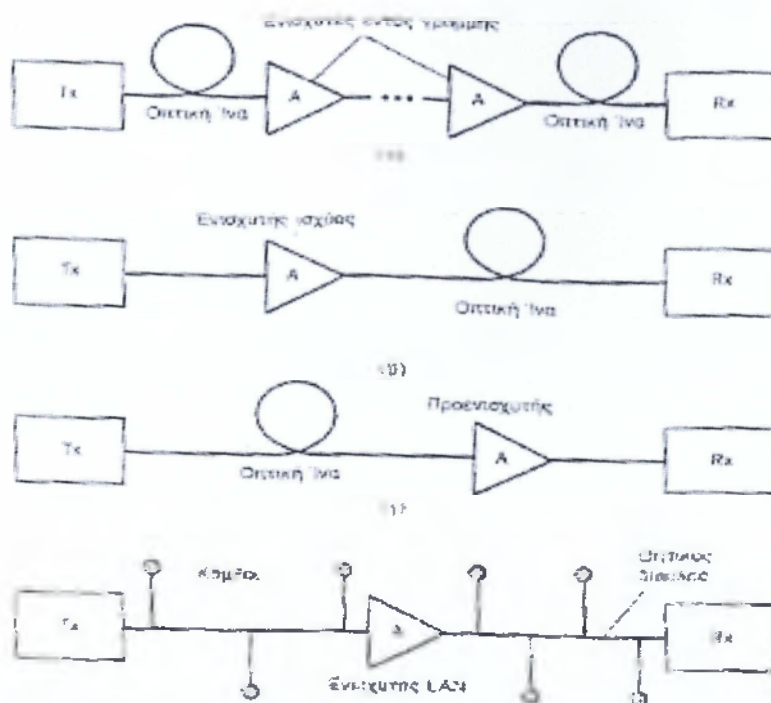
### 3.5 Εφαρμογές και Πλεονεκτήματα Ενισχυτών

Οι οπτικοί ενισχυτές μπορούν να εξυπηρετήσουν σημαντικούς σκοπούς στη σχεδίαση των οπτικών ινών. Μια σημαντική εφαρμογή για συστήματα μεγάλων αποστάσεων είναι η χρήση ενισχυτών σαν ενισχυτές εντός γραμμής, που αντικαθιστούν τους ηλεκτρονικούς αναμεταδότες. Μια τέτοια αντικατάσταση μπορεί να διεξαχθεί αρκεί να μην περιορίζεται η απόδοση του συστήματος από τις συνολικές επιδράσεις της διασποράς και της μη γραμμικότητας των οπτικών ινών καθώς και του θορύβου του ενισχυτή. Η χρήση των οπτικών ενισχυτών είναι ιδιαίτερα ελκυστική για τα πολυκάναλα οπτικά συστήματα, αφού μπορούν να ενισχύουν όλα τα κανάλια ταυτόχρονα.

Ένας άλλος τρόπος χρήσης οπτικών ενισχυτών είναι να αυξήσουμε την ισχύ του πομπού τοποθετώντας έναν ενισχυτή ακριβώς μετά τον πομπό. Οι ενισχυτές αυτοί ονομάζονται ενισχυτές ισχύος, αφού ο κύριος σκοπός τους είναι να υποστηρίξουν την μεταδιδόμενη ισχύ. Ένας ενισχυτής ισχύος μπορεί να αυξήσει την απόσταση την απόσταση μετάδοσης κατά 1000Km ή και περισσότερο, ανάλογα με την απολαβή του ενισχυτή και την απώλεια των οπτικών ινών.

Η απόσταση μετάδοσης μπορεί επίσης να αυξηθεί αν τοποθετήσουμε έναν ενισχυτή ακριβώς πριν τον δέκτη για να υποστηρίξει την λαμβανόμενη ισχύ. Οι ενισχυτές αυτοί ονομάζονται οπτικοί προενισχυτές και συνήθως χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν την ευαισθησία του δέκτη. Μια άλλη εφαρμογή των οπτικών ενισχυτών είναι να τους χρησιμοποιούμε για αντιστάθμιση της απώλειας κατανομής στα τοπικά δίκτυα.

Οι οπτικοί ενισχυτές βρίσκουν εφαρμογές σε οπτικές ζεύξεις μακρινών αποστάσεων 'Σημείο προς σημείο', Καθώς και σε δίκτυα πολλαπλής πρόσβασης. Ακολουθούν Ορισμένες από τις πλέον συνηθισμένες εφαρμογές τους.



**Εικόνα 3.1:** Τέσσερις δυνατές εφαρμογές ενισχυτών στα οπτικά συστήματα: α) ενισχυτές εντός γραμμής, β) υποστηρικτικής της μεταδιδόμενης ισχύος, γ) προενισχυτής στο δέκτη και δ) για αντιστάθμιση της απώλειας κατανομής στα τοπικά δίκτυα.

## 3.6 Τύπο οπτικών ενισχυτών

Οι οπτικοί ενισχυτές κατατάσσονται σε δύο μεγάλες οικογένειες : στους οπτικούς ενισχυτές ημιαγωγού (semiconductor optical amplifiers, SOA) και στους ενισχυτές ντοπαρισμένης ίνας (doped fiber amplifiers, DFA).

Ο μηχανισμός ενίσχυσης είναι και για τους δύο τύπους ενισχυτών ο ίδιος (η εξαναγκασμένη εκπομπή φωτονίων\*, όπως θα δούμε λίγο αργότερα). Γενικά, η λειτουργία και η δομή ενός οπτικού ενισχυτή είναι σε γενικές γραμμές ανάλογη με αυτήν μιας οπτικής πηγής (laser διόδου), με μία όμως πολύ σημαντική διαφοροποίηση: σε έναν οπτικό ενισχυτή δεν υπάρχει ο μηχανισμός οπτικής ανάδρασης, ο οποίος όμως είναι απαραίτητος σε μία πηγή, αφού η τελευταία λειτουργεί σαν ταλαντωτής.

Στους οπτικούς ενισχυτές ημιαγωγού (SOA) χρησιμοποιούνται συνήθως κράματα ημιαγωγών των ομάδων III και IV του περιοδικού πίνακα των στοιχείων (P,Ga,As,In). Οι SOA είναι γενικά συμπαγείς διατάξεις με χαμηλή κατανάλωση ισχύος, προσφέρονται για εύκολη ολοκλήρωση σε κοινό υπόστρωμα με άλλες ενεργητικές ή παθητικές οπτικές διατάξεις και μπορούν να καλύψουν και τα δύο παράθυρα χαμηλών απωλειών (δηλ. 1.3 και 1.55  $\mu\text{m}$ ). Επίσης έχουν αρκετά γρήγορη απόκριση στην περιοχή του 1ps έως 0.1ns. Το γεγονός αυτό είναι περιοριστικό σε κάποιες περιπτώσεις, καθώς η εξάρτηση του κέρδους (σε ένα

συγκεκριμένο μήκος κύματος) από το ρυθμό μετάδοσης, οδηγεί σε γενικότερη διακύμανση του κέρδους και τελικά σε φαινόμενα παρεμβολής (crosstalk).

Οι ενισχυτές ντοπαρισμένης ίνας (DFA) χρησιμοποιούν μία ίνα  $2 SiO$  με χαμηλό επίπεδο ντόπινγκ στον πυρήνα της από κάποιο στοιχείο Σπάνιας Γαίας, όπως το Er (Erbium) ή το Yb (Ytterbium). Η λειτουργία στα 1300 nm είναι δυνατή μόνο στην περίπτωση ινών τύπου fluoride και ντόπινγκ από στοιχεία όπως το Nd (Neodymium). Οι DFA παρέχουν τη δυνατότητα οπτικής άντλησης σε πολλά διαφορετικά μήκη κύματος, πολύ χαμηλές απώλειες σύζευξης ανάμεσα στις ίνες μετάδοσης και ενίσχυσης, καθώς και πολύ μικρή εξάρτηση του κέρδους από την πόλωση του κύματος. Επιπλέον λειτουργούν ανεξάρτητα από το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων (λόγω της αργής απόκρισής τους, 0.1-10 ps), διατηρώντας έτσι σταθερό το κέρδος και αποκλείοντας την εμφάνιση φαινομένων παρεμβολής. Τέλος, προσφέρουν ταυτόχρονη ενίσχυση σε ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος (τυπικά από 1530 έως 1560 nm). Η παρούσα μελέτη αφορά κυρίως τη δεύτερη κατηγορία και συγκεκριμένα τους ενισχυτές ντοπαρισμένης ίνας Ερβίου (EDFA).

### 3.6.1 Οπτικοί Ενισχυτές γραμμής:

Το Μήκος της ζεύξης μονόρυθμων οπτικών ινών καθορίζεται κυρίως από την απόσβεση (απώλειες μετάδοσης), Μιας και τα φαινόμενα διασποράς είναι γενικά περιορισμένα. Έτσι, Δεν απαιτείται συχνή πλήρης αναγέννηση του σήματος, Ενώ η οπτική ενίσχυση που προσφέρουν οι ενισχυτές γραμμής κατά μήκος της ζεύξης είναι αρκετή, Για να αντισταθμίσει τις απώλειες μετάδοσης. Συνεπώς Αυξάνεται σημαντικά η απόσταση ανάμεσα στους αναμεταδότες που επιτελούν πλήρη αναγέννηση του σήματος, Ενώ ταυτόχρονα μειώνεται το κόστος και η πολυπλοκότητα του συστήματος

### 3.6.2 Προενισχυτές:

Στην Περίπτωση αυτή ο ενισχυτής τοποθετείται στην πρώτη βαθμίδα ενός οπτικού δέκτη. Το ασθενές σήμα ενισχύεται πριν οδηγηθεί στο φωτοανιχνευτή, με αποτέλεσμα η επίδραση του θερμικού θορύβου (Λόγω των ηλεκτρονικών του δέκτη) στο λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) να περιορίζεται σημαντικά. Επιπλέον, η επιλογή ενός οπτικού ενισχυτή αντί κάποιου άλλου μηχανισμού κέρδους (π.χ. φωτοδίοδος χιονοστιβάδας), οδηγεί συνήθως σε μεγαλύτερο κέρδος και εύρος ζώνης.

### 3.6.3 Ενισχυτές ισχύος

Ο Οπτικός ενισχυτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν booster στην έξοδο του οπτικού πομπού, Αυξάνοντας την ισχύ του εκπεμπόμενου σήματος. Με Ταυτόχρονη χρήση και ενός οπτικού προενισχυτή, Μπορούν να επιτευχθούν υποθαλάσσιες ζεύξεις μήκους 200-250 km, Χωρίς την παρεμβολή αναμεταδότη. Επίσης, Οπτικοί ενισχυτές μπορούν να τοποθετηθούν σε τοπικά δίκτυα πρόσβασης



(LAN), Για να αντισταθμίσουν τις απώλειες από τη διανομή του σήματος σε μεγάλο αριθμό αποδεκτών. Η Χρήση οπτικών ενισχυτών σε μια οπτική τηλεπικοινωνιακή ζεύξη προσφέρει διάφορα πλεονεκτήματα, όπως:

- Εφόσον Τα σήματα πληροφορίας ενισχύονται άμεσα στο οπτικό πεδίο, χωρίς μετατροπή στο ηλεκτρικό πεδίο, η απόδοση ενός συστήματος με οπτικούς ενισχυτές δεν εξαρτάται από το ρυθμό μετάδοσης. Δηλαδή, σε αντίθεση με τους ηλεκτρονικούς επαναλήπτες, Ο ενισχυτής λειτουργεί αποτελεσματικά ακόμη και σε υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων.
- Είναι δυνατή η ταυτόχρονη ενίσχυση περισσότερων του ενός σημάτων σε συστήματα πολυπλεξίας στο μήκος κύματος (WDM), μιας και οι οπτικοί ενισχυτές έχουν συνήθως μεγάλο γινόμενο κέρδους - εύρους ζώνης, δηλαδή μπορούν να παρέχουν κέρδος σε ένα μεγάλο φασματικό εύρος (π.χ. 40 nm).
- Ο θόρυβος που προστίθεται από τον ενισχυτή είναι κοντά στα χαμηλότερα δυνατά επίπεδα (3-4 dB).
- Η σύνδεση (συγκόλληση) Των οπτικών ενισχυτών με το υπόλοιπο τηλεπικοινωνιακό σύστημα γίνεται με μια απλή διαδικασία και με ελάχιστες απώλειες εισαγωγής.
- Το κέρδος που παρέχουν οι οπτικοί ενισχυτές (Ντοπαρισμένης ίνας) είναι ανεξάρτητο από την πόλωση του κύματος.

### 3.6.4 Οπτικός Ενισχυτής Ημιαγωγού (Semiconductor Optical Amplifier (SOA))

Η προέλευση του θορύβου στον SOA είναι επίσης αυθόρμητη εκπομπή. Όμως οι SOAs είναι πιο θορυβώδεις από τα EDFAs διότι η αποδοτικότητα σύζευξης είναι χαμηλότερη. Αλλιώς έχουν τους ίδιους θεωρητικούς περιορισμούς. Ο θόρυβος ενός SOA δίνεται από τον τύπο

$$F_n = 2n_{sp} K_x / \eta_m.$$

Ο SOA μπορεί να λειτουργήσει στον κόρο ή εκτός αυτού.

Κάνοντας τον SOA κορεσμένο με ένα σήμα επηρεάζουμε το συνολικό φάσμα κέρδους. Έτσι όλα τα μήκη κύματος θα διαμορφωθούν σε περιορισμένο βαθμό. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται ετεροδιαμόρφωση κέρδους (cross gain modulation). Πιθανές λύσεις για αυτό το πρόβλημα είναι:

- Χαμηλή ισχύς εισόδου (γραμμικό σύστημα). Ο SOA εκτός κόρου.
- Εφεδρικό κανάλι, SOAs στον κόρο.
- Clamped κέρδος SOA. Το μέσον κέρδους μοιράζεται μεταξύ του SOA και ενός laser που εκπέμπει σε διαφορετικό μήκος κύματος..

Οι SOAs έχουν χρησιμοποιηθεί σαν ενισχυτές σε συνδέσμους μεγάλων αποστάσεων με μέτρια αποτελέσματα.. Οι SOAs δεν είναι ακόμα κατάλληλοι για συστήματα μεγάλης διαδρομής αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μικρής απόστασης WDM. Ο οπτικός ενισχυτής ημιαγωγού μπορεί ακόμα να χρησιμοποιηθεί για λόγους διαφορετικούς από την ενίσχυση εκμεταλλευόμενος το πλεονέκτημα της μη γραμμικότητας που υπάρχει στον ημιαγωγό. Τέτοιες χρήσεις

είναι και η οπτική αποπολυπλεξία (optical demultiplexing), η ανάκτηση ρολογιού (clock recovery) και οι διακόπτες (switching).

### 3.6.5 Ενισχυτές laser ημιαγωγού (SLA)

Τα Lasers γενικά μπορεί να θεωρηθούν σαν μονάδες παραγωγής οπτικών σημάτων πολύ υψηλής φέρουσας συχνότητας. Όλα τα lasers μπορούν να λειτουργούν σαν ενισχυτές αλλά πριν φτάσουν στην στάθμη του κατωφλίου, και οι laser ημιαγωγοί δεν αποτελούν εξαίρεση. Η ανακάλυψη των laser ημιαγωγών έγινε το 1962 και αμέσως άρχισε η έρευνα για τους ενισχυτές laser ημιαγωγού (SLA). Το 1980 όμως αναπτύχθηκαν τα SLA για πρακτικές εφαρμογές, με κίνητρο την δυνατότητα εφαρμογής τους στα οπτικά συστήματα.

Οι ενισχυτές οδεύοντος κύματος (TW) είναι ενισχυτές χωρίς ανάδραση ,δηλαδή το σήμα του ενισχυτή ακολουθεί μόνο ορθή κατεύθυνση. Αντίθετα τα laser ημιαγωγού υφίστανται μια σχετικά μεγάλη ανάδραση λόγω των ανακλάσεων που εμφανίζονται στις κομμένες πλευρές (ανακλαστικότητα 32%). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν ενισχυτές όταν πολώνονται κάτω από την στάθμη του κατωφλίου, αλλά θα πρέπει να συμπεριλάβουμε πολλές ανακλάσεις στις πλευρές θεωρώντας μια κοιλότητα Fabry-Perot (FP). Αυτοί οι ενισχυτές ονομάζονται ενισχυτές FP. Ο παράγοντας ενίσχυσης δίνεται από την σχέση:

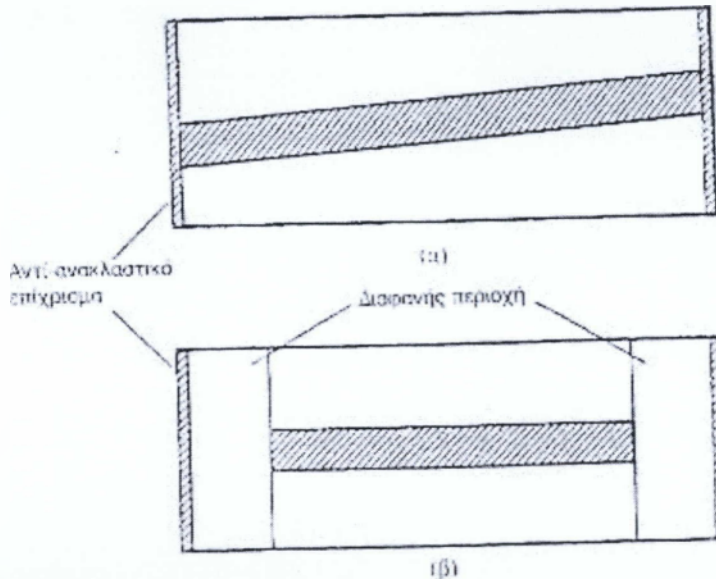
$$G_{FP}(\nu) = \frac{(1 - R_1)(1 - R_2)G(\nu)}{(1 - G\sqrt{R_1R_2})^2 + 4G\sqrt{R_1R_2}\sin^2\left[\frac{\pi(\nu - \nu_m)}{\Delta\nu_L}\right]} \quad \{3.3\}$$

Όπου  $R_1$  και  $R_2$  είναι οι αντανakλαστικότητες των πλευρών,  $\nu_m$  είναι οι συχνότητες συντονισμού κοιλότητας και  $\Delta\nu_L$  είναι η απόσταση μεταξύ διαμήκων τρόπων διάδοσης γνωστή και ως ελεύθερη φασματική εμβέλεια της κοιλότητας FP. Ο συντελεστής απλής διέλευσης  $G$  αντιστοιχεί σε εκείνο ενός ενισχυτή TW.

Τα SLA τύπου TW μπορούν να κατασκευαστούν αν η ανάδραση ανάκλασης από το άκρο των πλευρών συμπιεστεί. Ένας απλός τρόπος για να μειώσουμε την ανακλαστικότητα είναι να καλύψουμε τις πλευρές με ένα αντί-ανακλαστικό επίχρισμα. Παρόλα αυτά η ανακλαστικότητα είναι αναγκαίο να είναι υπερβολικά μικρή (<0,1%) ώστε ο SLA να λειτουργεί σαν ενισχυτής TW.

Απαιτείται σημαντική προσπάθεια για την παραγωγή αντί-ανακλαστικού επιχρίσματος με ανακλαστικότητες μικρότερες του 0,1%. Ακόμα και τότε είναι πολύ δύσκολο να πάρουμε μικρές πλευρικές ανακλαστικότητες με τρόπο κανονικό και προβλέψιμο. Για τον λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί εναλλακτικές τεχνικές για την μείωση της ανάδρασης ανάκλασης στα SLA. Σε μια μέθοδο, η λωρίδα ενεργούς περιοχής αποκτά μια κλίση από το κανονικό. Μια τέτοια δομή ονομάζεται δομή γωνιακής-πλευράς ή κεκλιμένης λωρίδας. Η ανακλώμενη δέσμη στην πλευρά διαχωρίζεται με φυσικό τρόπο από την ορθή δέσμη λόγω της γωνιακής πλευράς, εμφανίζεται και κάποια ποσότητα ανάδρασης αφού ο ενεργός τρόπος μετάδοσης εκτείνεται πέρα από την ενεργό περιοχή σε όλα τα εξαρτήματα των laser ημιαγωγών. Η συγκεκριμένη δομή παρέχει ανακλαστικότητες κάτω από  $10^{-3}$ . Σε άλλη τεχνική, εισάγεται μια περιοχή διαφανούς παραθύρου μεταξύ των

άκρων του ενεργού στρώματος και των πλευρών. Η οπτική δέσμη απλώνεται σε αυτή την περιοχή παραθύρου πριν φτάσει στο σημείο επαφής ημιαγωγού-αέρα. Η δέσμη ανάκλασης εκχύνεται ακόμα μακρύτερα κατά την επιστροφή και δεν επιτρέπει τη σύζευξη μεγάλης ποσότητας φωτός στο λεπτό ενεργό στρώμα. Αυτή η δομή ονομάζεται δομή βυθισμένης πλευράς ή πλευράς παραθύρου και παρέχει ανακαστικότητες μόλις  $10^{-4}$ , όταν χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός με αντί-ανακλαστικό επίχρισμα.



**Εικόνα 3.2:** Δομές (α) κεκλιμένης λωρίδας και (β) βυθισμένης λωρίδας για ενισχυτές laser ημιαγωγών σχεδόν οδεύοντος κύματος.

### 3.6.5.1 Πολυκαναλική ενίσχυση SLA

Ένα πλεονέκτημα των οπτικών ενισχυτών είναι ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ενισχύσουν αρκετά κανάλια επικοινωνίας ταυτόχρονα, αρκεί το εύρος ζώνης του πολυκαναλικού σήματος να είναι μικρότερο από το εύρος ζώνης του ενισχυτή. Το εύρος ζώνης των EDFA είναι συγκρίσιμο με εκείνο SLA (1-5THz) κι έτσι και οι δύο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πολυκαναλική επικοινωνία.

Τα SLA υφίστανται διαφωνία των καναλιών που επάγεται από την διαμόρφωση πυκνότητας της φέρουσας, που εμφανίζεται σε συχνότητα παλμικού κτύπου  $\Omega$  των γειτονικών οπτικών φερόντων. Η διαφωνία δεν εμφανίζεται όταν  $\Omega \tau_c \gg 1$ , όπου  $\tau_c$  είναι η διάρκεια ζωής των φορέων. Σαν συνέπεια, η επιδράσεις διαμόρφωσης απολαβής είναι αμελητέες όταν χρησιμοποιούμε τους EDFA για ενίσχυση ενός πολυκαναλικού σήματος. Η ιδιότητα αυτή τα καθιστά κατάλληλα για οπτικά συστήματα WDM.

Μία δεύτερη πηγή διαφωνίας μεταξύ των καναλιών εμφανίζεται λόγω του ότι η απολαβή ενός συγκεκριμένου καναλιού φτάνει στον κόρο όχι μόνο μέσω της δικής του αποκλειστικά ισχύος αλλά και μέσω της ισχύος των γειτονικών καναλιών και οι EDFA δεν αποτελούν εξαίρεση μπορούμε να τη αποφύγουμε αν λειτουργήσουμε των ενισχυτή στην μη κορεσμένη περιοχή.

