

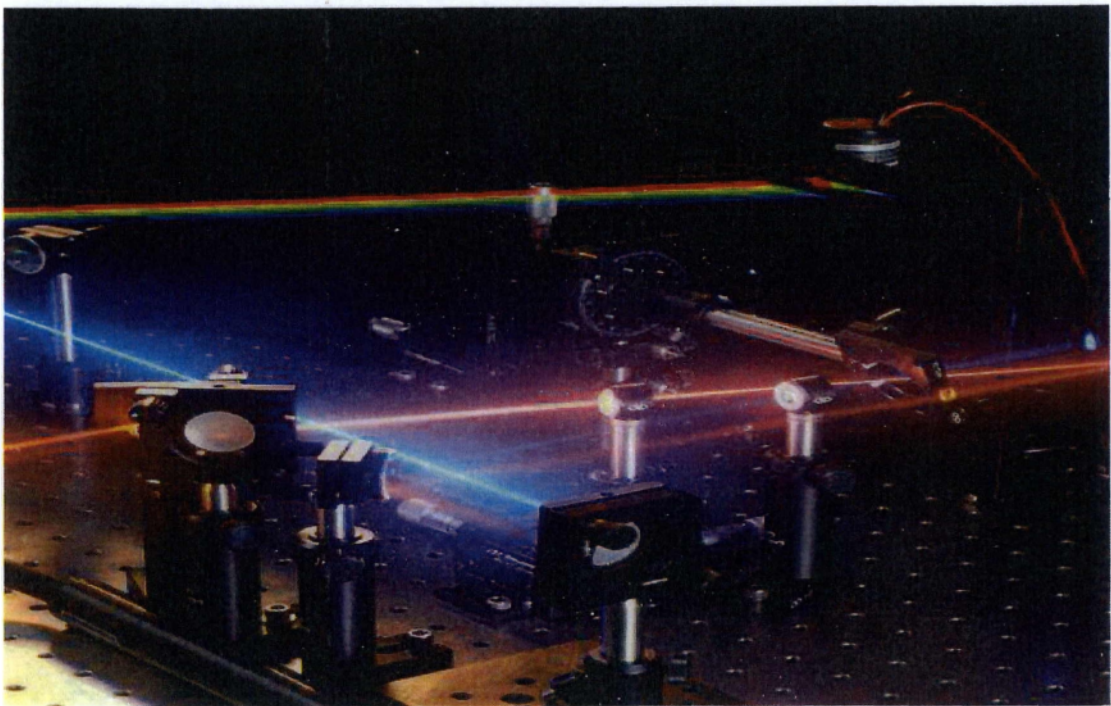


Α.Τ.Ε.Ι ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ - ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΠΑΡΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ

## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



*“Σχεδίαση μοντέλων οπτικών στοιχείων και διατάξεων για τη μελέτη  
ισολογισμών ζεύξης (link budget) με χρήση προσομοίωσης”*

ΦΟΙΤΗΤΕΣ: ΛΑΜΠΡΑΝΟΥ ΣΤΑΜΑΤΑ Α.Μ. 2007269  
ΣΙΜΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Α.Μ.2007051

Επιβλέπων: Γιάννης Διαπέρδος, Καθηγητής Εφαρμογών

ΣΠΑΡΤΗ 2011

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αντικείμενο της πτυχιακής εργασίας είναι η σχεδίαση μιας βιβλιοθήκης μοντέλων οπτικών στοιχείων (οπτικών ινών , οπτικών ενισχυτών , φωτοπομπών, φωτοφωρατών διακλαδωτών , κ.λπ.) που θα χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη οπτικών ισολογισμών Ζεύξης στο Simulink)

Στο Θεωρητικό μέρος της εργασίας παρέχονται οι βασικές γνώσεις που αφορούν τα στοιχεία μιας οπτικής ζεύξης (φωτοπομποί, φωτοφωρατές, οπτικές ίνες, κ.λπ., καθώς και στοιχεία από την τεχνολογία των οπτικών δικτύων. Συγκεκριμένα:

Στο 1ο Κεφάλαιο, ύστερα από μια σύντομη Ιστορική αναδρομή των τηλεπικοινωνιών, παρατίθενται τα χαρακτηριστικά και τα πλεονεκτήματα των συστημάτων οπτικών επικοινωνιών.

Το 2ο Κεφάλαιο αναφέρεται στις βασικές έννοιες εκπομπής φωτός και στα είδη και τα χαρακτηριστικά των βασικών οπτικών πηγών. Ασχολείται με την αρχή λειτουργίας και τα χαρακτηριστικά των πηγών LED και των laser ημιαγωγών. Ακόμα και ποια είναι τα κριτήρια για την επιλογή της κατάλληλης οπτικής πηγής.

Το 3ο κεφάλαιο ασχολείται με την οπτική ίνα , τις αρχές διάδοσης του φωτός και ποιοι είναι οι Οπτικοί τρόποι μετάδοσης. Ακόμα με τα είδη και τα χαρακτηριστικά οπτικών ινών, απώλειες και διασπορά και τέλος με την κατασκευή οπτικών ινών και καλωδίων.

Το 4ο κεφάλαιο παραθέτει τις βασικές αρχές ανίχνευσης του φωτός, τα είδη και τα χαρακτηριστικά των βασικών οπτικών ανιχνευτών όπως ανιχνευτές pn, pin, χιονοστιβάδας. Ακόμα ασχολείται με το εύρος ζώνης του ανιχνευτή, τα είδη θορύβου και τέλος με τα κυκλώματα ανιχνευτών, BER, SNR, και το διάγραμμα οφθαλμού.

Το 5ο κεφάλαιο ασχολείται με τις ενώσεις (splice) οπτικών ινών και τις απώλειες κατά την ένωση. Επιπλέον με τους τύπους και τα χαρακτηριστικά των συζευκτών

(couplers) των οπτικών ινών, με τους πολυπλέκτες των οπτικών ινών, τους πολυπλέκτες πρόσθεσης-αφαίρεσης, τα φράγματα διάθλασης των οπτικών ινών (BRAGG GRATINGS), και τέλος με τη διαχείριση ισχύος οπτικής ζεύξης και τη διαχείριση χρόνου ανόδου οπτικής ζεύξης,

Το 6ο κεφάλαιο αναφέρεται στους οπτικούς ενισχυτές και στα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους. Ακόμα στους οπτικούς ενισχυτές ημιαγωγών, στον ενισχυτή οδεύοντος κύματος στον Fabry Perot στα μειονεκτήματα των ενισχυτών και στους ενισχυτές με προσμίξεις.

Το 7ο κεφάλαιο ασχολείται με την πολυπλεξία και τα δίκτυα και ειδικότερα με την πολυπλεξία χρόνου, συχνότητας και μήκους κύματος των οπτικών ζεύξεων και θα κάνουμε και μια μικρή αναφορά στα Δίκτυα οπτικών ινών, ETHERNET, FDDI.

Στο Πρακτικό μέρος της εργασίας μας (8ο κεφάλαιο), παρουσιάζεται η σχεδίαση μίας βιβλιοθήκης μοντέλων οπτικών στοιχείων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μελέτη οπτικών ισολογισμών ζεύξης στο Simulink, με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab.

## Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο επιθυμούμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον επιβλέποντα της εργασίας μας, καθηγητή Εφαρμογών κ. Λιαπέρδο Ιωάννη για την καθοδήγηση και την προθυμία του, καθ' όλο το διάστημα εκπόνησης της εργασίας μας.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Ιστορική Εξέλιξη των Τηλεπικοινωνιών οπτικών Ινών.....	8
1.2	Χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα οπτικών επικοινωνιών.....	13
1.3	Βασικές έννοιες οπτικής.....	14
1.3.1	Ανάκλαση και διάθλαση σε μια διαχωριστική επιφάνεια.....	16

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΟΠΤΙΚΟΣ ΠΟΜΠΟΣ

2.1	Βασικές έννοιες εκπομπής φωτός και χαρακτηριστικά βασικών οπτικών πηγών.....	23
2.2	Αρχή λειτουργίας και χαρακτηριστικά πηγών LED και laser ημιαγωγών.....	31
2.3	Άμεση και εξωτερική διαμόρφωση οπτικού σήματος.....	34
2.4	Κωδικοί διαμόρφωσης (Codes).....	37
2.4.1	Ζεύξη πηγής – ίνας.....	39

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΟΠΤΙΚΗ ΙΝΑ

3.1	Ανατομία μιας οπτικής ίνας και αρχές διάδοσης φωτός.....	40
3.2	Οπτικοί τρόποι μετάδοσης.....	45
3.3	Χαρακτηριστικά οπτικών ινών-Διασπορά-Απώλειες.....	48
3.3.1	Κατασκευή οπτικών ινών.....	56

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΟΠΤΙΚΟΣ ΔΕΚΤΗΣ

4.1 Βασικές αρχές ανίχνευσης φωτός.....	58
4.2 Είδη και χαρακτηριστικά βασικών οπτικών ινών.....	60
4.2.1 Φωτοδίοδος pin.....	63
4.2.2 Φωτοδίοδος χιονοστιβάδας (APD) .....	63
4.3 Είδη θορύβου –κυκλώματα ανιχνευτών.....	64
4.4 BER , SNR ,Διάγραμμα οφθαλμού.....	66

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΟΠΤΙΚΩΝ ΖΕΥΞΕΩΝ

5.1 Οπτικές Ζεύξεις .....	70
5.2 Είδη και χαρακτηριστικά συζευκτών οπτικών ινών.....	74
5.3 Πολυπλέκτες οπτικών ινών.....	77
5.4 Πολυπλέκτες πρόσθεσης – αφαίρεσης.....	78

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΟΠΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ

6.1 Οπτικοί ενισχυτές και χαρακτηριστικά λειτουργίας τους.....	80
6.2 Κατάταξη οπτικών ενισχυτών.....	85
6.3 Οπτικοί ενισχυτές ημιαγωγών.....	86
6.3.1 Ενισχυτής οδεύοντος κύματος .....	86
6.3.2 Ενισχυτής Fabry Perot .....	88
6.3.3 Μειονεκτήματα ενισχυτών ημιαγωγού.....	89
6.4 Ενισχυτές οπτικών ινών με προσμίξεις.....	90
6.4.1 Ενισχυτές οπτικής ίνας με προσμίξεις ιόντων ερμπίου (EDFA).....	90
6.4.2 Οπτικός Ενισχυτής Raman.....	96

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7**

### **ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ – ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ**

7.1 Σχεδίαση ψηφιακών οπτικών συστημάτων.....	97
7.2 Πολυπλεξία διαίρεση χρόνου – συχνότητας.....	100
7.3 Πολυπλεξία μήκους κύματος οπτικών ζεύξεων.....	100
7.4 Δίκτυα οπτικών ινών.....	102
7.4.1 Ethernet.....	109
7.4.2 FDDI.....	110

### **ΠΡΑΚΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8**

8.1 Λίγα λόγια για το Matlab.....	112
8.2 Λίγα λόγια για το Simulink.....	116
8.3 Link budget.....	117
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ – ΠΙΝΑΚΩΝ.....	141

<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>145</b>
--------------------------	------------

# ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

## Κεφάλαιο 1

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

**1.1** Με τον όρο «τηλεπικοινωνίες» εννοούμε την μεταφορά πληροφορίας από ένα σημείο σε άλλο που βρίσκεται σε κάποια απόσταση. Για τη μεταφορά αυτή συνήθως απαιτείται κάποιο τηλεπικοινωνιακό σύστημα. Στα πλαίσια λειτουργίας λοιπόν αυτού του τηλεπικοινωνιακού συστήματος η μεταφορά της πληροφορίας επιτυγχάνεται συνήθως με τη μετάδοση ηλεκτρομαγνητικού κύματος το οποίο ουσιαστικά ενεργεί σαν φορέας - φέρον του σήματος πληροφορίας. Το φέρον διαμορφώνεται πρώτα από την πηγή της πληροφορίας, κατόπιν αποστέλλεται μέσα από κατάλληλο τηλεπικοινωνιακό κανάλι και λαμβάνεται τέλος από τον δέκτη. Διαδικασία αποδιαμόρφωσης (ακριβώς αντίστροφη αυτής της διαμόρφωσης στον πομπό) αποδίδει στον παραλήπτη την αρχική πληροφορία. Περίπλοκες τεχνικές έχουν αναπτυχθεί για την παραπάνω υλοποίηση της μεταφοράς της πληροφορίας από τον αποστολέα στον παραλήπτη, οι οποίες και συνθέτουν ουσιαστικά τον συναρπαστικό και ταχύτατα εξελισσόμενο κλάδο των τηλεπικοινωνιών. Είναι νομίζουμε περιττό να αναφερθεί κανείς στις καταλυτικές συνέπειες της τεχνολογίας των τηλεπικοινωνιών στη σύγχρονη κοινωνικο-οικονομική διάρθρωση των κρατών καταργώντας ουσιαστικά τις αποστάσεις. Τις συνέπειες άλλωστε αυτές τις ζούμε καθημερινά, αδυνατώντας πολλές φορές ως κοινωνίες να αφομοιώσουμε η ακόμη και να προσαρμοστούμε γρήγορα στα τηλεπικοινωνιακά επιτεύγματα - προϊόντα που καθημερινά μας κατακλύζουν. Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας περίπτωσης θα μπορούσε άνετα να επικαλεσθεί κανείς την τεχνολογία των κινητών επικοινωνιών 3<sup>ης</sup> γενιάς.

Θεωρώντας την μετάδοση της πληροφορίας ως ροή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, διαπιστώνουμε ότι το φέρον σήμα της τηλεπικοινωνιακής ζεύξης συναντάται, ανάλογα με την περίπτωση, σε μία ευρεία περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος: από την περιοχή των ράδιο-συχνοτήτων μέχρι αυτήν των μικροκυμάτων. Παρ' όλα αυτά αποδείχθηκε ότι η χρήση και του ορατού (οπτικές συχνότητες) μέρους του

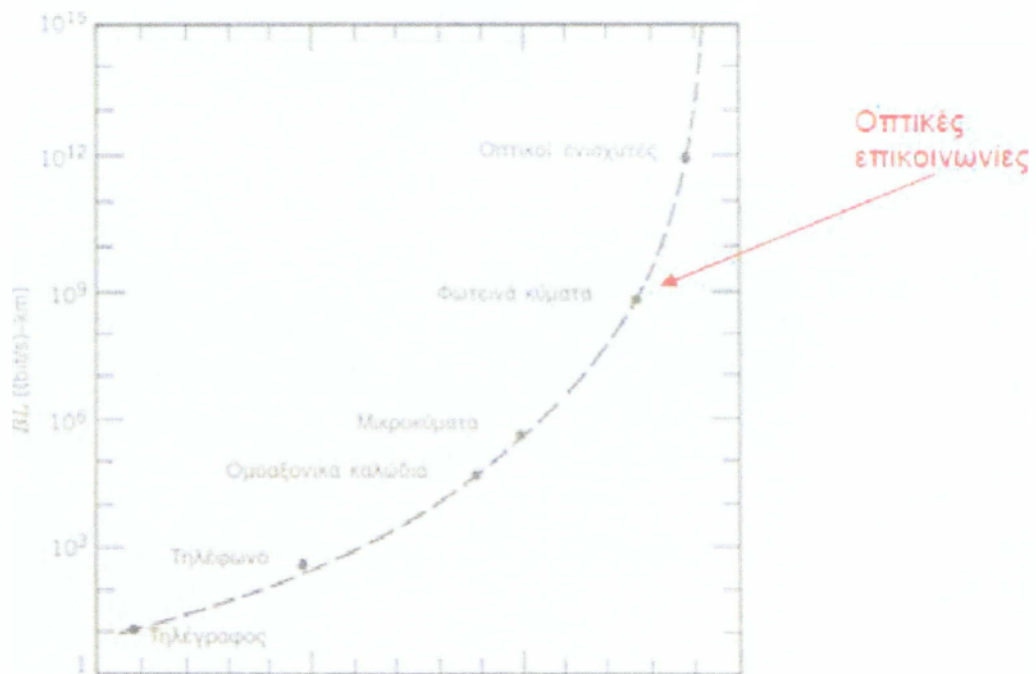


φάσματος θα μπορούσε εξαιρετικά αποδοτικά να χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση του φέροντος. Θα έπρεπε απλώς να ξεπερασθούν προβλήματα κυματοδότησης και εξασθένισης του φωτεινού σήματος. Τέτοια προβλήματα αντιμετωπίστηκαν και ξεπεράστηκαν στο πλαίσιο της τεχνολογίας των οπτικών ινών. Μιας τεχνολογίας που ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του 1960 και συνεπικουρούμενη της ανακάλυψης του Laser ημιαγωγών την ίδια περίπου περίοδο γνώρισε τεράστια βήματα προόδου. Έτσι δικαίως σήμερα μπορούμε να ισχυρισθούμε ότι το πάντρεμα της μικροηλεκτρονικής (επίτευγμα ουσιαστικά της τεχνολογίας των ημιαγωγών) και των δικτύων οπτικών ινών στιγματίσει την εποχή μας ως την εποχή της πληροφορίας.

## Εισαγωγή στις οπτικές επικοινωνίες



Σχήμα 1.1 Βασικό σύστημα οπτικών επικοινωνιών



Σχημα 1.2 Ιστορική αναδρομή τηλεπικοινωνιών

B: ρυθμός μετάδοσης ψηφιακού σήματος (bits / sec ή bps)

L: απόσταση μετάδοσης σήματος

Το γινόμενο BL (bps km) αποτελεί ένα αντιπροσωπευτικό μέγεθος σύγκρισης συστημάτων επικοινωνιών.

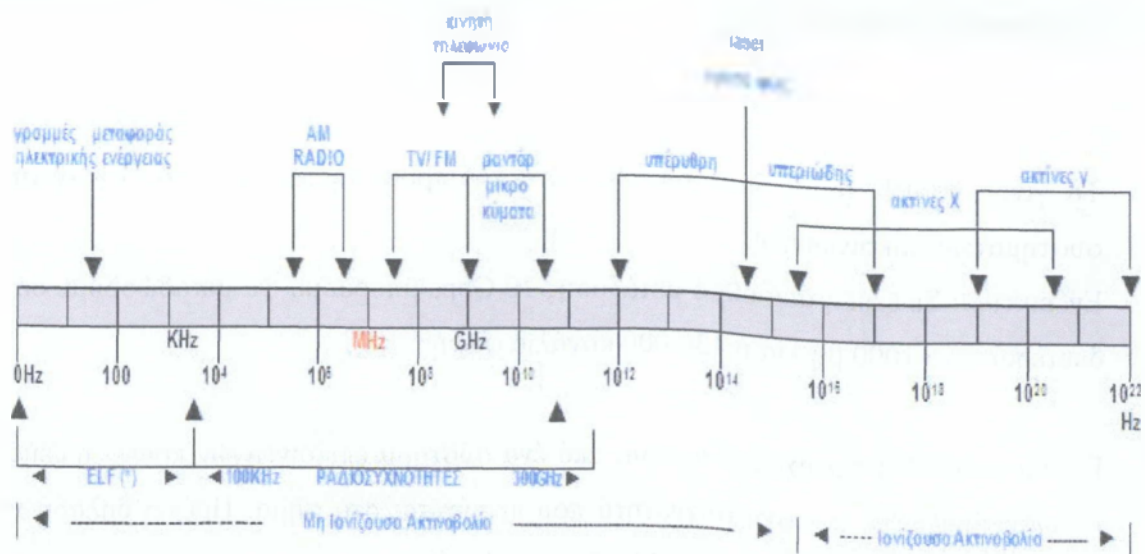
Ενδεικτικά: Σε ζεύξη με ρυθμό μετάδοσης 10 Gbps μπορούμε να μεταδώσουμε σε 1 δευτερόλεπτο 1000 βιβλία ή 130.000 κανάλια φωνής.

Για να μεταδοθεί επιτυχώς ένα σήμα από ένα σύστημα επικοινωνιών πρέπει η ζεύξη να υποστηρίζει τη μέγιστη συχνότητα που περιέχεται στο σήμα. Πρέπει δηλαδή να καλύπτει το εύρος ζώνης (bandwidth)  $\Delta f$  του σήματος.

Είδος σήματος	Εύρος ζώνης	Σχόλια
Φωνή	4 kHz	1 κανάλι τηλεφώνου
Μουσική	10 kHz	AM ραδιόφωνο
Μουσική	200 kHz	FM ραδιόφωνο
Τηλεόραση	6 MHz	
Ψηφιακά κωδικοποιημένη φωνή	64 kHz	
Ψηφιακή τηλεόραση	96 MHz	

Πίνακας 1.1 Εύρος ζώνης διαφόρων σημάτων

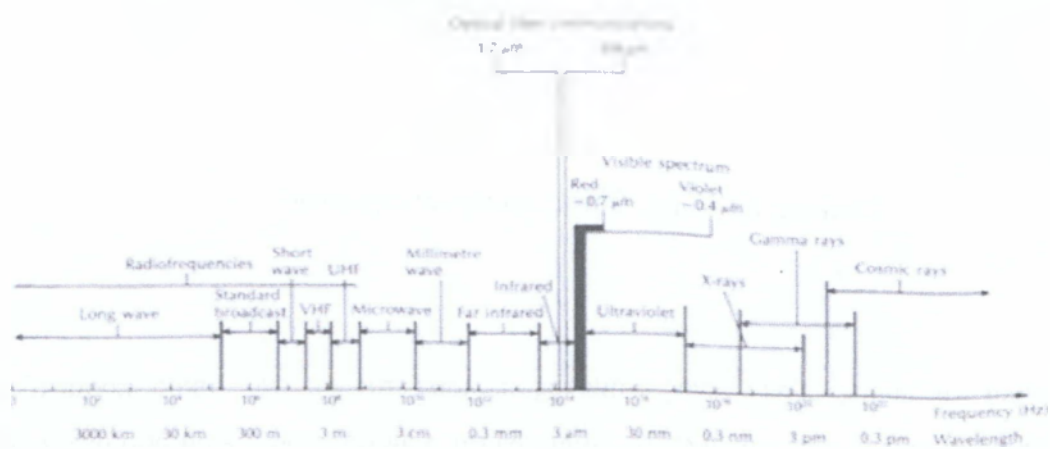
Γενικά το εύρος ζώνης ενός σήματος περιορίζεται σε ένα μικρό ποσοστό της φέρουσας συχνότητας πάνω στην οποία γίνεται η διαμόρφωση. Άρα όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα του φέροντος τόσο μεγαλύτερο το διαθέσιμο εύρος ζώνης άρα και μεγαλύτερη η ικανότητα μετάδοσης σήματος



Το Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα

(\*) ELF: Ίδιωμα Χαμηλής Ενέργειας

Σχημα 1.3α



Σχημα 1.3β

Οι οπτικές επικοινωνίες έχουν θεωρητικά διαθέσιμο εύρος ζώνης ως 100 THz

## 1.2 Πλεονεκτήματα συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

Η υψηλή διείσδυση της τεχνολογίας των οπτικών ινών στις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες δεν είναι τυχαία, αλλά αντίθετα οφείλεται στον μεγάλο αριθμό πλεονεκτημάτων της, τα οποία συνοψίζονται στα εξής:

- 1) Χαμηλό κόστος. Η κατασκευή ενός καλωδίου οπτικών ινών είναι πιο συμφέρουσα οικονομικά, σε σχέση με ένα χάλκινο καλώδιο ίδιας απόστασης και δυνατοτήτων. Αυτό ωφελεί αρχικά τους πάροχους υπηρεσιών τηλεπικοινωνιών, οι οποίοι με μικρότερο κόστος παρέχουν ποιοτικές υπηρεσίες. Τελικά αυτό μειώνει και τις ανάγκες απόσβεσης εξόδων των παρόχων, επομένως ωφελεί και τον καταναλωτή, που επιβαρύνεται με μικρότερες χρεώσεις για τις υπηρεσίες που χρησιμοποιεί.

- 2) Υψηλό bandwidth, το οποίο ξεπερνά κατά εκατοντάδες φορές αυτό ενός κοινού καλωδίου. Οι υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, εξασφαλίζουν ταχύτητες της τάξεως των Gbps, που με τη σειρά τους προσφέρουν αστραπιαία διαμεταγωγή δεδομένων και αξιόπιστες υπηρεσίες τηλεφωνίας μέσω πρωτοκόλλου IP.