Μια τρίτη πηγή διαφωνίας μεταξύ των καναλιών σχετίζεται με την φασματική ανομοιομορφία της απολαβής του ενισχυτή στα EDFA. Σαν συνέπεια ενισχύονται διαφορετικά κανάλια ενός σήματος WDM μέσω διαφορετικών ποσοτήτων. Το πρόβλημα αυτό γίνεται αρκετά έντονο στα συστήματα μετάδοσης σε μεγάλες αποστάσεις χρησιμοποιώντας μία αλυσίδα διαδοχικών EDFA. Επίσης οδηγεί σε παραμόρφωση στα δίκτυα CATV που μεταδίδουν πολλά κανάλια εικόνας μέσω της πολυπλεξίας των υποφερόντων. Η επαγωγική παραμόρφωση των EDFA έχει σαν αποτέλεσμα την μετατροπή ενός τετρασιμένου σήματος από FM σε AM. Λόγω της κεκλιμένης απολαβής ( $dg/d\omega \neq 0$ ) στο λειτουργικό μήκος κύματος. Η κεκλιμένη απολαβή των EDFA, που χρησιμοποιείται για εφαρμογές CATV, μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με την κατάλληλη σχεδίαση.

### 3.6.6 Ενισχυτές οπτικών ινών με προσμίξεις

#### 3.6.6.1 Εισαγωγή

Οι ενισχυτές αυτοί μελετήθηκαν θεωρητικά για πρώτη φορά το 1964, αλλά η χρήση τους στην πράξη κατέστη δυνατή κάπου 25 χρόνια αργότερα, με την τελειοποίηση των τεχνικών κατασκευής και μοντελοποίησης ντοπαρισμένων ινών χαμηλών απωλειών. Πολλά στοιχεία σπάνιας γαίας είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν στους ενισχυτές αυτούς, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα για λειτουργία στην ευρεία περιοχή 0.5-3.5 $\mu\text{m}$ . Οι ενισχυτές ντοπαρισμένης ίνας Erbium, κυριάρχησαν πολύ απλά διότι λειτουργούν στην περιοχή των 1.55 $\mu\text{m}$ , όπου οι απώλειες των οπτικών ινών είναι ελάχιστες. Οι ανάπτυξη των EDFA έφερε επανάσταση στη σχεδίαση οπτικών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

Οι ενισχυτές οπτικών ινών εμπλουτισμένων με έρβιο<sup>3</sup> προσέλκυσαν την μεγαλύτερη προσοχή απλώς επειδή λειτουργούν γύρω στα 1,55  $\mu\text{m}$ , η περιοχή μήκους κύματος στην οποία έχουμε ελάχιστη απώλεια οπτικών ινών. Οι EDFA χρησιμοποιήθηκαν για μετάδοση εικόνας από το 1992. Τα υπερατλαντικά και υπεριοκεανικά καλώδια οπτικών ινών, που χρησιμοποιούν EDFA σαν ενισχυτές σε σειρά λειτουργώντας στα 5Gb/s, τέθηκαν σε λειτουργία το 1996.

Οι ενισχυτές αυτοί βασίζονται στην αρχή της ενίσχυσης του φωτός μέσα στην ίνα λόγω νόθευσής της με κατάλληλα υλικά (στοιχεία). Τα άτομα των προσμειξεων βρίσκονται στον πυρήνα της ίνας, Από τον οποίο διέρχεται και Το προς ενίσχυση

---

<sup>3</sup> Το χημικό στοιχείο Έρβιο είναι ένα μέταλλο με ατομικό αριθμό 68 και ατομικό βάρος 167,26. Έχει θερμοκρασία τήξης 1522 C° και θερμοκρασία βρασμού 2510 C°. Χημικό σύμβολο: Er. Το οξείδιο Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> είναι ροδόχρουν, σχηματίζει άλατα επίσης ροδόχροα με λίαν χαρακτηριστικό φάσμα απορρόφησης. Το στοιχείο αυτό ανήκει στη κατηγορία των σπάνιων γαιών ή λανθανιδών στον περιοδικό πίνακα.

σημείο εισόδου (Με μήκος κύματος  $\lambda_1$ ) Στον Ίδιο πυρήνα διοχετεύεται και φως υψηλής ισχύος από μια πηγή laser, η οποία ονομάζεται laser άντλησης (Με μήκος κύματος  $\lambda_2$ ). Η άντληση είναι η διαδικασία με την οποία δίνεται η αναγκαία ενέργεια σε έναν οπτικό ενισχυτή ή μια πηγή laser, για να λειτουργήσει. Η Αντληση είναι απαραίτητη για να διεγερθούν τα άτομα του υλικού ώστε να έχουμε εξαναγκασμένη εκπομπή. Η ενέργεια άντλησης μπορεί να δίνεται α) με τη μορφή ηλεκτρικού ρεύματος (Ενισχυτής ή laser ημιαγωγού α) και β) με τη μορφή φωτεινής ακτινοβολίας (Ενισχυτής ίνας).

Στον ενισχυτή ίνας Τα άτομα προσμερίζων έχουν την εξής ιδιότητα. Απορροφούν φωτεινή Ισχύ στο μήκος κύματος  $\lambda_2$  και την αποδίδουν στο μήκος κύματος  $\lambda_1$ . Με αυτόν τον τρόπο, το σήμα ενισχύεται σε Οπτική μορφή, καθώς οδεύει μέσα στην ίνα. Οι πιο Συνηθισμένο ενισχυτές ίνας Χρησιμοποιούν μερικά μέτρα ίνας με προσμερίξεις του στοιχείου ερβίου (Er) και ενισχύουν φωτεινά σήματα στο μήκος κύματος 1,55  $\mu\text{m}$  των οπτικών επικοινωνιών.

Ως πηγή άντλησης χρησιμοποιείται ένα laser ημιαγωγού, το οποίο εκπέμπει στα 0,98 ή 1,48  $\mu\text{m}$ . Τυπικές τιμές της ενίσχυσης(απολαβής) Ενός ενισχυτή ίνας φθάνουν τα 30 dB Με εύρος ζώνης 40 nm. Οι ενισχυτές ίνας εμφανίζουν πλεονεκτήματα όπως: α)Απλότητα στην κατασκευή, β)Ευκολία ζεύξης με τη γραμμή οπτικής ίνας με χαμηλές απώλειες, γ)Εξάλειψη των φαινομένων διαφωνίας των οπτικών σημάτων που ενισχύονται. Οπτικοί ενισχυτές ίνας προσμερίζων ερβίου έχουν ήδη εγκατασταθεί σε πολλές ζεύξεις Όπως στο υπερατλαντικό υποβρύχιο καλώδιο (TAT12/13), Το οποίο συνδέει τη Μεγάλη Βρετανία, τη Γαλλία και τις ΗΠΑ με ρυθμό μετάδοσης 10 Gbit/s.

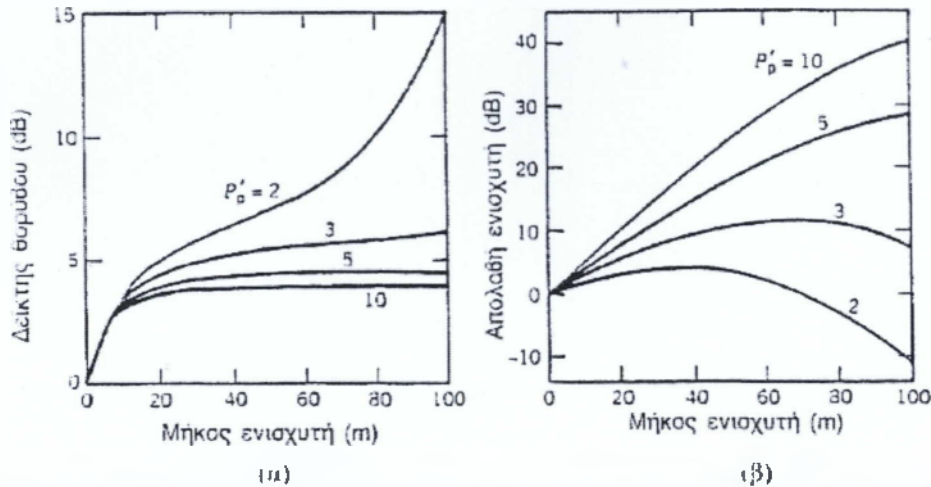
Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις οπτικές επικοινωνίες είναι φθορίζοντα, και ο φθορισμός είναι το κλειδί για την κατανόηση της λειτουργίας των οπτικών ενισχυτών. Μια φθορίζουσα ουσία εκπέμπει φως όταν προσπίπτει φως σε αυτήν, με το χρώμα της λάμψης να είναι διαφορετικό από το χρώμα του προσπίπτοντος φωτός. Το τελευταίο ονομάζεται και φως άντλησης. Αν και ο φθορισμός ξεκινά με την πρόσπτωση του φωτός άντλησης, με την απομάκρυνση αυτού η διαδικασία δε σταματά αμέσως, αλλά φθίνει με ένα χαρακτηριστικό χρόνο ζωής. Επίσης σημαντικό είναι το γεγονός πως, ενώ το μήκος κύματος (χρώμα) της εκπομπής είναι καθορισμένο, το μήκος κύματος του φωτός άντλησης δε απαιτείται να είναι αυστηρά καθορισμένο.

### 3.6.6.2 Θόρυβος ενισχυτών με προσμίξεις

Ο θόρυβος του ενισχυτή δίνεται ποσοτικά μέσω του δείκτη θορύβου  $F_n$ , που δίνεται από τον τύπο  $F_n=2n_{sp}$ . Ο συντελεστής αυθόρμητης εκπομπής  $n_{sp}$  εξαρτάται από τους σχετικούς πληθυσμούς  $N_1$  και  $N_2$  και της βασικής κατάστασης και των διεγερμένων καταστάσεων ως εξής:  $n_{sp}=N_2/(N_2-N_1)$ . Αφού οι EDFA λειτουργούν βάσει μιας τεχνικής άντλησης τριών σταθμών,  $N_1 \neq 0$  και  $n_{sp} > 1$ . Επομένως ο δείκτης θορύβου των EDFA υποθέτουμε ότι να είναι μεγαλύτερος από την ιδανική τιμή των 3dB.

Ο συντελεστής αυθόρμητης εκπομπής για τους EDFA μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας το πρότυπο των εξισώσεων ρυθμού τριών επιπέδων. Ωστόσο, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι ο  $N_1$  και ο  $N_2$  μεταβάλλονται κατά μήκος της οπτικής ίνας λόγω της εξάρτησης τους από την ισχύ άντλησης και σήματος.

Επομένως ο  $n_{sp}$  θα πρέπει να αποκτήσει μέση τιμή σε όλο το μήκος του ενισχυτή. Σαν συνέπεια ο δείκτης θορύβου εξαρτάται και από το μήκος του ενισχυτή  $L$  και από την ισχύ άντλησης  $P_p$ , όπως και η απολαβή του ενισχυτή.



**Εικόνα 3.3:** (α) Ο δείκτης θορύβου και (β) η απολαβή του ενισχυτή σαν συνάρτηση του μήκους για διάφορα επίπεδα άντλησης.

Η **Εικόνα 3.3** δείχνει την μεταβολή του  $F_n$  με το μήκος του ενισχυτή για διάφορες τιμές του  $P_p/P_p^{sat}$  όταν ένα σήμα  $1.53\mu\text{m}$  ενισχύεται ανάλογα με την ισχύ εισόδου  $1\text{mW}$ . Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μπορούμε να αποκτήσουμε δείκτη θορύβου γύρω στα 3dB για έναν ενισχυτή υψηλής απολαβής που αντλείται έτσι ώστε  $P_p \gg P_p^{sat}$ .

Τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν πως μπορούμε να πάρουμε  $F_n$  γύρω στα 3dB στους EDFA. Μετρήθηκε ο δείκτης θορύβου 3.2dB σε EDFA μήκους 30m που αντλήθηκε στα  $0.98\mu\text{m}$  σε μόλις  $11\text{mW}$  ισχύ. Είναι δύσκολο να επιτευχθεί υψηλή απολαβή, χαμηλό θόρυβο και υψηλή απόδοση άντλησης ταυτόχρονα. Ο βασικός περιορισμός είναι η ενισχυμένη αυθόρμητη εκπομπή, που μεταδίδεται ανάστροφα, προς την κατεύθυνση της άντλησης και ελαττώνει την ισχύ άντλησης. Το πρόβλημα λύνεται με ενσωμάτωση ενός εσωτερικού απομονωτή.

Οι σχετικά χαμηλές στάθμες θορύβου των EDFA τους καθιστούν ιδανική επιλογή για εφαρμογές οπτικών συστημάτων παρά τον χαμηλό θόρυβο η απόδοση των συστημάτων επικοινωνίας οπτικών ινών που χρησιμοποιούνται πολλοί EDFA περιορίζεται συχνά από τον θόρυβο του ενισχυτή. Το πρόβλημα του θορύβου είναι ιδιαίτερα έντονο όταν το σύστημα λειτουργεί σε μία περιοχή ανώμαλης διασποράς της οπτικής ίνας, αφού ένα μη γραμμικό φαινόμενο γνωστό σαν αστάθεια διαμόρφωσης ενισχύει τον θόρυβο του ενισχυτή και υποβαθμίζει το φάσμα του σήματος. Ο θόρυβος του ενισχυτή επίσης επηρεάζει την απόδοση των συστημάτων επικοινωνίας σολιτονίων όπου προκαλεί χρονικό τρέμουλο.

### 3.6.6.3 Στενοί παλμοί

Το σχετικά μεγάλο εύρος ζώνης (~ 30nm) των EDFA δηλώνει ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ενισχύσουν οπτικούς παλμούς διάρκειας 1ps ή και ακόμα μικρότερους χωρίς παραμόρφωση. Το φασματικό εύρος ζώνης τόσο των στενών παλμών είναι αρκετά μεγάλο ώστε η διασπορά της απολαβής (φασματική ανομοιομορφία της απολαβής) να πρέπει να ληφθεί υπόψη. Ακόμα, πρέπει να συμπεριληφθεί η διεγερμένη σκέδαση Raman στο εσωτερικού του παλμού, φαινόμενο μέσω των οποίων οι συνιστώσες υψηλής συχνότητας ενός πάρα πολύ στενού παλμού μπορούν να επιφέρουν άντληση των συνιστωσών χαμηλής συχνότητας του ίδιου παλμού. Η ενίσχυση των πολύ στενών παλμών επίσης επηρεάζεται από την διασπορά ταχύτητα ομάδας (GDV) και από την εξάρτηση του δείκτη διάθλασης και από την ένταση στις ίνες πυριτίου λειτουργώντας σαν ξενιστής για τα ιόντα ερβίου, τα οποία περιέχουν απολαβή. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις δείχνουν ότι ο παλμός εισόδου μπορεί να ενισχυθεί και να συμπιεστεί ταυτόχρονα από έναν EDFA όταν η μέγιστη ισχύς υπερβαίνει. Από την άποψη των εφαρμογών των οπτικών συστημάτων, οι δυνατότητες των EDFA βρίσκονται στην ικανότητα τους να ενισχύουν παλμούς ps χωρίς παραμόρφωση.

### 3.6.7 Οπτικοί Ενισχυτές με Προσμίξεις Ερβίου (EDFA)

#### 3.6.7.1 Εισαγωγή

Στο οπτικό δίκτυο επικοινωνίας, τα σήματα ταξιδεύουν μέσω ινών για πολύ μεγάλες αποστάσεις χωρίς σημαντική εξασθένηση. Ωστόσο, όταν οι αποστάσεις γίνονται εκατοντάδες χιλιόμετρα, καθίσταται αναγκαίο η ενίσχυση το σήμα κατά τη διάρκεια της διέλευσης. Ενισχυτές οπτικών ινών παρέχουν ενίσχυση της γραμμής των οπτικών σημάτων μέσω της εξαναγκασμένης εκπομπή φωτονίων από σπάνια ιόντα γαιών εμφυτεύοντας τα στον πυρήνα της οπτικής ίνας.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο πλέον συνηθισμένος τύπος οπτικού ενισχυτή είναι ο ενισχυτής ντοπαρισμένης ίνας Ερβίου, γνωστός με τη συντομογραφία EDFA. Βασίζεται σε ίνες γυαλιού ( $2 SiO_2$ ), των οποίων ο πυρήνας έχει νοθευτεί ελαφρά με τριπλά κατιόντα Ερβίου (τυπικές συγκεντρώσεις της τάξης των εκατοντάδων ppm κατά βάρος). Το μήκος της ίνας που προσφέρει την ενίσχυση είναι συνήθως από 5 έως 30 m και η λειτουργία κατά κανόνα περιορίζεται στο παράθυρο 1530 - 1560 nm.

Το Ερβίου είναι το προτιμώμενο για το σκοπό αυτό αν και ενισχυτές που χρησιμοποιούν Πρασεοδύμιο είναι επίσης σε χρήση. Οι EDFAs χρησιμοποιούνται για να παρέχουν ενίσχυση σε μεγάλες αποστάσεις οπτικής επικοινωνίας με απώλεια ίνας μικρότερη από 0,2 dB / km παρέχοντας μεγάλο μήκος κοντά στο 1550 nm. Η λειτουργία των ενισχυτών ίνας με προσμίξεις είναι η ίδια με εκείνη των λέιζερ εκτός του ότι τέτοιοι ενισχυτές δεν απαιτούν κοιλότητα ενώ μια κοιλότητα απαιτείται για λέιζερ ταλάντωσης. Πλεονεκτήματα της EDFA έχουν ως εξής:

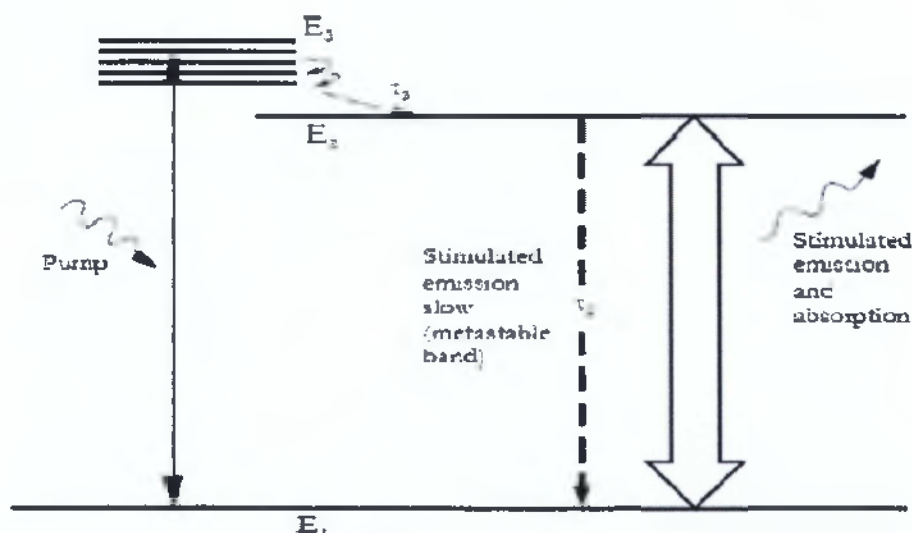
- να παρέχουν ενίσχυση του σήματος στη γραμμή χωρίς να απαιτείται ηλεκτρονικά.

- Παρέχει υψηλή απόδοση μεταφοράς ενέργειας από την αντλία σε ισχύ του σήματος.
- Το κέρδος είναι σχετικά επίπεδο, έτσι ώστε να μπορούν να κλιμακώνονται για χρήση μεγάλων αποστάσεων.

Μειονεκτήματα είναι ότι οι συσκευές είναι μεγάλες, υπάρχει κόρος κέρδους και υπάρχει επίσης παρουσία ενισχυμένης αυθόρμητη εκπομπή (ASE)

### 3.6.7.2 Λειτουργία EDFA

Ο μηχανισμός ενίσχυσης των οπτικών ενισχυτών ντοπαρισμένης ίνας μπορεί να εξηγηθεί φαινομενολογικά, μέσω ενός απλού ενεργειακού μοντέλου το οποίο κάνει χρήση των εννοιών των ενεργειακών σταθμών-επιπέδων των ατόμων/ιόντων, των μεταβάσεων μεταξύ των σταθμών αυτών και της αλληλεπίδρασης των ατόμων/ιόντων με το φως. Ανάλογα με το στοιχείο της σπάνιας γαίας που χρησιμοποιείται σε μία ντοπαρισμένη ίνα, το μοντέλο μπορεί να προβλέπει διαφορετικό αριθμό ενεργειακών επιπέδων. Στο πλέον συνηθισμένο μοντέλο είναι το λεγόμενο μοντέλο τριών ενεργειακών επιπέδων, το οποίο είναι σε θέση να περιγράψει τη λειτουργία ενός EDFA



**Εικόνα 3.4:** Ενεργειακό μοντέλο τριών επιπέδων

Στην **Εικόνα 3.4** διακρίνονται τα τρία ενεργειακά επίπεδα  $E_1, E_2, E_3$ . Στους DFAs το υλικό ντόπινγκ αποτελείται από ιόντα κάποιου στοιχείου σπάνιας Γαίας, οπότε τα εν λόγω ενεργειακά επίπεδα είναι αυτά τα οποία μπορούν να καταληφθούν από τα ιόντα του στοιχείου. Το επίπεδο αναφοράς  $E_1$  περιέχει το μεγαλύτερο αριθμό ιόντων υπό συνθήκες ηρεμίας. Με την πρόσπτωση φωτός άντλησης κατάλληλης συχνότητας, τέτοιας ώστε  $E_3 - E_1 = hf_{\text{pump}}$ , τα ιόντα διεγείρονται και μεταβαίνουν από το επίπεδο  $E_1$  στο  $E_3$ . Σημειώνεται ότι το επίπεδο  $E_3$  είναι στη πραγματικότητα



μία δέσμη αρκετών παρακείμενων επιπέδων. Στα ιόντα από τη στάθμη  $E_3$  μεταβαίνουν σχεδόν άμεσα, χωρίς ακτινοβολία, στη στάθμη  $E_2$  μετά την πάροδο πολύ μικρού μέσου χρόνου  $t_3$ . Όταν λόγω της πρόσπτωσης φωτός άντλησης οδηγηθούμε στο να έχουμε περισσότερα ιόντα στη στάθμη  $E_2$  από την  $E_1$ , τότε λέμε ότι έχουμε συνθήκες *πληθυσμιακής αντιστροφής*.

Σε υλικά όπως το Έρβιο, τα ιόντα παρουσιάζουν πολύ μεγάλο χρόνο παραμονής στη στάθμη  $E_2$ , η οποία για αυτό το λόγο ονομάζεται *μετασταθής* (metastable). Οι στάθμες  $E_1, E_2$  αποτελούνται και αυτές από παρακείμενα υποεπίπεδα, όμως η μετάβαση από τη δεύτερη στη πρώτη γίνεται μέσω συγκεκριμένων υποεπιπέδων. Έτσι, η ακτινοβολία που συνοδεύει τη μετάβαση αυτή έχει αυστηρά καθορισμένο μήκος κύματος. Αντίθετα, το μήκος κύματος της άντλησης μπορεί να κυμαίνεται μέσα σε μία περιοχή τιμών. Υπάρχουν τρεις βασικοί μηχανισμοί μετάβασης ανάμεσα στη βασική και τη μετασταθή στάθμη:

- Η *αυθόρμητη εκπομπή* (spontaneous emission), κατά την οποία ένα ιόν μεταβαίνει αυθόρμητα από την  $E_2$  στην  $E_1$ . Κατά την τυχαία αυτή διαδικασία, εκπέμπονται φωτόνια τα οποία έχουν διαφορετικές φάσεις και κινούνται σε τυχαίες διευθύνσεις και χαρακτηρίζονται ως *ασύμφωνα*. Η διαδικασία αυτή ευθύνεται για την κυρίαρχη πηγή θορύβου σε έναν DFA, η οποία ονομάζεται *ενισχυμένη αυθόρμητη εκπομπή* (Amplified Spontaneous Emission, ASE).
- Η *εξαναγκασμένη εκπομπή* (stimulated emission), κατά την οποία η πρόσπτωση ενός φωτονίου  $f_{\text{signal}}$  κατάλληλης συχνότητας τέτοιας ώστε  $E_2 - E_1 = hf_{\text{signal}}$  υποχρεώνει ένα ιόν να μεταβεί από την  $E_2$  στην  $E_1$  με ταυτόχρονη εκπομπή ενός δεύτερου φωτονίου, ίδιας φάσης και κατεύθυνσης με το αρχικό. Με τη διαδικασία αυτή ενισχύεται ουσιαστικά το προσπίπτον φως. Σε ένα DFA, το σήμα που προκαλεί την εξαναγκασμένη εκπομπή είναι το σήμα πληροφορίας, το οποίο θέλουμε να ενισχύσουμε.
- Η *εξαναγκασμένη απορρόφηση* (stimulated absorption), κατά την οποία ένας μικρός αριθμός ιόντων μεταβαίνει από τη στάθμη  $E_1$  στην  $E_2$  και χάνεται.

Ας σημειωθεί ότι, όπως είναι αυτονόητο, για να έχουμε ενίσχυση του προσπίπτοντος σε έναν DFA σήματος πληροφορίας, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ισχύς άντλησης να είναι αρκετή έτσι ώστε να δημιουργηθούν συνθήκες πληθυσμιακής αντιστροφής.

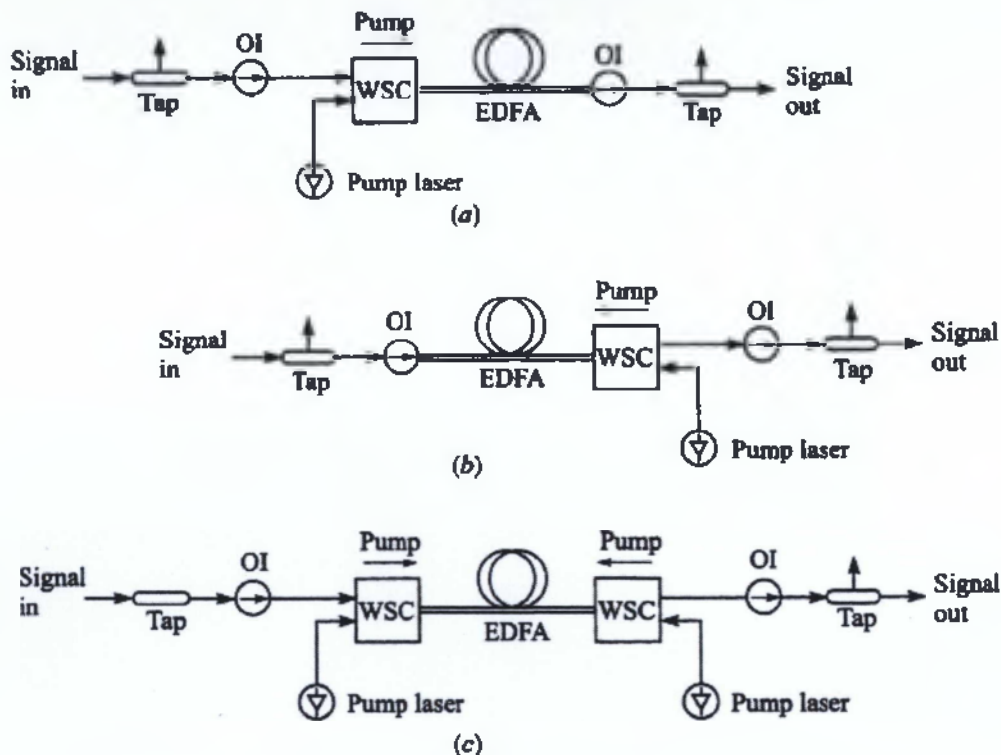
### 3.6.7.3 Αρχιτεκτονικές EDFA

Υπάρχουν τρεις δυνατές αρχιτεκτονικές για τους EDFA, ανάλογα με τη διεύθυνση διάδοσης του φωτός άντλησης και του προς ενίσχυση σήματος. Έτσι λοιπόν, διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις που απεικονίζονται στην **Εικόνα 3.5**: συγκατευθυντική άντληση (co-directional pumping), αντικατευθυντική άντληση (counter-directional pumping) και διπλή άντληση (bidirectional pumping).

Η περίπτωση μονής άντλησης (μία πηγή άντλησης), είτε συγκατευθυντικής είτε αντικατευθυντικής, προσφέρει προφανώς σαφώς μικρότερο κέρδος από αυτήν της

διπλής άντλησης (τυπικά στις περιοχές των 17 και 35 dB αντίστοιχα). Εξάλλου, η συγκατευθυντική άντληση οδηγεί σε καλύτερα χαρακτηριστικά θορύβου, ενώ η αντικατευθυντική σε υψηλότερο κέρδος.

Οι ζεύκτες ελέγχου (taps), έχουν μικρό λόγο διαίρεσης (στην περιοχή 99:1 μέχρι 99:5) και τοποθετούνται στην είσοδο και έξοδο του ενισχυτή, προκειμένου να έχουμε δείγματα του σήματος εισόδου και εξόδου για την εκτίμηση της ενίσχυσης. Οι οπτικοί απομονωτές (optical isolators, OI) αποτρέπουν την επιστροφή του ενισχυμένου σήματος πίσω στη διάταξη λόγω ανακλάσεων, κάτι το οποίο θα είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του θορύβου και τη μείωση της αποδοτικότητας.



**Εικόνα 3.5:** Πιθανές αρχιτεκτονικές οπτικών ενισχυτών EDFA : (a) συγκατευθυντική άντληση , (b) αντικατευθυντική άντληση , (c) διπλή άντληση ( OI : Optical Isolator , WSC : Wavelength Selective Coupler ).

### 3.6.7.4 Άντληση

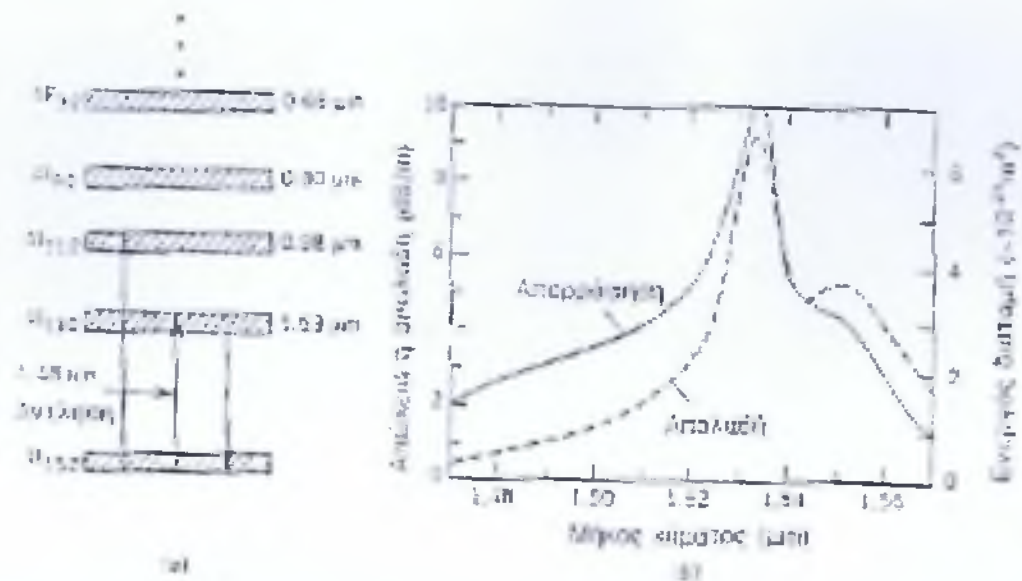
Τα χαρακτηριστικά απολαβής των EDFA εξαρτώνται από την τεχνική άντλησης καθώς και από άλλες προσμίξεις, όπως γερμάνιο και αλουμίνιο, που βρίσκονται στο εσωτερικό του πυρήνα της οπτικής ίνας.

Η άμορφη φύση του πυριτίου διευρύνει τις ενεργειακές στάθμες των ιόντων του ερβίου ( $Er^{3+}$ ) στις ζώνες. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πολλές μετακινήσεις για να αντλήσουμε τους EDFA. Πρώιμα πειράματα χρησιμοποίησαν για άντληση την ορατή ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα laser υψηλής ισχύος, όπως το ιόν-αργόν και έγχρωμα laser παρόλο που τέτοιου είδους τεχνικές άντλησης έχουν σχετικά περιορισμένη απόδοση. Από πρακτική άποψη προτιμάται η χρήση ενός laser ημιαγωγού.

Η ικανοποιητική άντληση των EDFA είναι δυνατή χρησιμοποιώντας laser ημιαγωγών που λειτουργούν σε μήκος κύματος 0.98 και 1.48 $\mu\text{m}$ . Για αυτό και η ανάπτυξη των laser ημιαγωγών προήλθε από την ανάγκη για laser με την κατάλληλη ικανότητα άντλησης των EDFA. Όταν οι EDFA αντλούνται χρησιμοποιώντας τέτοιου είδους laser, μπορούμε να πάρουμε υψηλές απολαβές ενισχυτή μεταξύ 30-40 dB με μόλις 10-20 mW απορροφημένης ισχύος αντλήσεως. Η μεταφορά της άντλησης 4115/2-419/2 μπορεί να χρησιμοποιήσει laser GaAs υψηλής ισχύος για την άντληση των EDFA. Μπορούμε να επιτύχουμε απόδοση άντλησης περίπου 1dB/mW στα 820 nm. Παρόλο που η απόδοση είναι μικρότερη από εκείνη των laser 0.98 $\mu\text{m}$  κατά μία τάξη μεγέθους, μπορούμε να πάρουμε απολαβή 30dB με ισχύ άντλησης 40-50mW, στάθμες ισχύος που ήδη έχουμε επιτύχει με τους laser ημιαγωγών. Η ισχύς άντλησης μπορεί να μειωθεί χρησιμοποιώντας ίνες πυριτίου εμπλουτισμένες με αλουμίνιο και φώσφορο ή χρησιμοποιώντας φθόριο-φωσφορικές ίνες. Με την διάθεση των ορατών laser ημιαγωγών, οι EDFA μπορούν επίσης να αντληθούν σε μήκος κύματος μεταξύ 3.6-0.7  $\mu\text{m}$ .

Τα EDFA μπορούν σχεδιαστούν για να λειτουργούν με τέτοιο τρόπο ώστε οι δέσμες άντλησης και σήματος διαδίδονται σε αντίθετες κατευθύνσεις, διάταξη που ονομάζεται ανάστροφη-άντληση για να την ξεχωρίζουμε από την μορφοποίηση ορθής άντλησης στην οποία και οι δύο δέσμες διαδίδονται προς την ίδια κατεύθυνση. Η απόδοση είναι σχεδόν η ίδια και στις δύο διάταξης άντλησης όταν η ισχύς σήματος είναι αρκετά μικρή ώστε ο ενισχυτής να παραμένει ακόρεστος. Στη περιοχή κόρου, η απόδοση μετατροπής-ισχύος είναι γενικά καλύτερη στην διάταξη αναστροφής-άντλησης, κυρίως λόγω του σημαντικού ρόλου που παίζει η ενισχυμένη αυθόρμητη εκπομπή. Στη διάταξη αμφίδρομης άντλησης, ο ενισχυτής υφίστανται άντληση και προς τις δύο κατευθύνσεις ταυτόχρονα, χρησιμοποιώντας δύο laser ημιαγωγών τοποθετημένα στα δύο άκρα της οπτικής ίνας. Η διάταξη αυτή απαιτεί δύο laser άντλησης αλλά έχει και το πλεονέκτημα ότι η πληθυσμιακή αντιστροφή και επομένως και η απολαβή μικρού σήματος είναι σχετικά ομοιόμορφη σε όλο το μήκος της οπτικής ίνας.

Σε έναν ενισχυτή EDFA το μέσο που παρέχει την ενίσχυση είναι η ίνα Ερβίου. Η πηγή των 980nm είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία συνθηκών πληθυσμιακής αντιστροφής κατά μήκος της ίνας. Ιδανικά, για δεδομένη τιμή της ισχύος άντλησης, θα πρέπει να δημιουργούνται συνθήκες πληθυσμιακής αντιστροφής σε όλο το μήκος της ίνας. Όταν συμβαίνει αυτό, λέμε ότι το μήκος της ίνας είναι βέλτιστο για τη συγκεκριμένη τιμή της ισχύος άντλησης και θεωρητικά στην έξοδο της ίνας δεν ανιχνεύεται ισχύς στην περιοχή των 980nm. Για μικρότερες του βέλτιστου τιμές του μήκους της ίνας δεν εκμεταλλευόμαστε όλη την ισχύ άντλησης και έτσι δεν παίρνουμε τη μέγιστη δυνατή ενίσχυση. Για μεγαλύτερες τιμές η ισχύς άντλησης δεν επαρκεί για τη δημιουργία συνθηκών πληθυσμιακής αντιστροφής σε όλο το μήκος της ίνας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το κομμάτι της ίνας όπου δεν έχουν δημιουργηθεί συνθήκες πληθυσμιακής αντιστροφής να απορροφά μέρος της ισχύος του σήματος προς ενίσχυση, συμβάλλοντας έτσι στο συνολικό κέρδος με απώλειες. Όπως είναι λογικό, αύξηση της ισχύος άντλησης οδηγεί σε αύξηση του βέλτιστου μήκους της ίνας και κατά συνέπεια σε μεγαλύτερο κέρδος.



**Εικόνα 3.6:** (α)Το διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών των ιόντων-ερβίου στις οπτικές ίνες πυριτίου. (β) Τα φάσματα απορρόφησης κι απολαβής ενός EDFA του οποίου ο πυρήνας εμπλουτίστηκε από κοινού με γερμάνιο για την αύξηση του δείκτη διάθλασης.

### 3.6.7.5 Φάσμα απολαβής

Το φάσμα απολαβής των EDFA επηρεάζεται σημαντικά από την άμορφη φύση του πυριτίου και από την παρουσία άλλων προσμίξεων στο εσωτερικό του πυρήνα της οπτικής ίνας, όπως το γερμάνιο και το αλουμίνιο. Μόνο το προφίλ απολαβής των ιόντων ερβίου διευρύνεται ομοιογενώς και το εύρος ζώνης του καθορίζεται από το χρόνο διπολικής χαλάρωσης. Ωστόσο, διευρύνεται σημαντικά με την παρουσία γυαλιού πυριτίου. Οι παραμορφώσεις στη δομή οδηγούν σε ανομοιογενή διεύρυνση του προφίλ απολαβής ενώ ο διαχωρισμός Stark των διάφορων ενεργειακών σταθμών ευθύνεται για την ομοιογενή διεύρυνση. Στην **Εικόνα 3.6** παρουσιάζονται τα φάσματα απολαβής και απορρόφησης ενός EDFA του οποίου ο πυρήνας έχει εμπλουτιστεί με γερμάνιο. Το φάσμα απολαβής είναι αρκετά ευρύ (FWHM > 10nm), με δομή διπλής κορυφής. Η πρόσθεση αλουμινίου στο πυρήνα διευρύνει ακόμα περισσότερο το φάσμα απολαβής. Μετά από πολλές προσπάθειες απομόνωσης των συνεισφορών της ομοιογενούς και ανομοιογενούς διεύρυνσης με μετρήσεις φασματικής οπής, έχει βρεθεί ότι για τους EDFA εμπλουτισμένους με γερμάνιο οι σχετικές συμβολές είναι 4 και 8 nm αντίστοιχα. Αντίθετα, το φάσμα απολαβής του γυαλιού αλουμινίου πυριτίου μάλλον δεν έχει την ίδια συνεισφορά με τους μηχανισμούς ομοιογενούς και ανομοιογενούς διεύρυνσης. Το εύρος ζώνης της απολαβής ενός τέτοιου EDFA τυπικά υπερβαίνει τα 30nm.

Το φάσμα απολαβής EDFA μπορεί να αλλάξει από ενισχυτή σε ενισχυτή ακόμα και όταν η σύνθεση του πυρήνα είναι η ίδια καθώς εξαρτάται από το μήκος του ενισχυτή. Ο λόγος είναι ότι η απολαβή εξαρτάται από τις ενεργές διατομές της απορρόφησης και μετάδοσης οι οποίες έχουν διαφορετικά φασματικά

χαρακτηριστικά. Η τοπική αντιστροφή ή απολαβή μεταβάλλεται κατά μήκος της οπτικής ίνας λόγω των διακυμάνσεων της ισχύος άντλησης. Η ολική απολαβή βρίσκεται αν ολοκληρώσουμε σε όλο το μήκος του ενισχυτή. Το χαρακτηριστικό αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα σχετικά σταθερό (επίπεδο) φάσμα απολαβής βελτιώνοντας το μήκος της οπτικής ίνας.

Υπάρχουν πολλές παράμετροι από τις οποίες εξαρτάται η απολαβή των EDFA μερικές από αυτές είναι η συγκέντρωση των ιόντων ερβίου, το μήκος του ενισχυτή η ακτίνα του πυρήνα και η ισχύς άντλησης. Παρά την σημαντική προσπάθεια να κατανοήσουμε τα χαρακτηριστικά απολαβής μέσω θεωρητικής προσέγγισης, συνηθίζεται να χρησιμοποιείται σαν πρότυπο μια εξίσωση ρυθμού τριών επιπέδων. Η εξίσωση χρησιμοποιείται για ορισμένα laser όμως μπορεί να προσαρμοστεί και στα EDFA κάθε μήκους άντλησης, αφού σε κάθε περίπτωση η διεγερμένη μετάδοση σταματά την βασική κατάσταση. Μερικές φορές είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί μια τέταρτη στάθμη για να συμπεριλάβουμε την απορρόφηση διεγερμένης κατάστασης. Γενικά οι εξισώσεις που προκύπτουν πρέπει να λυθούν αριθμητικά. Αν χρησιμοποιήσουμε ένα πρότυπο δύο επιπέδων που ισχύει, όταν αγνοούμε την ενισχυμένη αυθόρμητη εκπομπή και την απορρόφηση διεγερμένης κατάστασης, μπορούμε να κατανοήσουμε καλύτερα κάποια στοιχεία. Το πρότυπο υποθέτει ότι η στάθμη άντλησης 3 του συστήματος τριών επιπέδων παραμένει σχεδόν άδεια λόγω της γρήγορης μετάβασης του πληθυσμού που υπέστη άντληση στην κατάσταση διέγερσης 2. Αν  $N_2$  ο πληθυσμός της διεγερμένης κατάστασης τότε ικανοποιεί την εξίσωση του ρυθμού:

$$\frac{\theta N_2}{\theta t} = W_p N_1 - W_s (N_2 - N_1) - \frac{N_2}{T_1} \quad \{3.4\}$$

Όπου  $N_1 = N_1 - N_2$  είναι ο πληθυσμός βασικής κατάστασης ( $N_1$  είναι η ολική ατομική πυκνότητα) και  $T_1$  είναι η αυθόρμητη διάρκεια ζωής της διεγερμένης κατάστασης.  $W_p$  και  $W_s$  είναι οι ρυθμοί μετάβασης των κυμάτων άντλησης ώστε:

$$W_p = \sigma_p P_p / \alpha_p h \nu_p \quad \{3.5\}$$

Μαζί με μία παρόμοια έκφραση για το  $W_s$ . Η  $\sigma_p$  είναι η ενεργός διατομή της μετάβασης με συχνότητα άντλησης  $\nu_p$ , η  $\alpha_p$  η ενεργός διατομή του τρόπου διάδοσης της άντλησης στο εσωτερικό της οπτικής ίνας και  $P_p$  είναι η ισχύς άντλησης. Η λύση μόνιμης κατάστασης της εξίσωσης  $\theta$  δίνεται από την σχέση:

$$N_2 = \frac{(P'_p + P'_s) N_t}{1 + 2P'_s + P'_p} \quad \{3.6\}$$

Όπου  $P'_p = \frac{P_p}{P_p^{sat}}$  και  $P'_s = P_s / P_p^{sat}$  και οι ισχύεις κόρου ορίζονται ως εξής:

$$P_p^{sat} = \frac{\alpha_p h \nu_p}{\sigma_p T_1}, \quad P_s^{sat} = \frac{\alpha_s h \nu_s}{\sigma_s T_1} \quad \{3.7\}$$

Οι ισχύεις άντλησης και σήματος αλλάζουν σ' όλο το μήκος του ενισχυτή λόγω της απορρόφησης, της διεγερμένης μετάδοσης και της αυθόρμητης μετάδοσης. Αν αγνοήσουμε την συνεισφορά της αυθόρμητης μετάδοσης, οι  $P_p$  και  $P_s$  ικανοποιούν την σχέση:

$$\frac{dP_s}{dz} = \sigma_s(N_2 - N_1) - aP_s, \quad \frac{dP_p}{dz} = \sigma_p N_1 - a'P_p \quad \{3.8\}$$

Όπου  $a_s = \sigma_s N_1$  και  $a_p = \sigma_p N_1$  δίνουν την απορρόφηση της απαγόμενης-πρόσμειξης, ενώ τα  $a$  και  $a'$  την απώλεια στις οπτικές ίνες, στα μήκη κύματος του σήματος και της άντλησης αντίστοιχα. Η απώλεια στις οπτικές ίνες πυριτίου μπορεί να αγνοηθεί για τυπικά μήκη ενισχυτών της τάξης 10-20m. Ωστόσο θα πρέπει να την συμπεριλάβουμε στην περίπτωση της κατανεμημένης ενίσχυσης.

Αν αντικαταστήσουμε με τα  $N_1 = N_t - N_2$  και  $N_2$ , οι ισχύς σήματος και άντλησης βλέπουμε ότι ικανοποιούν τις σχέσεις:

$$\frac{dP_s}{dz} = \frac{(P'_p - 1)a_s P_s}{1 + 2P'_s + P'_p} - aP_s, \quad \{3.9\}$$

$$\frac{dP_p}{dz} = \frac{(P'_s - 1)a_p P_p}{1 + 2P'_s + P'_p} - aP'_s \quad \{3.10\}$$

Οι εξισώσεις αυτές διέπουν την αύξηση της ισχύος σήματος στο εσωτερικό του EDFA και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μελετήσουμε τα χαρακτηριστικά ενίσχυσης και του μικρού και του μεγάλου σήματος. Οι προβλέψεις τους συμφωνούν κατά πολύ με τα πειράματα αρκεί η ενισχυμένη αυθόρμητη μετάδοση να παραμείνει αμελητέα.

Ένα μειονέκτημα του προηγούμενου προτύπου είναι ότι οι ενεργές διατομές απορρόφησης και μετάδοσης θεωρούνται ίδιες και για την δέσμη άντλησης και για την δέσμη σήματος. Από την **Εικόνα 3.8** ότι οι ενεργές αυτές διατομές γενικά διαφέρουν. Στην **Εικόνα 3.7** φαίνεται η υπολογισμένη απολαβή μικρού σήματος στα 1.55 μm σαν συνάρτηση ισχύος άντλησης και του μήκους του ενισχυτή χρησιμοποιώντας τις τυπικές τιμές των παραμέτρων. Για δεδομένο μήκος του ενισχυτή  $L$ , η απολαβή του ενισχυτή αρχικά αυξάνεται εκθετικά με την ισχύ άντλησης, αλλά η αύξηση αυτή γίνεται μικρότερη όταν η ισχύς άντλησης υπερβαίνει μια συγκεκριμένη τιμή. Για δεδομένη ισχύ άντλησης, η απολαβή του ενισχυτή γίνεται μέγιστη στη μέγιστη τιμή του  $L$  και πέφτει απότομα όταν το  $L$  υπερβαίνει την βέλτιστη αυτή τιμή. Ο λόγος είναι ότι το τελευταίο τμήμα του ενισχυτή δεν υφίσταται άντληση και απορροφά το ενισχυμένο σήμα.