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

- 4) Μικρές απαιτήσεις σε ενέργεια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν παρατηρούνται σημαντικές απώλειες σήματος, καθώς και στον τρόπο μετάδοσης δεδομένων, δηλαδή με τη χρήση φωτεινής δέσμης, που απαιτεί πολύ μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, σε σχέση με το ηλεκτρικό σήμα.

- 5) Αμιγώς ψηφιακό σήμα, που εξασφαλίζει υψηλότερη ποιότητα επικοινωνίας και αποφυγή προβλημάτων που θα προέκυπταν σε μια αναλογική μετάδοση. Στον κόσμο της ψηφιακής πληροφορίας, τα δεδομένα αναπαρίστανται από τα ψηφία 0 και 1, οι οποίοι ονομάζονται bits. Το 0 ισοδυναμεί με την κατάσταση «κλειστό» και το 1 με την κατάσταση «ανοικτό». Μια ακολουθία 8 bits σχηματίζουν 1 ψηφιακή λέξη που λέγεται byte ή octet. Οι οπτικές ίνες μεταδίδουν τις φωτεινές αναλαμπές με υψηλή αξιοπιστία, μεταφέροντας τα bytes με πολύ μικρότερες αλλοιώσεις σε σχέση με αυτές

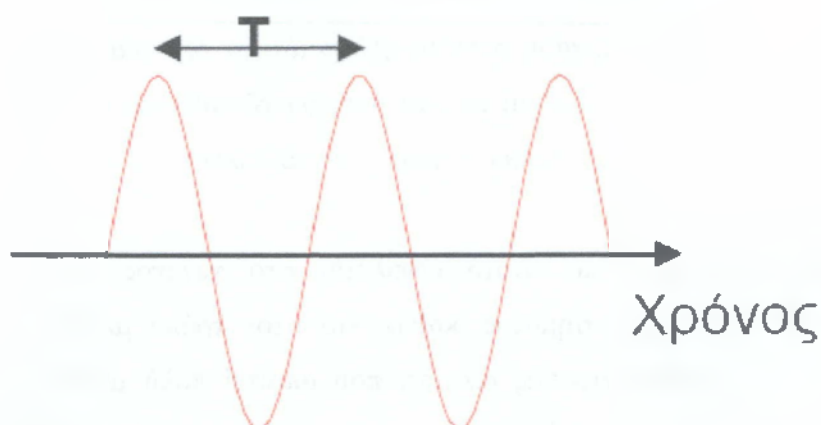
ενός κοινού καλωδίου δικτύου, ή μιας ασύρματης σύνδεσης δεδομένων.

- 6) Υψηλή διαθεσιμότητα, που οφείλεται κυρίως στην ανθεκτική κατασκευή των σύγχρονων οπτικών καλωδίων, που μειώνει στο ελάχιστο το ενδεχόμενο εξωτερικής ζημιάς.

- 7) Μικρές διαστάσεις και βάρος, καθώς ένα μικρό και ελαφρύ καλώδιο οπτικών ινών, μεταφέρει πολύ περισσότερα δεδομένα από ένα μεγαλύτερο και πιο βαρύ χάλκινο καλώδιο. Έτσι, απαιτείται πολύ λιγότερος χώρος για την υλοποίηση ενός δικτύου

### 1.3 Βασικές έννοιες οπτικής

Κυματική φύση του φωτός



Σχήμα 1.4 κυματική φύση του φωτός

Συχνότητα – frequency -F:  $\nu$  (Hz) = (T: περίοδος)

Μήκος κύματος – wave length:  $\lambda$  (m)

$$c = \lambda * \nu$$

$c = 3 * 10^8$  m/sec : ταχύτητα φωτός στο κενό

Ταχύτητα φωτός σε ένα υλικό

Υλικό	$n$	$v(10 \cdot m/sec)$
Κενό	1	3
Αέρας	1.0003	2.999
Νερό	1.33	~2.30
Γυαλί	1.46-1.96	~ 2.50 - 1.51
Διαμάντι	2.42	~1.24

Πίνακας 1.2 Ταχύτητα του φωτός και ο δείκτης διάθλασης ανάλογα με το υλικό

$$v = \frac{c}{n}$$

$n$  : Δείκτης διάθλασης υλικού

Πίνακας 1.2 Ταχύτητα του φωτός και ο δείκτης διάθλασης ανάλογα με το υλικό

Κβαντική φύση φωτός

Ενέργεια φωτονίου

$$E = h \cdot \nu$$

$h$ : σταθερά Planck  $6.626 \cdot 10^{-34} J \cdot sec$

Χρώμα	$\lambda (nm)$ [ $1nm = 10^{-9}m$ ]	$\nu (THz)$ [ $THz = 10^{12} Hz$ ]
Κόκκινο	780-622	384-482
Πορτοκαλί	622-597	482-503
Κίτρινο	597-577	503-520
Πράσινο	577-492	520-610
Μπλε	492-455	610-659
Ίώδες	455-390	659-769

 Υπέρουθρο  
IR

 Υπεριώδες  
UV

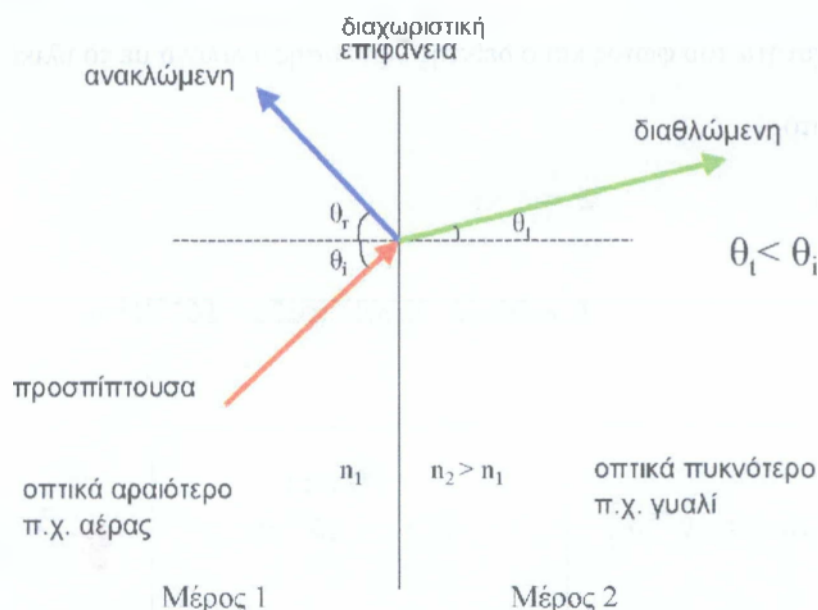
Πίνακας 1.3 Η περιοχή του ορατού φάσματος

### 1.3.1 Ανάκλαση και διάθλαση σε μια διαχωριστική επιφάνεια

Θεωρούμε φωτεινή ακτίνα που προσπίπτει υπό γωνία  $\theta_i$  σε μια επίπεδη διαχωριστική επιφάνεια δύο ιδανικών μέσων με δείκτες διάθλασης  $n_1$  και  $n_2$  αντίστοιχα (σχήμα 1.5). Αυτό που συμβαίνει είναι ένα μέρος της φωτεινής ακτίνας να ανακλαστεί πίσω στο μέσο 1 και ένα μέρος της να διαδοθεί στο μέσο 2. Το δεύτερο φαινόμενο ονομάζεται διάθλαση του φωτός. Οι γωνίες ανάκλασης και διάθλασης με την κάθετο στην διαχωριστική επιφάνεια είναι  $\theta_r$  και  $\theta_t$  αντίστοιχα.

Εξετάζουμε πρώτα την περίπτωση το φως να διαδίδεται **από οπτικώς**

Σχήμα 1.5 Ανάκλαση και διάθλαση φωτός που διαδίδεται από οπτικώς αραιότερο μέσο σε οπτικώς πυκνότερο



π.χ. από τον αέρα στο γυαλί. Αυτό εκφράζεται μαθηματικά με τη σχέση  $n_2 > n_1$  και δείχνεται στο σχήμα 1.5. Το σενάριο αυτό της διάδοσης του φωτός (από οπτικώς αραιότερο σε οπτικώς πυκνότερο) μας ενδιαφέρει μόνο κατά τη στιγμή της **σύζευξης του φωτός στην οπτική ίνα** και όχι κατά τη διάδοσή του όντας αυτό στην οπτική ίνα. Οι φυσικοί νόμοι που διέπουν το φαινόμενο είναι δύο:

**Νόμος της ανάκλασης:** η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης  $\theta_i = \theta_r$  και η ανακλώμενη ακτίνα βρίσκεται στο επίπεδο που καθορίζεται από την προσπίπτουσα ακτίνα και την κάθετο στη διαχωριστική επιφάνεια.

**Νόμος της διάθλασης του Snell:** καθορίζει τη γωνία διάθλασης  $\theta_t$  και δίνεται από τη σχέση:



$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r \quad (2.2)$$

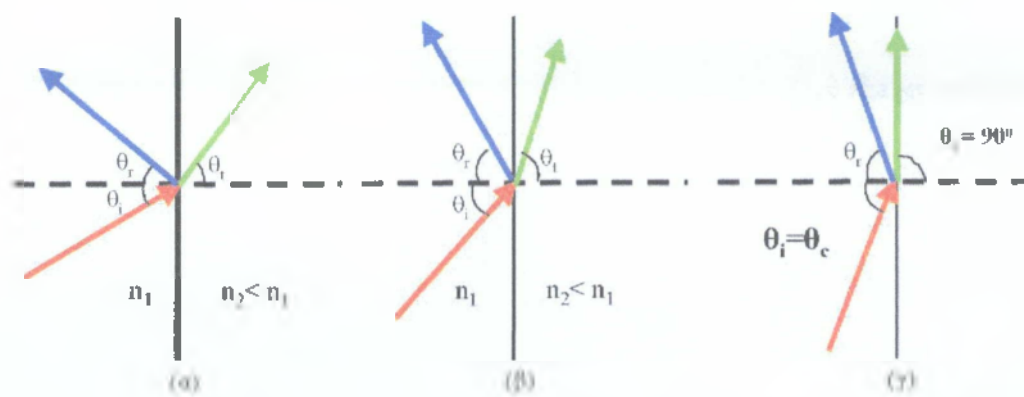
ή

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{n_2}{n_1}$$

Παρατηρούμε ότι, εφόσον έχουμε διάδοση φωτός από οπτικώς αραιότερο σε οπτικώς πυκνότερο ( $n_2 > n_1$ ) είναι από το νόμο του Snell  $\sin \theta_i > \sin \theta_r$  και συνεπώς η **γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη από τη γωνία διάθλασης**.

Πάντα δηλαδή στην περίπτωση αυτή έχουμε διάδοση του φωτεινού σήματος και στο δεύτερο μέσο διάδοσης.

Εξετάζουμε τώρα την περίπτωση που το φως διαδίδεται **από οπτικώς πυκνότερο μέσο σε οπτικώς πυκνότερο**, δηλ.  $n_2 < n_1$ . Είναι η περίπτωση που το φως διαδίδεται στο εσωτερικό μιας οπτικής ίνας (γυαλί) και προσπίπτει στη διαχωριστική επιφάνεια με τον αέρα. Ισχύουν και πάλι οι προηγούμενοι νόμοι της ανάκλασης και του Snell αλλά τώρα παρατηρούμε τα εξής: Επειδή  $n_2 < n_1$  ο νόμος του Snell δίνει τώρα  $\sin \theta_i < \sin \theta_r$  και συνεπώς η γωνία διάθλασης είναι μεγαλύτερη από τη γωνία πρόσπτωσης. Καθώς όμως η γωνία πρόσπτωσης αυξάνεται, για κάποια τιμή της  $\theta_i = \theta_c$  η γωνία διάθλασης γίνεται  $\theta_r = 90^\circ$  δηλ. η διαθλώμενη ακτίνα γίνεται παράλληλη με τη διαχωριστική επιφάνεια και δεν υπάρχει διάδοση του φωτεινού σήματος στο δεύτερο μέσο (σχήμα 1.6). Το φαινόμενο αυτό λέγεται ολική ανάκλαση και η γωνία πρόσπτωσης  $\theta_c$  για την οποία συμβαίνει λέγεται κρίσιμη γωνία.

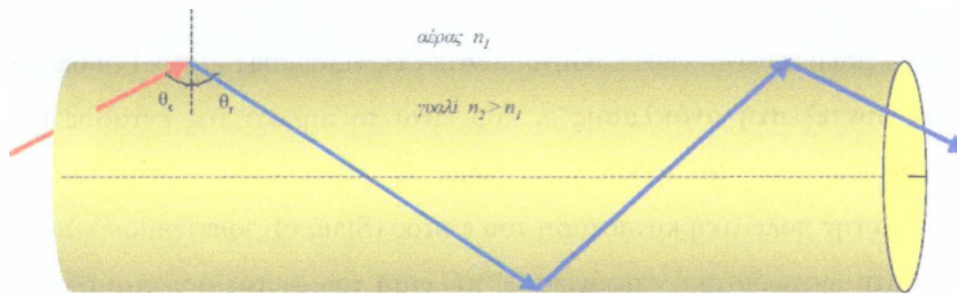


Σχήμα 1.6 Προσπίπτουσες ακτίνες φωτός από οπτικώς πυκνότερο σε οπτικώς αραιότερο μέσο (π.χ. γυαλί-αέρας). Καθώς η γωνία πρόσπτωσης αυξάνεται και πλησιάζει την κρίσιμη γωνία θα παρατηρείται ολική ανάκλαση (γ)

Από το νόμο του Snell για την περίπτωση της ολικής ανάκλασης έχουμε, θέτοντας  $\theta_r=90^\circ$  και  $\theta_i=\theta_c$ , την έκφραση για την κρίσιμη γωνία

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.3)$$

Το φαινόμενο της ολικής ανάκλασης είναι ο καθοριστικός λόγος για την τεχνολογική αξιοποίηση των οπτικών ινών ως κυματοδηγοί φωτεινών σημάτων στις τηλεπικοινωνίες. Όταν το φως που διαδίδεται στην οπτική ίνα προσπέσει στη διαχωριστική επιφάνεια γυαλιού-αέρα με γωνία μεγαλύτερη από τη κρίσιμη γωνία, θα υποστεί ολική ανάκλαση, δεν θα έχουμε πρακτικά διαρροή του σήματος στον αέρα (απώλειες) και θα συνεχίσει να διαδίδεται στην οπτική ίνα. (σχήμα 1.7)



Σχήμα 1.7. Κυματοδότηση φωτεινού σήματος μέσα από οπτική ίνα στα πλαίσια του φαινομένου της ολικής ανάκλασης.

Για να αποκτήσουμε μια πραγματική αίσθηση των φαινομένων μπορούμε να υπολογίσουμε τυπικές τιμές της κρίσιμης γωνίας πρόσπτωσης για ολική ανάκλαση στην τυπική περίπτωση που είναι

$$\frac{n_1}{n_2} = 1.01$$

Από το νόμο του Snell βρίσκουμε ότι η κρίσιμη γωνία είναι  $\theta_c = 88.3^\circ$  δηλ. μόλις  $1.7^\circ$  «ξυστά» από τη διαχωριστική επιφάνεια γυαλιού-αέρα.

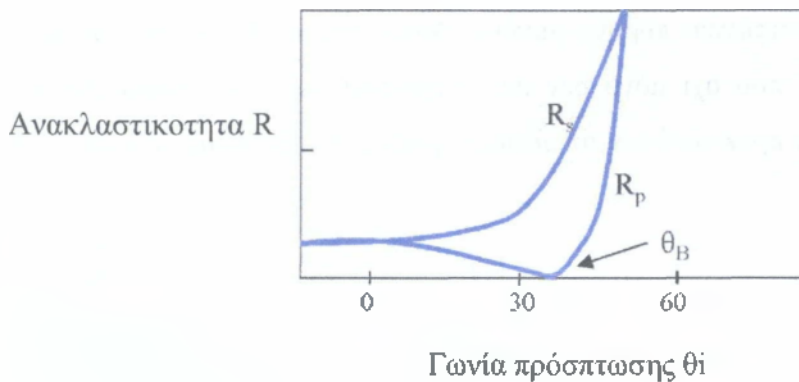
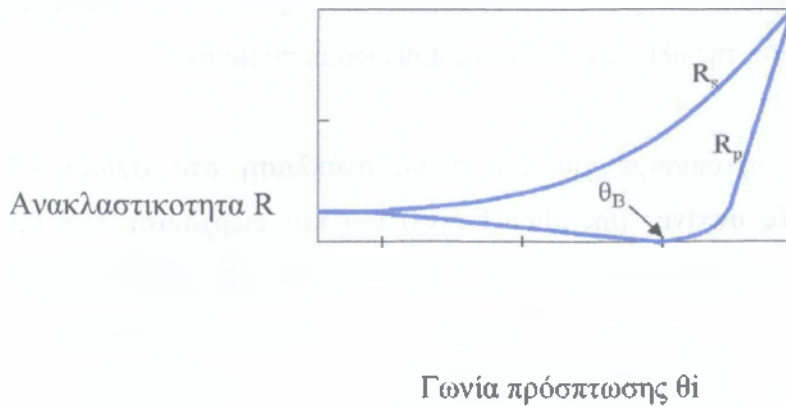
Αξίζει να τονίσουμε ότι η γεωμετρική προσέγγιση με φωτεινές ακτίνες και ο νόμος του Snell δεν μας δίνουν καμία ένδειξη για τις εντάσεις των ακτίνων που ανακλώνται και διαθλώνται. Εντάσεις φωτός μπορούν να υπολογισθούν μόνο στα πλαίσια της φυσικής οπτικής με τη λύση των εξισώσεων του MAXWELL που διέπουν τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία (όπως το φως). Χωρίς να εισέλθουμε σε πολύπλοκες λεπτομέρειες μαθηματικών υπολογισμών, που ενδεχομένως να είναι πέρα από το στοιχειώδες επίπεδο κάλυψης των φαινομένων που επιχειρούμε εδώ, αλλά αναφέρουμε ότι:

Με τη λύση των εξισώσεων MAXWELL οδηγούμαστε στις εξισώσεις Fresnel οι οποίες μας δίνουν τον **συντελεστή ανάκλασης  $\rho$** , που είναι το πηλίκο της έντασης του ανακλώμενου πεδίου προς το προσπίπτον πεδίο. Ο συντελεστής ανάκλασης  $\rho$  εξαρτάται και από την πολωτική κατάσταση του φωτός (State of polarization - SOP) που προσπίπτει στη διαχωριστική επιφάνεια. Η **πόλωση** του φωτός ορίζεται από το επίπεδο στο οποίο ταλαντώνεται το διάνυσμα της έντασης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου του φωτεινού σήματος (επίπεδα ή γραμμικά πολωμένο κύμα). Στη συνέχεια θα δούμε ότι η κατάσταση πόλωσης του φωτεινού σήματος που διαδίδεται στην οπτική ίνα έχει σημαντικό ρόλο στην τεχνολογία των οπτικών επικοινωνιών. Τέλος μπορούμε να υπολογίσουμε την **ανακλαστικότητα  $R$**  της διαχωριστικής επιφάνειας, που είναι ο λόγος της έντασης της ανακλώμενης δέσμης του φωτός προς την προσπίπτουσα, καθώς και τον **συντελεστή διέλευσης  $T$** , που είναι η ένταση της διαδιδόμενης φωτεινής ακτίνας προς την ένταση της προσπίπτουσας. Είναι

$$R=|\rho|^2$$

$$T= 1-R$$

Η ανακλαστικότητα  $R$  σαν συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης  $\theta_i$  δίνεται από το σχήμα 1.8 για δυο καταστάσεις πόλωσης: κάθετη στο επίπεδο πρόσπτωσης ( $R_s$ ) και παράλληλη στο επίπεδο πρόσπτωσης ( $R_p$ ).



Σχήμα 1.8 Ανακλαστικότητα  $P$  σαν συνάρτηση πρόσπτωσης για κάθετη ( $P_s$ ) και παράλληλη πόλωση ( $P_p$ ).

Από το σχήμα 1.7 παρατηρούμε ότι :

1. για παράλληλη πόλωση και γωνία πρόσπτωσης ίση με  $\theta_i = \theta_B$  η ανακλαστικότητα μηδενίζεται. Η γωνία  $\theta_B$  ονομάζεται γωνία Brewster και δίνεται από τη σχέση  $\tan \theta_B = n_2/n_1$

2. για διάδοση φωτός από οπτικώς αραιότερο σε οπτικώς πυκνότερο μέσο ( $n_1 < n_2$ ) πάντα είναι η  $R \leq 1$  καθώς  $\theta_i \leq 90^\circ$ , δηλ. πάντα έχουμε διάθλαση  $T = 1 - R \geq 0$ .

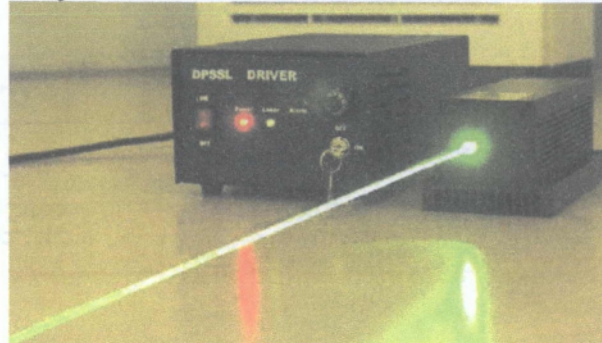
3. Για διάδοση από οπτικώς πυκνότερο σε οπτικώς αραιότερο μέσο ( $n_1 > n_2$ ), όταν η γωνία πρόσπτωσης γίνει μεγαλύτερη μιας κρίσιμης γωνίας ( $\theta_i > \theta_c$ ) η ανακλαστικότητα γίνεται  $R=1$  ανεξαρτήτου πόλωσης. Δεν έχουμε τότε διάθλαση ( $T=0$ ) και είναι η περίπτωση της ολικής ανάκλασης που είδαμε παραπάνω.

Οι ακτίνες φωτός που σχεδιάσαμε για την ολική ανάκλαση στο σχήμα 1.6 ονομάζονται **μεσημβρινές ακτίνες** (meridional rays) μια και διέρχονται από τον άξονα του πυρήνα της ίνας. Είναι οι απλούστερες και γενικότερα χρησιμοποιούμενες για την περιγραφή των βασικών ιδιοτήτων μετάδοσης στις οπτικές ίνες. Επιπλέον, η γεωμετρική προσέγγιση που υιοθετήσαμε στα παραπάνω για την ολική ανάκλαση και την κρίσιμη γωνία ισχύουν εφόσον πρόκειται για τέλεια οπτική ίνα χωρίς ασυνέχειες και ατέλειες στην ενδοεπιφάνεια πυρήνα-μανδύα. Διαφορετικά, θα είχαμε και άλλα ανεπιθύμητα φαινόμενα που όχι μόνο δεν θα οδηγούσαν σε ολική ανάκλαση και κυματοδήγηση, αλλά θα προκαλούσαν απώλειες σήματος εκτρέποντάς το εκτός του πυρήνα.

## Κεφάλαιο 2

### ΟΠΤΙΚΟΣ ΠΟΜΠΟΣ

#### 2.1 Βασικές έννοιες



Ο ρόλος των οπτικών πομπών είναι μετατρέπουν ένα ηλεκτρικό σήμα εισόδου σε αντίστοιχο οπτικό σήμα και να το εκπέμπουν στο εσωτερικό της οπτικής ίνας, δηλαδή στο κανάλι επικοινωνίας. Οι πηγές φωτός που χρησιμοποιούνται σε ένα οπτικό δίκτυο μπορεί να είναι είτε δίοδοι εκπομπής φωτός (light emitting diodes, LED) είτε λέιζερ ημιαγωγού (semiconductor lasers).

Ακόμα η επιλογή του είδους της πηγής φωτός που θα χρησιμοποιηθεί σε ένα οπτικό σύστημα μετάδοσης βασίζεται σε αρκετούς παράγοντες όπως:

Μήκος κύματος εκπομπής → παράθυρο μετάδοσης ίνας.