Αφού η βέλτιστη τιμή του  $L$  εξαρτάται από την ισχύ άντλησης  $P_p$ , είναι απαραίτητο να επιλέξουμε κατάλληλα τόσο το  $L$  όσο και την  $P_p$ . Το παρακάτω σχήμα δείχνει ότι για άντληση 1.45μm μπορούμε να πάρουμε απολαβή 35dB με ισχύ άντλησης 5mW για  $L=30m$ . Μπορούμε να σχεδιάσουμε ενισχυτές έτσι ώστε να πάρουμε υψηλή απολαβή για μήκος ενισχυτή μόλις μερικά μέτρα.

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στο σχήμα παρατηρήθηκαν σε όλους τους EDFA. Η συμφωνία μεταξύ θεωρίας και πειράματος είναι γενικά πολύ αρκετά καλή. Η ισχύς κόρου της εξόδου είναι μικρότερη από την ισχύ άντλησης της εξόδου που περιμένουμε όταν δεν έχουμε σήμα. Μπορεί να ποικίλει πολύ ανάλογα με τον σχεδιασμό του EDFA, με τυπικές τιμές 10mW. Για αυτό το λόγο οι στάθμες της ισχύος εξόδου γενικά περιορίζονται σε τιμές κάτω των 100mW.

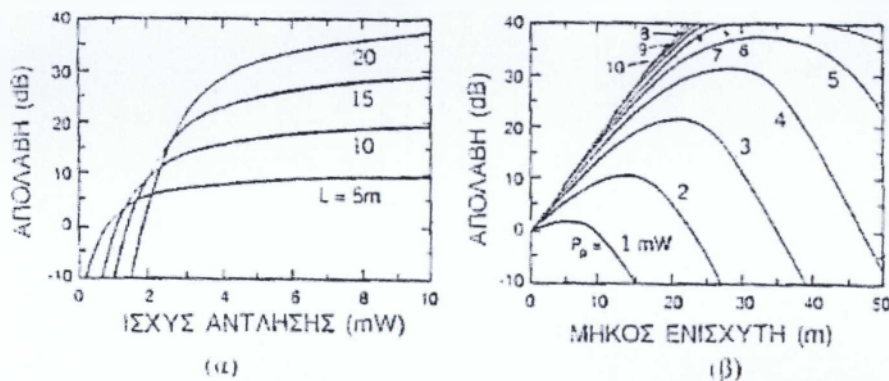
Η παραπάνω ανάλυση υποθέτει πως το κύμα άντλησης και το κύμα σήματος έχουν μορφή δέσμης CW. Στην πράξη, οι EDFA αντλούνται χρησιμοποιώντας laser

ημιαγωγού CW, αλλά το σήμα έχει την μορφή μιας σειράς παλμών, και η διάρκεια των μεμονωμένων παλμών είναι αντιστρόφως ανάλογη προς τον ρυθμό μετάδοσης bit. Όλοι οι παλμοί θα πρέπει να έχουν την ίδια απολαβή. Αυτό εμφανίζεται με φυσιολογικό τρόπο στου EDFA για παλμούς μικρότερους από μερικά ms. Ο λόγος είναι η σχετικά μεγάλη τιμή του χρόνου φθορισμού που σχετίζεται με τα διεγερμένα ιόντα ερβίου ( $T_1 \sim 10\text{ms}$ ). Όταν η χρονική κλίμακα των μεταβολών ισχύος σήματος είναι πολύ μικρότερη από τον  $T_1$ , τα ιόντα ερβίου είναι ανίκανα να ακολουθήσουν τόσο γρήγορες μεταβολές. Αφού οι ενέργειες απλού παλμού είναι τυπικά πολύ μικρότερες από την ενέργεια κόρου, οι EDFA αντιστοιχούν στη μέση ισχύ. Σαν συνέπεια ο κόρος απολαβής διέπεται από τη μέση ισχύ σήματος και η απολαβή του ενισχυτή δεν μεταβάλλεται από παλμό σε παλμό.

Σε μερικές εφαρμογές, όπως τα δίκτυα μεταγωγή πακέτων, η ισχύς σήματος μπορεί να μεταβάλλεται σε χρονική κλίμακα συγκρίσιμη με το  $T_1$ . Η απολαβή του ενισχυτή στη περίπτωση αυτή πιθανότατα εξαρτάται από τον χρόνο, χαρακτηριστικό ανεπιθύμητο όσον αφορά στη απόδοση του συστήματος. Μπορούμε να υλοποιήσουμε έναν ενσωματωμένο μηχανισμό ελέγχου απολαβής, που διατηρεί την απολαβή του ενισχυτή σε σταθερή τιμή. Η βασική ιδέα είναι να κάνουμε τον EDFA να ταλαντώνεται.

Σε ελεγχόμενο μήκος κύματος έξω από τα όρια που μας ενδιαφέρουν (τυπικά κάτω από  $1.5\mu\text{m}$ ). Αφού η απολαβή παραμένει σταθερή στη τιμή κατωφλίου για ένα laser, το σήμα ενισχύεται με τον ίδιο συντελεστή, παρά τις μεταβολές της ισχύος.

Σε μία υλοποίηση της τεχνικής αυτής ένας EDFA υποχρεώθηκε να ταλαντωθεί στα  $1.48\mu\text{m}$  χρησιμοποιώντας δύο σχάρες διάθλασης οπτικών ινών Bragg, οι οποίες λειτουργούν σαν κάτοπτρα υψηλής ανακλαστικότητας στα δύο άκρα του ενισχυτή.



**Εικόνα 3.7:** Η απολαβή του μικρού σήματος σε συνάρτηση με (α) την ισχύ άντλησης και (β) το μήκος του ενισχυτή για ένα EDFA που υποθέτουμε ότι αντλείται στα  $1.48\mu\text{m}$ .

Ο EDFA έφερε επανάσταση στις οπτικές επικοινωνίες επειδή είναι αμιγώς οπτικός, συμβατός με ίνες, παρέχει μεγάλο bandwidth ( $20\sim 70\text{ nm}$ ), υψηλό κέρδος ( $20\sim 40\text{ dB}$ ), υψηλή ισχύ εξόδου ( $>200\text{ mW}$ ), αναισθησία στο bit rate, ρύθμιση της ισχύος και του μήκους κύματος, χαμηλά επίπεδα θορύβου ( $\text{NF} < 5\text{ dB}$ ) και χαμηλή διαστρέβλωση.

## 3.6.7.6 Ο θόρυβος και υποβάθμιση του οπτικού SNR

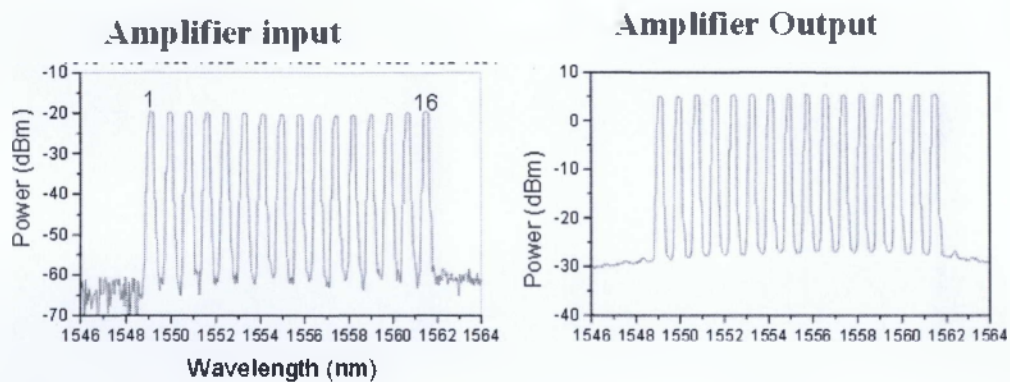
Η ενίσχυση του EDFA συνοδεύεται από ενισχυμένη αυθόρμητη εκπομπή (ASE). Αυτό το ASE προσθέτει θόρυβο που υποβαθμίζει τα ενισχυμένα σήματα. Το noise figure ενός EDFA δίνεται από τη σχέση:

$$NF \cong 2n_{sp} (G - 1)/G + 1/G \approx 2n_{sp} , \{3.11\}$$

οπού  $n_{sp}$ , είναι ο παράγοντας αυθόρμητης εκπομπής που υποδηλώνει τις σχετικές ισχύεις της αυθόρμητης και διεγειρομένης εκπομπής και μπορεί να προσδιοριστεί από τη σχέση:

$$n_{sp} = P_{ASE} / (h\nu_s * \Delta\nu * (G-1)) , \{3.12\}$$

Το  $P_{ASE}$  είναι η ισχύς ASE σε μια πόλωση σε bandwidth  $\Delta\nu$  και  $h\nu_s$  είναι η ενεργεία του φωτονίου. Το αποτέλεσμα της ενίσχυσης στο οπτικό SNR φαίνεται στην **Εικόνα 3.8**.



**Εικόνα 3.8:** Αποτελέσματα ενίσχυσης σε οπτικό SNR.

Ακόμα και για ιδανικούς ενισχυτές, οπού ο παράγοντας αντιστροφής πληθυσμού είναι 1 το noise figure είναι 3dB. Για τους EDFA, το NF είναι περίπου 4-7 dB. Με τις απώλειες κουπλαρίσματος στην αρχή λόγω του κακού ταιριάσματος μεταξύ της ίνας ερβίου (τυπικά 2 – 4  $\mu\text{m}$  διάμετρος) και των ιών μετάδοσης (τυπικά 8 – 10  $\mu\text{m}$ ), το NF είναι χειρότερο.

## 3.6.7.7 Ανάπτυξη ASE σε Σύστημα με Ενίσχυση

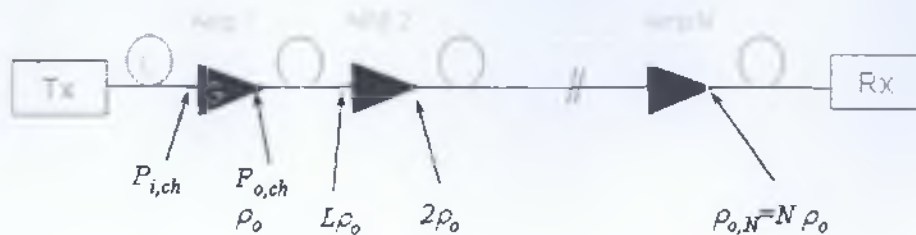
Θεωρούμε ένα σύνδεσμο που διαρθρώνεται σε ίσα τμήματα όπου το κέρδος αντισταθμίζει την απώλεια,  $L=1/G$ , όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3.9**. Η φασματική πυκνότητα του ASE είναι:

$$\rho_o = h\nu(GF - 1) \cong h\nu GF.$$

Το συνολικό noise figure N ενισχυτών συνδεδεμένων σε σειρά είναι:



$$F_{\text{sys}} = \text{SNR}_0 / \text{SNR}_1 * \text{SNR}_1 / \text{SNR}_2 * \text{SNR}_2 / \text{SNR}_3 \dots \text{SNR}_{N-1} / \text{SNR}_N$$



**Εικόνα 3.9:** Σύνδεσμος με ίσα τμήματα όπου τα κέρδος αντισταθμίζει τις απώλειες

Το μήκος κύματος άντλησης καθορίζει τα χαρακτηριστικά του ενισχυτή σε σχέση με το θόρυβο ASE, την ισχύ και την αποδοτικότητα. Οι εμπορικοί EDFA's γενικά έχουν διόδους άντλησης στα 1480 nm εξαιτίας της μεγάλης τους αξιοπιστίας. Αυτοί οι ενισχυτές επιδεικνύουν υψηλές τιμές ισχύος εξόδου. Ωστόσο απαιτούν μεγάλης ισχύος laser άντλησης για να επιτύχουν χαμηλά noise figures. Απ' την άλλη μεριά οι EDFA's με μήκος κύματος άντλησης στα 980 nm χαρακτηρίζονται από λίγο ASE και χαμηλό θόρυβο επειδή παράγουν μεγαλύτερο επίπεδο αντιστροφής, αλλά η αξιοπιστία τους είναι επαρκής μόνο για γήινες εφαρμογές και όχι υποθαλάσσιες.

### 3.6.7.8 Μη ομοιόμορφο φάσμα κέρδους

Το bandwidth κέρδους του EDFA κυμαίνεται μεταξύ 1525 – 1565 nm. Το φάσμα κέρδους δεν είναι επίπεδο και η μορφή του αλλάζει με το επίπεδο. Οι πληθυσμοί σε διαφορετικά επίπεδα είναι διαφορετικοί έχοντας σαν αποτέλεσμα την εξάρτηση του κέρδους απ' το μήκος κύματος. Η μορφή του κέρδους είναι σημαντική ειδικά σε συστήματα WDM, όπου κάθε κανάλι λαμβάνει διαφορετική ενίσχυση. Αυτό το φαινόμενο ενδυναμώνεται όταν πολλοί EDFA's βρίσκονται σε αλληλουχία και αυτό το μη ομοιόμορφο κέρδος αυξάνεται. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επιτευχθεί εξομάλυνση του κέρδους:

- Προενίσχυση του εισερχόμενου σήματος με ρύθμιση των ισχύων των διαφόρων καναλιών του πομπού έτσι ώστε το φάσμα ισχύος του καναλιού να είναι συμπληρωματικό του κέρδους ή του φάσματος SNR της αλυσίδας ενίσχυσης. Με αυτό τον τρόπο κάποιος μπορεί να εξισώνει είτε την εξερχόμενη ισχύ ή το SNR στην έξοδο της αλυσίδας ενίσχυσης.
- Χρησιμοποιώντας οπτικά φίλτρα μέσα στην αλυσίδα για να διορθώσει την καμπύλη κέρδους. Οι παραπάνω μέθοδοι εξισώνουν το κέρδος των EDFA's με παθητικό τρόπο. Αυτή η προσέγγιση προϋποθέτει ότι η ακριβής μορφή του φάσματος κέρδους είναι γνωστή και δεν μπορεί να ανταποκριθεί στις δυναμικές αλλαγές στο δίκτυο όπως οι απώλειες στις ίνες η δρομολόγηση η αναδιαμόρφωση κτλ.

- Χρησιμοποιώντας EDFA έκχυσης φθορίου. Αυτοί οι ενισχυτές είναι ρεαλιστικά επίπεδοι. Απ' την άλλη αυτοί οι είναι πιο θορυβώδεις, ευαίσθητοι και δύσκολο να συγκολληθούν με τυπικές ίνες, ενώ μπορούν να αντληθούν μόνο στα 1480 nm λόγω του ESA στα 980 nm.
- Το κέρδος ενός EDFA εξαρτάται από το βαθμό που κορένεται. Δεδομένου ότι ο χρόνος ανάκαμψης αυτού του ενισχυτή είναι της τάξης των ms μπορούν να λάβουν χώρα παροδικά φαινόμενα κέρδους, οδηγώντας σε διακύμανση του κέρδους. Το παροδικό penalty εξαρτάται από το ρυθμό δεδομένων, τον αριθμό των EDFAs και τον αριθμό των καναλιών. Τα φαινόμενα αυτά συμβαίνουν σε περιπτώσεις όπως το άνοιγμα ενός καναλιού, επαναδρομολόγησης αναδιαμόρφωσης του δικτύου και αστοχία κάποιου συνδέσμου.
- Ο χρόνος αυτών των φαινομένων ελαττώνεται σε ms για μεγάλο αριθμό από αλληλουχία EDFAs. Με τη χρήση οπτικού εξασθενητή αποκατάστασης ή με τη χρήση ενός καναλιού ελέγχου με adding/dropping όταν ένα κανάλι είναι dropped/added αυτά τα παροδικά φαινόμενα μπορούν να μειωθούν σημαντικότερα.

### 3.6.7.9 Βέλτιστο μήκος ίνας ερβίου

Όπως έχει αναφερθεί, σε έναν ενισχυτή EDFA το μέσο που παρέχει την ενίσχυση είναι η ίνα Ερβίου. Η πηγή των 980 nm είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία συνθηκών πληθυσμιακής αντιστροφής κατά μήκος της ίνας. Ιδανικά, για δεδομένη τιμή της ισχύος άντλησης, θα πρέπει να δημιουργούνται συνθήκες πληθυσμιακής αντιστροφής σε όλο το μήκος της ίνας. Όταν συμβαίνει αυτό, λέμε ότι το μήκος της ίνας είναι βέλτιστο για τη συγκεκριμένη τιμή της ισχύος άντλησης και θεωρητικά στην έξοδο της ίνας δεν ανιχνεύεται ισχύς στην περιοχή των 980 nm. Για μικρότερες του βέλτιστου τιμές του μήκους της ίνας δεν εκμεταλλευόμαστε όλη την ισχύ άντλησης και έτσι δεν παίρνουμε τη μέγιστη δυνατή ενίσχυση. Για μεγαλύτερες τιμές η ισχύς άντλησης δεν επαρκεί για τη δημιουργία συνθηκών πληθυσμιακής αντιστροφής σε όλο το μήκος της ίνας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το κομμάτι της ίνας όπου δεν έχουν δημιουργηθεί συνθήκες πληθυσμιακής αντιστροφής να απορροφά μέρος της ισχύος του σήματος προς ενίσχυση, συμβάλλοντας έτσι στο συνολικό κέρδος με απώλειες. Όπως είναι λογικό, αύξηση της ισχύος άντλησης οδηγεί σε αύξηση του βέλτιστου μήκους της ίνας και κατά συνέπεια σε μεγαλύτερο κέρδος.

### 3.6.8 Ενισχυτές οπτικών ινών με εμπλουτισμένων με pr (πρασεοδύμιο<sup>4</sup>)

Οι EDFA μπορούν χρησιμοποιηθούν μόνο για τα οπτικά συστήματα που λειτουργούν γύρω στα 1.55μm. Ωστόσο, το παγκόσμιο δίκτυο τηλεπικοινωνιών περιέχει περισσότερα από 50 εκατομμύρια χιλιόμετρα συνηθισμένων οπτικών ινών, των οποίων η απόδοση βελτιώνεται για λειτουργία στα 1.33μm. επιπλέον, Η

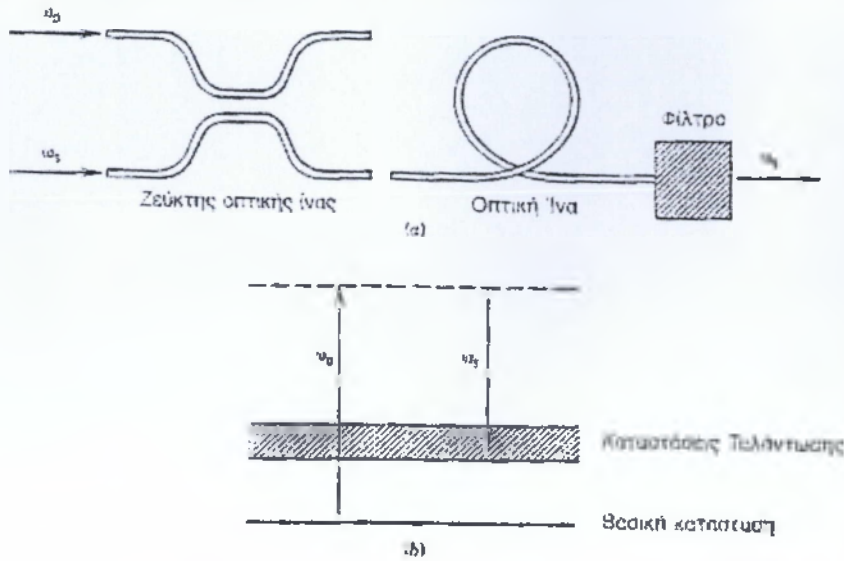
<sup>4</sup> Το πρoσινoδύμιο είναι ελατό μέταλλο, ασημόχρωμο αλλά τα άλατά του είναι συνήθως πράσινα, των οποίων όμως τα διαλύματα παρουσιάζουν ένα λiαν χαρακτηριστικό και έντονο φάσμα απορρόφησης, χρησιμεύουν σε σμάλτα και σε χρωματιστά γυαλιά

κατανομή εικόνας από την βιομηχανία CATV διεξάγεται κυρίως στα 1.33 $\mu\text{m}$ . Είναι ολοφάνερο πως αυτά τα οπτικά συστήματα θα βελτιώνονταν αν υπήρχαν ενισχυτές οπτικών ινών που λειτουργούσαν γύρω στα ένα 1.3 $\mu\text{m}$ . Σημαντική προσπάθεια, κατευθύνθηκε προς την ανάπτυξη οπτικών ενισχυτών ευρείας ζώνης συχνοτήτων που παρέχουν απολαβή στη συγκεκριμένη περιοχή μήκους κύματος. Ο εμπλουτισμός στις οπτικές ίνες πυριτίου με ιόντα νεοδυμίου παρέχει ενισχυτή οπτικών ινών ικανό να ενισχύει στη φασματική περιοχή των 1.30-1.36 $\mu\text{m}$ . Ωστόσο, ανεπιθύμητες επιδράσεις όπως η απορρόφηση διεγερμένης κατάστασης και ανταγωνιστικές ακτινοβόλες μεταβάσεις έχουν περιορίσει την απόδοση των ενισχυτών αυτών. Τελικά η απόδοση βελτιώνεται σημαντικά αν προσθέσουμε ιόντα  $\text{Nd}^{3+}$  σε μία φθοριούχο οπτική ίνα. Η συνηθισμένη οπτική ίνα που χρησιμοποιείται για τον σκοπό αυτό είναι γνωστή σαν ZBLAN, ακρόνυμο που σχηματίζεται από το πρώτο γράμμα των οπτικών υλικών που χρησιμοποιούνται για την βιομηχανική κατασκευή του.

Λόγω της σχετικά φτωχής απόδοσης των ενισχυτών οπτικών ινών εμπλουτισμένων με Nd, αναπτύχθηκαν ενισχυτές οπτικών ινών που λειτουργούν στα 1.3 $\mu\text{m}$  εμπλουτίζοντας οπτικές ίνες ZBLAN με ιόντα προσοδυμίου, που παρουσιάζει συντονισμό 1.32 $\mu\text{m}$ . Οι ενισχυτές αυτοί απαιτούν άντληση στην περιοχή μήκους κύματος γύρω στα 1.01 $\mu\text{m}$ .

### 3.6.9 Ενισχυτές οπτικών ινών Raman

Ένας ενισχυτής Raman χρησιμοποιεί διεγερμένη σκέδαση Raman (SRS) που εμφανίζεται στις ίνες πυριτίου όταν μία έντονη δέσμη άντλησης μεταδίδεται μέσω αυτής. Ο SRS διαφέρει από την διεγερμένη μετάδοση ενός άλλου πανομοιότυπου φωτονίου χωρίς απώλεια της ενέργειας του, στην περίπτωση του SRS το προσπίπτον φωτόνιο άντλησης δίνει την ενέργεια του για να δημιουργήσει ένα άλλο φωτόνιο μειωμένης ενέργειας και χαμηλότερης συχνότητας (ανελαστική σκέδαση). Η υπόλοιπη ενέργεια απορροφάται από το μέσο με την μορφή μοριακών δονήσεων(οπτικά φωτόνια). Επομένως, οι ενισχυτές οπτικών ινών Raman θα πρέπει να αντληθούν οπτικά για να δώσουν απολαβή αντίθετα με τα SLA, τα οποία μπορούν να υποστούν ηλεκτρική άντληση. Μια σημαντική διαφορά με τα SLA είναι ότι η πληθυσμιακή αντιστροφή δεν είναι απαραίτητα για τους ενισχυτές οπτικών ινών Raman. Στην πραγματικότητα, ο SRS είναι ένα μη συντονισμένο, μη γραμμικό φαινόμενο που δεν απαιτεί πληθυσμιακή μεταφορά μεταξύ των ενεργειακών σταθμών. Η **Εικόνα 3.10** παρουσιάζει σχηματικά έναν ενισχυτή οπτικών ινών Raman καθώς και την τεχνική του ενεργειακού επιπέδου. Η άντληση και οι δέσμες του σήματος σε συχνότητες  $\omega_p$  και  $\omega_s$  εκπέμπονται στην οπτική ίνα μέσω ενός ζεύκτη οπτικών ινών WDM. Η ενέργεια μεταφέρεται από τη δέσμη άντλησης στη δέσμη σήματος μέσω του SRS, αφού οι δέσμες μεταδίδονται από κοινού σε όλο το μήκος της οπτικής ίνας. Οι δέσμες άντλησης και σήματος μπορούν επίσης να εκτοξευτούν με τέτοιο τρόπο ώστε να μεταδίδονται με αντίθετο τρόπο στο εσωτερικό της οπτικής ίνας.



**Εικόνα 3.10:** Α) ενισχυτής οπτικών ινών Raman και β) τεχνική ενεργειακού σταθμού σχεπικά με το SRS

Η προέλευση του κόρου απολαβής στους ενισχυτές οπτικών ινών Raman διαφέρει αρκετά από τα SLA. Αφού η άντληση παρέχει ενέργεια για την ενίσχυση του σήματος, αρχίζει να αραιώνεται καθώς αυξάνεται η ισχύς του σήματος. Μία μείωση στην ισχύ άντλησης μειώνει την οπτική απολαβή, η μείωση αυτή ονομάζεται απολαβή κόρου.

Μια πρώιμη εφαρμογή των ενισχυτών Raman ήταν σαν προενισχυτής για να βελτιώσει την ευαισθησία του δέκτη. Η βελτίωση περιορίστηκε από τον θόρυβο του ενισχυτή που σχετίζεται με την αυθόρμητη σκέδαση Raman, η οποία συνοδεύει την διαδικασία της ενίσχυσης έτσι κι αλλιώς. Παρόλο που ο δείκτης θορύβου των ενισχυτών αυτών έχει σχεδόν ιδανική τιμή (3dB), ο θόρυβος του δέκτη ενισχύεται λόγω μιας αύξησης του θορύβου βολής απλώς επειδή εμφανίζεται αυθόρμητη σκέδαση Raman σε μία μεγάλη περιοχή συχνοτήτων (>5THz). Η απόδοση μπορεί να βελτιωθεί αν περάσουμε το ενισχυμένο σήμα μέσα από το οπτικό φίλτρο. Το μεγάλο εύρος ζώνης των ενισχυτών οπτικών ινών Raman χρησιμεύει στην ταυτόχρονη ενίσχυση πολλών καναλιών.

Το μεγάλο εύρος ζώνης των ενισχυτών των οπτικών ινών Raman τους καθιστά κατάλληλους για ενίσχυση μικρών οπτικών παλμών. Πιο συγκεκριμένα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ξεπεράσουμε την απώλεια οπτικών ινών στα συστήματα επικοινωνίας σολιτονίων. Ένα άλλο χαρακτηριστικό της προσέγγισης αυτής είναι ότι η ίδια οπτική ίνα που χρησιμοποιείται για την μετάδοση του σήματος, χρησιμοποιείται και για την ενίσχυση του. Η ιδιότητα αυτή μερικές φορές ονομάζεται κατανεμημένη ενίσχυση, σε αντίθεση με την συγκεντρωμένη ενίσχυση που παρέχουν άλλοι ενισχυτές. Το βασικό μειονέκτημα των ενισχυτών οπτικών ινών Raman όσον αφορά τις εφαρμογές των οπτικών συστημάτων, είναι ότι απαιτείται ένα laser υψηλής ισχύος για την άντληση. Τέτοια laser είναι πολύ ογκώδη για εφαρμογή στις επικοινωνίες. Ειδικά μετά την αύξηση του ενισχυτή οπτικών ινών εμπλουτισμένου με έρβιο, οι ενισχυτές Raman χρησιμοποιούνται σπάνια στην περιοχή μήκους κύματος 1,55μm. Η κατάσταση μπορεί να αλλάξει με την διάθεση συμπαγών laser ημιαγωγών υψηλής ισχύος.

Η χρήση ενισχυτών οπτικών ινών Raman στην περιοχή των 1,3μm προσέλαυσε αρκετά την προσοχή κατά την δεκαετία του 1990, απλά επειδή οι ιδιότητες των ενισχυτών εμπλουτισμένης ίνας των 1,3μm είναι συχνά κάθε άλλο παρά ικανοποιητικές. Οι ενισχυτές οπτικών ινών Raman 1,3μm με διαδοχικούς SRS αναπτύχθηκαν έχοντας κατά νου πολλές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης και της χρήσης τους από την βιομηχανία CATV. Μπορούν να παρουσιάσουν απολαβές μέχρι και 40dB με δείκτη θορύβου περίπου 4dB και είναι αρκετά κατάλληλοι για οπτικούς προενισχυτές και χρησιμοποιούνται στους οπτικούς δέκτες υψηλής ταχύτητας. Οι ενισχυτές οπτικών ινών Raman 1,3μm μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να αναβαθμίσουν την ικανότητα μετάδοσης των υπάρχοντων ζεύξεων οπτικών ινών από τα 2,5 στα 10 Gb/s.

### 3.6.10 Ενισχυτές ινών οπτικών Brillouin

Η αρχή λειτουργίας των ενισχυτών οπτικών ινών Brillouin είναι ουσιαστικά η ίδια με εκείνη των ενισχυτών οπτικών ινών Raman, εκτός του ότι η οπτική απολαβή παρέχεται από την διεγερμένη σκέδαση Brillouin(SBS) αντί του SRS. Οι ενισχυτές των οπτικών ινών Brillouin υφίσταται επίσης οπτική άντληση και ένα μέρος της ισχύος άντλησης μεταφέρεται στο σήμα μέσω του SBS. Από φυσική άποψη κάθε φωτόνιο ενέργειας άντλησης  $\omega_p$

Χρησιμοποιεί την περισσότερη ενέργεια του για να δημιουργήσει ένα φωτόνιο ενέργειας σήματος  $\omega_s$ , ενώ η υπόλοιπη ενέργεια χρησιμοποιείται για να διεγείρει ένα ακουστικό φωτόνιο. Κλασικά η δέσμη άντλησης διασκορπίζεται από ένα ακουστικό κύμα που μετακινείται με την βοήθεια του μέσου και με την ταχύτητα του ήχου. Παρά την τυπική ομοιότητα των SBS και SRS, ο SBS διαφέρει από τον SRS σε τρία βασικά σημεία τα οποία επηρεάζουν σημαντικά την λειτουργία των ενισχυτών οπτικών ινών Brillouin:

- Η ενίσχυση εμφανίζεται μόνο όταν η δέσμη σήματος διαδίδεται σε κατεύθυνση αντίθετη προς εκείνη της δέσμης άντλησης (διάταξη ανάστροφης άντλησης).
- Η ολίσθηση Stokes για τον SBS είναι μικρότερη ( $10^{-5}$  GHz) κατά τρεις τάξεις μεγέθους σε σύγκριση με εκείνη του SRS κι εξαρτάται από την συχνότητα άντλησης.
- Το φάσμα απολαβής Brillouin είναι υπερβολικά στενό με εύρος ζώνης <100MHz.

Οι διαφορές αυτές οφείλονται σε μία σχετικά μικρή τιμή του λόγου  $v_A/c$  ( $10^{-5}$ ), όπου  $v_A$  είναι η ακουστική ταχύτητα στο πυρίτιο και  $c$  η ταχύτητα του φωτός. Το στενό εύρος ζώνης των ενισχυτών οπτικών ινών Brillouin τους καθιστά ακατάλληλους για την ενίσχυση των οπτικών καναλιών στα οπτικά συστήματα. Το ίδιο χαρακτηριστικό μπορεί ωστόσο να χρησιμοποιηθεί για ορισμένες εφαρμογές στα σύμφωνα και πολυκαναλικά συστήματα επικοινωνίας.

Όπως και στην περίπτωση του SRS, η απολαβή ενισχυτών οπτικών ινών Brillouin επιφέρει κόρο όταν το ενισχυμένο σήμα αρχίζει να αραιώνει την άντληση. Παρόλο που ο SBS στις οπτικές ίνες παρατηρήθηκε το 1972 και μελετήθηκε σαν μη γραμμικό φαινόμενο που περιορίζει την ισχύ του σήματος στα συστήματα επικοινωνίας οπτικών ινών, η χρήση του για την κατασκευή ενισχυτών οπτικών

ινών Brillouin δεν προσέλκυσε αρκετή προσοχή λόγω του στενού εύρους ζώνης της απολαβής που σχετίζεται με τους ενισχυτές αυτού του είδους. Αφού οι συχνότητες άντλησης και σήματος θα πρέπει να διαφέρουν σχεδόν πλήρως από την ενίσχυση Brillouin, που αλλάζει από οπτική ίνα σε οπτική ίνα, απαιτείται ένα συντονισμένο laser άντλησης με στενό εύρος ζώνης γραμμής (1 MHz)

Οι ενισχυτές οπτικών ινών Brillouin μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν προενισχυτές για να βελτιώσουν την ευαισθησία του δέκτη. Ο δείκτης θορύβου των ενισχυτών ινών Brillouin είναι αρκετά μεγαλύτερος (>15dB) λόγω του μεγάλου πληθυσμού των ακουστικών φωτονίων σε θερμοκρασία δωματίου και περιορίζει την χρησιμότητα τους σαν προενισχυτές. Η χρήση τους σαν ενισχυτές ισχύος ή σαν ενισχυτές σε σειρά επίσης περιορίζεται λόγω του στενού εύρους ζώνης και της μικρής ισχύος κόρου. Το στενό εύρος ζώνης των ενισχυτών οπτικών ινών Brillouin μπορεί να χρησιμοποιηθεί προς όφελος των σύμφωνων και πολυκαναλικών οπτικών συστημάτων. Στην περίπτωση των σύμφωνων συστημάτων επικοινωνίας, μπορούμε να διεξάγουμε με ομόδυνη ανίχνευση χωρίς να απαιτεί τοπικό ταλαντωτή κλειδώματος φάσης στον δέκτη. Η βασική ιδέα είναι η επιλεκτική ενίσχυση του οπτικού φέροντος σήματος, ενώ δεν ενισχύει την διαμόρφωση των πλευρικών ζωνών συχνοτήτων. Το ενισχυμένο φέρον λειτουργεί σαν τοπικός ενισχυτής, του οποίου η φάση ασφαρίζεται αυτόματα στη φάση του μεταδιδόμενου φέροντος. Για τον σκοπό αυτό η ενίσχυση Brillouin είναι ιδανική λόγω του στενού εύρους ζώνης.

Ένα κανάλι μπορεί να ενισχυθεί επιλεκτικά μέσω της ενίσχυσης Brillouin εκτοξεύοντας μία δέσμη άντλησης στο άκρο του δέκτη έτσι ώστε να μεταδίδεται στο εσωτερικό της οπτικής ίνας σε κατεύθυνση αντίθετη προς εκείνη του πολυκαναλικού οπτικού συστήματος. Η συχνότητα άντλησης ρυθμίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι μεγαλύτερη από εκείνη του επιλεγόμενου καναλιού κατά την ολίσθηση Brillouin ακριβώς. Διαφορετικά κανάλια μπορούν να ενισχυθούν επιλεκτικά συντονίζοντας το laser άντλησης. Το κύριο μειονέκτημα αυτής της επιλογής καναλιού είναι ότι ο ρυθμός μετάδοσης bit περιορίζεται στα περίπου 100Mb/s, αφού το φάσμα του καναλιού θα πρέπει να βρίσκεται μέσα στο εύρος ζώνης του φάσματος απολαβής Brillouin. Μπορεί να αυξηθεί διευρύνοντας το φάσμα άντλησης, αφού τότε αυξάνεται το ζώνης της απολαβής, παρόλο που μειώνεται η μέγιστη απολαβή.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> ΟΠΤΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ

### 4.1 Εισαγωγή

Ένα οπτικό φίλτρο είναι μία συσκευή, η οποία είναι ευαίσθητη στο μήκος κύματος και έχει τη δυνατότητα να επιλέγει ένα σήμα από τα πολλά που έχουν πολυπλεχτεί μαζί. Τα φίλτρα αυτά συνήθως περιέχουν κοίλους αντηχητές (cavity-like resonators), το μήκος των οποίων ορίζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε μετά την είσοδο σε μία κοιλότητα από τη μία πλευρά και μετά από πολλαπλές ανακλάσεις από τα άκρα της κοιλότητας, μόνο το φως που έχει ένα περιορισμένο μήκος κύματος φεύγει από την άλλη πλευρά. Στην ουσία, οι πολλαπλές ανακλάσεις σε αυτή τη στενή ζώνη προκαλούν ενίσχυση του σήματος προς την κατεύθυνση διάδοσης μέσα στην κοιλότητα. Οι πολλαπλές ανακλάσεις σε όλα τα άλλα μήκη κύματος έχουν ως αποτέλεσμα να ανακλά η κοιλότητα όλα τα υπόλοιπα μήκη κύματος προς κατεύθυνση αντίθετη με αυτή της πρόσπτωσης.

Τα φίλτρα μπορεί να είναι σταθερά (fixed) ή ρυθμιζόμενα (tunable)

Η λειτουργία των φίλτρων βασίζεται στη θεωρία συμβολής. Η συμβολή ταξινομείται σε διαίρεση πλάτους και διαίρεση μετώπου κύματος. Στη διαίρεση πλάτους το φως ανακλάται και διαδίδεται στην επιφάνεια που διαχωρίζει δύο οπτικά μέσα με διαφορετικούς δείκτες διάθλασης. Οι συνιστώσες πρόσπτωσης και ανάκλασης ακολουθούν διαφορετικές διαδρομές και επανασυνδέονται συμβολομετρικά. Στην διαίρεση μετώπου κύματος το μέτωπο κύματος προέρχεται από μία μοναδική πηγή που περνά ταυτόχρονα από δύο ή περισσότερα ανοίγματα, στα οποία γίνεται περίθλαση, το καθένα από τα οποία συνεισφέρει ένα κύμα στο σημείο υπέρθεσης.

### 4.2 Χαρακτηριστικά

Ορισμένα γενικά επιθυμητά χαρακτηριστικά των οπτικών φίλτρων είναι τα εξής:

- **Χαμηλές απώλειες.** Η απώλεια ισχύος μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του οπτικού φίλτρου πρέπει να είναι χαμηλή.
- **Λειτουργία ανεξάρτητη από την πόλωση.** Εξαιτίας του φαινομένου της PMD, η πολωτική κατάσταση του σήματος μεταβάλλεται τυχαία. Αν τα χαρακτηριστικά των φίλτρων εξαρτώνται από την πολωτική κατάσταση του σήματος τότε η ισχύς του σήματος εξόδου θα παρουσιάζει τυχαίες αυξομειώσεις πράγμα που δεν είναι καθόλου επιθυμητό.
- **Ανεξαρτησία στις θερμοκρασιακές μεταβολές.** Τα χαρακτηριστικά των φίλτρων όπως το κεντρικό τους μήκος κύματος ή το εύρος 3dB της συνάρτησης μεταφοράς συνήθως εξαρτώνται και από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Η εξάρτηση αυτή πρέπει να είναι μικρή ώστε τα συστήματα WDM που υποστηρίζουν, να λειτουργούν σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιακών μεταβολών.

- **Ικανότητα σειριακής διασύνδεσης.** Η συνάρτηση μεταφοράς των φίλτρων πρέπει να είναι τέτοια ώστε τα φίλτρα να μπορούν να διασυνδεθούν σειριακά. Ιδανικά, η συνάρτηση μεταφοράς θα πρέπει να είναι ορθογώνια αλλά στην πράξη, αυτό είναι αδύνατο να επιτευχθεί.

- **Υψηλή απομόνωση από τα γειτονικά κανάλια.** Το φίλτρο θα πρέπει να αποκόπτει ικανοποιητικά τα γειτονικά μήκη κύματος ώστε να μην παρουσιάζεται διαφωνία (crosstalk) μεταξύ των καναλιών WDM. Διαφορετικά η πιθανότητα σφάλματος (όπως θα δούμε και σε επόμενο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής) αυξάνεται. \_\_

### 4.3 Ρυθμιζόμενα Οπτικά Φίλτρα και τα είδη τους

Χαρακτηρίζονται από δύο παραμέτρους: το εύρος της ρύθμισης και το χρόνο που χρειάζεται για να γίνει η ρύθμιση. Το εύρος καθορίζει τα μήκη κύματος τα οποία μπορούν να προσπελαστούν από το συγκεκριμένο φίλτρο. Όσο πιο μεγάλο είναι το εύρος, τόσο πιο πολλά κανάλια μπορεί να χειριστεί το φίλτρο.

Ο χρόνος ρύθμισης αναφέρεται στο χρόνο που απαιτείται για να ρυθμιστεί το φίλτρο από ένα μήκος κύματος σε άλλο. Για τα broadcast and select δίκτυα αυτός ο χρόνος πρέπει να είναι μικρός.

#### 4.3.1 Etalon (Fabry-Perot Filters ή Interferometers)

Πρόκειται για μία κοιλότητα η οποία δημιουργείται από δύο παράλληλους καθρέφτες. Το φως εισέρχεται στην κοιλότητα και ανακλάται αρκετές φορές πάνω στους καθρέφτες. Η επιλογή του μήκους κύματος που θα διαδοθεί από την κοιλότητα γίνεται ρυθμίζοντας την απόσταση ανάμεσα στους καθρέφτες.

Η απόσταση ανάμεσα στους καθρέφτες μπορεί να ρυθμιστεί με μηχανικό τρόπο, δηλαδή με μετακίνησή τους, ή με αλλαγή του υλικού της κοιλότητας.

Ονομάζονται και Fabry-Perot Filters ή interferometers<sup>5</sup>.

#### 4.3.2 Φίλτρα ίνας Fabry-Perot με προσθήκη πιεζοηλεκτρικών στοιχείων υπό τάση

Η βασική ιδέα είναι η μεταβολή του δείκτη διάθλασης. Η χρήση των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων στηρίζεται στη χρήση του μηχανικού πλεονεκτήματος της μεταβολής των

σχετικών διαστάσεων της κοιλότητας είτε με μηχανικό τρόπο είτε με εφαρμογή τάσης.

Ο συντονισμός συνήθως επιτυγχάνεται με εφαρμογή μιας τάσης σε ένα εξωτερικό πιεζοηλεκτρικό στέλεχος. Η λεπτότητα που επιτυγχάνεται με αυτή την μέθοδο φτάνει το 350 με εσωτερικές απώλειες 1 έως 2 dB. Σήμερα η τεχνική που χρησιμοποιείται είναι η ελεγχόμενη από τάση μεταβολή του δείκτη διάθλασης. Το

<sup>5</sup> **interferometer:** συσκευή η οποία χρησιμοποιεί την αρχή της παρεμβολής των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για να κάνει μετρήσεις.



πλεονέκτημα που επιθυμείται είναι η αύξηση της περιοχής συντονισμού αλλά και η ταχύτητα συντονισμού.

### 4.3.3 Αλυσίδα Mach-Zechner

Πρόκειται για ένα interferometer, στο οποίο ένας διαχωριστής χωρίζει το εισερχόμενο κύμα σε δύο μήκη κύματος, ενώ ένας συζευκτήρας το επανασυνδιάζει στην έξοδο. Στο ένα από τα μήκη κύματος υπάρχει διακόπτης καθυστέρησης, έτσι ώστε αυτά να έχουν διαφορά φάσης στην έξοδο. Μήκη κύματος με διαφορά φάσης  $180^\circ$  δεν περνάει από το φίλτρο

### 4.3.4 Ακουστό-οπτικά φίλτρα

Τα φίλτρα αυτά έχουν πολύ γρήγορο χρόνο ρύθμισης. Δέχεται κύματα στη συχνότητα του ραδιοφώνου (radio frequency waves), τα οποία περνάνε από έναν πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, ο οποίος μετατρέπει τα ηχητικά κύματα σε μηχανικά. Τα ηχητικά κύματα αλλάζουν τον δείκτη διάθλασης του κρυστάλλου, με αποτέλεσμα αυτός να λειτουργεί σαν φράγμα. Αλλάζοντας τα RF κύματα, μπορούμε να επιλέξουμε ένα μόνο οπτικό μήκος κύματος να περάσει μέσα από το υλικό.

### 4.3.5 Ήλεκτρο-οπτικά φίλτρα

Επειδή ο χρόνος ρύθμισης των ακουστό-οπτικών φίλτρων περιορίζει από την ταχύτητα του ήχου, μπορούμε εναλλακτικά να χρησιμοποιήσουμε κρυστάλλους των οποίων οι δείκτες διάθλασης αλλάζουν με ηλεκτρικό ρεύμα. Τα ηλεκτρόδια, τα οποία βρίσκονται στον κρύσταλλο, χρησιμοποιούνται για να δώσουν ρεύμα σε αυτόν.

Το ρεύμα αλλάζει το δείκτη διάθλασης του κρυστάλλου, κάτι το οποίο επιτρέπει μόνο σε ορισμένα μήκη κύματος να περάσουν. Ο χρόνος ρύθμισης μπορεί να είναι μερικά nanosecond, αλλά το εύρος ρύθμισης είναι γύρω στα 16 nm για 10 κανάλια. Φίλτρα Υγρών Κρυστάλλων

Μοιάζουν με τα Fabry- Perot φίλτρα, αλλά η κοιλότητα τους αποτελείται από υγρούς κρυστάλλους. Ο δείκτης διάθλασης ρυθμίζεται από ηλεκτρικό ρεύμα, έτσι ώστε να επιλέγεται το επιθυμητό μήκος κύματος όπως ακριβώς γίνεται σε ένα ήλεκτρο-οπτικό φίλτρο.

Ο χρόνος ρύθμισης είναι της τάξης των microsecond και το εύρος από 30 ως 40 nm.

Απαιτούν λίγο ρεύμα, είναι φτηνά στην κατασκευή και μπορούν να διαχειριστούν μεταγωγές πακέτων σε broadcast-and-select δίκτυα.

## 4.4 Σταθερά Οπτικά Φίλτρα

Ονομάζονται και σκάρες διάθλασης (grating devices). Μπορούν να επιλέξουν ένα ή περισσότερα μήκη κύματος.

### 4.4.1 Grating Filters

Ονομάζονται και πλέγματα περίθλασης (diffraction gratings). Αποτελούνται από ένα στρώμα διαφανούς υλικού (γυαλί ή πλαστικό) με μία σειρά από παράλληλα αυλάκια.

Το φως που χτυπάει στο φίλτρο χωρίζεται σε μήκη κύματος με ανάκλαση στα αυλάκια αυτά σε διάφορες γωνίες. Σε κάποιες γωνίες επικρατεί ένα μόνο μήκος κύματος. Έτσι μπορούμε να επιλέξουμε το μήκος κύματος που επιθυμούμε βάζοντας ένα φίλτρο στη σωστή γωνία.

### 4.4.2 Thin Film Interference Filters

Μοιάζουν με τα Fiber-Bragg Gratings, αλλά κατασκευάζονται με την εναπόθεση στρωμάτων υλικών με υψηλό και χαμηλό δείκτη διάθλασης σε ένα υπόστρωμα. Είναι ασταθή στη θερμοκρασία και έχουν μεγάλη απώλεια εισαγωγής.