Σχέση ισχύος και απόστασης μετάδοσης

Το πλάτος του εύρους των μηκών κύματος → φαινόμενα διασποράς

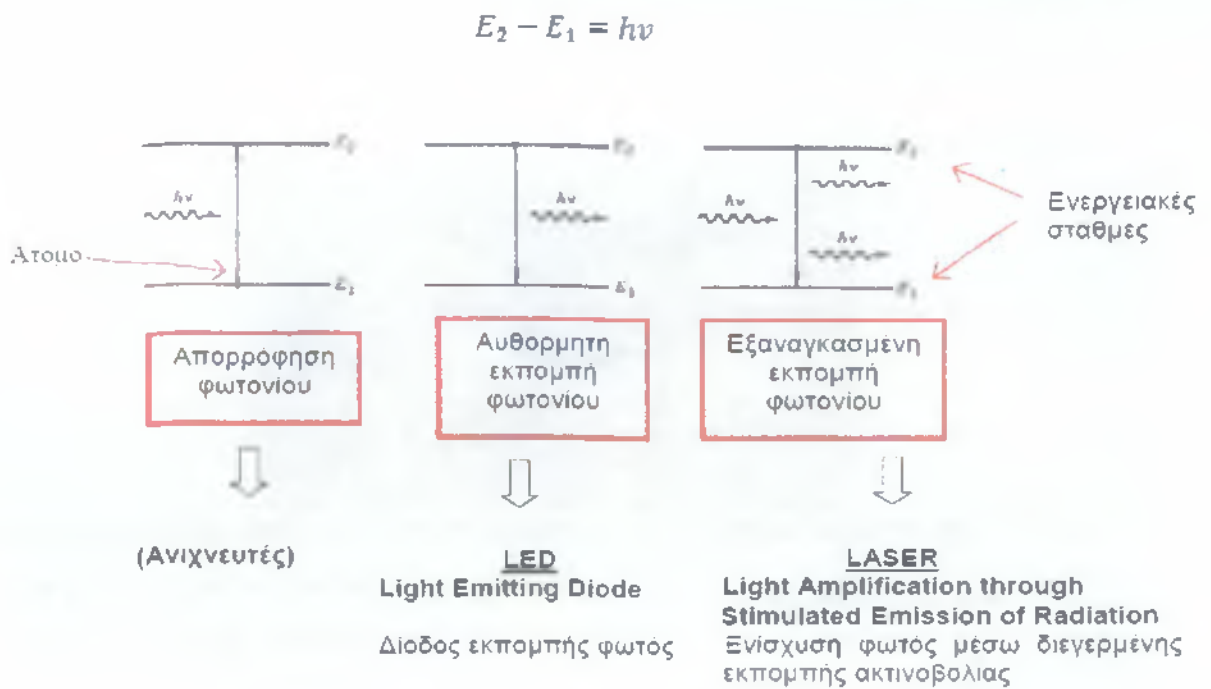
Αποτελεσματικός τρόπος διοχέτευσης του παραγόμενου φωτός στην οπτική ίνα μετάδοσης.



Σχήμα 2.1 Λειτουργία οπτικού πομπού

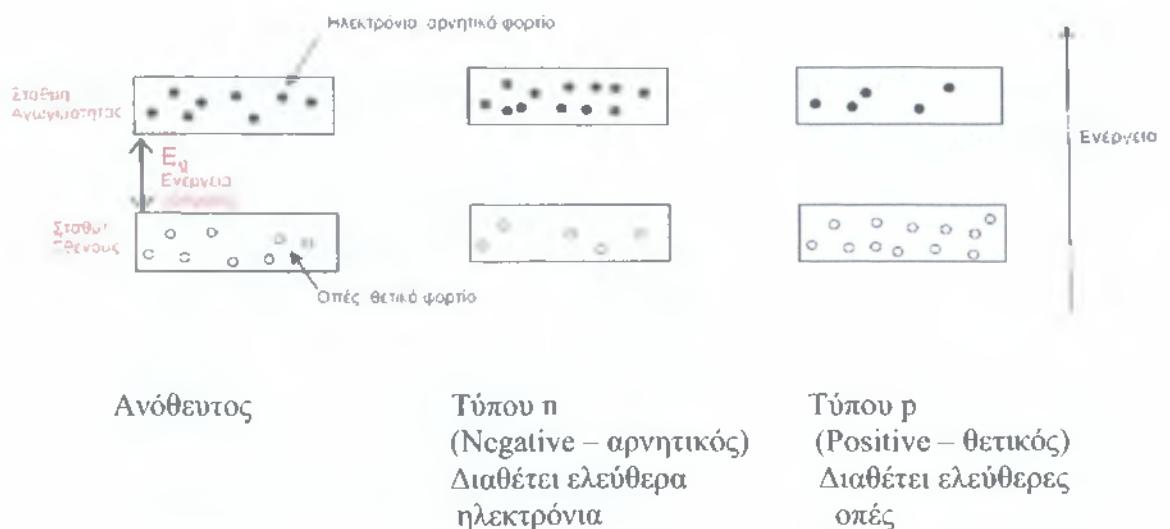
Οι βασικότερες λειτουργίες ενός οπτικού πομπού είναι οι εξής:

- Εκπομπή φωτός
- Διαμόρφωση του σήματος της οπτική πηγής από το σήμα προς μετάδοση
- Ζεύξη του φωτός στην οπτική ίνα



Σχήμα 2.2

### Ημιαγωγοί



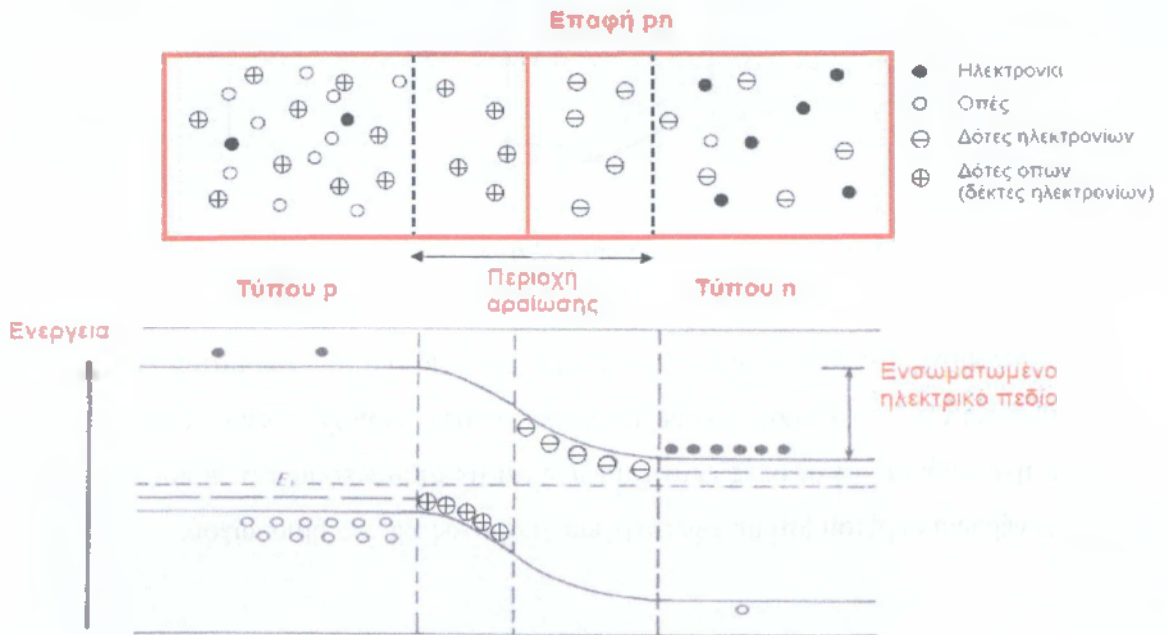
Σχήμα 2.3

Η δημιουργία ημιαγωγών τύπου n και p επιτυγχάνεται με την προσθήκη προσμίξεων επιλεγμένων υλικών σε κατάλληλες ποσότητες.



Ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο και μία ελεύθερη οπή μπορούν να ανασυζευχθούν οπότε το άτομο πάει να είναι φορτισμένο (επιστρέφει στην ουδέτερη κατάσταση).

Με την ανασύζευξη απελευθερώνεται ενέργεια.



Σχήμα 2.4

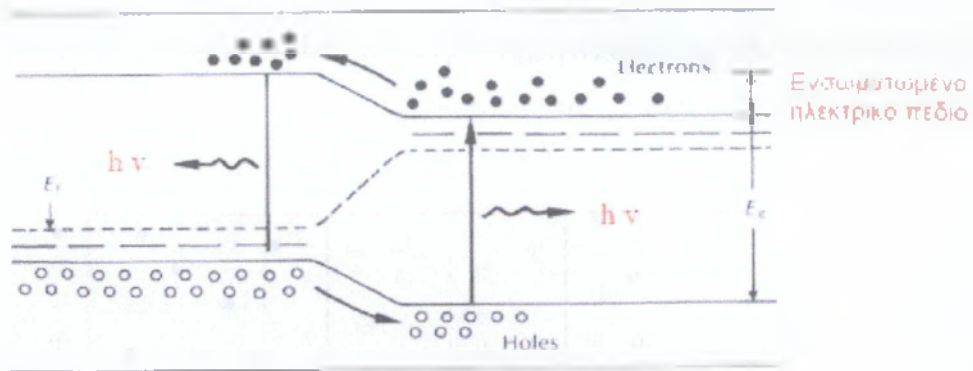
Το ενσωματωμένο ηλεκτρικό πεδίο εμποδίζει την μετακίνηση και επανασύνδεση των ελεύθερων φορτίων.

Ορθά πολωμένη επαφή pn -LED

(ομοιογενής)



Σχήμα 2.5



Σχήμα 2.6

Η εφαρμογή θετικής τάσης στην επαφή pn μειώνει το ενσωματωμένο πεδίο και επιτρέπει την μετακίνηση ελεύθερων φορτίων στην περιοχή απογύμνωσης. Τα ηλεκτρόνια και οι οπές επανασυνδέονται με αποτέλεσμα την εκπομπή φωτονίων με ενέργεια περίπου ίση με την ενέργεια χάσματος  $E_g$  του ημιαγωγού.

$$\lambda(\mu m) = \frac{1.24}{E_g(eV)}$$

Υλικό	Μήκος κύματος ( $\mu m$ )	Ενέργεια χάσματος (eV)
GaInP	0.64-0.68	1.82-1.94
GaAs	0.9	1.4
AlGaAs	0.8-0.9	1.4-1.55
InGaAs	1.0-1.3	0.95-1.24
InGaAsP	0.9-1.7	0.73-1.35

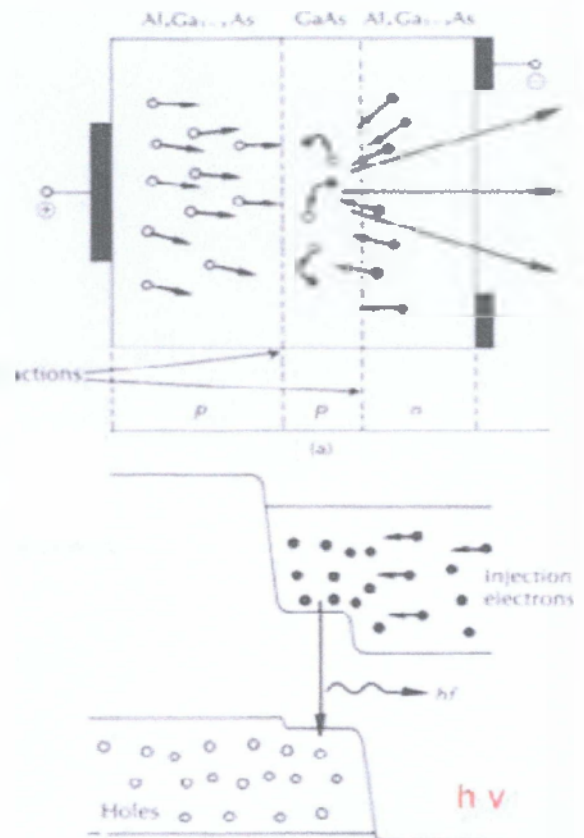
Πίνακας 2.1 Ημιαγωγοί και εκπεμπόμενα μήκη κύματος

## Ετερογενής επαφή

Στην ομοιογενή επαφή pn (επαφή από το ίδιο ημιαγωγικό υλικό) η επανασύνδεση των φορτίων γίνεται σε μια σχετικά μεγάλη περιοχή της επαφής με αποτέλεσμα το φως να εκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Επίσης ένα ποσοστό των φωτονίων που παράγονται επανα-απορροφούνται.

Αυτά τα προβλήματα αντιμετωπίζονται με τις ετερογενείς επαφές (επαφές που έχουν δημιουργηθεί από διαφορετικούς ημιαγωγούς)

## Ετερογενείς επαφές



## Παράδειγμα

*p-AlGaAs - p GaAs - n-AlGaAs*

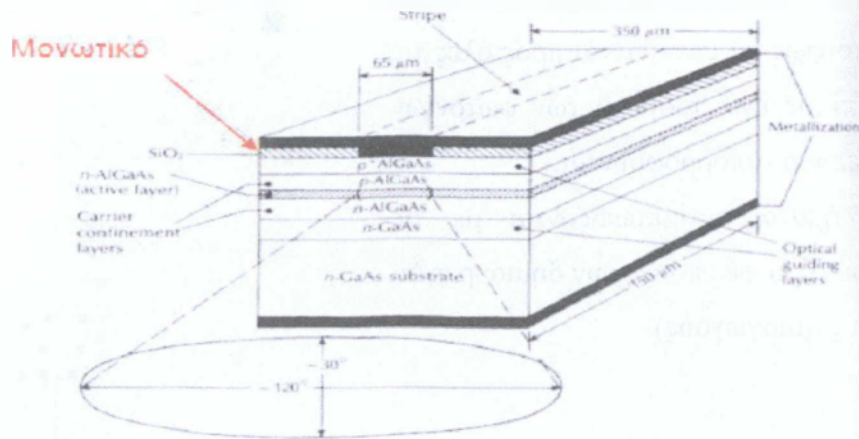
Σχήμα 2.7 Ετερογενείς επαφές

Με την εφαρμογή ορθής πόλωσης τα

ηλεκτρόνια μετακινούνται στην περιοχή του

GaAs όπου επανασυνδέονται με τις οπές και εκπέμπουν φωτόνια. Η μετακίνηση ηλεκτρονίων στην περιοχή του p-AlGaAs δεν είναι δυνατή λόγω του υψηλού ενσωματωμένου ηλεκτρικού πεδίου στην επαφή p-p

Επίσης λόγω των διαφορετικών ενεργειών χάσματος των γειτονικών ημιαγωγών τα φωτόνια δεν επανα-απορροφούνται



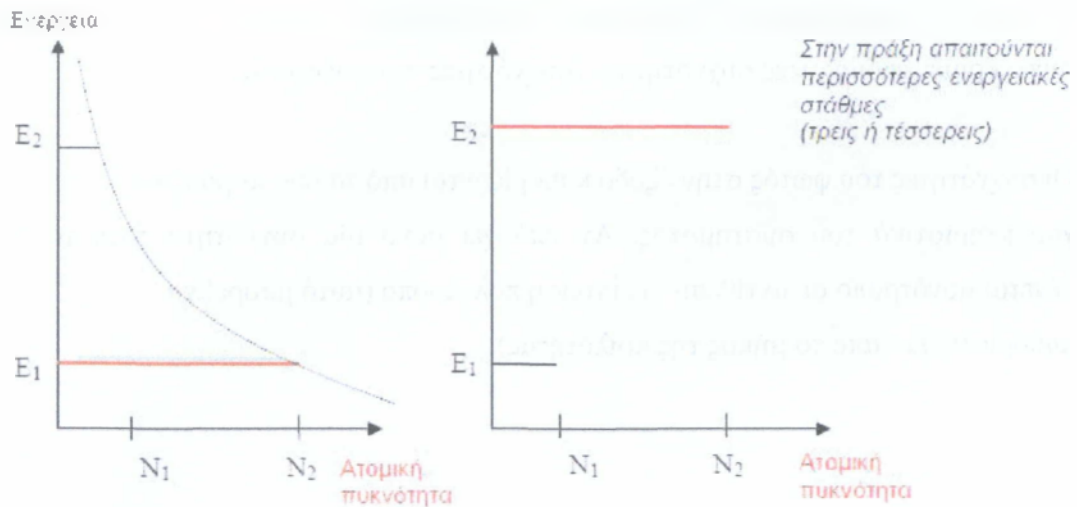
LED  
γεωμετρίας  
ακμής

Σχήμα 2.8  
LED γεωμετρίας ακμής

Προϋποθέσεις διεγερμένης εκπομπής (ακτινοβολία laser)

(Πρέπει να υπάρχουν άτομα σε διεγερμένη κατάσταση)

Αναστροφή πληθυσμών : Τα περισσότερα άτομα πρέπει να βρίσκονται στην ενεργειακή στάθμη με την υψηλότερη ενέργεια

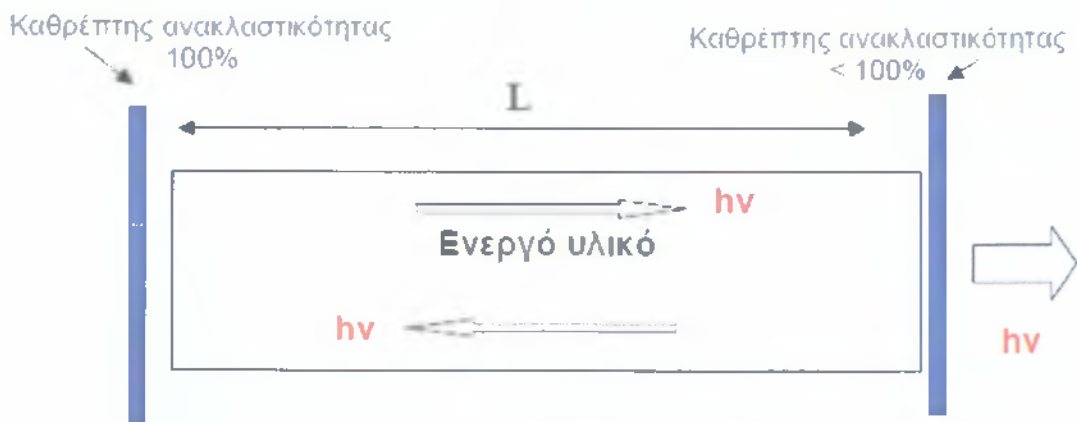


Σχήμα 2.9 Θερμική ισορροπία και αναστροφή πληθυσμού

(Πρέπει να υπάρχουν φωτόνια για να προκαλέσουν την εξαναγκασμένη πτώση διεγερμένων ατόμων)

Οπτική ανάδραση (κοιλότητα)

Τα φωτόνια που παράγονται παραμένουν στην περιοχή του ενεργού υλικού λόγω ανάκλασης σε καθρέπτες που το περικλείουν.

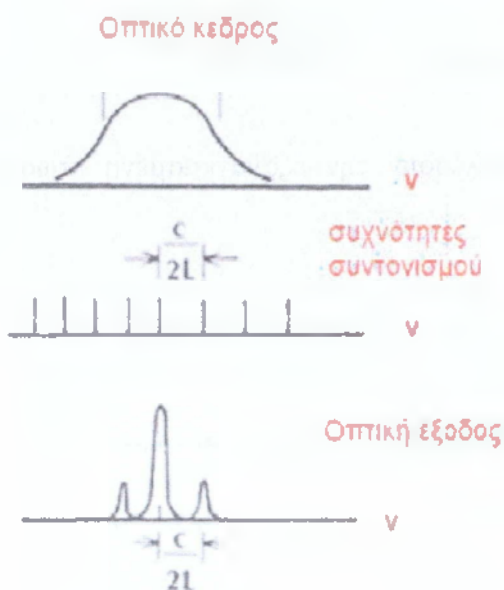


Σχήμα 2.10

Το ενεργό υλικό σε μία συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων (μήκος κύματος) που λέγεται οπτικό κέρδος

Η κοιλότητα που σχηματίζεται από τους δύο καθρέπτες επιτρέπει την ταλάντωση σε συγκεκριμένες διακριτές συχνότητες– (συχνότητες συντονισμού).

Οι συχνότητες του φωτός στην έξοδο καθορίζονται από τα δύο παραπάνω χαρακτηριστικά του συστήματος. Αν υπάρχει μόνο μία συχνότητα τότε το laser λέγεται μονότροπο σε αντίθεση περίπτωση πολύτροπο (αυτό μπορεί να καθοριστεί και από το μήκος της κοιλότητας)



Σχήμα 2.11

Οπτικό κέρδος  $\geq$  οπτικές απώλειες

Πιθανές πηγές απωλειών :

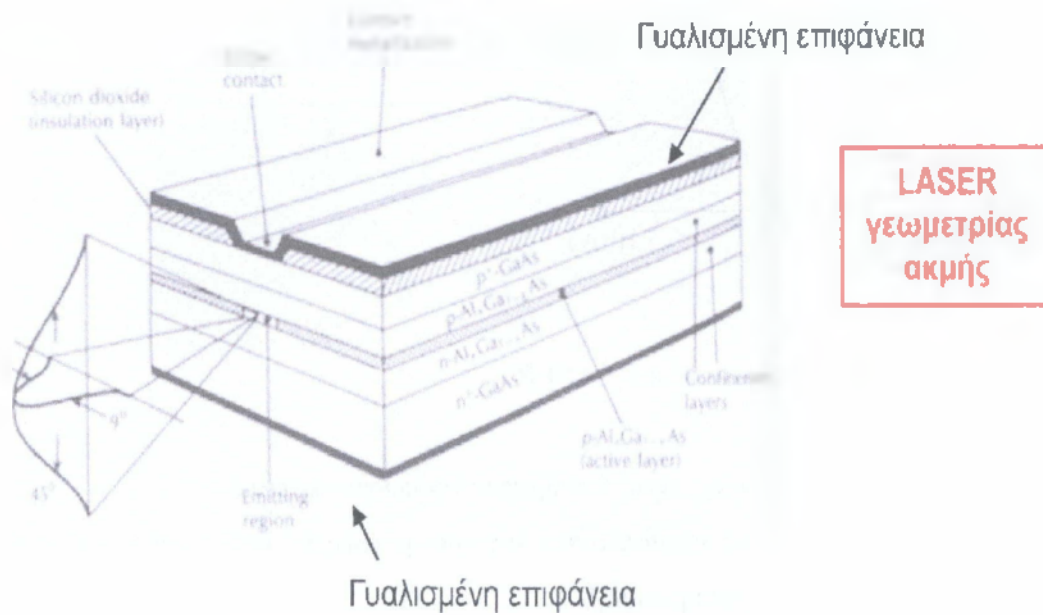
Απορρόφηση ακτινοβολίας στο ενεργό υλικό και στους καθρέπτες

Σκέδαση ακτινοβολίας στο ενεργό υλικό και τους καθρέπτες

Διαπερατότητα καθρέπτη ανακλαστικότητας  $< 100\%$

Στα laser ημιαγωγών η αναστροφή πληθυσμών επιτυγχάνεται με προσθήκη έντονων προσμίξεων ώστε να υπάρχουν πολλά ελεύθερα φορτία στην επαφή pn. Οι κοιλότητα

σχηματίζεται με γυάλισμα των δύο απέναντι επιφανειών της συσκευής που δρουν ως καθρέπτες

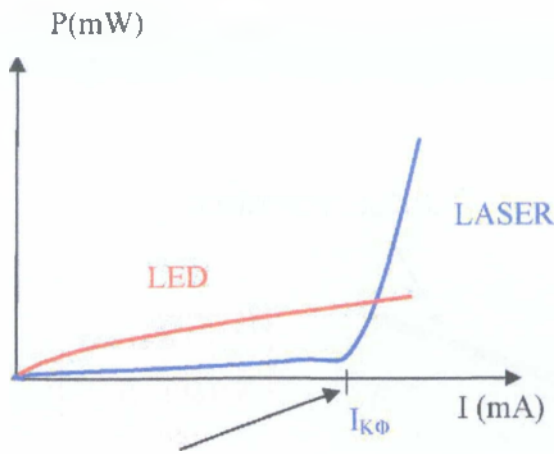


Σχήμα 2.12 LASER γεωμετρίας ακμής

## 2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΟΠΤΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ LED ΚΑΙ LASER

### 1) Οπτική ισχύς

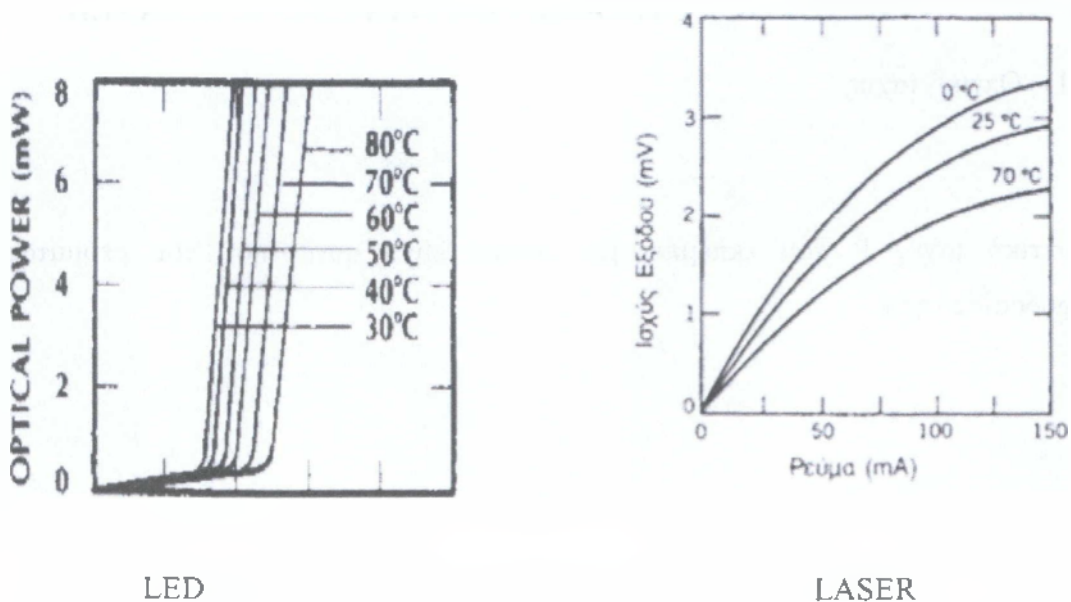
Η οπτική ισχύς  $P$  που εκπέμπει μια οπτική είναι συνάρτηση του ρεύματος τροφοδοσίας της  $I$ .



Σχήμα 2.13 Ρεύμα κατωφλίου LASER

LED: Ιδανικά η σχέση οπτικής ισχύος - ρεύματος τροφοδοσίας είναι γραμμική. Στην πράξη όμως εμφανίζονται μη γραμμικότητες (για υψηλά ρεύματα τροφοδοσίας και υψηλές θερμοκρασίας).

LASER: Η εκπομπή ακτινοβολίας laser αρχίζει για ρεύμα τροφοδοσίας μεγαλύτερο από το ρεύμα κατωφλίου  $I_{K\Phi}$ . Για την τιμή αυτή του ρεύματος (που εξαρτάται έντονα από τη θερμοκρασία) το οπτικό κέρδος είναι μεγαλύτερο από τις απώλειες ( $3^{\text{η}}$  προϋπόθεση εκπομπής ακτινοβολίας laser).



Σχήμα 2.14 Οπτική ισχύ LED-LASER



2) Χωρική κατανομή ακτινοβολίας

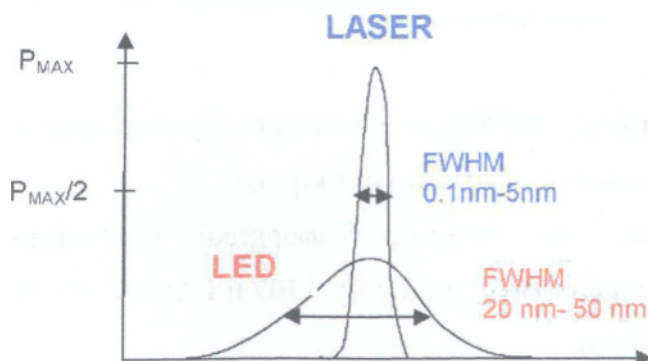


Σχήμα 2.15 Χωρική κατανομή ακτινοβολίας LED-LASER

Η ακτινοβολία που εξέρχεται από μια πηγή LED είναι πιο "απλωμένη" χωρικά σε σύγκριση με αυτή του LASER. Στο LASER λόγω διεγερμένης εκπομπής η ακτινοβολία είναι πιο κατευθυντική.

3) Φασματικό εύρος ακτινοβολίας (Δλ)

Γενικά, η ακτινοβολία που εκπέμπει μια οπτική πηγή περιέχει περισσότερα *από ένα μήκη κύματος και έχει ένα συγκεκριμένο φασματικό εύρος (Δλ)*. Το φασματικό εύρος αναφέρεται στην περιοχή μηκών κύματος που εκπέμπονται και μετράται στο FWHM του φάσματος (Full Width at Half Maximum- μέγιστο φασματικό εύρος στο μισό της μέγιστης ισχύος )



Σχήμα 2.16 Μήκος κύματος

Το φασματικό εύρος της οπτικής πηγής είναι πολύ σημαντικό στις οπτικές ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων λόγω της διασποράς που εμφανίζουν οι οπτικές ίνες

LED: Το φασματικό εύρος εξαρτάται από τις προσμίξεις και τη θερμοκρασία λειτουργίας της πηγής

LASER : Έχουν την ιδιότητα της μονοχρωματικότητας (λόγω διεγερμένης εκπομπής) ώστε με κατάλληλη επιλογή των απωλειών, του μεγέθους της κοιλότητας και του ρεύματος τροφοδοσίας μπορούν να δώσουν φως με ελάχιστο φασματικό εύρος.

### 2.3. Διαμόρφωση οπτικού σήματος



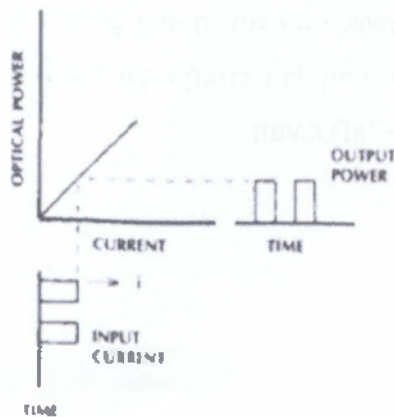
A) Άμεση διαμόρφωση

Σχήμα 2.17 Άμεση διαμόρφωση

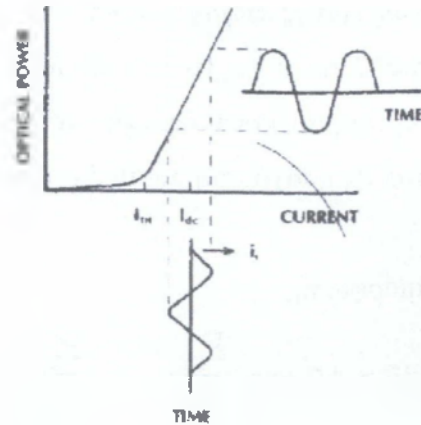
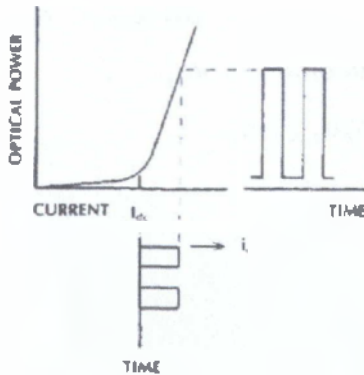
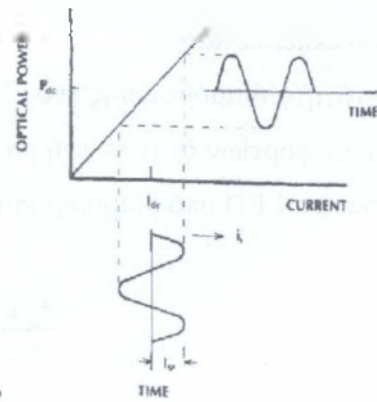
Το ρεύμα τροφοδοσίας της οπτικής πηγής μεταβάλλεται συναρτήσει τις πληροφορίες συνεπώς η πληροφορία αποτυπώνεται στην εκπεμπόμενη οπτική ισχύ.

Υπάρχουν διαφορετικές απαιτήσεις και συνεπώς διαφορετικά κυκλώματα τροφοδοσίας - διαμόρφωσης ανάλογα με το είδος της πηγής (LED ή LASER) και το είδος του σήματος (αναλογικό ή ψηφιακό).

## LED



## LASER



Σχήμα 2.18 Κυκλώματα τροφοδοσίας – διαμόρφωσης ανάλογα με το είδος της πηγής και το είδος του σήματος

### Ψηφιακό σήμα

- Απαιτείται τροφοδοσία γύρω από σταθερή τιμή ρεύματος  $I_{dc}$  μόνο για τα LASER
- Προτιμητέα πηγή: LASER

### Αναλογικό σήμα

- Απαιτείται τροφοδοσία γύρω από σταθερή τιμή ρεύματος  $I_{dc}$  και για τα LED και για τα LASER
- Η γραμμικότητα της πηγής είναι πολύ κρίσιμη
- Προτιμητέα πηγή: LED

Η συχνότητα διαμόρφωσης ουσιαστικά καθορίζει τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων (όσον αφορά τον πομπό) Η διαμόρφωση σε υψηλές συχνότητες μειώνει την οπτική ισχύ που εκπέμπεται.

Η δυνατότητα διαμόρφωσης ενός LED εξαρτάται κυρίως από τον χρόνο ζωής  $\tau$  των ελεύθερων φορτίων στην επαφή pn πριν την επανασύνδεση. Η οπτική ισχύ  $P_{\Delta}(\omega)$  που εκπέμπει ένα LED υπό διαμόρφωση σε συχνότητα  $\omega (=2\pi f)$  είναι:

$$\frac{P_{\Delta}(\omega)}{P_{X\Delta}} = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}}$$

όπου  $P_{X\Delta}$  η οπτική ισχύς που εκπέμπεται απουσία διαμόρφωσης (σταθερό ρεύμα τροφοδοσίας).

### Εύρος ζώνης διαμόρφωσης 3dB

Ονομάζεται η συχνότητα διαμόρφωσης  $f_{3dB}$  στην οποία η ισχύς της πηγής έχει την μισή τιμή συγκριτικά με την αντίστοιχη τιμή ισχύος απουσία διαμόρφωση.

Έστω  $P_{\Delta}$  η ισχύς παρουσία διαμόρφωσης και η ισχύς  $P_{X\Delta}$  ισχύς χωρίς

διαμόρφωση,

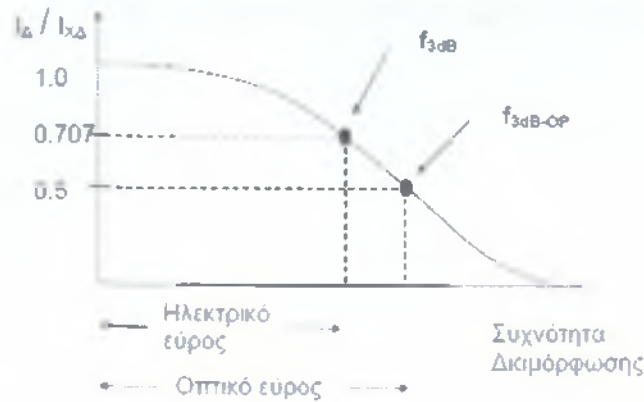
$$3dB = 10 \log \frac{P_{X\Delta}}{P_{\Delta}} \Rightarrow \frac{P_{X\Delta}}{P_{\Delta}} = 10^{0,3} = 2 \Rightarrow \frac{P_{\Delta}}{P_{X\Delta}} = \frac{1}{2}$$

Ηλεκτρικό εύρος ζώνης $f_{3dB}$	Οπτικό εύρος ζώνης $f_{3dB,OP}$
Ηλεκτρική ισχύ $P \propto I^2$	Οπτική ισχύ $P \propto I$
$\frac{P_{\Delta}}{P_{X\Delta}} = \frac{1}{2} \Rightarrow \left(\frac{I_{\Delta}}{I_{X\Delta}}\right)^2 = \frac{1}{2} \Rightarrow$	$\frac{P_{\Delta}}{P_{X\Delta}} = \frac{1}{2} \Rightarrow$
$\frac{I_{\Delta}}{I_{X\Delta}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$	$\frac{I_{\Delta}}{I_{X\Delta}} = \frac{1}{2} = 0.5$

Πίνακας 2.2 Τύποι ηλεκτρικού εύρους ζώνης  $f_{3dB}$  και οπτικού εύρους ζώνης  $f_{3dB,OP}$

Άρα

$$f_{3dB} = \frac{f_{3dB-OP}}{\sqrt{2}}$$



Σχήμα 2.19 Ηλεκτρικό και οπτικό εύρος ζώνης

ΤΥΠΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ $f_{3dB}$	
<b>LED:</b>	ως 100 MHz
<b>LASER:</b>	ως 10 GHz

## 2.4 Κωδικοί διαμόρφωσης (Codes)

Υπάρχουν διάφορες αντιστοιχίες bit- έντασης φωτός, η επιλογή της κατάλληλης για κάποιο σύστημα γίνεται βάση της πολυπλοκότητας που εισάγεται στο σύστημα για την παραγωγή της.

Από τις πιο διαδεδομένες είναι :

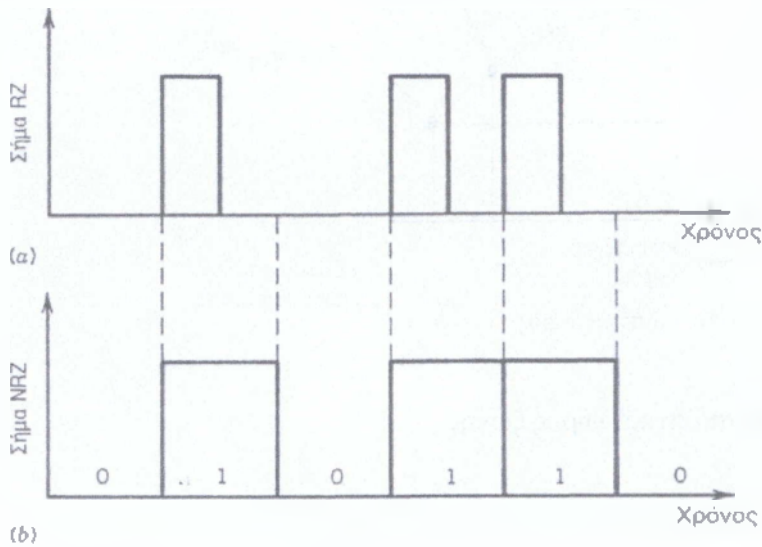
$$B_{MAX} = F_{3DB}$$

Διαμόρφωση με επιστροφή στο μηδέν (Return to Zero-RZ) Κάθε οπτικός παλμός που αναπαριστά το bit 1 είναι βραχύτερος από την περίοδο του bit και το πλάτος του επιστρέφει στο μηδέν (μηδενίζεται) πριν τελειώσει η διάρκεια του bit

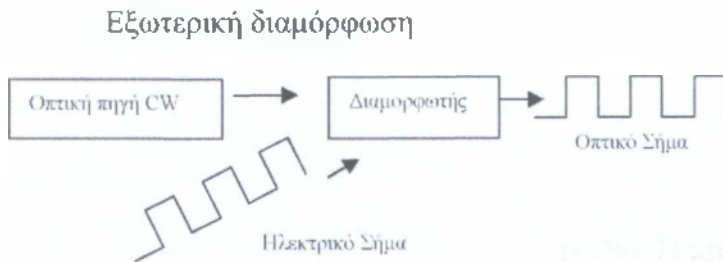
. Διαμόρφωση χωρίς επιστροφή στο μηδέν (Non Return to Zero- RZ)

$$B_{MAX} = 2F_{DBB}$$

Ο οπτικός παλμός παραμένει σε όλη τη διάρκεια της περιόδου του bit και το πλάτος του δεν πέφτει στο μηδέν μεταξύ δύο ή περισσότερων bit "1"



Σχήμα 2.20 Οπτικός παλμός



Σχήμα 2.21 Εξωτερική διαμόρφωση

Οι διαμορφωτές είναι διακόπτες, ανεξάρτητοι από τις οπτικές πηγές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συχνότητες διαμόρφωσης μεγαλύτερες από αυτές που είναι επιτρεπτές με απευθείας διαμόρφωση. Η απευθείας διαμόρφωση των οπτικών πηγών (laser) σε υψηλές συχνότητες μπορεί να αλλάξει τα χαρακτηριστικά της πηγής (φασματικό εύρος, μήκος κύματος) αλλαγές ανεπιθύμητες σε πολλές εφαρμογές.

### 2.4.1 Συζεύξη πηγής - οπτική ίνας

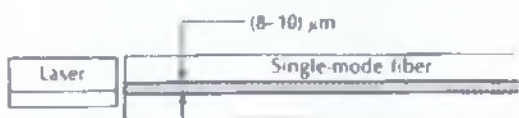
Ο αντικειμενικός σκοπός οποιουδήποτε πομπού είναι να συζεύξει όσο το δυνατό περισσότερο φως σε μια οπτική ίνα. Η ικανότητα ζεύξης εξαρτάται από :

Τον τύπο της οπτικής πηγής

Τον τύπο της οπτικής ίνας

Τη μέθοδος σύζευξης

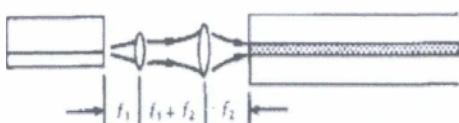
Απευθείας: LASER LED



10%

1-2%

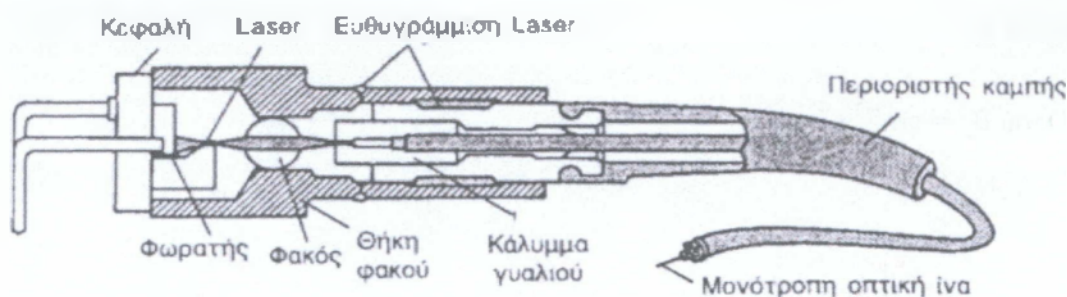
Ζεύξη μέσω φακών:



70%

15%

Πηγές συνδεδεμένες με οπτική ίνα (Pigtailed sources)



Σχήμα 2.22 Πηγές συνδεδεμένες με οπτική ίνα

Χρόνος ζωής

Η ισχύ που εκπέμπεται μειώνεται με τη λειτουργία της πηγής. Χρόνος ζωής ονομάζεται η χρονική περίοδο μετά την οποία η ισχύ της πηγής έχει πέσει στο μισό της αρχικής.

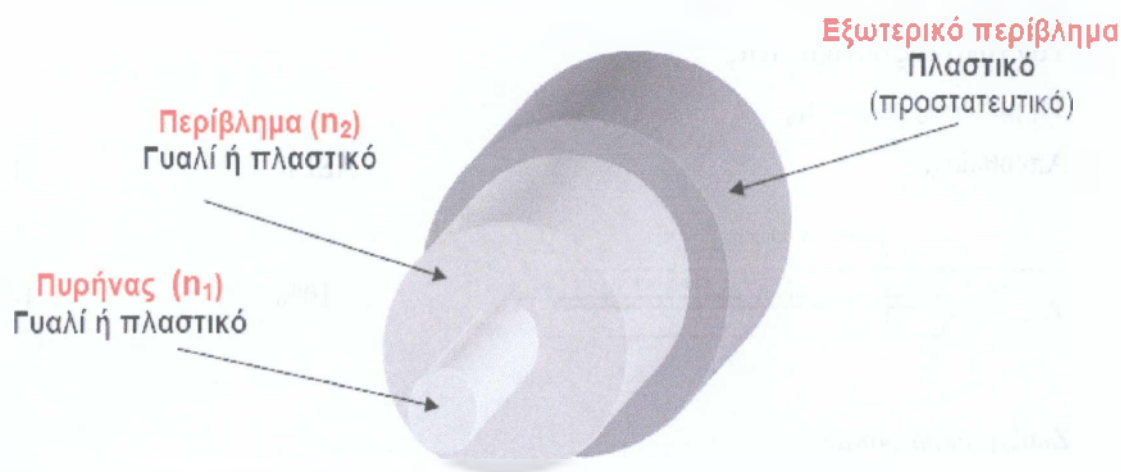
Τυπικές τιμές χρόνου ζωής είναι  $10^5$  ώρες (περίπου 11 χρόνια)

Τα LASER λόγω μεγαλύτερης ευαισθησίας στην αύξηση της θερμοκρασίας έχουν μικρότερο χρόνο ζωής.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΟΠΤΙΚΗ ΙΝΑ

#### 3.1 Ανατομία μιας οπτικής ίνας και αρχές διάδοσης φωτός



$$n_1 > n_2$$

Σχήμα 3.1 Ανατομία οπτικής ίνας

Το φως διαδίδεται στον πυρήνα της οπτικής ίνας με διαδοχικές ολικές ανακλάσεις  $\theta_i > \theta_c$

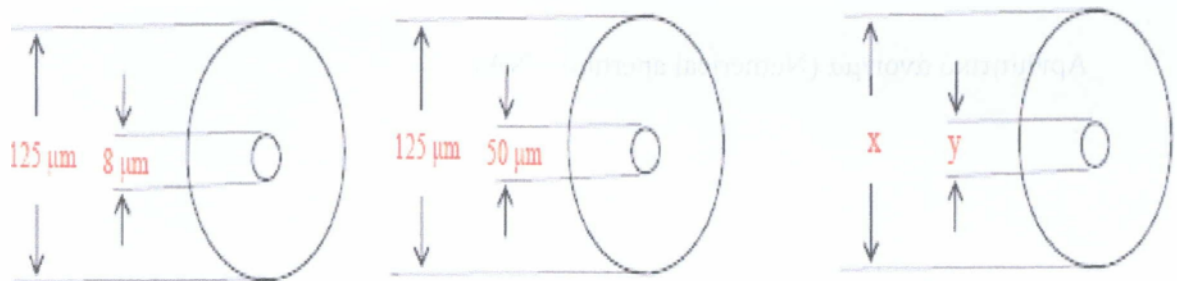
Όπου  $\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1}$



Σχήμα 3.2 Κρίσιμη γωνία



Διαστάσεις (ενδεικτικά)



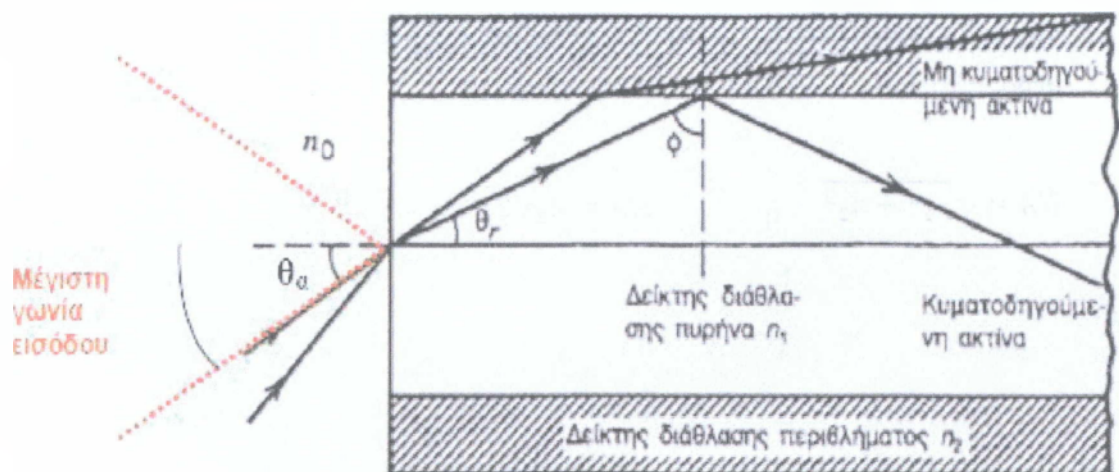
Σχήμα 3.3 Διαστάσεις οπτικής ίνας

Διάμετρος πυρήνα /	$200\mu\text{m} < y < 1\text{mm}$
Διάμετρος περιβλήματος	
Π.χ. 8/125	Πλαστικές ίνες