### 4.4.3 Φίλτρα Φράγματος Μεταγωγής

Χρησιμοποιούν ένα χαραγμένο φράγμα (blazed grating) ως περιθλόν στοιχείο (diffraction component). Η βασική ιδέα είναι η δημιουργία μιας πυκνής συστοιχίας από φωτοφωρατές και να περιθλούμε όλο το φως προς αυτή την συστοιχία. Τα φράγματα χαρακτηρίζονται από την περίοδο  $\Lambda$  ή αλλιώς χωρικό μήκος κύματος. Η ακτίνα μηδενικής τάξεως ισοδυναμεί με ανάκλαση από επίπεδο. Η ιδιότητα του φράγματος στηρίζεται την ικανότητα του να περιθλάσει διαφορετικά μήκη κύματος σε διαφορετικές γωνίες.

#### 4.4.3.1 Fiber-Bragg Gratings

Στα φίλτρα αυτά ο δείκτης διάθλασης αλλάζει περιοδικά με την επίδραση του φωτός στον πυρήνα της οπτικής ίνας. Ένα τέτοιο φίλτρο ανακλά ένα δοσμένο μήκος κύματος πίσω στην πηγή, ενώ επιτρέπει τη διέλευση των υπολοίπων. Δύο βασικά χαρακτηριστικά του είναι η ανακλαστικότητα και το φασματικό εύρος ζώνης. Συνήθως το εύρος είναι της τάξης του 0,1 nm και η ανακλαστικότητα 99%. Αν το πλέγμα εισαχθεί απευθείας στον πυρήνα της ίνας, έχουμε μικρή απώλεια εισαγωγής (insertion loss). Ένα μειονέκτημα τους όμως είναι ότι ο δείκτης διάθλασης αυξάνεται με τη θερμοκρασία.

## 4.5 Φίλτρα Διηλεκτρικών Επιστρώσεων

Τα φίλτρα διηλεκτρικών επιστρώσεων αποτελούνται από εναλλάξ, συνεχόμενα διηλεκτρικά στρώματα με μικρό και μεγάλο δείκτη διάθλασης αντίστοιχα. Κατασκευάζονται με εναπόθεση (Magnesium Fluoride και Zinc Sulphide αντίστοιχα) πάνω σε υπόστρωμα. Το καθένα από αυτά υπόστρωμα έχει πάχος ίσο με  $1/4$  του μήκους κύματος (quarter wave stack). Το ανακλώμενο φως από τα στρώματα μεγάλου δείκτη δεν υπόκειται μεταβολή της φάσης τους κατά την

ανάκλαση, ενώ τα ανακλώμενα εκ των στρωμάτων με μικρό δείκτη διάθλασης υπόκεινται σε μεταβολή της φάσης τους κατά 180°. Οι συνεχείς ανακλάσεις επανασυνδέονται ενισχυτικά στο

έμπροσθεν μέρος του φίλτρου παράγοντας μεγάλη ανακλαστικότητα σε ένα περιορισμένο εύρος ζώνης. Το εύρος ζώνης εξαρτάται από των λόγω των δεικτών διάθλασης  $nH/nL$ . Το quarter wave stack μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν υπερπυκνωτή, βαθυπερατό φίλτρο ή ακόμα και σαν αντιανακλαστική επικάλυψη. Μειονέκτημα των φίλτρων αυτών είναι οι μεγάλες σε πλάτος πλευρικές συνιστώσες της συνάρτησης μεταφοράς. Συνήθως στα εμπορικά διαθέσιμα φίλτρα χρησιμοποιούνται eighth wave stack (δηλαδή με πάχος  $\lambda/8$ ) με επιπλέον προσθήκη ενός στρώματος διηλεκτρικού με χαμηλό δείκτη στα άκρα του όλου σωρού για την καταπίεση των πλευρικών συνιστωσών. Γενικότερο μειονέκτημα αυτών των διατάξεων είναι η μικρή ανοχή στις θερμοκρασιακές μεταβολές και οι μεγάλες σχετικά απώλειες εισόδου.

### 4.6 Έλεγχος Διασποράς

Ο έλεγχος διασποράς είναι το πλέον βασικό κριτήριο για τα δίκτυα οπτικών ινών και κυρίως για τις ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων, point-to-point.

Η διασπορά στα δίκτυα καθορίζει:

- Μέγιστη δυνατή απόσταση τοποθέτησης ενιχυτών ή άλλων οπτοηλεκτρονικών διατάξεων, που εν γένει είναι ιδιαίτερα ακριβές, για την αναγέννηση του σήματος.
- Μεγιστοποίηση του αξιοποιήσιμου εύρους ζώνης.
- Καθορισμός του σημείου απόφασης στη διαδικασία φώρασης.
- Ελαχιστοποίηση ρυθμού σφαλμάτων και ενδοκαναλικού θορύβου. Σήμερα στα δίκτυα χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές για τον έλεγχο της διασποράς. Επιπλέον χρησιμοποιούνται και ίνες μετατοπισμένης διασποράς στην περιοχή μήκους κύματος 1.5  $\mu\text{m}$ .

Χρησιμοποιούνται δύο βασικές τεχνικές που σκοπό έχουν να απορροφήσουν την χρωματική διασπορά. Η πρώτη βασίζεται στα αντίθετα πρόσημα διασποράς και chirping του παλμού. Η δεύτερη τεχνική χρησιμοποιεί τα φράγματα μεταγωγής για την συμπίεση του πολυχρωματικού φάσματος σε ένα σαφώς στενότερο εύρος.

Chirping είναι η χρονική μεταβολή της συχνότητας και επάγεται με τη χρησιμοποίηση των μη γραμμικών φαινομένων σε ημιαγωγούς. Τα αντίθετα πρόσημα αλληλοαναιρούν και αντισταθμίζουν την απώλεια και την διαπλάτυνση του παλμού. Η μη γραμμικότητα οδηγεί σε chirping το μέρος του παλμού που έχει μεγαλύτερο πλάτος ενώ η διασπορά το μέρος που ο παλμός είναι πλουσιότερος σε αρμονικές δηλαδή στις μεγάλες κλίσεις. Όταν τα δύο φαινόμενα αλληλοαναιρούνται πλήρως οι παλμοί διαδίδονται χωρίς παραμόρφωση και ονομάζονται **σολιτόνια**.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

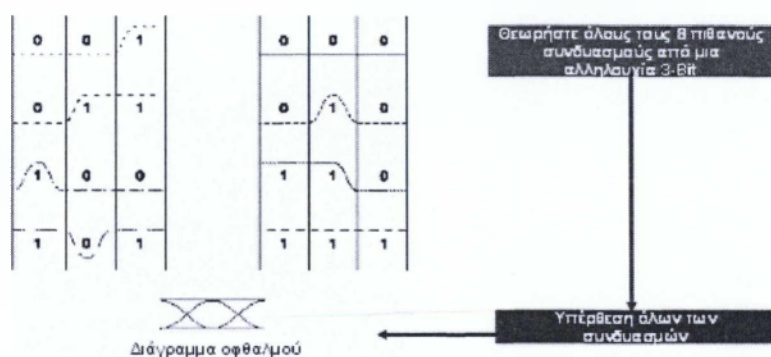
Χρησιμοποιώντας το optisystem θα παρουσιάσουμε δύο προσομοιώσεις κυκλωμάτων οπτικών ινών. Το optisystem είναι ένα ολοκληρωμένο λογισμικό που επιτρέπει στους χρήστες τους να σχεδιάσουν, να δοκιμάσουν και να προσομοιώσουν οπτικές συνδέσεις στο επίπεδο μετάδοσης των σύγχρονων οπτικών δικτύων.

Τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν μέσω γραφημάτων πινάκων και διαγραμμάτων. Συγκεκριμένα, η ποιότητα των οπτικών σημάτων αξιολογείται με δύο κυρίως τρόπους:

- Εποπτικά με την παρατήρηση διαγραμμάτων οφθαλμού (eye-diagrams)
- Με μετρήσεις ρυθμού λαθών (BER) που λαμβάνει ο δέκτης

### Διάγραμμα οφθαλμού

Οι οπτικές επικοινωνίες αναφέρονται σε ψηφιακά σήμα, μια σειρά 0 και 1. Το οφθαλμικό διάγραμμα παρέχει ένα οπτικό τρόπο ελέγχου της απόδοσης του δέκτη. Το κλείσιμο του ματιού αποτελεί ένδειξη ότι ο δέκτης δεν λειτουργεί σωστά. Το διάγραμμα οφθαλμού σχηματίζεται για μία αλληλουχία 3-bit για όλους τους 8 πιθανούς συνδυασμούς όπως στην **Εικόνα 5.1**.



**Εικόνα 5.1:** Ο τρόπος σχηματισμού ενός διαγράμματος οφθαλμού για ένα ψηφιακό σήμα 3-bit.

Για να αξιολογήσουμε την ποιότητα ενός οπτικού σήματος αρκεί να εισάγουμε τον συντελεστή ποιότητας  $Q$ . Αυτός δίνεται από την παρακάτω σχέση:

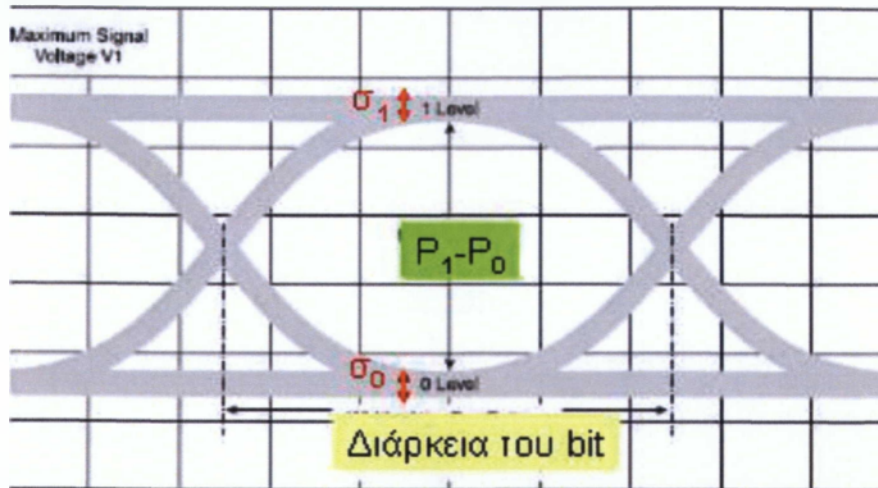
$$Q = \frac{P_1 - P_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (5.1)$$

Στη σχέση 5.1,  $P_1$  και  $P_0$  είναι η μέση ισχύς για bit 1 και 0 αντίστοιχα και  $\sigma_1$  και  $\sigma_0$  είναι η τυπική απόκλιση γύρω από τη μέση τιμή για bit 1 και 0 αντίστοιχα. Αυτό

## Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής

μπορεί να διευκρινιστεί στο διάγραμμα οφθαλμού της **Εικόνας 5.2**. Στα οπτικά συστήματα προτιμούμε ένα διάγραμμα οφθαλμού ανοιχτό και λιγότερο θόρυβο αν είναι αυτό εφικτό. Ο ρυθμός εσφαλμένων bit ( BER, bit error rate) είναι από τα βασικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν ένα διαμορφωμένο οπτικό σήμα. Ο BER είναι αντιστρόφως ανάλογος με τον παράγοντα ποιότητας Q. Αυτό φαίνεται στη σχέση 5.2.

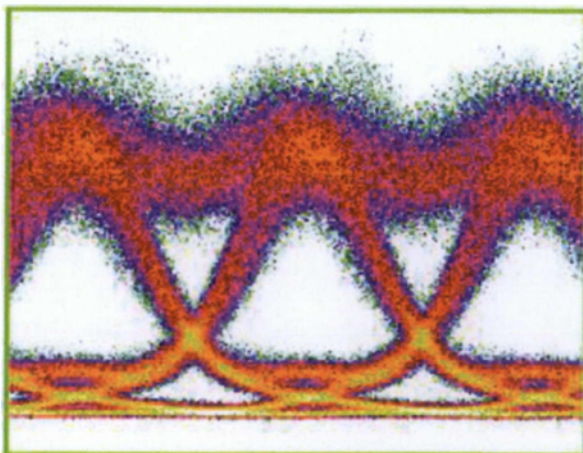
$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q\sqrt{2\pi}} \quad \{5.2\}$$



**Εικόνα 5.2:** Διάγραμμα οφθαλμού ενός διαμορφωμένου οπτικού σήματος και τα χαρακτηριστικά του.

Ο BER βελτιώνεται όσο αυξάνεται ο Q και μειώνεται σε λιγότερο από  $10^{-12}$  για  $Q > 7$ . Η ευαισθησία του δέκτη αντιστοιχεί στη μέση οπτική ισχύ για την οποία  $Q=6$ , αφού  $BER \approx 10^{-9}$  για αυτή την τιμή του Q.

Στην πραγματικότητα, τα διαγράμματα οφθαλμού μοιάζουν με αυτό της **Εικόνας 5.3**.

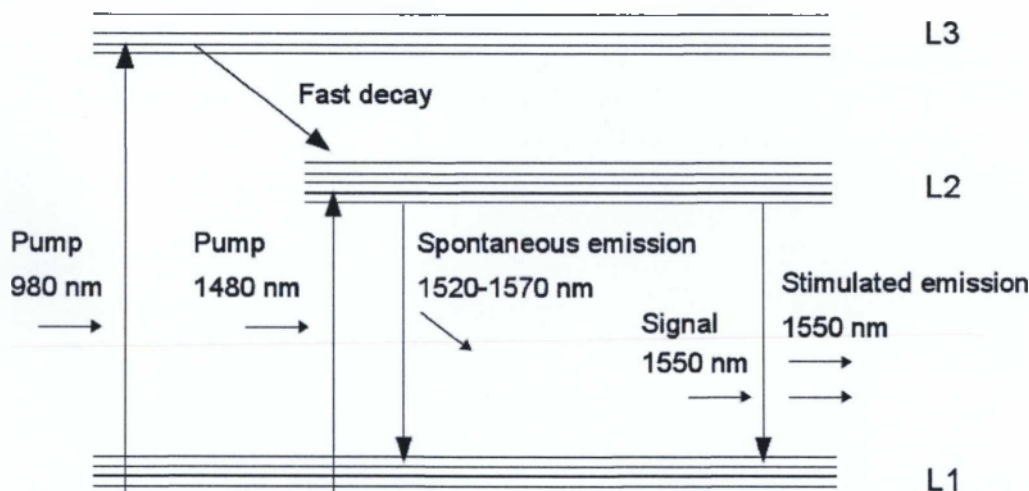


**Εικόνα 5.3:** Διάγραμμα οφθαλμού από πραγματική μέτρηση οργάνων στο πεδίο.

## ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 1

Ένας ενισχυτής ίνας ερβίου (EDFA) είναι μία οπτική ίνα της οποίας ο πυρήνας είναι ενισχυμένος με ιόντα ερβίου ( $\text{Er}^{+3}$ ). Διεγείροντας τα ιόντα ερβίου σε υψηλότερες ενεργειακές καταστάσεις μπορούμε να επιτύχουμε την ενίσχυση σημάτων σε περιοχές μηκών κύματος που χρησιμοποιούνται στις οπτικές επικοινωνίες (π.χ. 1550nm).

Προκειμένου να διεγείρουμε τα ιόντα ερβίου κατευθύνουμε στην ίνα δέσμη φωτός (laser άντλησης). Αν το μήκος κύματος εκπομπής του laser άντλησης είναι στα 980nm τα ιόντα ερβίου ανυψώνονται από την θεμελιώδη στάθμη L1 στην υψηλότερη στάθμη L3, όπως φαίνεται στο Φ. Ωστόσο, τα ιόντα καταρρέουν ταχύτατα στην στάθμη L2 χωρίς να παράγονται φωτόνια. Ο χρόνος ζωής των ιόντων στην στάθμη L3 είναι περίπου 1μs. Αν κανείς αντλήσει με ένα laser που εκπέμπει στα 1480nm τα ιόντα θα διεγερθούν κατευθείαν στην στάθμη L2. Μετά από 10ms τα ιόντα θα αποδιεγερθούν από την στάθμη L2 στην στάθμη L1 παράγοντας φωτόνια στην περιοχή μηκών κύματος 1520-1570nm. Το φαινόμενο αυτό λέγεται αυθόρμητη εκπομπή.



Αν στείλουμε σήμα με μήκος κύματος μεταξύ 1520 και 1570 nm μπορούν να συμβούν τρία πράγματα:

1. Το σήμα διεγείρει τα ιόντα ερβίου από την κατάσταση L1 σε υψηλότερη ενεργειακή κατάσταση και στη συνέχεια καταρρέει στην θεμελιώδη κατάσταση και έχουμε το φαινόμενο της αυθόρμητης εκπομπής.
2. Το σήμα εξαναγκάζει ένα ιόν που βρίσκεται στην κατάσταση L2 να καταρρεύσει στην κατάσταση L1 παράγοντας ένα φωτόνιο με ίδιο μήκος κύματος και κατεύθυνση διάδοσης όπως το φωτόνιο του σήματος. Το νέο φωτόνιο μπορεί να εξαναγκάσει και άλλες μεταβάσεις από την κατάσταση L2 στην κατάσταση L1. Το αποτέλεσμα είναι ενίσχυση του σήματος.
3. Το σήμα διαδίδεται ανεπηρέαστο στην ίνα.

Η αυθόρμητη εκπομπή δεν σχετίζεται με το σήμα αλλά κατανέμεται σε όλο το εύρος της μετάβασης L2-L1 και μπορεί να οδεύει στην κατεύθυνση του σήματος ή

## Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής

και στην αντίθετη και κατά συνέπεια να εισάγει θόρυβο. Προκειμένου να ενισχυθεί το σήμα θα πρέπει να συμβεί αυτό που περιγράφεται στο 2. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει να επιτύχω με το laser άντλησης αντιστροφή πληθυσμών οπότε τα ιόντα στην κατάσταση L2 να είναι περισσότερα από αυτά στην θεμελίωση κατάσταση

Ωστόσο, η αυθόρμητη εκπομπή είναι αναπόφευκτη και ενισχύεται όπως ακριβώς συμβαίνει και με το σήμα. Αυτό ονομάζεται ενισχυμένη αυθόρμητη εκπομπή και συμβολίζεται με ( $P_{sp}$ )

Ένας ενισχυτής χαρακτηρίζεται από το κέρδος του και το δείκτη θορύβου του.

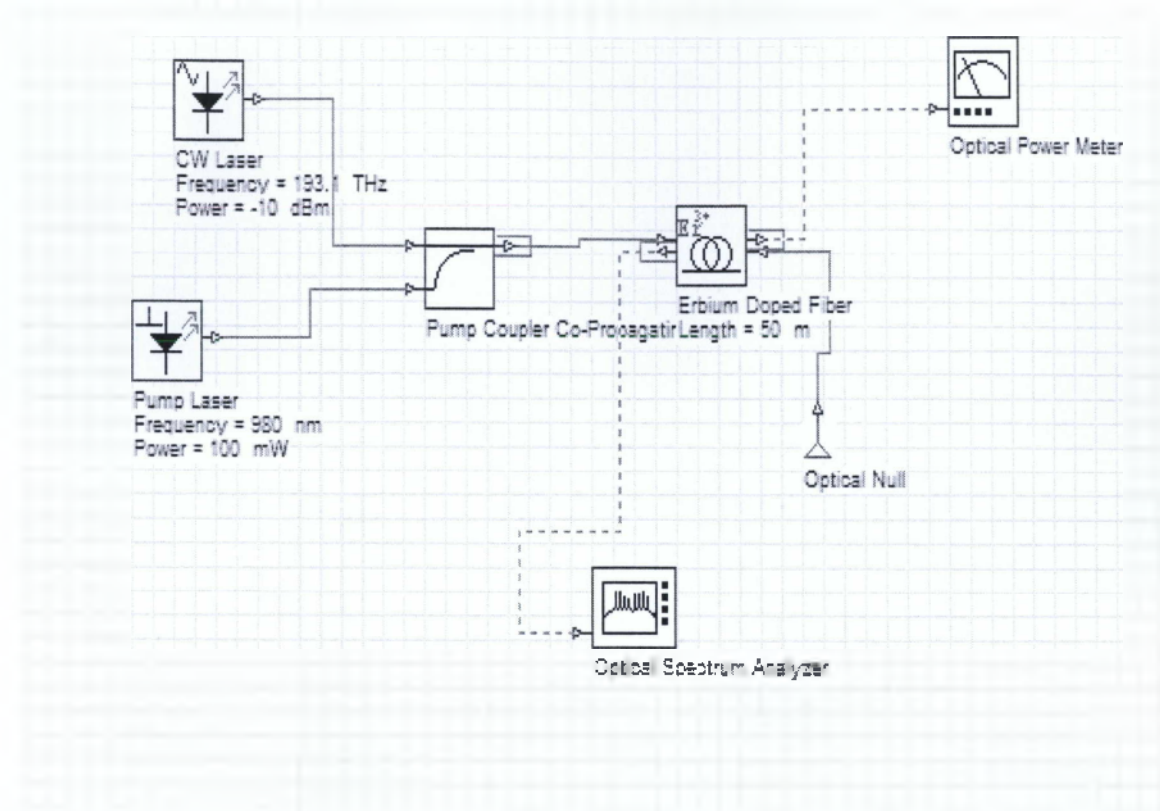
Το κέρδος του ενισχυτή ( $G$ ) ορίζεται ως ο λόγος του σήματος στην είσοδο και στην έξοδο του ενισχυτή.

Ο δείκτης θορύβου του ενισχυτή ( $N$ ) είναι ένα μέτρο του θορύβου που προσθέτει ο ενισχυτής στο σήμα και ορίζεται ως ο λόγος του σήματος προς θόρυβο στην είσοδο και στην έξοδο του ενισχυτή.

Στόχος της παρούσας προσομοίωσης είναι η μελέτη της επίδρασης οπτικού ενισχυτή στην ποιότητα μίας ινοοπτικής ζεύξης.

Στην επιφάνεια εργασίας τοποθετούμε τα στοιχεία CW laser και pump laser. Οδηγούμε τις εξόδους των δύο laser σε ένα συζευκτική Pump coupler Co-Propagating. Οδηγούμε την έξοδο του συζευκτική σε μία οπτική ίνα ερβίου (Erbium Doped Fiber). Στην άλλη έξοδο τις ίνας τοποθετούμε έναν μετρητή οπτικής ισχύος ( optical power meter) και ένα φασματικό αναλυτή ( Optical Spectrum Analyzer). Θέτουμε στη παράμετρο power -10dBm.