Γυάλινες ίνες

Τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές(κυρίως)

Μέγιστη γωνία εισόδου

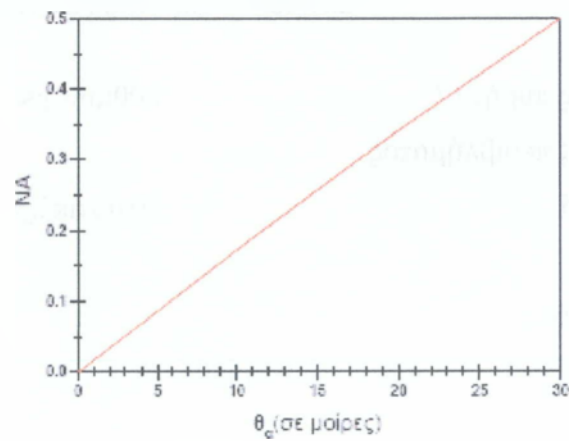


Σχήμα 3.4 Μέγιστη γωνία εισόδου

Μόνο οι ακτίνες που προσπίπτουν στην επιφάνεια της ίνας με γωνία μικρότερη από την  $\theta_c$  οδηγούνται από την ίνα

Αριθμητικό άνοιγμα (Numerical aperture – NA)

$$NA = n_0 \sin \theta_c$$



Σχήμα 3.5 Αριθμητικό άνοιγμα

Όπου  $n_0$  είναι ο δείκτης διάθλασης του υλικού που βρίσκεται έξω από την ίνα. Αν αυτό είναι αέρας τότε  $n_0=1$

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \text{ή} \quad NA = n_1 \sqrt{2\Delta}$$

Αποδεικνύεται ότι :

Όπου  $\Delta$  η κλασματική μεταβολή του δείκτη διάθλασης πυρήνα - περιβλήματος

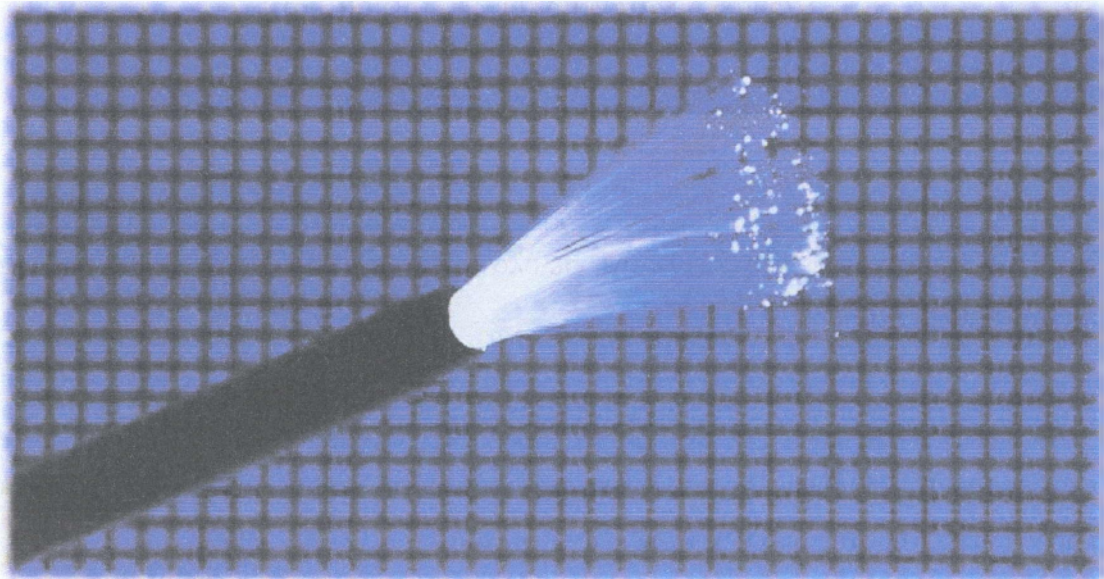
$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$$

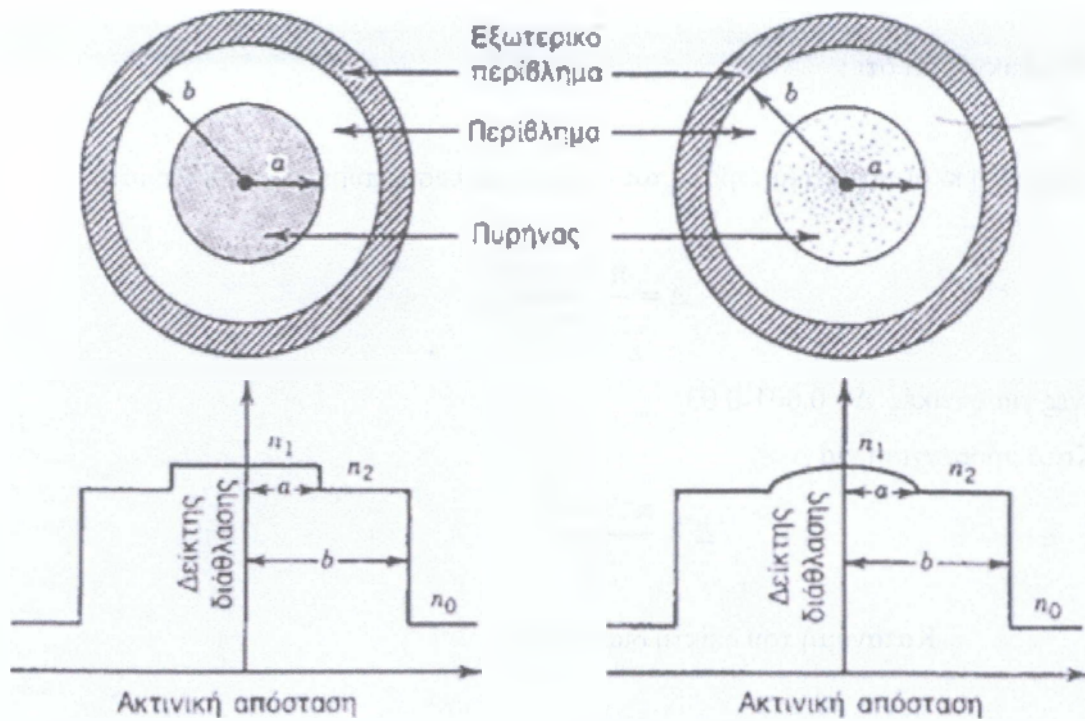
Ίνες για οπτικές  $\Delta = 0.001-0.03$

Κατά προσέγγιση για  $\Delta \ll 1$  :

$$\Delta \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

Κατανομή του δείκτη διάθλασης

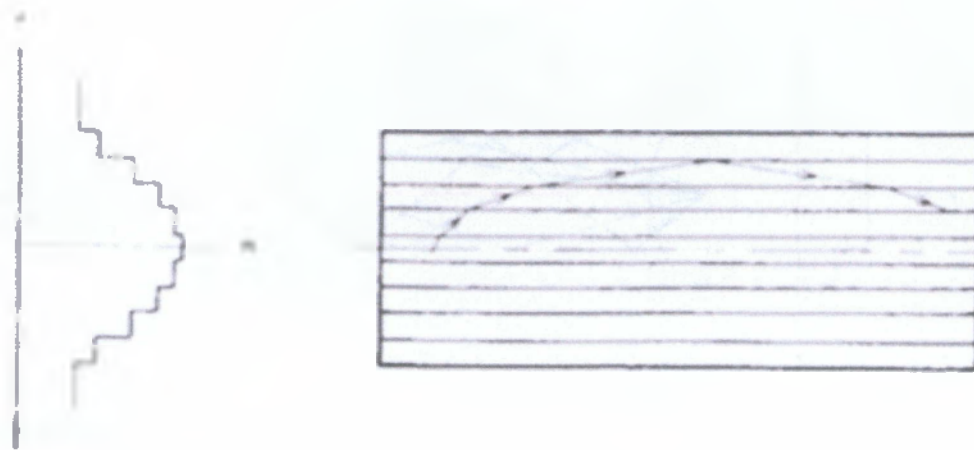




Σχήμα 3.6 Κατανομή του δείκτη διάθλασης

Στην ίνα βηματικού δείκτη διάθλασης, σε όλο τον πυρήνα ο δείκτης διάθλασης έχει παντού την ίδια τιμή,

Στην ίνα διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης, ο δείκτης διάθλασης έχει μέγιστη τιμή στο κέντρο του πυρήνα και μειώνεται σταδιακά μέχρι την διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα περιβλήματος όπου έχει την ελάχιστη τιμή



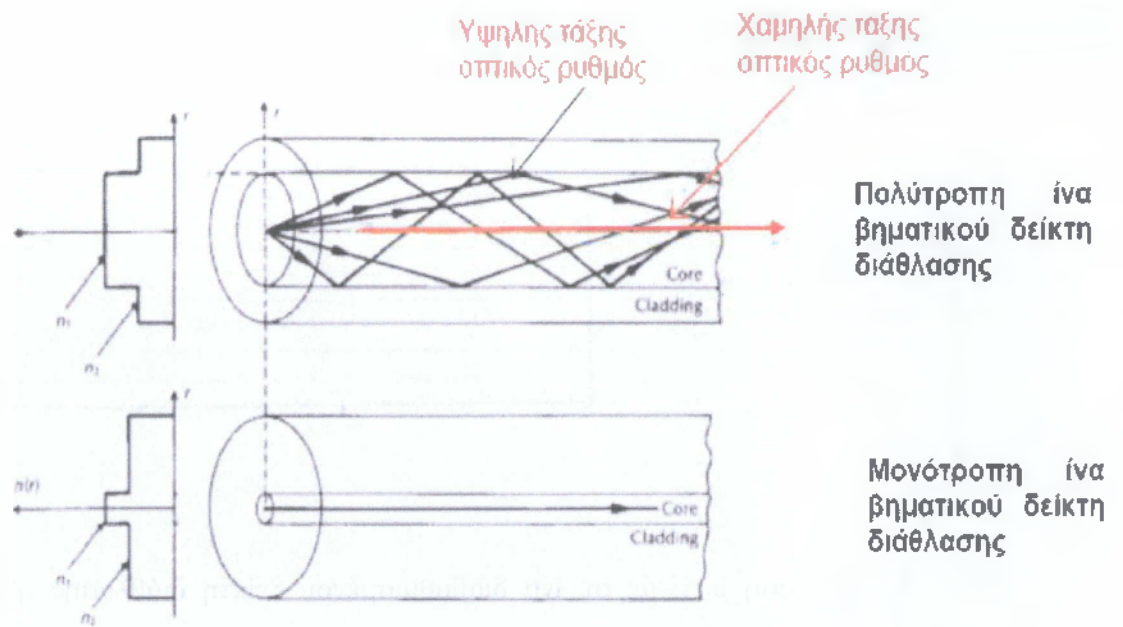
Σχήμα 3.7 Διάδοση ακτίνας σε ένα διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης (βηματική προσέγγιση)

### 3.2 Οπτικοί τρόποι μετάδοσης (modes)

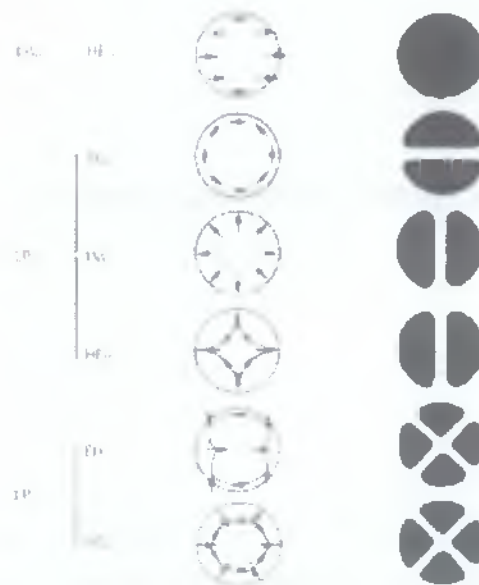
Οι οπτικοί τρόποι μετάδοσης είναι μαθηματικές και φυσικές έννοιες που περιγράφουν την διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (φως) από την οπτική ίνα ή κάποιο κυματοδηγό γενικότερα.

Κάθε οπτικός τρόπος μετάδοσης αντιπροσωπεύει μία λύση της κυματικής εξίσωσης που προκύπτει από τις εξισώσεις MAXWELL. Πιο απλά κάθε οπτικός τρόπος μετάδοσης είναι μια διαδρομή την οποία ακολουθεί το φως καθώς διαδίδεται από την ίνα.

Μία ίνα μπορεί να υποστηρίξει από 1 έως περισσότερους από 100000 οπτικούς τρόπους μετάδοσης ανάλογα με το μέγεθος της και τα χαρακτηριστικά της.



Ηλεκτρικό πεδίο και κατανομή της έντασης των 6 πρώτων οπτικών τρόπων μετάδοσης



Χαμηλής τάξης οπτικός ρυθμός

Υψηλής τάξης οπτικός ρυθμός

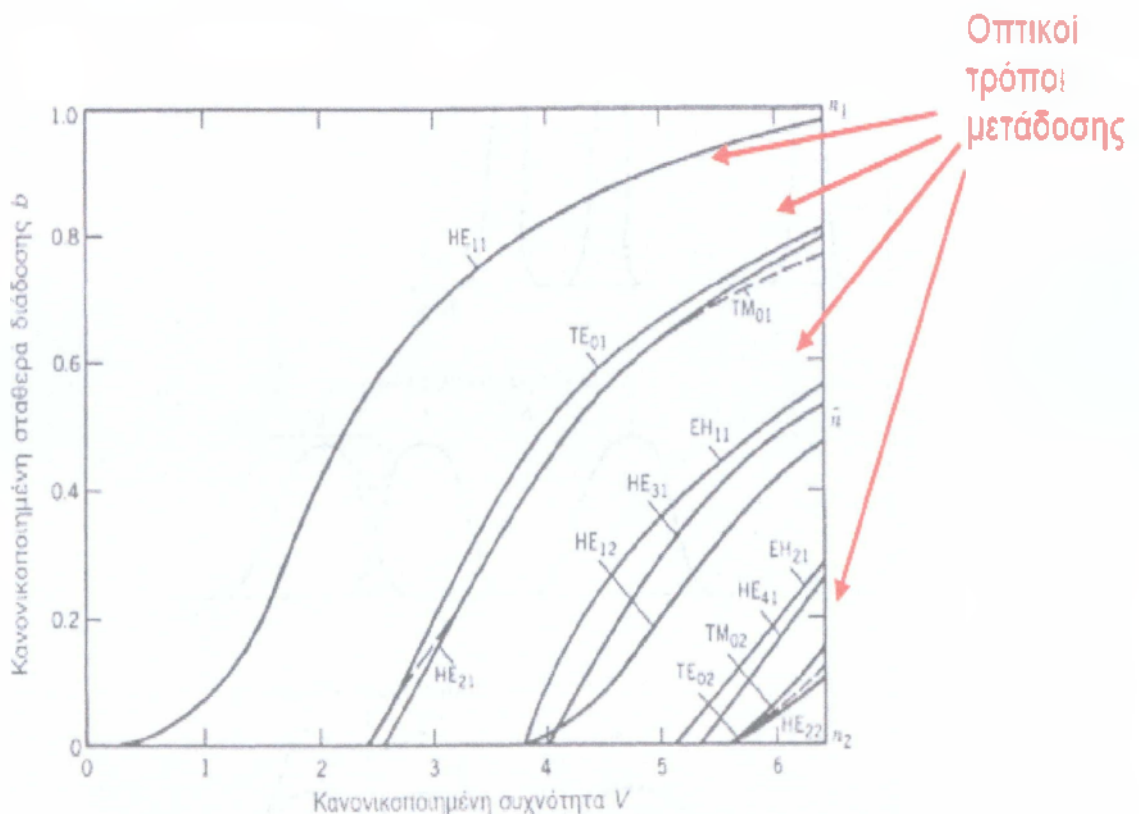
Σχήμα 3.8 Οπτικοί τρόποι μετάδοσης

### Κανονικοποιημένη συχνότητα $V$

Για να συσχετίσουμε τα χαρακτηριστικά της ίνας (ακτίνα, δείκτη διάθλασης) και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που μπορεί να μεταδοθεί από την ίνα ορίζουμε την κανονικοποιημένη συχνότητα  $V$  (παράμετρος  $V$ )

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \text{ή} \quad V = \frac{2\pi a}{\lambda} n_1 \sqrt{2\Delta}$$

Όπου  $a$  είναι η ακτίνα του πυρήνα της ίνας



Σχήμα 3.9 Διάγραμμα οπτικών τρόπων μετάδοσης ίνας βηματικού δείκτη διάθλασης

Για  $V < 2.405$  μόνο ένας τρόπος μετάδοσης υποστηρίζεται "Μονότροπη ίνα"

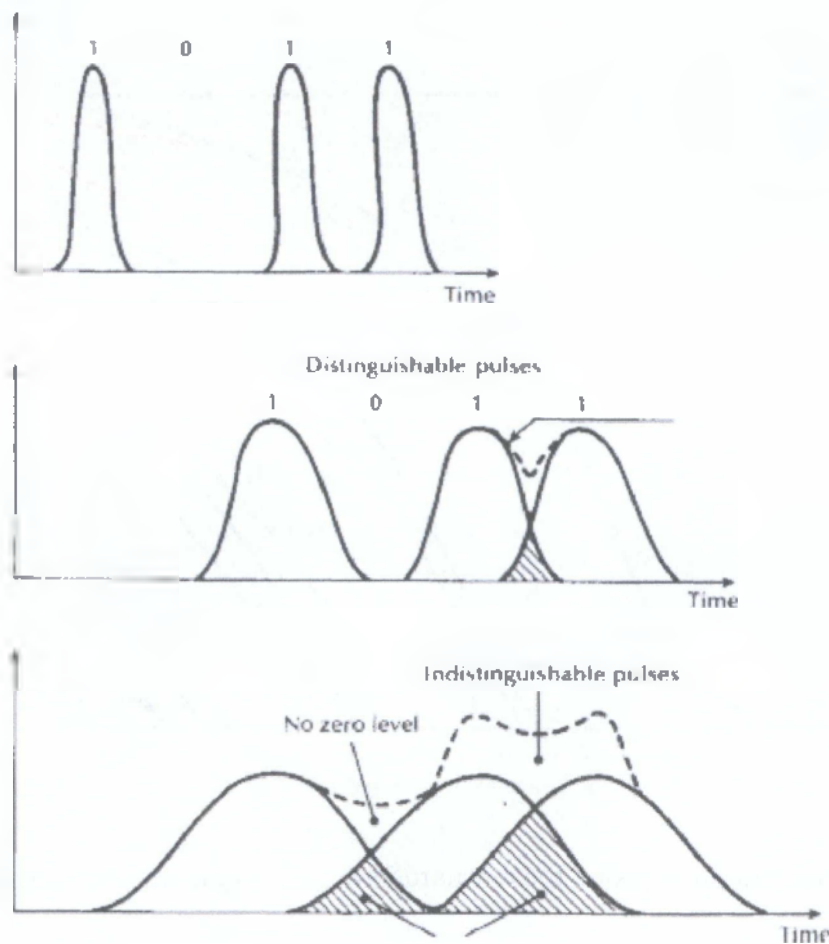
Για μια συγκεκριμένη ίνα κάθε οπτικός τρόπος μετάδοσης υποστηρίζεται μέχρι κάποιο μήκος κύματος  $\lambda < \lambda_c$  όπου  $\lambda_c$  το μήκος κύματος αποκοπής αυτού του οπτικού τρόπου μετάδοσης (cut off wavelength)

### 3.3 Χαρακτηριστικά οπτικών ινών

Διασπορά (**Dispersion**) ps / km nm

Φαινόμενο που προκαλεί τη χρονική διαπλάτυνση των παλμών κατά τη μετάδοση.

Αφού ο ρυθμός μετάδοσης των bit πρέπει να είναι τόσο χαμηλός ώστε οι παλμοί στο τέλος της ίνας να μην επικαλύπτονται η διασπορά περιορίζει το ρυθμό μετάδοσης της πληροφορίας που μπορεί να υποστηρίξει η ίνα επιτυχώς.



Σχήμα 3.10 Διασπορά



Οπτικό εύρος ζώνης  $f_{3dB-OP}$  οπτικής ίνας (κατά προσέγγιση)

$$f_{3dB-OP} = \frac{1}{2\tau}$$

όπου  $\tau$  (sec) είναι η χρονική διαπλάτυνση των παλμών μετά την διάδοση τους σε συγκεκριμένη απόσταση  $L$  (και η αρχική χρονική διάρκεια κάθε παλμού) .

Η τελική χρονική διαπλάτυνση ενός παλμού αυξάνει με το μήκος της ζεύξης και συνήθως για σύγκριση χρησιμοποιείται το γινόμενο οπτικού εύρους ζώνης επί μήκος ζεύξης:  $f_{3dB-OP} \times L$

Είδη διασποράς στις οπτικές ίνες

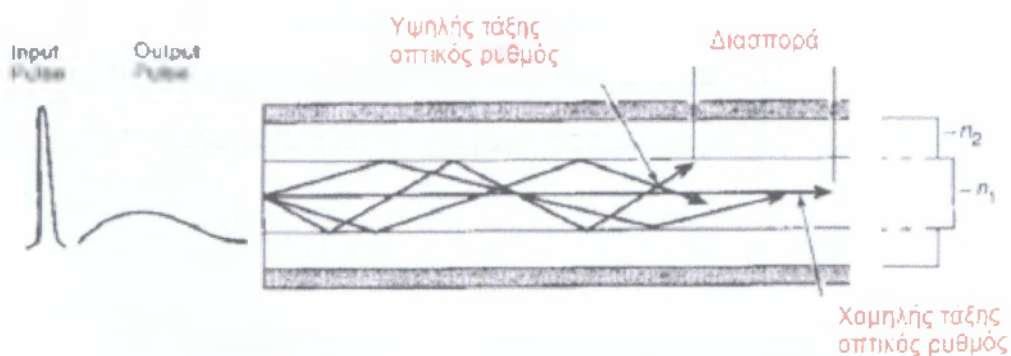
### 1. Διατροπική διασπορά (intermodal or mode dispersion)

Διαφορετικοί οπτικοί τρόποι μετάδοσης μεταδίδονται (γενικά) με διαφορετική ταχύτητα.

Ένας παλμός όταν εισάγεται στην ίνα γενικά διεγείρει περισσότερους από ένα, ίσως και όλους, τους οπτικούς τρόπους μετάδοσης που υποστηρίζονται από την ίνα.

Πολύτροπη ίνα βηματικού δείκτη διάθλασης

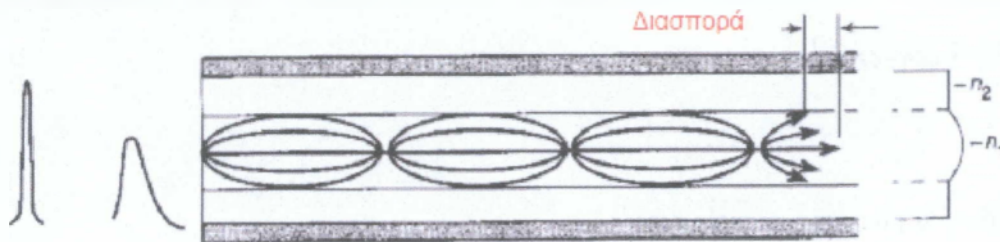
$$f_{3dB-OP} \times L = 20\text{MHz km}$$



Όλοι οι οπτικοί τρόποι μετάδοσης έχουν την ίδια ταχύτητα  $U=c/n_1$  άρα οι τρόποι μετάδοσης υψηλής τάξης (που διανύουν μεγαλύτερη απόσταση κατά τη μετάδοση) θα φτάσουν στην έξοδο καθυστερημένοι ως προς τους ρυθμούς χαμηλής τάξης

$$f_{3dB-OP} \times L = 1 \text{ GHz km}$$

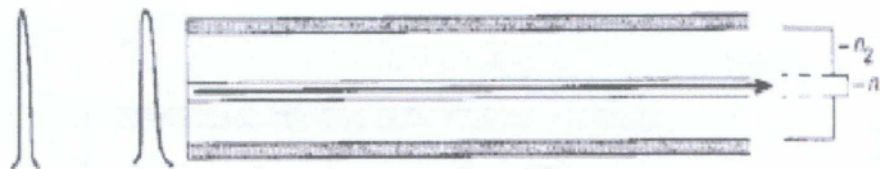
Πολύτροπη ίνα διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης



Οι υψηλής τάξης ρυθμοί διανύουν μεγαλύτερη απόσταση αλλά με μεγαλύτερη ταχύτητα ενώ οι ρυθμοί χαμηλής τάξης έχουν μικρότερη ταχύτητα ( ο δείκτης διάθλασης είναι μέγιστος στο κέντρο) αλλά διανύουν μικρότερες αποστάσεις. Άρα φτάνουν στην έξοδο με μικρή διαφορά → Μείωση χρονικής διαπλάτυνσης παλμού

Μονότροπη ίνα βηματικού δείκτη διάθλασης

$$f_{3dB-OP} \times L = 100 \text{ GHz km}$$



Μόνο ένας τρόπος μετάδοσης υποστηρίζεται άρα η διατροπική διασπορά δεν εμφανίζεται στις μονότροπες ίνες.

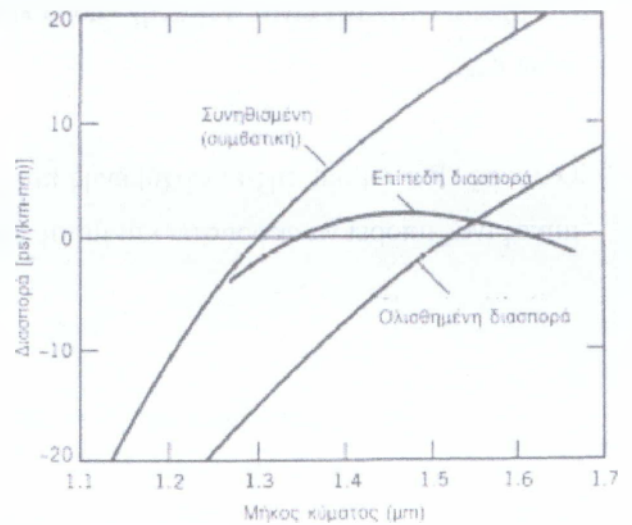
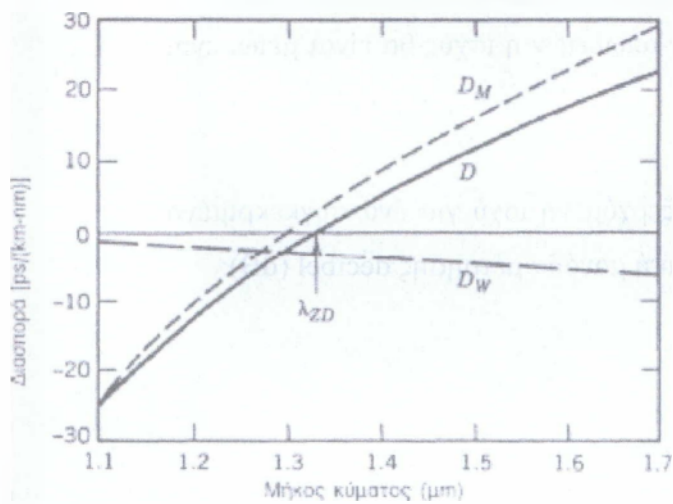
Σημαντική στις μονότροπες ίνες

-Διασπορά υλικού ( $D_M$ )

Η ταχύτητα της ακτινοβολίας μέσα σε ένα υλικό εξαρτάται από το μήκος κύματος της άρα διαφορετικές φασματικές συνιστώσες ενός παλμού μεταδίδονται με διαφορετική ταχύτητα.

-Διασπορά κυματοδηγού ( $D_w$ )

Η ταχύτητα της ακτινοβολίας είναι διαφορετική στον πυρήνα και στο περίβλημα.



Σχήμα 3.11 Ταχύτητα ακτινοβολίας στον πυρήνα και στο περίβλημα

$$D = D_M + D_w$$

Το μήκος κύματος μηδενικής διασποράς  $\lambda_{ZD}$  είναι στην περιοχή του 1300 nm αλλά με κατάλληλη επιλογή των χαρακτηριστικών της ίνας ( $\alpha$ ,  $\Delta$ ) κατασκευάζονται ίνες μετατοπισμένης (ολισθημένης) διασποράς με  $\lambda_{ZD}$  στην περιοχή του 1550 nm ή ακόμα και επίπεδης διασποράς.

Μια κατά προσέγγιση εκτίμηση του εύρους ζώνης ( $f_{3dB-OP}$ )

$$f_{3dB-OP} = \frac{0.188}{D \Delta\lambda L}$$

Όπου  $\Delta\lambda$  (nm) είναι το φασματικό εύρος της πηγής,  $D$  (sec / nm\*km) η διασπορά και  $L$ (km) το μήκος της ίνας.

-Απώλειες

Το φως κατά τη μετάδοση από την οπτική ίνα υπόκειται σε εξασθένιση: Αν η ισχύς που εισέρχεται στην ίνα είναι  $P_{in}$  στην έξοδο λόγω των απωλειών η ισχύς θα είναι μειωμένη, έστω  $P_{out}$ .

Ο λόγος  $P_{in} / P_{out}$  της εισερχόμενης προς την εξερχόμενη ισχύ για ένα συγκεκριμένο μήκος ίνας μπορεί να εκφραστεί και με τη λογαριθμική μονάδα μέτρησης decibel (dB):

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

και

$$\frac{P_{in}}{P_{out}} = 10^{dB/10}$$

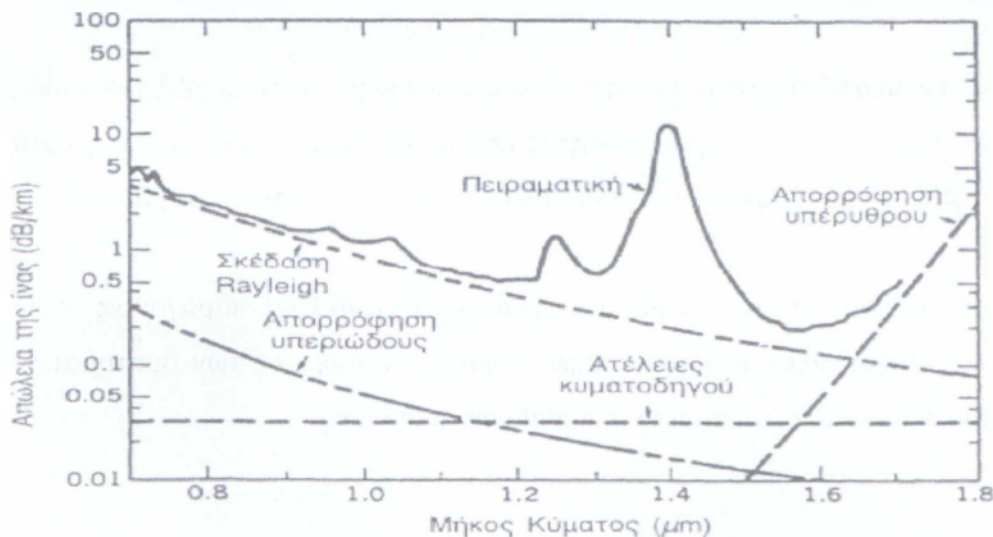
Για το χαρακτηρισμό των ινών ανεξάρτητα από το μήκος τους ορίζεται ο συντελεστής εξασθένισης ανά μονάδα μήκους  $\alpha$  (dB/km).

$$\alpha(\text{dB/km}) = \frac{1}{L} 10 \log_{10} \frac{P_{in}}{P_{out}}$$

Αφού οι απώλειες όλων των εξαρτημάτων στα συστήματα επικοινωνίας οπτικών ινών εκφράζονται σε dB είναι χρήσιμο να εκφράσουμε και την ισχύ εκπομπής και λήψης χρησιμοποιώντας την κλίμακα των dB. Ορίζουμε την μονάδα dBm ως:

$$\text{Ισχύς (σε dBm)} = 10 \log_{10} \frac{\text{ισχύς}}{1\text{mW}}$$

Όπου το επίπεδο αναφοράς του 1 mW επιλέγεται απλά επειδή οι τυπικές τιμές της εκπεμπόμενης ισχύος βρίσκονται στην κλίμακα αυτή.



Σχήμα 3.12 Οι παράγοντες που συμβάλουν στις απώλειες στις γυάλινες ίνες είναι:

## Απορρόφηση υλικού

Όλα τα υλικά παρουσιάζουν απορρόφηση σε συγκεκριμένα μήκη κύματος. Στην γυάλινη οπτική ίνα που κατασκευάζεται από πυρίτιο εμφανίζεται η φυσική απορρόφηση του πυριτίου (στην υπεριώδη περιοχή και στην υπέρυθη) και η απορρόφηση λόγω προσμίξεων πχ Fe, Cu αλλά κυρίως λόγω της παρουσίας υδρατμών που προκαλούν τις κορυφές απορρόφησης OH σε μήκη κύματος 1.39 μm, 1.24μm και 0.95 μm

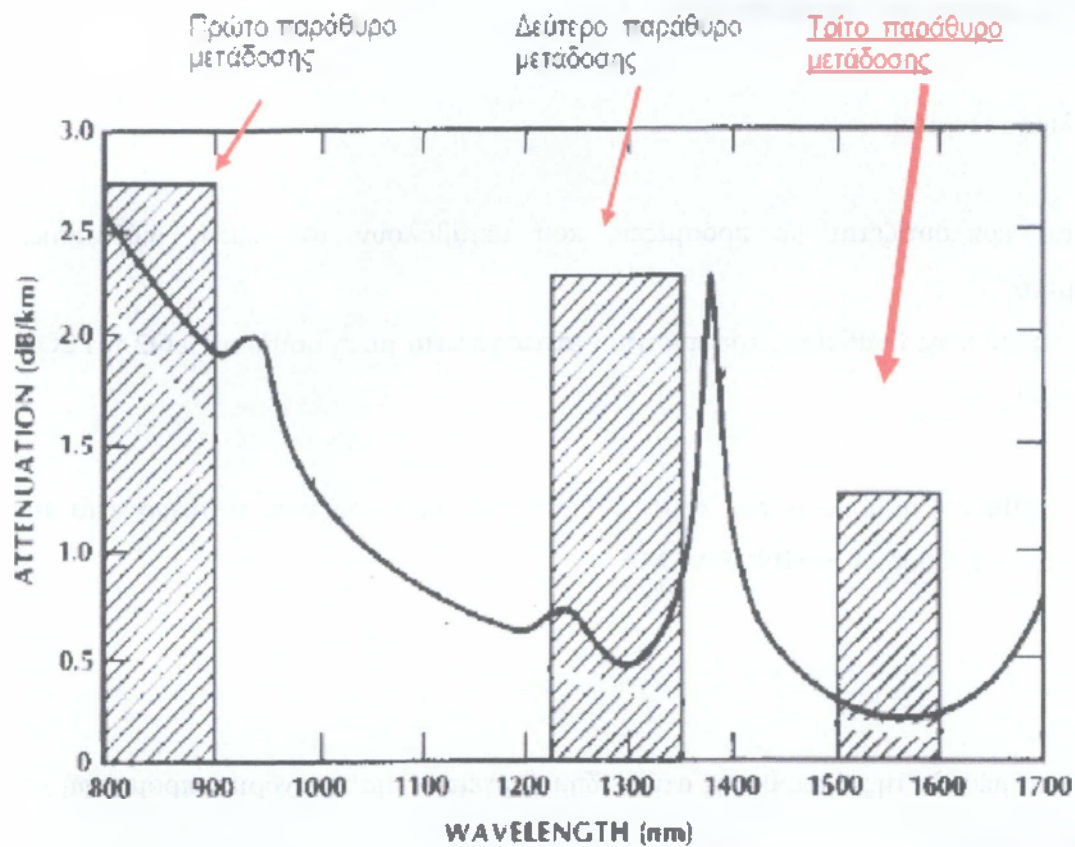
## Σκέδαση Rayleigh

Προκαλείται από τις κατά τόπους μικροσκοπικές διακυμάνσεις της πυκνότητας του υλικού που οδηγούν σε διακυμάνσεις του δείκτη διάθλασης που δρουν ως εστίες σκέδασης στο "ομογενές" υλικό της οπτικής ίνας. Η σκέδαση Rayleigh της ακτινοβολίας εξαρτάται έντονα από το μήκος κύματος της και συγκεκριμένα είναι ανάλογη του  $1/\lambda^4$

## Ατέλειες κυματοδηγού

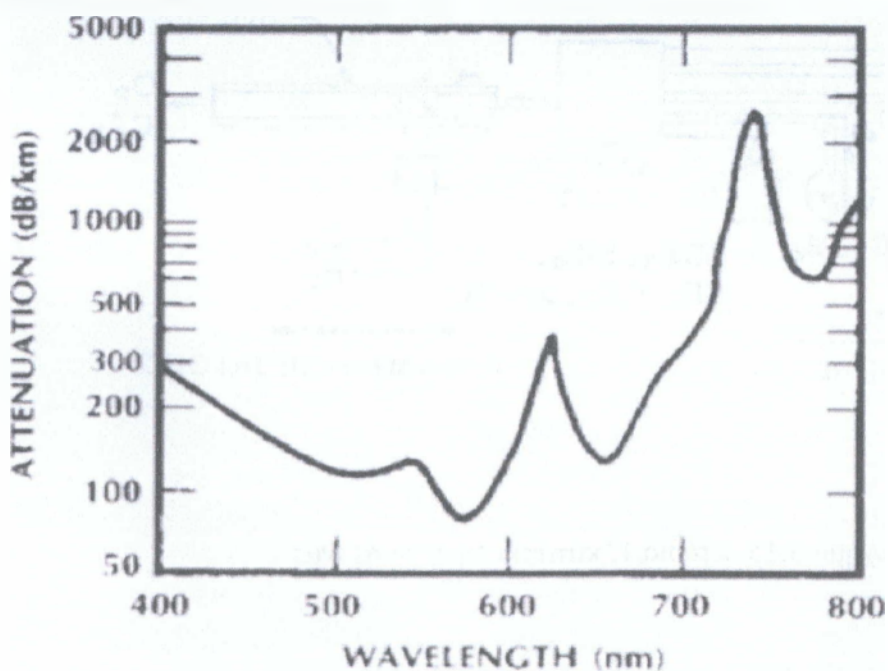
Απώλειες προκαλούν οι ατέλειες στην περιοχή ένωσης του πυρήνα με το περίβλημα καθώς και τα λυγίσματα της οπτικής ίνας: μικροκάμψεις (παραμορφώσεις μικρής ακτίνας κατά την κατασκευή της ίνας) και μακροκάμψεις (καμπυλότητα της ίνας κατά τη χρήση της).

Οι απώλειες των γυάλινων οπτικών ινών (σε συνδυασμό με άλλους παράγοντες όπως διαθέσιμες οπτικές πηγές) υπαγορεύουν τα μήκη κύματος λειτουργίας των συστημάτων οπτικών επικοινωνιών που αποκαλούνται και παράθυρα μετάδοσης.



Σχήμα 3.13 Παράθυρα μετάδοσης

Οι πλαστικές ίνες εμφανίζουν πολύ μεγαλύτερες απώλειες και η χρήση τους περιορίζεται σε ζεύξης μικρού μήκους (δεκάδες μέτρα) για μήκη κύματος στην περιοχή 650 nm ως 670 nm.



Σχήμα 3.14 Ζεύξη μικρού μήκους στα 650 nm ως 670 nm

### 3.3.1 Κατασκευή οπτικών ινών

Βασικό υλικό : Πυρίτιο

Το πυρίτιο εμπλουτίζεται με προσμίξεις που μεταβάλουν το δείκτη διάθλασης.  
Συγκεκριμένα:

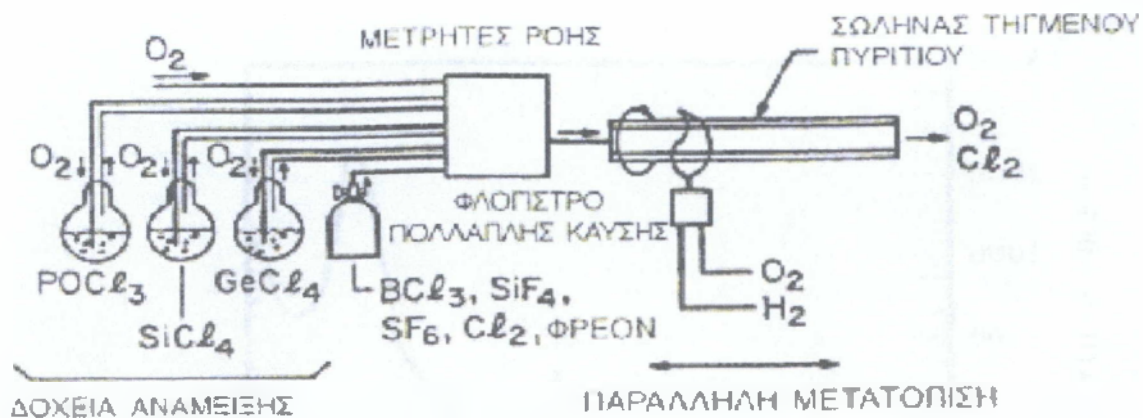
-Αύξηση του δείκτης διάθλασης του πυριτίου επιτυγχάνεται με προσθήκη  $\text{GeO}_2$  ή  $\text{P}_2\text{O}_5$   
→ ΠΥΡΗΝΑΣ

-Για το περίβλημα η μείωση του δείκτης διάθλασης του πυριτίου επιτυγχάνεται με προσθήκη  $\text{B}_2\text{O}_3$  ή Φθορίου → ΠΕΡΙΒΛΗΜΑ

Αρχικά με τη μέθοδο της εναπόθεσης ατμών δημιουργείται μια κυλινδρική προμορφή με την επιθυμητή κατανομή του δείκτη διάθλασης.

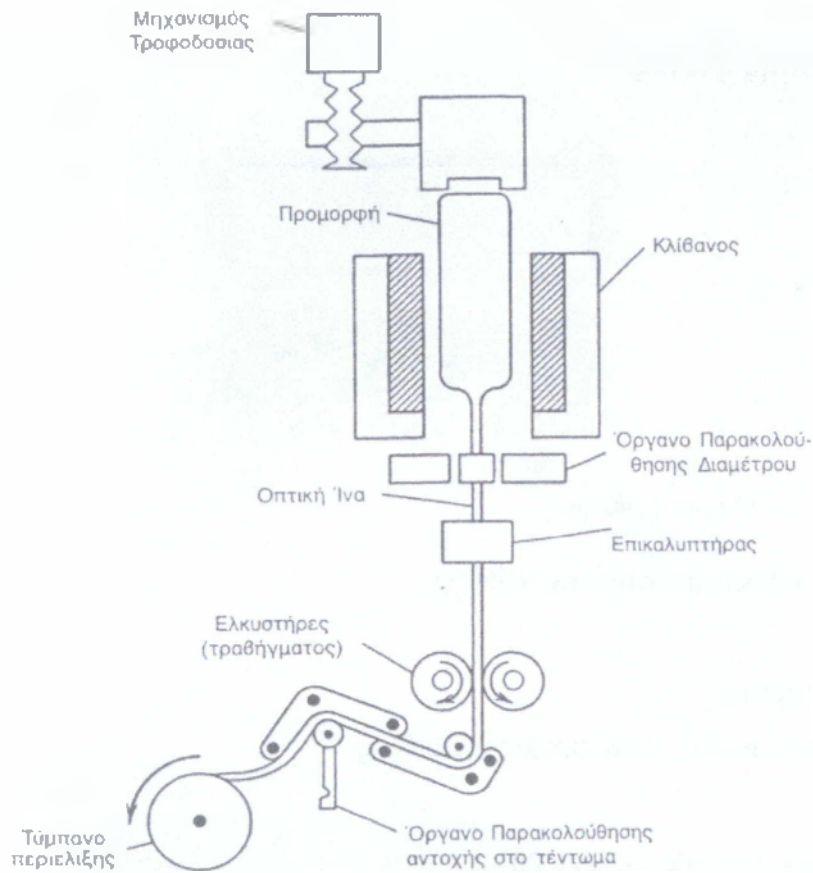
Τυπικά έχει μήκος 1m

Και διάμετρο 2 cm.



Σχήμα 3.15 Στάδιο 1<sup>ο</sup> κατασκευή οπτικής ίνας





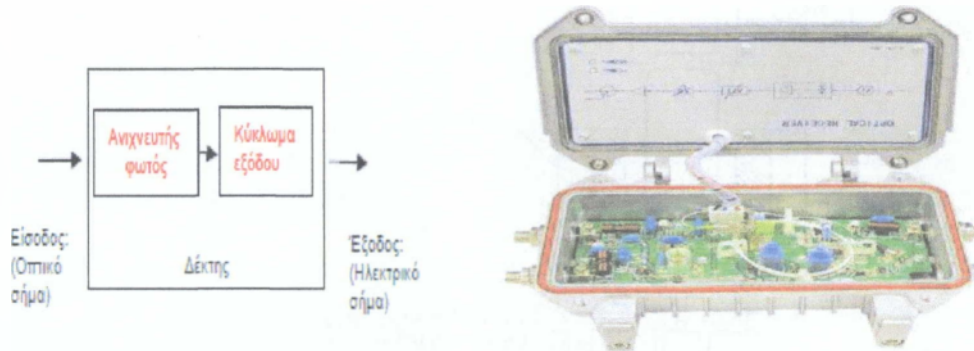
Σχήμα 3.16 Στάδιο 2<sup>ο</sup> κατασκευής οπτικής ίνας

Σε δεύτερο στάδιο η προμορφή γίνεται οπτική ίνα χρησιμοποιώντας ένα μηχανισμό τροφοδοσίας που τροφοδοτεί την ελεγχόμενα την προμορφή σε κλίβανο όπου σε θερμοκρασία 2000<sup>ο</sup> C. Στη συνέχεια η εύπλαστη προμορφή τραβιέται για να πάρει τη μορφή και τις διαστάσεις της οπτικής ίνας.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## ΟΠΤΙΚΟΣ ΔΕΚΤΗΣ

### 4.1 Βασικές αρχές ανίχνευσης φωτός



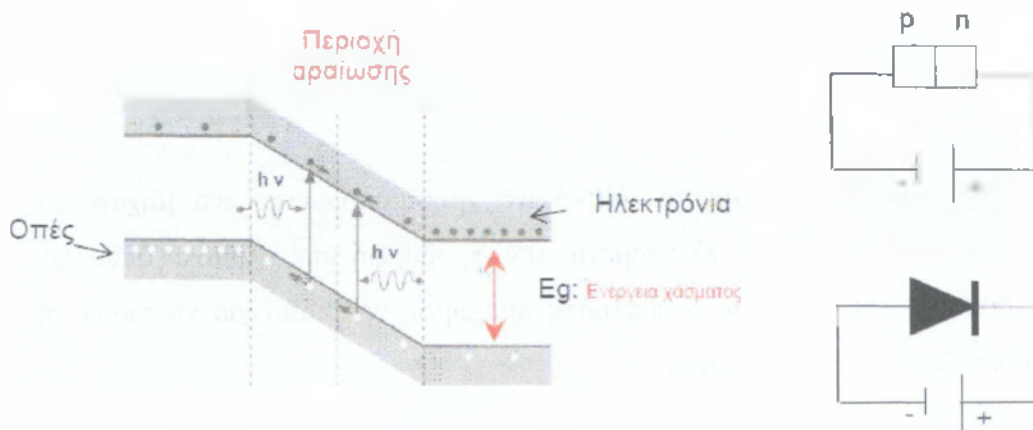
Σχήμα 4.1 Οπτικός δέκτης

Οι λειτουργίες του οπτικού δέκτη είναι οι ακόλουθες:

- Ανίχνευση φωτός
- Ενίσχυση του ανιχνευόμενου σήματος
- Ανάκτηση δεδομένων και έλεγχος σωστής λειτουργίας της ζεύξης

#### Ανίχνευση φωτός από ανάστροφα πολωμένη επαφή pn

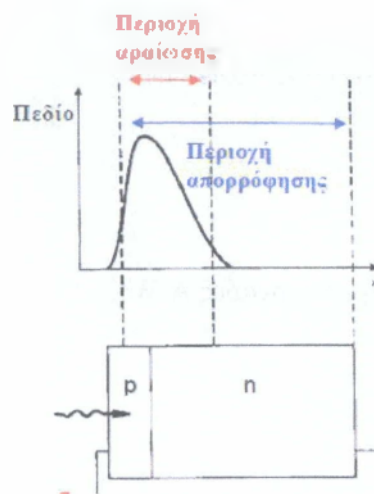
Διαδικασία αντίστροφη από αυτή της παραγωγής φωτός στα LED



Σχήμα 4.2 Ανίχνευση φωτός από ανάστροφα πολωμένη επαφή pn

Φωτόνιο κατάλληλης ενέργειας ( $E_{h\nu} \geq E_g$ ) απορροφάται στην αραίωσης και διεγείρει ηλεκτρόνιο από την στάθμη σθένους στη στάθμη αγωγιμότητας με αποτέλεσμα τη δημιουργία ζεύγους ηλεκτρονίου – οπής στο υλικό.