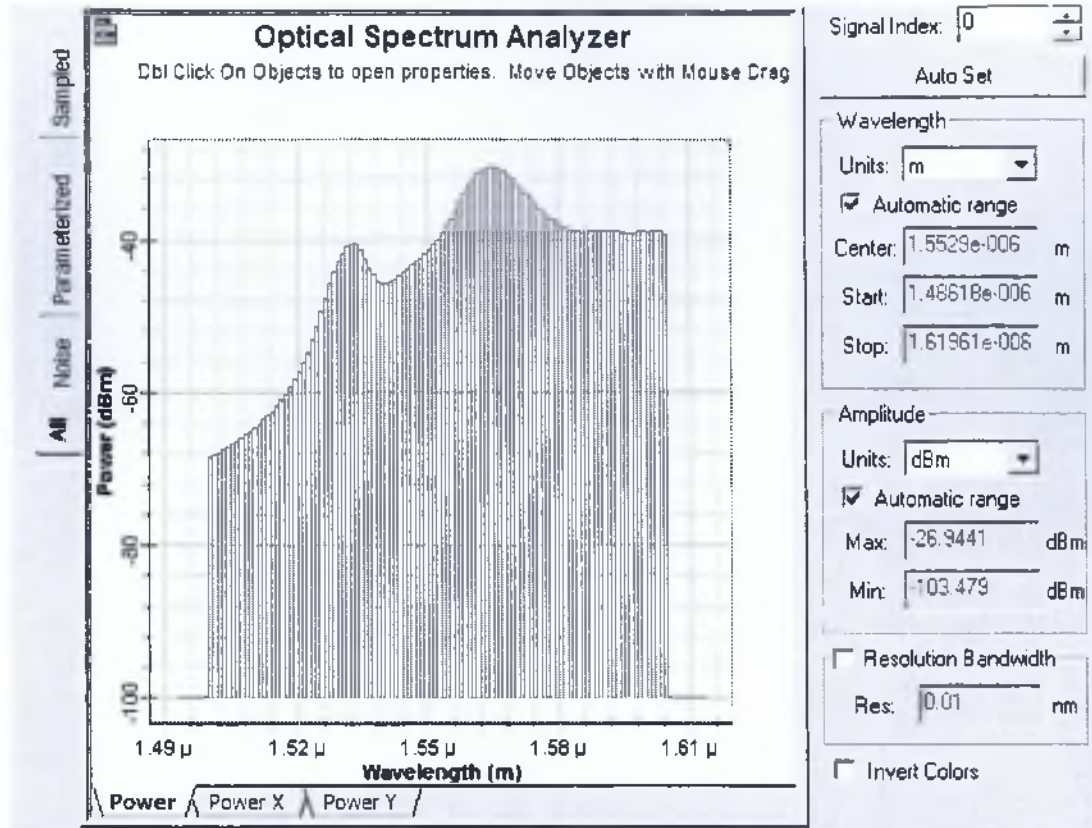
CW Laser	Laser που παράγει συνεχή δέσμη εξόδου.
Pump Laser	Laser άντλησης
Pump coupler	Συζευκτικής άντλησης
Erbium Doped Fiber	Οπτική ίνα με πρόσμιξη ερβίου
Dual Port WDM Analyser	Αναλυτής WDM διπλής εισόδου
Optical Power Meter	Μετρητής ισχύος
Optical Spectrum Analyser	Αναλυτής φάσματος



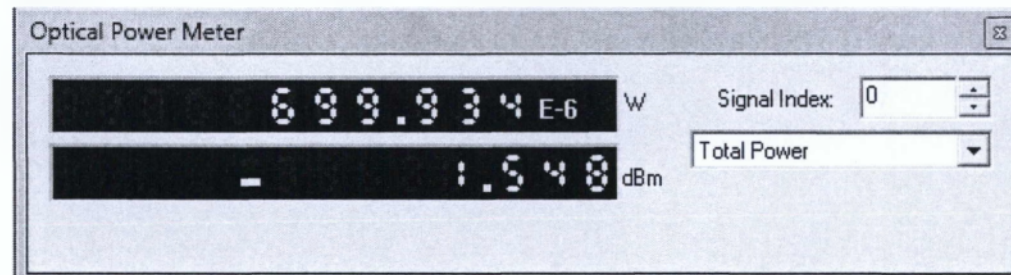
**Εικόνα 5.4.:** Προσομοίωση κυκλώματος.

Στη συνέχεια εκτελούμε την προσομείωση και παρατηρούμε τις ενδείξεις των οργάνων.





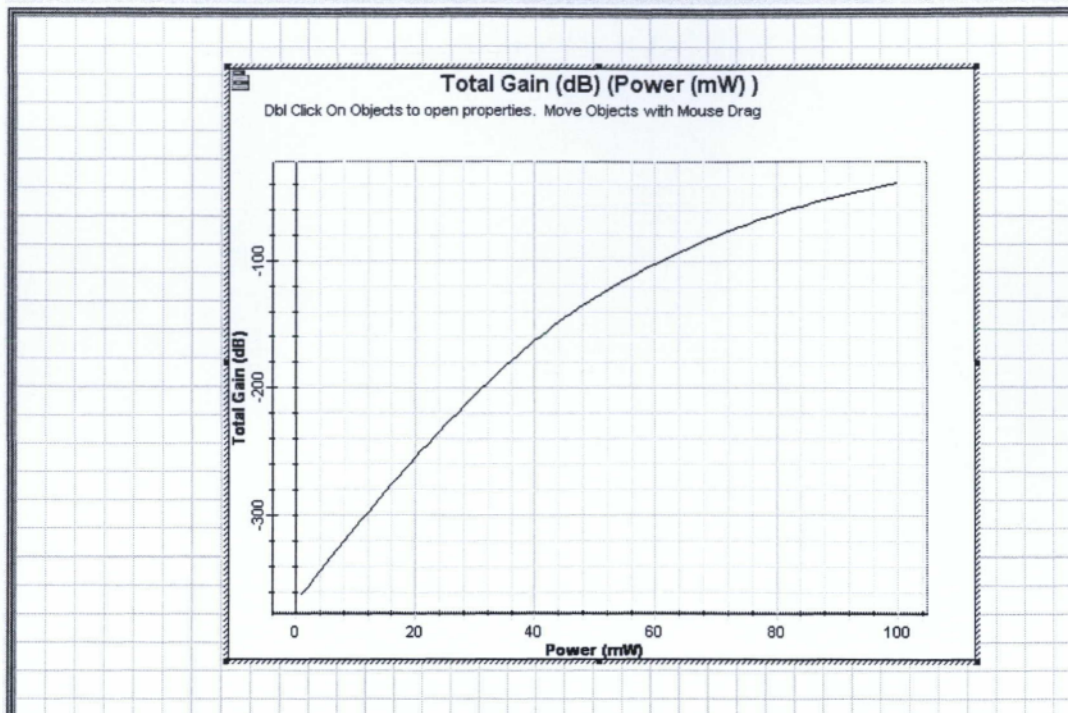
**Εικόνα 5.5:** Η ισχύς του σήματος σε συνάρτηση με το μήκος κύματος λειτουργίας.



**Εικόνα 5.6:** Η οπτική ισχύς του σήματος σε Watt και dBm.

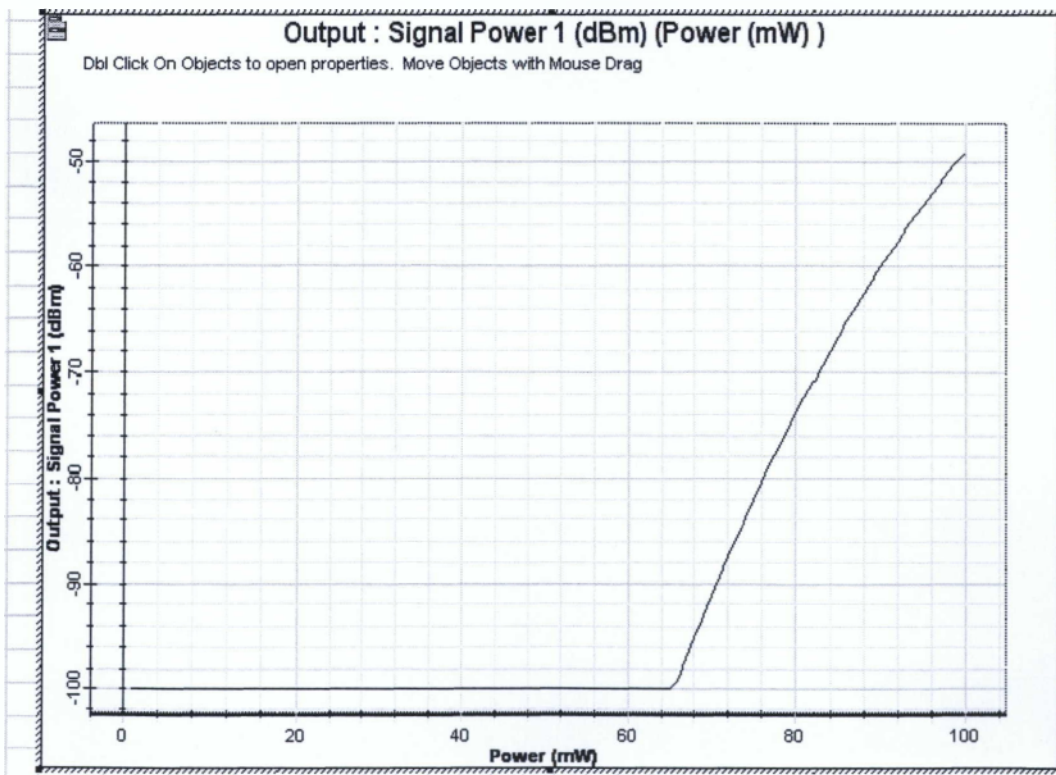
Προσθέτουμε το στοιχείο Dual port WDM analyser, το οποίο μας επιτρέπει να καταγράφουμε τα μεγέθη G και NF του οπτικού ενισχυτή, και οδηγούμε στις εισόδους του το οπτικό σήμα στην είσοδο της οπτικής ίνας EDFA και στην έξοδο αυτής. Επιτρέπουμε στη παράμετρο power να παίρνει τιμές μεταξύ 1 και 100 mW με βήμα 1mW.

Εφόσον εκτελέσουμε την προσομείωση δημιουργούμε τα γραφήματα:  
 Gain (dB) ως συνάρτηση της ισχύος του pump laser (power).  
 Signal power (dBm) ως συνάρτηση της ισχύος του pump laser (power).  
 Noise figure ως συνάρτηση της ισχύος του pump laser (power).



**Εικόνα 5.7:** Το κέρδος του ενισχυτή σε συνάρτηση της ισχύος του pump laser.

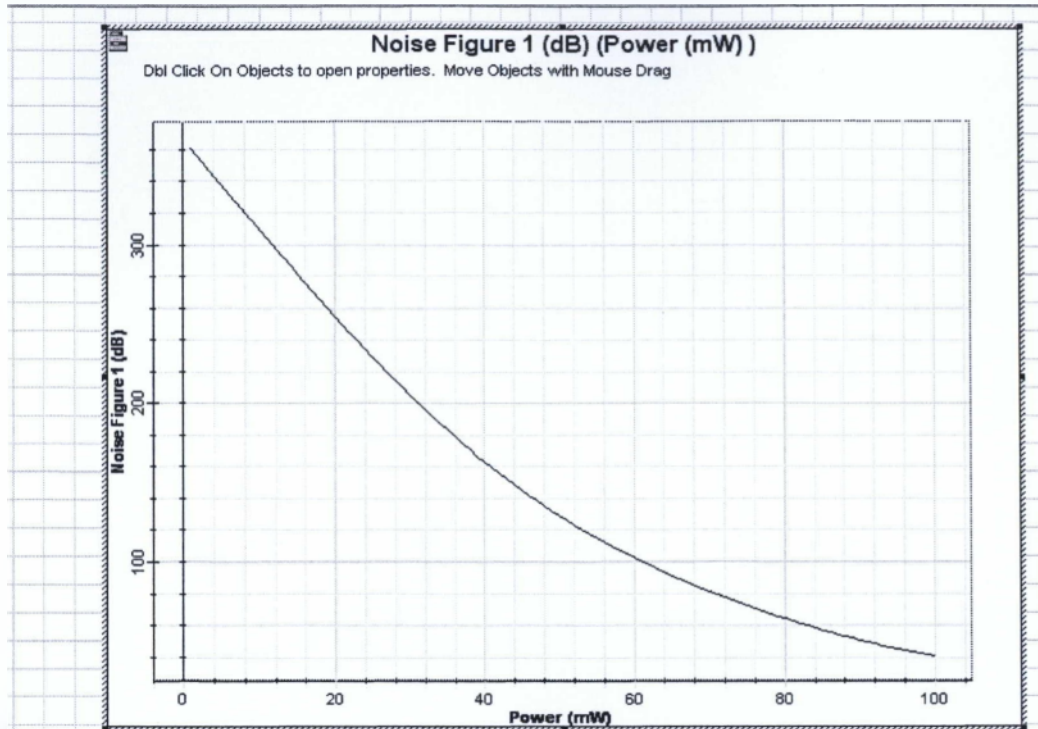
Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το κέρδος αυξάνεται και η ισχύς του laser.



**Εικόνα 5.8:** Η ισχύς σήματος σε συνάρτηση της ισχύος του pump laser.

## Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής

Παρατηρούμε ότι για κάποια χρονική περίοδο η ισχύς του σήματος παραμένει σταθερή. Αυτό συμβαίνει γιατί το laser χρειάζεται κάποιο χρόνο για να πιάσει την τιμή πάνω από 60 mW, αφού συμβεί αυτό η ισχύς του σήματος αρχίζει να αυξάνεται όσο αυξάνεται και η ισχύς του laser.

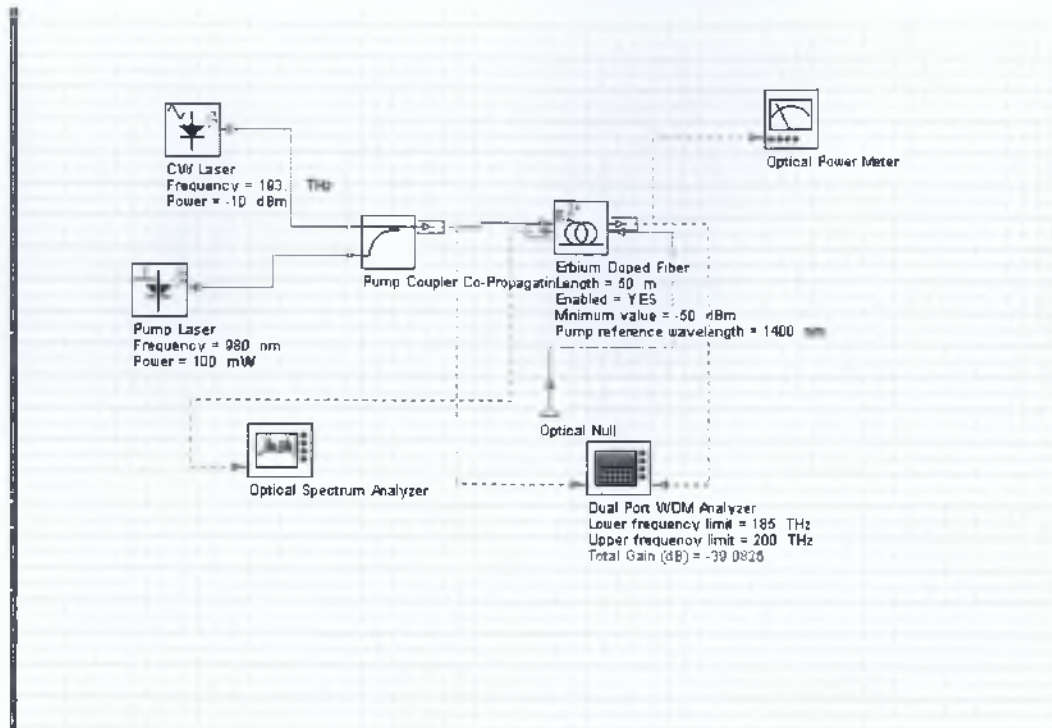


**Εικόνα 5.9:** Ο θόρυβος σε συνάρτηση με την ισχύ του pump laser.

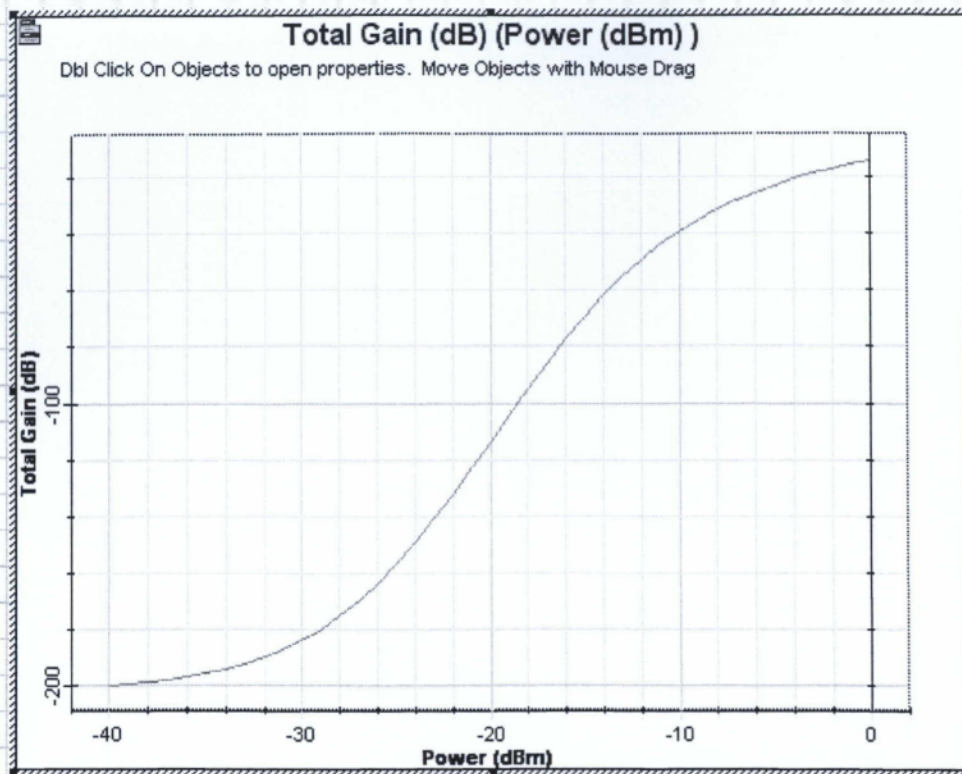
Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η τιμή την ισχύος του pump laser ο θόρυβος μειώνεται.

Στη συνέχεια θέτουμε στο στοιχείο pump laser την παράμετρο power 100mW και στο CW laser επιτρέπουμε στην παράμετρο power να παίρνει τιμές μεταξύ -40 και 0dBm με βήμα 1dBm.

Εκτελούμε την προσομοίωση και δημιουργούμε τα γραφήματα:  
Gain (dBm) ως συνάρτηση της ισχύος του CW laser (power).  
Maximum signal power (dBm) ως συνάρτηση της ισχύος του CW laser(power).

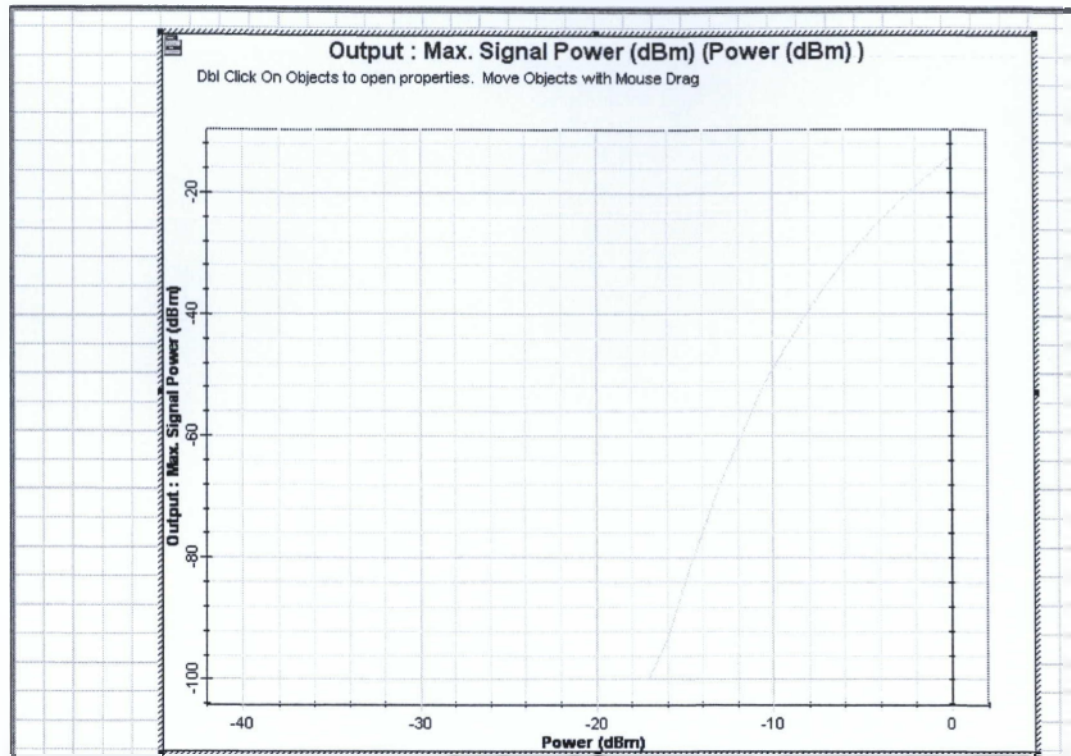


**Εικόνα 5.10:** Η προσομοίωση του κυκλώματος μετά από αλλαγή της ισχύς του pump laser και του CW laser.



**Εικόνα 5.11:** Το κέρδος σε συνάρτηση της ισχύος του CW laser.

Παρατηρούμε ότι το κέρδος αυξάνεται όσο αυξάνεται και η ισχύς του CW laser.



**Εικόνα 5.12:** Η μέγιστη ισχύς του σήματος σε συνάρτηση με την ισχύ του CW laser.

Όσο αυξάνεται η ισχύς του CW laser η τιμή της μέγιστης ισχύς του σήματος παραμένει σταθερή μέχρι κάποια συγκεκριμένη τιμή. Αυτό συμβαίνει γιατί το laser χρειάζεται κάποιο χρόνο για να πιάσει την τιμή της ισχύος του σήματος.

Power (dBm)	Total Gain(dB)	Max Signal Power(dBm)
-40 dBm	-200 dB	-100 dBm
-20 dBm	-4 dB	-24 dBm

<b>Dispersion at 193.1 THz</b>	-1.53032e+007 ps/nm
<b>Dispersion at 305.9 THz</b>	<b>0.00000e+000 ps/nm</b>
<b>Noise at 193.1 THz</b>	-6.33525e+001 dBm
<b>Noise at 305.9 THz</b>	<b>-1.00000e+002 dBm</b>
<b>OSNR at 193.1 THz</b>	1.42640e+001 dB
<b>OSNR at 305.9 THz</b>	<b>0.00000e+000 dB</b>
<b>Power at 193.1 THz</b>	-4.90885e+001 dBm
<b>Power at 305.9 THz</b>	<b>-1.00000e+002 dBm</b>

Παρατηρούμε ότι η κατάλληλη συχνότητα του σήματος μας είναι στα 305.9 THz, εφόσον η διασπορά και ο θόρυβος είναι μηδενικά και το SNR καθώς και η ισχύς σαφώς πιο βελτιωμένα από την συχνότητα των 193.1 THz.

## ΠΡΟΣΩΜΕΙΩΣΗ 2

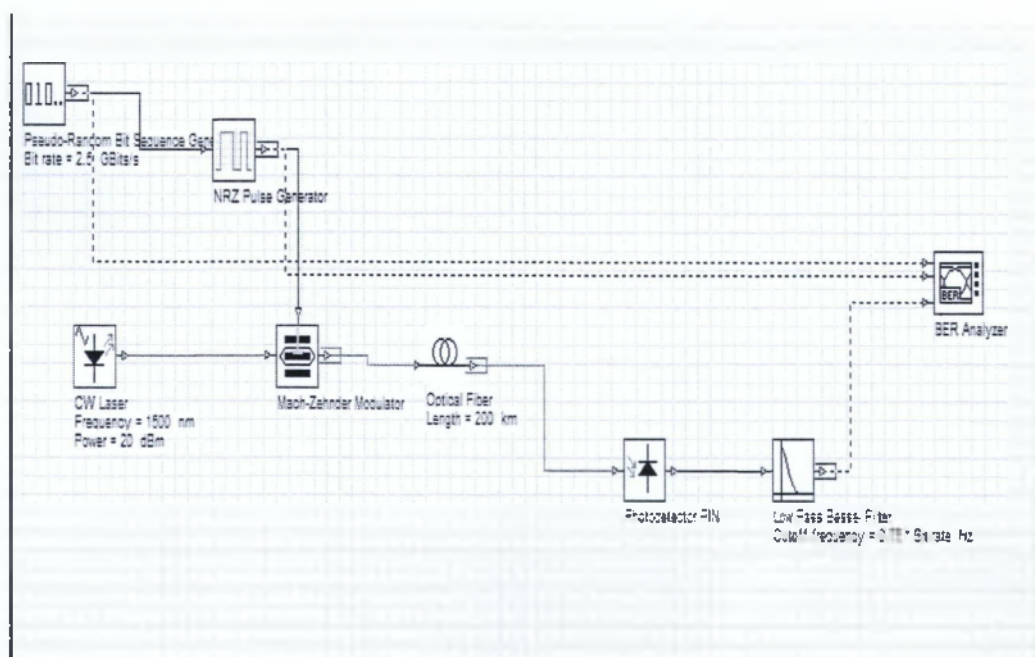
Στόχος της παρούσας προσομοίωσης είναι η κατανόηση του ρόλου ενός οπτικού ενισχυτή σε μία ινοοπτική ζεύξη, καθώς και η μελέτη της επίδρασης οπτικού φίλτρου και των θεμελιωδών παραμέτρων του σε αυτήν.

Δημιουργούμε έναν οπτικό πομπό. Χρησιμοποιώντας γεννήτρια ψευδοτυχαίας ακολουθίας bit (στοιχείο Pseudo random bit sequence generator), γεννήτρια παλμών (στοιχείο NRZ pulse generator), οπτική πηγή laser (στοιχείο CW laser) και οπτικό διαμορφωτή Mach-Zehnder (στοιχείο Mach-Zehnder modulator). Οδηγούμε το οπτικό και το ηλεκτρικό σήμα στις εισόδους του διαμορφωτή προκειμένου να διαμορφώσουμε εξωτερικά το οπτικό σήμα.

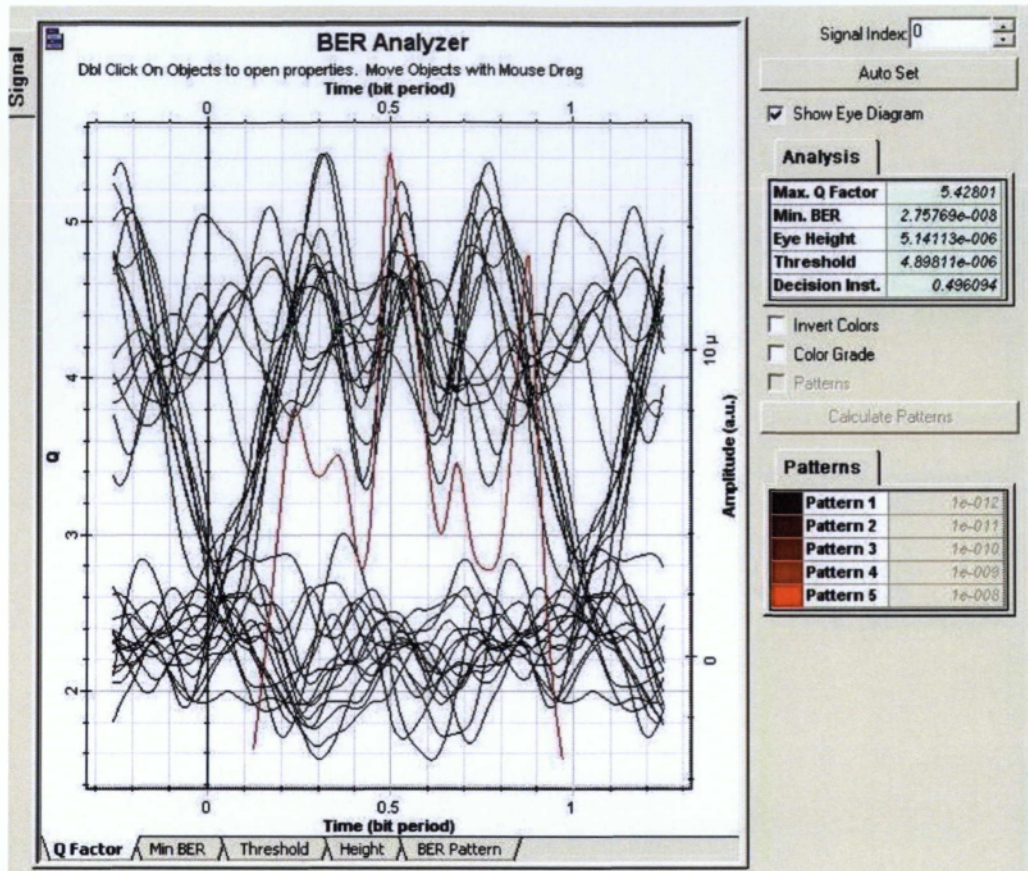
Οδηγούμε το οπτικό σήμα σε οπτική ίνα (στοιχείο Optical Fiber) και στη συνέχεια σε φωτοδίοδο PIN (στοιχείο Photodetector PIN). Οδηγούμε το προκύπτον ηλεκτρικό σήμα σε χαμηλοπερατό φίλτρο (στοιχείο Low pass Bessel Filter) και στη συνέχεια σε ελεγκτή σφάλματος (στοιχείο BER Analyzer).

Η μεταφορά πληροφορίας γίνεται με ρυθμό 2.5Gbps.

Έστω ότι η παραπάνω ινοοπτική ζεύξη έχει μήκος 200Km. Είναι δυνατή η σωστή μετάδοση της πληροφορίας ( $BER \leq 10^{-12}$ ) ;



**Εικόνα 5.13:** Προσομοίωση του κυκλώματος

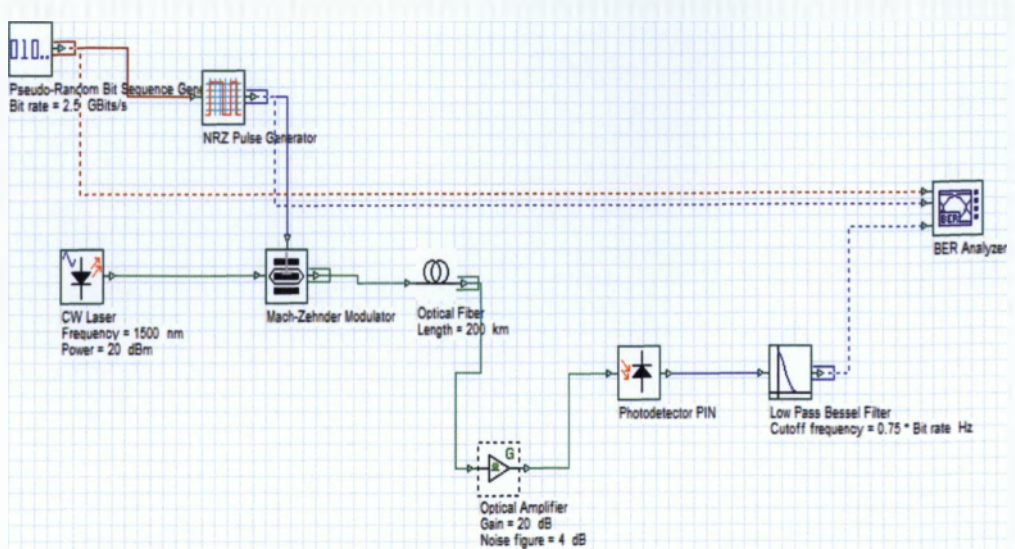


**Εικόνα 5.14:** Διάγραμμα οφθαλμού

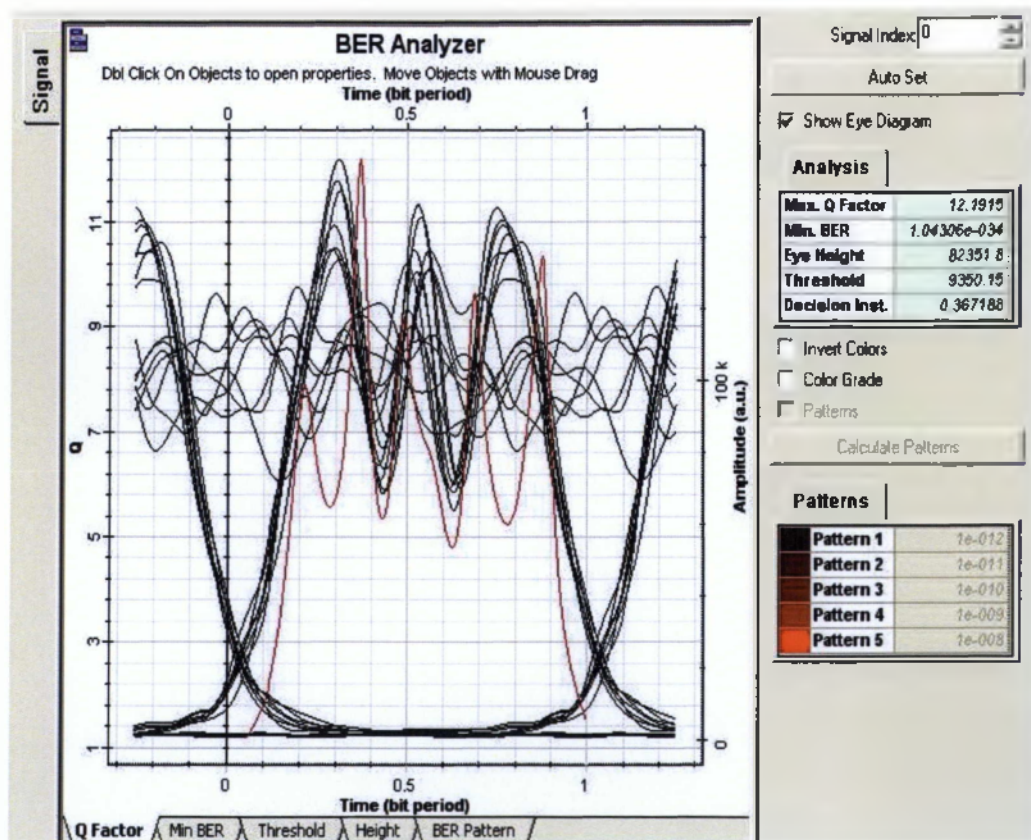
Για να είναι σωστή η μετάδοση της πληροφορίας πρέπει  $BER \leq 10^{-12}$ . Όμως βάση του διαγράμματος οφθαλμού παρατηρούμε ότι υπάρχει πρόβλημα στα bit. Σε κάποιες χρονικές στιγμές δεν ξεχωρίζουμε τα bit που λαμβάνουμε. Η τιμή του BER είναι  $2,7569e^{-8}$  άρα μεγαλύτερη του  $10^{-12}$ . Συμπερασματικά, δεν είναι δυνατή η σωστή μετάδοση της πληροφορίας.

Αν τοποθετηθεί ενισχυτής ο οποίος χαρακτηρίζεται από δείκτη θορύβου, NF, ίσο με 4dB (θέστε την τιμή 4 στην παράμετρο noise figure) θα μπορούσε να μεταφερθεί σωστά η πληροφορία στην παραπάνω ινοοπτική ζεύξη;





**Εικόνα 5.15:** Προσομοίωση του κυκλώματος με προσθήκη ενισχυτή.

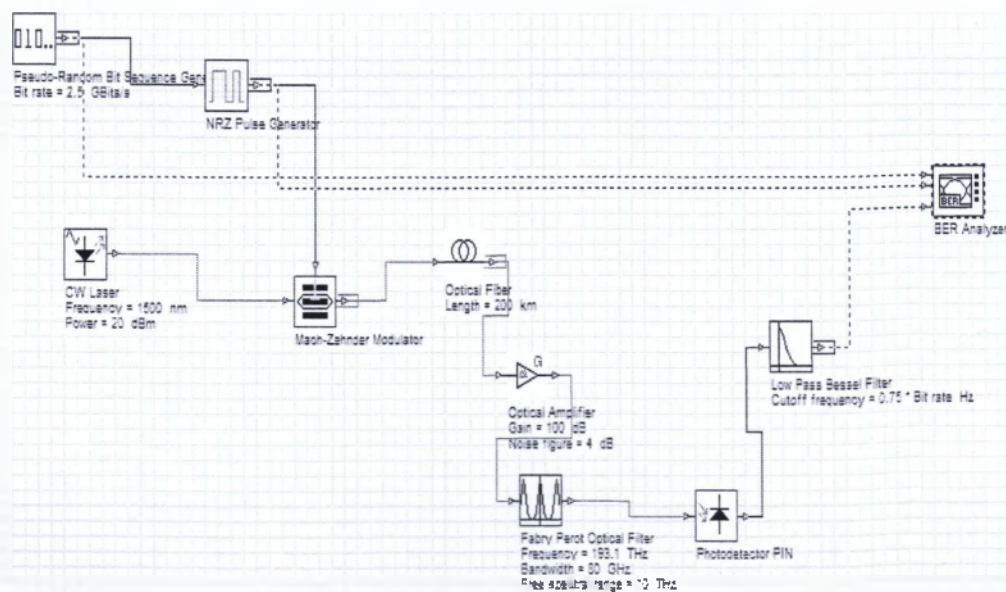


**Εικόνα 5.16:** Διάγραμμα οφθαλμού

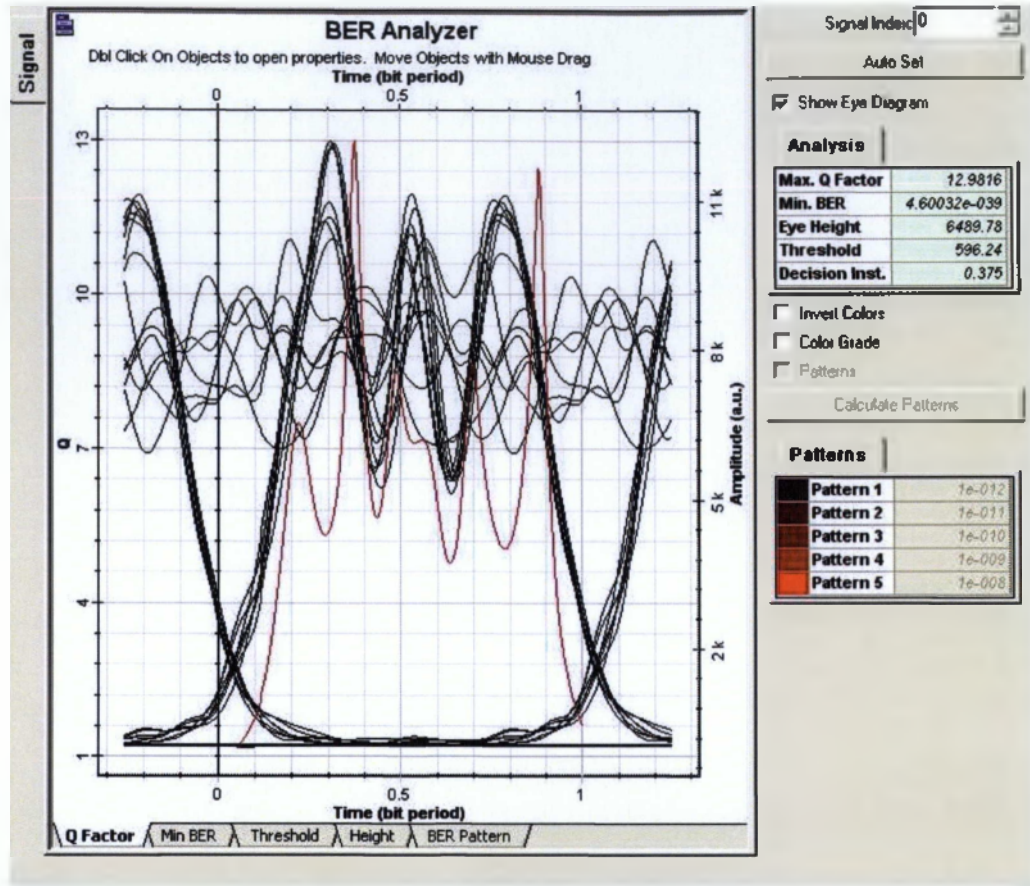
Χρησιμοποιώντας τον ενισχυτή παρατηρούμε, σύμφωνα με το διάγραμμα οφθαλμού, ότι η ποιότητα μετάδοσης του σήματος βελτιώνεται σημαντικά. Πιο συγκεκριμένα, το BER είναι  $1,04306e^{-34}$  άρα μικρότερο από  $10^{-12}$  οπότε και το αποτέλεσμα είναι αποδεκτό. Άρα, έχουμε ικανοποιητική ποιότητα μετάδοσης σήματος.

Τοποθετήστε οπτικό φίλτρο (στοιχείο Fabry-Perot Optical Filter) στην έξοδο του οπτικού ενισχυτή προκειμένου να μειώσετε το θόρυβο που εισάγει ο ενισχυτής. Θέστε στην παράμετρο του φίλτρου Free Spectral Range την τιμή 10THz. Επιτρέψτε στην παράμετρο Bandwidth του οπτικού φίλτρου να παίρνει τιμές μεταξύ 10 και 80GHz. Σχολιάστε την επίδραση του φίλτρου στην ποιότητα της ινοοπτικής ζεύξης.

Όπου θεωρείτε απαραίτητο για την κατανόηση της ινοοπτικής ζεύξης τοποθετήστε κατάλληλες μετρητικές συσκευές.



**Εικόνα 5.17:** Προσομοίωση κυκλώματος με προσθήκη οπτικού φίλτρου.



**Εικόνα 5.18:** Διάγραμμα οφθαλμού.

Παρατηρούμε ότι το οπτικό φίλτρο εξομαλύνει την ποιότητα του σήματος. Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα οφθαλμού οι γραμμές είναι πιο ομοιογενείς σε σχέση με το διάγραμμα της Εικόνας 5.16. Οπότε σαφώς και η ποιότητα της μετάδοσης βελτιώνεται ακόμα περισσότερο.

Παρακάτω παραθέτουμε έναν πίνακα για να συνοψίσουμε τα αποτελέσματα της μετάδοσης.

	Χωρίς Ενίσχυση Χωρίς φίλτρο	Με ενίσχυση Χωρίς Φίλτρο	Με ενίσχυση Με φίλτρο
Max Q Factor	5.42801	12.1915	12.9816
Min BER	$2.75769e^{-6}$	$1.0436e^{-34}$	$4.6032e^{-39}$
Eye Height	$5.14113e^{-6}$	82351.8	6489.78
Threshold	$4.89811e^{-6}$	9350.15	596.24
Decision Inst.	0.496094	0.37188	0.375

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία ασχοληθήκαμε με την επίδραση ενός οπτικού ενισχυτή και ενός οπτικού φίλτρου στην ποιότητα μετάδοσης ενός οπτικού σήματος. Μετά από μία εισαγωγή γενικά για τις ίνες και για την χρήση τους στις οπτικές επικοινωνίες και δίκτυα, στο κεφάλαιο 1 και 2 αντίστοιχα, αναπτύξαμε την χρήση των οπτικών ενισχυτών καθώς και τη λειτουργία τους στο κεφάλαιο 3.

Έγινε αναφορά για τα είδη των οπτικών ενισχυτών και των χαρακτηριστικών αυτών, όμως εκτεταμένη αναφορά έγινε για τους ενισχυτές EDFA εφόσον ήταν το είδος του ενισχυτή που χρησιμοποιήσαμε στις προσομοιώσεις καθώς είναι και το είδος του ενισχυτή που χρησιμοποιείται περισσότερο στα σύγχρονα οπτικά δίκτυα. Τα οπτικά φίλτρα αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 4 με ανάλυση του κάθε είδους.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται πειραματικά οι δύο προσομοιώσεις κυκλωμάτων στο λογισμικό του optisystem με χρήση οπτικού ενισχυτή και οπτικού φίλτρου, με αφετηρία την ανάλυση του διαγράμματος οφθαλμού. Στην συνέχεια, έγιναν οι μετρήσεις για την αξιολόγηση της ποιότητας του σήματος μέσω διαγραμμάτων και γραφημάτων.

Στην πρώτη προσομοίωση τα αποτελέσματα έδειξαν ποια είναι η κατάλληλη συχνότητα του σήματος μας και την επίδραση του ενισχυτή στην ποιότητα του σήματος σε σχέση με το κέρδος, την ισχύ των λέιζερ και των θόρυβο που προκαλείται στο σήμα κατά την μετάδοση.

Τέλος στη δεύτερη προσομοίωση οι αξιολογήσεις έγιναν κυρίως μέσω διαγραμμάτων οφθαλμών. Παρατηρήσαμε την επίδραση του οπτικού ενισχυτή και στη συνέχεια του οπτικού φίλτρου στο κύκλωμα. Πιο συγκεκριμένα, η ποιότητα του οπτικού σήματος δεν ήταν η επιθυμητή χωρίς την χρήση του ενισχυτή και του φίλτρου. Οι τιμές παρουσιάστηκαν μέσω του BER Analyser στο διάγραμμα οφθαλμού και στη συνέχεια τα αποτελέσματα τοποθετήθηκαν σε πίνακα συγκεντρωτικά ώστε να γίνει η σύγκριση τους.

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Παγιατάκης Γ.Κ., *Ινοοπτικές Επικοινωνίες*, Εκδόσεις Τζιόλα
2. Βασιλόπουλος Χ. – Παγιατάκης Γ.Κ , *Προηγμένες Τηλεπικοινωνιακές Υπηρεσίες*, Τόμος Α', 2004.
3. Σκουλάτος Β.Μ.- Κωνσταντόπουλος Α.Ν., *Τηλεπικοινωνιακά Δίκτυα*, 1996.
4. P. E. Green, *Δίκτυα Οπτικών Ινών* (μετάφραση: Κ. Καρούμπαλος) Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 1994.
5. Rajin Ramaswami and Kumar N. Sivarajan, "*Optical Networks*"Morgan Kaufmann Publications
6. Govind Agrawal, *Συστήματα Επικοινωνιών με Οπτικές ίνες*, Εκδόσεις Τζιόλα Θεσσαλονίκη.
7. C. R. Giles, "*Lightwave Applications of Fiber Bragg Gratings*", Journal of Lightwave Technology, August 1997.
8. Noboru Takachio and Hiro Suzuki, "*Application of Raman-Distributed Amplification to WDM Transmission Systems Using 1.55  $\mu\text{m}$  Dispersion-Shifted Fiber*", Journal of Lightwave Technology, January 2001.
9. Yasuhiro Aoki, "*Properties of Fiber Raman Amplifiers and their Applicability to Digital Optical Communication Systems*", Journal of Lightwave Technology, July 1988.
10. J. Palais. "*Fiber Optic Communications*", Prentice Hall
11. Jeunhomme , "*Single Mode Fiber Optics*", Dekker
12. Edited By S.E. Miller and I.P. Kaminow, "*Optical Fiber Telecommunication*" , Academic Press Publications
13. J. Senior, "*Optical Fiber Communication*" ,Second Edition, Prentice Hall Publication

### ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ

<http://www.i-fiberoptics.com/basics.php>

<http://www.ceid.upatras.gr/faculty/kvlachos/courses/documents/ots/Lecture%20Notes.pdf>

[http://www.optiwave.com/pdf/literature/EDFA\\_revised.pdf](http://www.optiwave.com/pdf/literature/EDFA_revised.pdf)