Λόγω της ανάστροφης πόλωσης τα δύο φορτία δεν επανασυνδέονται αλλά κινούνται σε αντίθετες κατεύθυνσης με αποτελέσματα την δημιουργία ρεύματος( φωτόρεύμα  $I_{ph}$ )



Σχήμα 4.3 Δημιουργία ρεύματος

Το ηλεκτρικό πεδίο είναι μέγιστο στην περιοχή αραίωσης (επειδή εκεί δεν υπάρχουν ελεύθερα φορτία) και ελάχιστο έξω από αυτή.

-Τα φορτία που δημιουργούνται λόγω απορρόφηση φωτονίου μέσα στην περιοχή αραίωσης λόγω του υψηλού ηλεκτρικού πεδίου μετατοπίζονται γρήγορα προς την πλευρά p ή n.

-Τα φορτία που δημιουργούνται λόγω απορρόφηση φωτονίου έξω από την περιοχή αραίωσης λόγω του χαμηλού ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή αυτή μετακινούνται αργά (διαχέονται) και κάποια επανασυνδέονται πριν φτάσουν στα άκρα της επαφής με αποτέλεσμα να παράγουν ελάχιστο ή καθόλου ρεύμα.

-Η απορρόφηση φωτονίων έξω από την περιοχή αραίωσης υποβιβάζει τη λειτουργία της επαφής pn αφού μειώνει την ταχύτητα απόκρισης του ανιχνευτή.

## 4.2 Είδη και χαρακτηριστικά βασικών οπτικών ινών

### Παράμετροι φωτοανίχνευσης

#### 1. Αποκρισιμότητα ( **$\rho$ -Responsivity**)

Το φωτόρρευμα  $I_\phi$  είναι ανάλογο της προσπίπτουσας ισχύς  $P_{\text{πρ}}$

$$I_\phi = \rho * P_{\text{πρ}}$$

Όπου  $\rho$  είναι η αποκρισιμότητα του ανιχνευτή (σε μονάδες A/W)

#### 2. Κβαντική απόδοση (Quantum efficiency) (%)

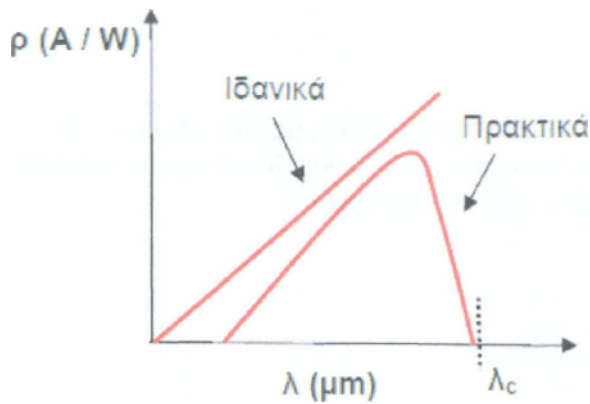
Στην ιδανική περίπτωση κάθε προσπίπτον φωτόνιο πρέπει να παράγει ένα ηλεκτρόνιο. Ο βαθμός στον οποίο προσεγγίζεται στην πράξη η ιδανική αυτή κατάσταση περιγράφεται από την κβαντική απόδοση:

$$\eta = \frac{\text{ρυθμός δημιουργίας ηλεκτρονίων}}{\text{ρυθμός πρόσπτωσης φωτονίων}} = \frac{I_\phi / e}{P_{\text{πρ}} / h\nu} = \frac{h\nu}{e} * \rho \rightarrow$$

$$\rho = \frac{ne}{h\nu} = \frac{ne\lambda}{hc} \quad (\text{e: φορτίο ηλεκτρονίου})$$

Η αποκρισιμότητα μεταβάλλεται με το μήκος κύματος άρα πρέπει να ορίζεται

Για συγκεκριμένο μήκος κύματος. Θεωρητικά η αποκρισιμότητα είναι ανάλογη του μήκους κύματος συνεπώς αυξάνει το μήκος κύματος.



Σχήμα 4.4 Αποκρισιμότητα

Στην πράξη η ανίχνευση είναι δυνατή μόνο αν  $E_{\text{ph}} \geq E_g$  δηλαδή  $hc/\lambda \geq E_g$

$$\lambda \leq \frac{hc}{E_g}$$

Όπου το μέγιστο μήκος κύματος για το οποίο επιτυγχάνεται ανίχνευση  $\lambda_c = hc/E_g$  ονομάζεται μήκος κύματος αποκοπής ανίχνευσης και εξαρτάται από το ενεργειακό χάσμα της επαφής άρα από το υλικό που αυτή είναι φτιαγμένη.

### 3. Φασματική περιοχή ανίχνευσης

Οι οπτικοί ανιχνευτές λειτουργούν σε μια συγκεκριμένη φασματική περιοχή που εξαρτάται από το υλικό κατασκευής τους. Στην περιοχή αυτή η αποκρισιμότητα δεν έχει σταθερή τιμή. Η αποκρισιμότητα έχει μέγιστη τιμή σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος που ονομάζεται μέγιστο μήκος κύματος ανίχνευσης

Υλικό	Φασματική περιοχή ανίχνευσης (μm)	Μέγιστο μήκος κύματος ανίχνευσης (μm)
Πυρίτιο (Si)	0.3 - 1.1	0.8
Γερμάνιο (Ge)	0.6 - 1.7	1.55
Ινδίο-Γάλλιο -Αρσενικό (InGaAs)	0.8 - 1.8	1.7

Πίνακας 4.1 Φασματική περιοχή ανίχνευσης

#### 4.Εύρος ζώνης 3dB ανιχνευτή

Το εύρος ζώνης ενός ανιχνευτή καθορίζεται από την ταχύτητα με την οποία αυτός αποκρίνεται στις μεταβολές της προσπίπτουσας οπτικής ισχύος. Κατά προσέγγιση το εύρος ζώνης σχετίζεται με το χρόνο ανόδου τα βάση της σχέσης:

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

Ο χρόνος ανόδου του ανιχνευτή, γενικά έχει τρεις χρονικές συνιστώσες :

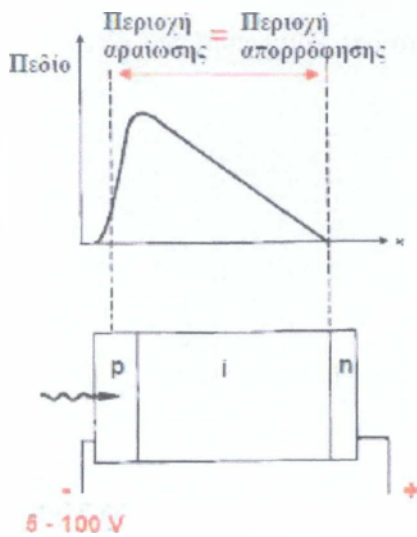
- $\tau_M$  : Λόγω της μετατόπισης των ηλεκτρονίων στη ζώνη αραίωσης
- $\tau_\Delta$  : Λόγω της διάχυσης των ηλεκτρονίων που δημιουργούνται έξω από την περιοχή αραίωση

$\tau_{RC}$ : Λόγω του ηλεκτρικού κυκλώματος με  
 $\tau_{RC} = 2.19RC$

Τελικά το εύρος ζώνης του ανιχνευτή καθορίζεται από την χρονική συνιστώσα που δίνει την μεγαλύτερη καθυστέρηση.

$$f_{3dB} = \frac{1}{2\pi RC}$$

### 4.2.1 Φωτοдиодοι pin



Σχήμα 4.5 Φωτοдиодος pin

Η περιοχή αραίωσης αυξάνεται με την προσθήκη ανόθευτου ή ελαφρά νοθευμένου στρώματος (i-intrinsic).

Έτσι ελαχιστοποιούνται τα φωτόνια έξω από την περιοχή αραίωσης με αποτέλεσμα η χρονική συνιστώσα διάχυσης να έχει μικρή επίδραση στη λειτουργία του ανιχνευτή.

### 4.2.2 Φωτοдиодοι χιονοστιβάδας (APD-Avalanche PhotoDiodes)



Σχήμα 4.6 Φωτοдиодος APD

Αποτελείται από τα ίδια στρώματα όπως μια φωτοдиодος pin αλλά με αυξημένες προσμίξεις. Επιπλέον προστίθεται ένα ακόμα στρώμα (p) όπου λόγω του πολύ υψηλού πεδίου προκύπτουν δευτερεύοντα ηλεκτρόνια μέσω ιονισμού με κρούση.

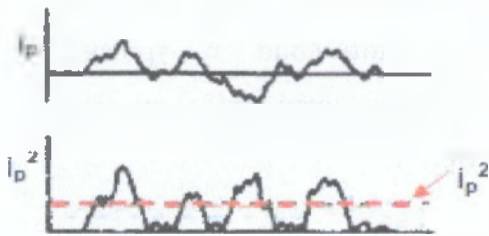
(Ένα επιταχυνόμενο ηλεκτρόνιο μπορεί, αν έχει αρκετή ενέργεια, να μεταδώσει ένα μέρος της κινητικής του ενέργειας σε ένα άλλο ηλεκτρόνιο στη ζώνη σθένους και να το διεγείρει στη ζώνη αγωγιμότητας)

Οι APD έχουν μεγάλες τιμές αποκρισιμότητας (ως και 100 A/W) και χρησιμοποιούνται όταν η ποσότητα της οπτικής ισχύς που φτάνει στο δέκτη είναι περιορισμένη.

## 4.3 Είδη θορύβου

### Θόρυβος ανιχνευτή

Με τον όρο “θόρυβο ανίχνευσης” εννοούμε κάθε ανεπιθύμητη διαταραχή η οποία προκαλεί διακυμάνσεις στο παραγόμενο ρεύμα ακόμα και όταν το ανιχνευόμενο οπτικό σήμα έχει σταθερή ισχύ.



$\bar{i}_p^2$  - η μέση τιμή των τετραγώνων των μεταβολών του ρεύματος λόγω του θορύβου.

#### 1. Θερμικός θόρυβος $\bar{i}_e^2$

Σε συγκεκριμένη θερμοκρασία τα ηλεκτρόνια κινούνται τυχαία σε οποιοδήποτε αγωγό. Η τυχαία θερμική κίνηση των ηλεκτρονίων σε μια αντίσταση παρουσιάζεται με την μορφή διακυμάνσεων του ρεύματος. Η αντίσταση φορτίου R ενός οπτικού δέκτη προσθέτει τέτοιου είδους διακυμάνσεις στο ρεύμα που δημιουργείται από μια φωτοδίοδο. Ο θερμικός θόρυβος δίδεται από:

$$\bar{i}_e^2 = \frac{4KTf_{3dB}}{R}$$

όπου: K: η σταθερά Boltzmann  
T: η απόλυτη θερμοκρασία (Kelvin)  
 $f_{3dB}$ : το εύρος ζώνης 3dB του ανιχνευτή



## 2. Θόρυβος βολής $\bar{i}_B$

Ο θόρυβος βολής αποδεικνύει πως το ηλεκτρικό ρεύμα αποτελείται από μια ροή ηλεκτρονίων τα οποία δημιουργούνται σε τυχαίους χρόνους. Εκτός από το φωτόρευμα  $I_\Phi$  που δημιουργείται κατά την ανίχνευση του φωτός στον δέκτη υπάρχει και ένα δεύτερο ρεύμα (ανεπιθύμητο) που αποκαλείται ρεύμα σκότους  $I_{\Sigma K}$ .

Το ρεύμα σκότους  $I_{\Sigma K}$ :

- Παράγεται στον ανιχνευτή ακόμα και απουσία οπτικού σήματος.
- Οφείλεται στο παρασιτικό φως ή στη θερμική δημιουργία ζεύγους ηλεκτρονίου – οπής
- Πρέπει να έχει πολύ μικρή τιμή ώστε να μην επηρεάζει την μέτρηση του πραγματικού ρεύματος που προκαλεί το οπτικό σήμα.

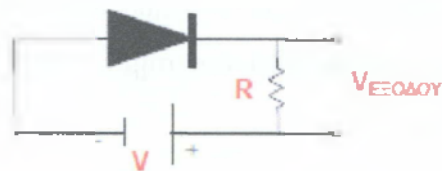
Ο θόρυβος βολής δίδεται από:

$$\bar{i}_B^2 = 2e f_{3dB} (I_\Phi + I_{\Sigma K})$$

Όπου  $e$  είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου

### Κύκλωμα δέκτη

Στην πιο απλή μορφή κυκλώματος δέκτη το φωτόρευμα που παράγει η φωτοδίοδος μετράται ως τάση στα άκρα μιας αντίστασης



Σχήμα 4.7 Κυκλωμα δέκτη

Η τιμή της αντίστασης είναι πολύ κρίσιμη και υπάρχουν διάφορα κριτήρια που καθορίζουν την κατάλληλη τιμή της.

Παράμετρος	Ορισμός (σε σχέση με R)	Κατάλληλη R
Σήμα εξόδου	$V_{\text{εξόδου}} = \rho P_{\text{ηλ}} R$	Μεγάλη R
Εύρος ζώνης	$f_{\text{3dB}} = \frac{ f }{2\pi RC}$	Μικρή R
Θερμικός θόρυβος	$\bar{v}^2 = \frac{4kTf_{\text{3dB}}}{R}$	Μεγάλη R
Δυναμική περιοχή (Γραμμικότητα)	$P_{\text{max}} = \frac{V_0}{\rho R}$	Μικρή R

Πίνακας 4.2 Κριτήρια για την τιμή της αντίστασης

#### 4.4 SNR, BER, Διάγραμμα οφθαλμού

##### 1. SNR (Signal to Noise Ratio)

Ο λόγος σήματος προς θόρυβο SNR είναι η μέση τιμή της ηλεκτρικής ισχύς του σήματος διαιρεμένη με την μέση τιμή της ηλεκτρικής ισχύς που προκαλείται από όλες τις πηγές θορύβου

$$SNR = \frac{\text{Μέση ισχύς σήματος}}{\text{Μέση ισχύς θορύβου}} = \frac{I^2}{I_N^2}$$

##### 2. BER (Bit Error Rate)

Ο ρυθμός εσφαλμένων bit ( BER) εκφράζει την πιθανότητα εσφαλμένης αναγνώρισης ενός bit από τον οπτικό δέκτη και αποτελεί ένα σημαντικό κριτήριο στον έλεγχο της απόδοσης μιας ψηφιακής ζεύξης.

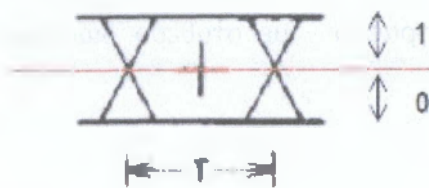
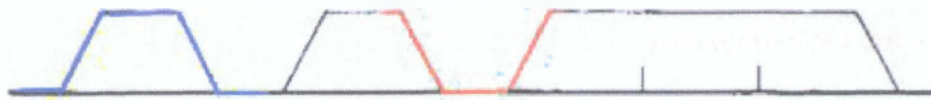
$$BER = \frac{\text{Αριθμός εσφαλμένων bit}}{\text{Αριθμός σωστών bit}}$$

Ο επιτρεπτός αριθμός BER εξαρτάται από το είδος της πληροφορίας που μεταφέρεται. Συνήθως απαιτείται  $BER \leq 10^{-9}$  δηλαδή επιτρέπεται η λανθασμένη αναγνώριση ενός bit στα 1 δισεκατομμύρια bits που ανιχνεύτηκαν

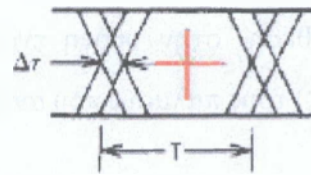
### Διάγραμμα οφθαλμού ( eye diagram)

Η επίδραση του θορύβου, του χρόνου ανόδου και του χρονικού τρέμουλου (jitter) στην απόδοση ενός συστήματος ανίχνευσης ψηφιακού σήματος μπορεί να εξεταστεί οπτικά με τη χρήση του διαγράμματος οφθαλμού. Το διάγραμμα οφθαλμού προκύπτει αν απεικονίσουμε σε υπέρθεση, στην οθόνη ενός παλμογράφου, με σταθερό διάστημα σκανδαλισμού ( **trigger**) τους παλμούς που ανιχνεύονται.

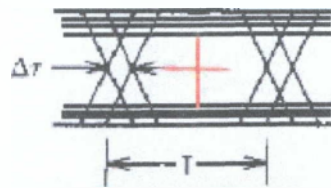




**ΥΠΕΡΘΕΣΗ ΠΑΛΜΩΝ**



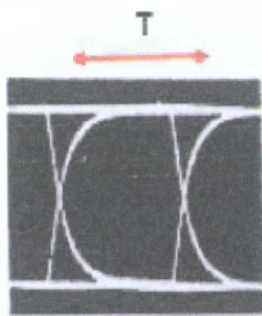
**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΧΡΟΝΙΚΟΥ ΤΡΕΜΟΥΛΟΥ Δτ**



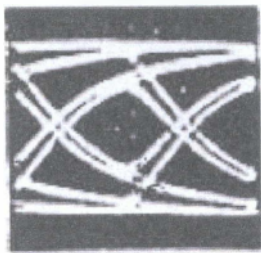
**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΟΡΥΒΟΥ**

Σχήμα 4.8 Διάγραμμα οφθαλμού

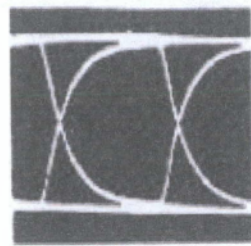
Ο σταυρός στο κέντρο του ματιού προσδιορίζει την βέλτιστη στιγμή χρονικά και το κατώφλι διαχωρισμού σήματος για το διαχωρισμό μεταξύ 0 και 1. Για υψηλό επίπεδο θορύβου η /και τρέμουλου χρονισμού το μάτι κλείνει και είναι δύσκολο ή και αδύνατο να αναγνωριστεί σωστά το σήμα.



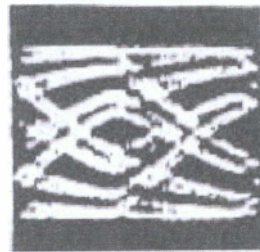
$$l_{\text{ανοδου}} = T/4$$



$$\Delta t = 5\%T$$



$$l_{\text{ανοδου}} = T/2$$



$$\Delta t = 50\%T$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΟΠΤΙΚΩΝ ΖΕΥΞΕΩΝ

#### 5.1 Οπτικές ζεύξεις

##### Ένωση οπτικών ινών

Όλο το φως πρέπει να μεταφερθεί από τη μία ίνα στην άλλη με τις ελάχιστες απώλειες

Απώλειες λόγω κακής ευθυγράμμιση πυρήνων

##### 1.Ομοιες ίνες

##### Διαμήκης

A) Ανάκλαση στις επιφάνειες της ίνας λόγω της παρεμβολής του αέρα που έχει διαφορετικό δείκτη διάθλασης από το υλικό της ίνας ονομάζεται ανάκλαση Fresnel. Περίπου το 4% του φωτός που προσπίπτει στην επιφάνεια ανακλάται. Οι απώλειες μπορούν να μειωθούν με την προσθήκη λαδιών με τον κατάλληλο δείκτη διάθλασης (index matching oils)

B)

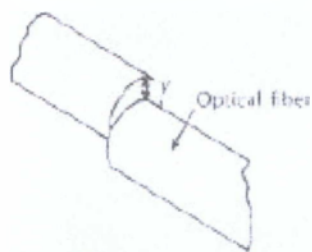
$$L = -10 \log \left| 1 - \frac{z NA}{4an_0} \right|$$

Ενδεικτική τιμή :  
 $z = 10 \mu\text{m} \Rightarrow L = 0 \text{ dB}$



Όπου  $a$  : ακτίνα πυρήνα και  $n_0$  δείκτης διάθλασης στο χώρο ανάμεσα στις ίνες

**Πλευρική**



$$L = -10 \log \left| 1 - \frac{2y}{\pi a} \right|$$

Ενδεικτική τιμή :  
 $y = 10 \mu\text{m} \Rightarrow L = 1 \text{ dB}$

**Γωνιακή**



$$L = -10 \log \left| 1 - \frac{n_c n_0}{\pi NA} \right|$$

Ενδεικτικές τιμές :  
 $\theta = 4^\circ \Rightarrow L = 1 \text{ dB}$

NA: Αριθμητικό άνοιγμα ίνας

## 2. Διαφορετικές ίνες:

### Διαφορετικές ακτίνες πυρήνα

Ζεύξη φωτός από ίνα με πυρήνα  $a_1$  σε ίνα πυρήνα  $a_2$  με  $a_1 > a_2$

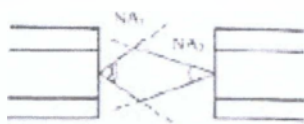


$$L = -10 \log \left| \frac{a_2}{a_1} \right|^2$$

(Αν  $NA_1 < NA_2$  δεν υπάρχουν απώλειες)

### Διαφορετικό αριθμητικό άνοιγμα NA

Ζεύξη φωτός από ίνα με αριθμητικό άνοιγμα  $NA_1$  σε ίνα με αριθμητικό άνοιγμα  $NA_2$  με  $NA_1 > NA_2$ .

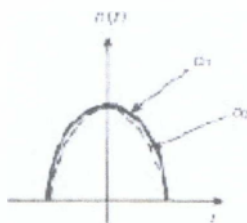


$$L = -10 \log \left( \frac{NA_2}{NA_1} \right)^2$$

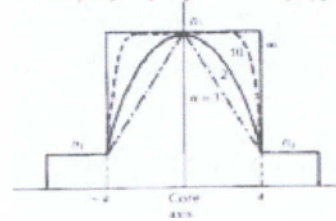
(Αν  $NA_1 < NA_2$  δεν υπάρχουν απώλειες)

### Διαφορετική κατανομή δείκτη διάθλασης

Ζεύξη φωτός από ίνα με παράμετρο κατανομής του δείκτη διάθλασης  $\alpha_1$  σε ίνα με  $\alpha_1 > \alpha_2$



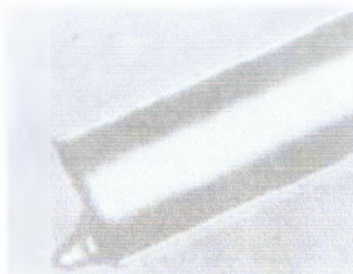
$\alpha$ : παράμετρος κατανομής



$$L = -10 \log \left| \frac{\alpha_2 (\alpha_1 - 2)}{\alpha_1 (\alpha_2 - 2)} \right|^2$$

(Αν  $\alpha_1 < \alpha_2$  δεν υπάρχουν απώλειες)

Απώλειες λόγω κακής ποιότητας της επιφάνειας επαφής



Η επιφάνεια της ίνας πρέπει να είναι εντελώς κάθετη (ακρίβεια  $1^0 - 2^0$ ) χωρίς ατέλειες.



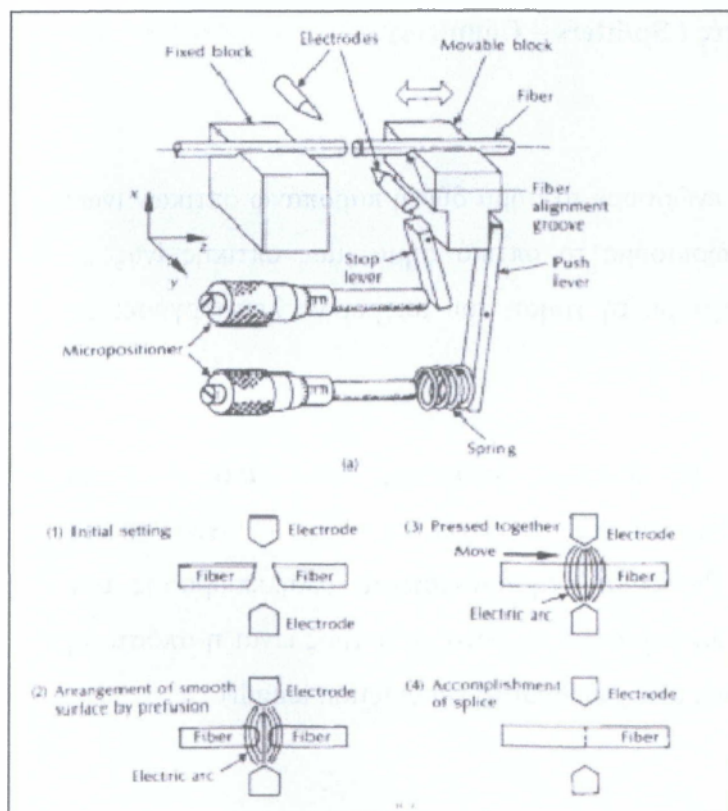
Αυτό επιτυγχάνεται είτε με γυάλισμα είτε με τη μέθοδο χάραξης (scribe – and – break)  
 Όπου η ίνα αρχικά χαράσσεται τοπικά με κάποιο σκληρό υλικό (διαμάντι) και στη συνέχεια η ίνα τεντώνεται με αποτέλεσμα το χάραγμα να βαθύνει και η ίνα να σπάσει.

### Μόνιμες ενώσεις τήξης (Fusion splice)

Οι δύο που πρόκειται να ενωθούν θερμαίνονται μέχρι το σημείο τήξης (συνήθως από ηλεκτρικό σπινθήρα) και με την επιβολή αξονικής πίεσης συγκολλούνται.

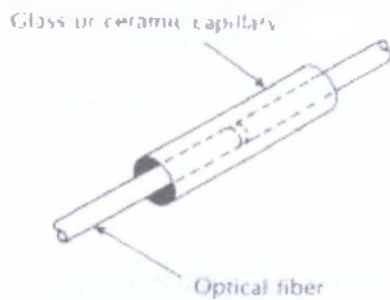
Στο σημείο της ένωσης οι ίνες είναι εκτεθειμένες (το εξωτερικό περίβλημα έχει αφαιρεθεί πριν την ένωση) με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ευαισθησία τους οπότε χρησιμοποιούνται προστατευτικά καλύμματα (συνήθως θερμο-συσταλόμενοι πλαστικοί σωλήνες.)

Οι ενώσεις που επιτυγχάνονται από τα όργανα που υπάρχουν στο εμπόριο έχουν απώλειες της τάξης 0,25 dB ενώ με προσεκτική χρήση μπορούν να μειωθούν σε 0,05 dB.



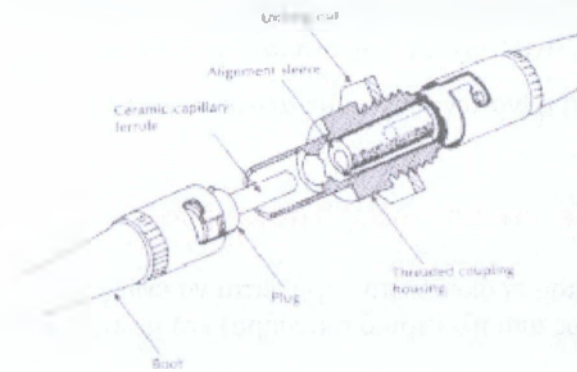
Σχήμα 5.1 Όργανα που προκαλούν μόνιμες ενώσεις τήξης

## Μηχανικές ενώσεις



Απώλειες - 0.1 - 1 dB

## Συνδετήρες (Connectors)



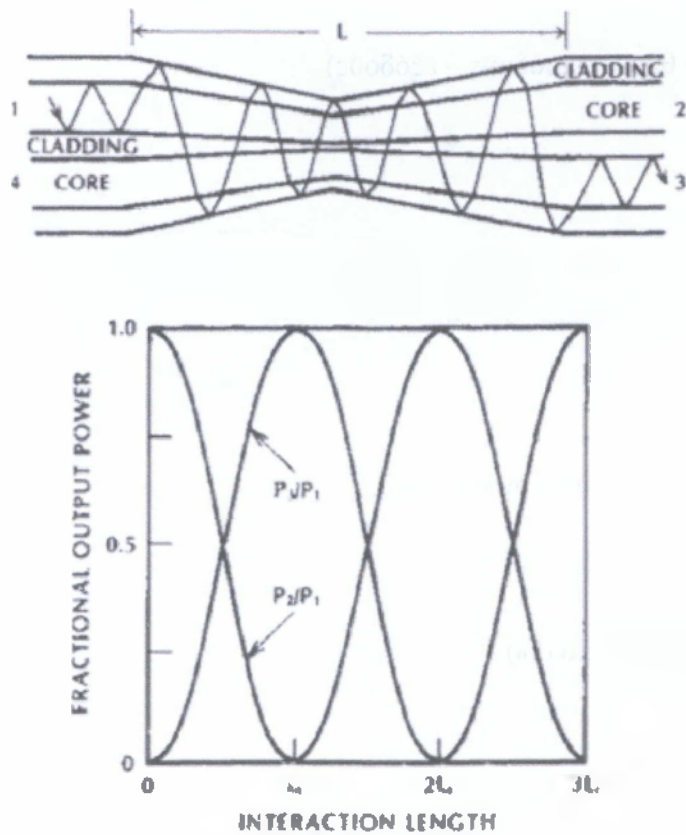
Επαναληψιμη ένωση

## 5.2 Είδη και χαρακτηριστικά συζευκτων οπτικών ινών

### Διακλαδωτές – Συζευκτές ( Splitters – Couplers)

Με τη χρήση συζευκτών μπορούμε να ενώσουμε το σήμα δύο ή παραπάνω οπτικών ινών σε μια ενώ με διακλαδωτές να διαχωρίσουμε το οπτικό σήμα μίας οπτικής ίνας σε περισσότερες. Το ίδιο στοιχείο ανάλογα με τη χρήση του μπορεί να λειτουργήσει ως διακλαδωτής ή ως συζευκτής.

Τα στοιχεία αυτά κατασκευάζονται με διάφορες μεθόδους αλλά από τους πιο διαδεδομένους είναι οι λεπτυσμένοι διακλαδωτές – συζευκτές τήξης – fused tapered couplers). Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη δυνατότητα αλληλεπίδρασης των πυρήνων των ινών που το αποτελούν. Κρίσιμα για τη λειτουργία τους είναι η απόσταση των πυρήνων και το μήκος της επιφάνειας αλληλεπίδρασης (interaction length)



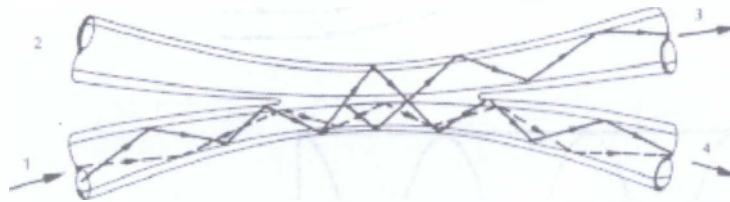
Σχήμα 5.2 Λεπτυσμένοι διακλαδωτές – συζευκτές τήξης

Αν  $L=L_c$  όλη η ισχύς θα εξέλθει από τη θύρα 3

Αν  $L=2L_c$  όλη η ισχύς θα εξέλθει από τη θύρα 2

Ενδιάμεσες τιμές διαχωρισμού είναι δυνατές με κατάλληλη επιλογή του μήκους της περιοχής αλληλεπίδρασης

Παράδειγμα: Στοιχείο με 4 θύρες (εισόδους – εξόδους)



Σχήμα 5.3 Διαχωρισμός ισχύος

Διαχωρισμός ισχύος – Splitting ratio (%)

$$S = \frac{P_3}{P_3 + P_4} * 100$$

Καθορίζει το ποσοστό της ισχύος που μοιράζεται σε κάθε μια από τις εξόδους

Πρόσθετες απώλειες – Excess Loss (dB)

$$L_E = 10 \log \frac{P_1}{P_3 + P_4}$$

Εκφράζει τις απώλειες που επιβάλλει το στοιχείο συγκρίνοντας το φως που εισέρχεται με αυτό που εξέρχεται (συνολικά). Ιδανικά  $L_E = 0 * (P_1 = P_3 + P_4)$

**Απώλεια Εισόδου** Insertion Loss (dB)

$$L_{i4} = 10 \log \frac{P_1}{P_4} , L_{i3} = 10 \log \frac{P_1}{P_3}$$

Ορίζεται για κάθε μια από τις εξόδους και συγκρίνει την ισχύ σε κάθε έξοδο με την ισχύ εισόδου.

**Διαφωνία** –Cross talk (dB)

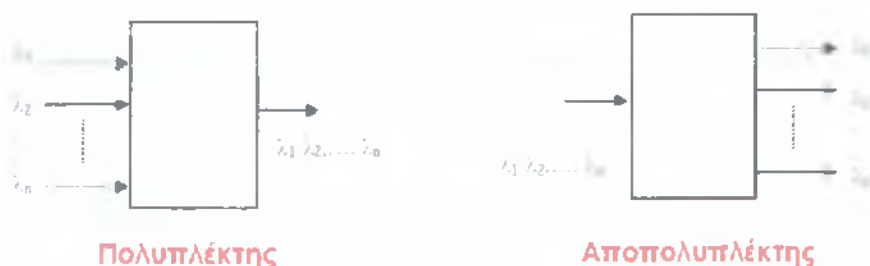
$$L_c = 10 \log \frac{P_2}{P_1}$$

Απώλειες από πίσω-ανάκλαση ισχύος στην τέταρτη θύρα που δεν χρησιμοποιείται.  
Ιδανικά  $P_2=0$

### 5.3 Πολυπλέκτες οπτικών ινών

Πολυπλέκτες / αποπολυπλέκτες μήκους κύματος  
(wavelength multiplexers/ demultiplexers)

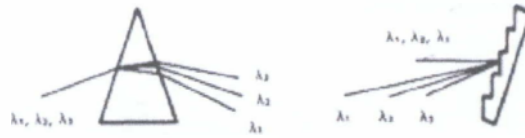
Συσκευές με ειδική λειτουργία: περιλαμβάνουν ένα μηχανισμό επιλογής μήκους κύματος ώστε να διοχετεύουν δύο ή περισσότερα διαφορετικά μήκη κύματος σε μια ίνα (πολυπλέκτες) ή αντίστοιχα να διαχωρίζουν δύο ή περισσότερα μήκη κύματος σε διαφορετικές ίνες (αποπολυπλέκτες)



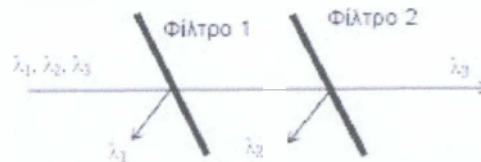
Σχήμα 5.4 Πολυπλέκτης - Αποπολυπλέκτης

Μηχανισμοί επιλογής μήκους κύματος

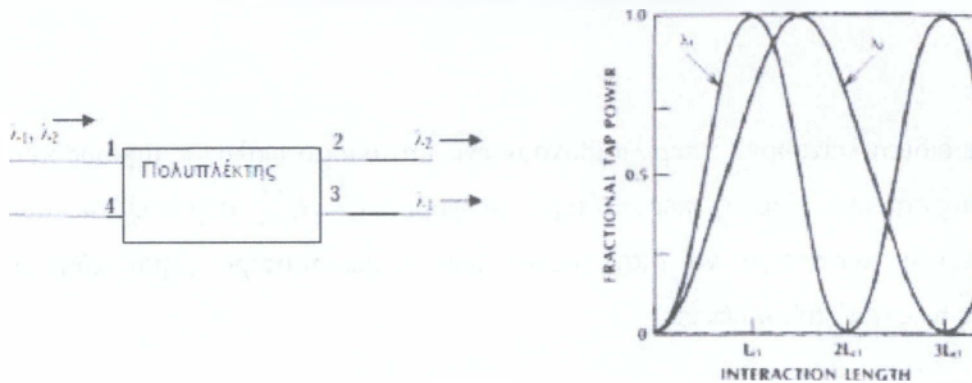
## Φράγματα διάθλασης



-Φίλτρα

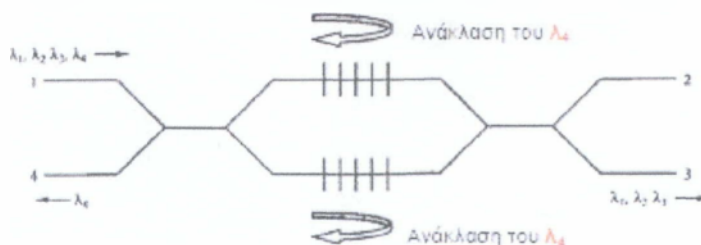


-Μήκος αλληλεπίδρασης (λεπτυσμένοι πολυπλέκτες τήξης – fused tapered couplers)



## 5.4 Πολυπλέκτες πρόσθεσης / αφαίρεσης (Add / drop multiplexers)

Προσθέτουν ή / και αφαιρούν συγκεκριμένα μήκη κύματος από μία ζεύξη χωρίς να επηρεάζουν τα υπόλοιπα μήκη κύματος



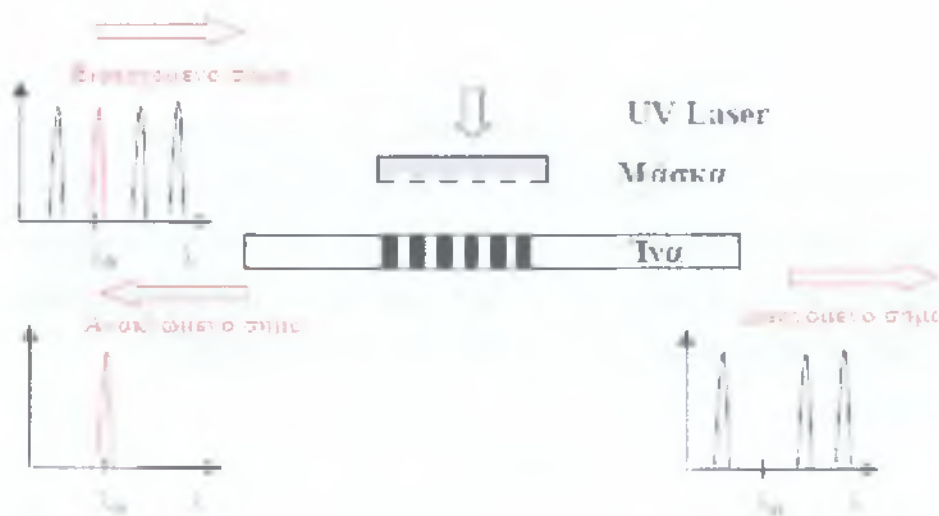
Σχάρες διάθλασης οπτικών ινών (Fibre Bragg gratings- FBG)

Είναι περιοδικές μεταβολές της τιμής του δείκτη διάθλασης του πυρήνα κατά μήκος της ίνας που προκαλούνται από την έκθεση της ίνας σε υπεριώδη ακτινοβολία LASER μέσω μίας μάσκας κατάλληλης περιοδικότητας

Κύριο χαρακτηριστικό των FBG είναι ότι ανακλούν ένα στενό φασματικά τμήμα του φωτός γύρω από ένα μήκος κύματος γνωστό ως μήκος κύματος γνωστό ως μήκος κύματος Bragg  $\lambda_B$  που δίδεται από τη σχέση:

$$\lambda_B = 2 \Lambda n$$

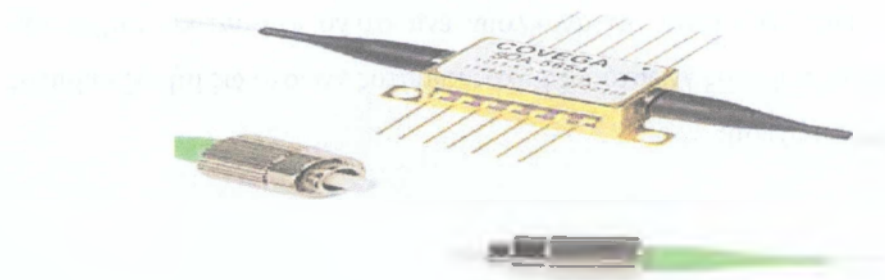
Όπου  $\Lambda$  είναι η περίοδος του FBG και  $n$  είναι ο μέσος δείκτης διάθλασης του πυρήνα



Σχήμα 5.5 FBG

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### 6.1 ΟΠΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ



Όπως είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, ένα από τα ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά της διάδοσης ενός φωτεινού σήματος μέσα από οπτική ίνα, είναι και αυτό της απορρόφησης της ισχύος του σήματος. Άμεση συνέπεια του φαινομένου αυτού είναι ο περιορισμός της απόστασης μετάδοσης σ' ένα σύστημα επικοινωνιών οπτικών ινών. Έτσι είδαμε χαρακτηριστικά, ότι η μέγιστη απόσταση μετάδοσης ενός σήματος ρυθμού μερικών δεκάδων Gb/s είναι περίπου 200 Km. Εάν θέλουμε να αναπτύξουμε δίκτυα ευρείας περιοχής (WAN) που να στηρίζονται σε οπτικές ίνες και να καλύπτουν μεγάλες αποστάσεις, είναι απαραίτητο να καταφύγουμε σε ενδιάμεση ενίσχυση του οπτικού σήματος. Διαφορετικά, η ένταση του σήματος θα ελαττωθεί τόσο πολύ με την απόσταση, λόγω απορρόφησης, που θα πέσει κάτω από το όριο ευαισθησίας του φωτοανιχνευτή, δίνοντας γένεση σε απαγορευτικά υψηλό λόγο σήματος-προς- θόρυβο (SNR).

Στα οπτικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα δεύτερης γενιάς, όπου ένα μόνο κανάλι (μήκος κύματος) μετέφερε την πληροφορία, κάθε βαθμίδα ενδιάμεσης ενίσχυσης γινόταν σε τρία στάδια: πρώτα είχαμε μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό (με τη χρήση φωτοδιόδου), κατόπιν το ηλεκτρικό σήμα ενισχύοντας με συμβατικούς ηλεκτρονικούς ενισχυτές και τέλος το ενισχυμένο ηλεκτρικό σήμα μετατρέπονταν σε οπτικό διαμορφώνοντας κατάλληλα την οπτική έξοδο ενός laser και διοχετεύονταν στην οπτική ίνα για συνέχιση της διάδοσης. Πέρα από την καθυστέρηση στη διάδοση του σήματος, στον επί πλέον θόρυβο που εισήγαγε ο ηλεκτρονικός ενισχυτής και την απαίτησή του για εσωτερική τροφοδοσία (σκεφτείτε αυτό να γίνεται κάθε 200 Km, στην καλύτερη περίπτωση, στο βάθος του Ατλαντικού ωκεανού σε βάθος μερικών Km), στα σύγχρονα πολυκάναλα (WDM) οπτικά συστήματα πρέπει να αντιμετωπίσουμε ένα επί πλέον πρόβλημα: Μέσα από την οπτική ίνα η πληροφορία μεταφέρεται από πολλά κανάλια, είναι ανεξάρτητα bit streams, και η παραπάνω διαδικασία της οπτοηλεκτρονικής μετατροπής-ηλεκτρονική ενίσχυση-ηλεκτρο-οπτική μετατροπή, πρέπει να γίνει ανεξάρτητα για κάθε

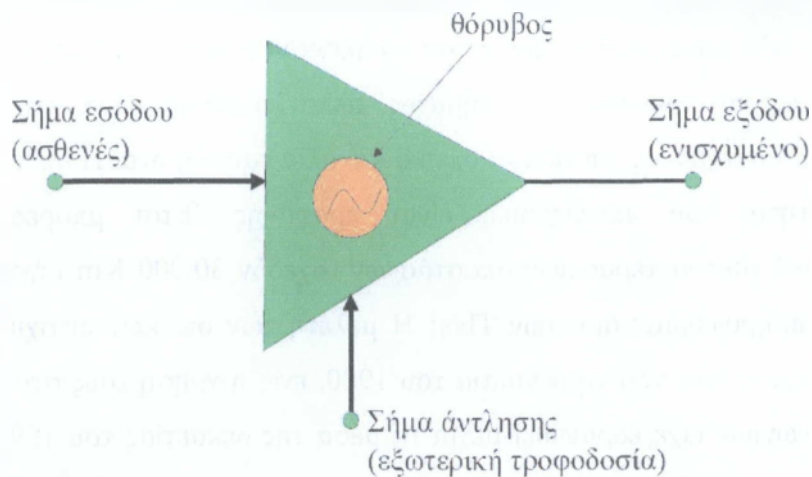


ένα κανάλι-μήκος κύματος. Το κόστος και η περιπλοκότητα της ενίσχυσης του οπτικού σήματος της ίνας γίνεται πλέον απαγορευτικό. Τη λύση στο πρόβλημα έδωσε η τεχνολογία με την σχεδίαση και ανάπτυξη των οπτικών ενισχυτών οι οποίοι: (α) είναι παθητικές διατάξεις και δεν απαιτούν εξωτερική τροφοδοσία από ηλεκτρική πηγή. (β) Δεν χρειάζεται οπτοηλεκτρονική μετατροπή του φωτεινού σήματος, αλλά λαμβάνει χώρα απ' ευθείας οπτική ενίσχυση του όλου σήματος για όλα τα οπτικά κανάλια ταυτόχρονα. Η απλοποίηση και αποτελεσματικότητα που επιτεύχθηκε είναι προφανής. Έτσι μπόρεσαν να κατασκευασθούν οπτικά δίκτυα τεραστίων αποστάσεων (σχεδόν 30.000 Km μήκους) με συνολικούς ρυθμούς πληροφορίας αρκετών Tb/s! Η μελέτη των οπτικών ενισχυτών σε ερευνητικό επίπεδο άρχισε ήδη από τη δεκαετία του 1980, ενώ η χρήση τους στα οπτικά συστήματα τηλεπικοινωνιών είχε εδραιωθεί μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1990. Ήδη από το 1996 είχαν ενσωματωθεί στα οπτικά καλώδια που διέσχιζαν τον Ατλαντικό και Ειρηνικό ωκεανό.

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε συνοπτικά στα βασικά χαρακτηριστικά που διέπουν την λειτουργία των οπτικών ενισχυτών γενικά και στη συνέχεια θα περιγράψουμε τις βασικές αρχές λειτουργίας των οπτικών ενισχυτών διόδου laser και ενισχυτών οπτικών ινών με προσμείξεις ερμπίου (Er)

## **Χαρακτηριστικά λειτουργίας οπτικών ενισχυτών**

Εάν θεωρήσουμε έναν ενισχυτή σαν ένα μαύρο κουτί (σχ. 6.1) η βασική αρχή λειτουργίας του αναφέρεται στο ότι κάποιο ασθενές σήμα εισόδου μετατρέπεται σε ισχυρό σήμα εξόδου μετά από μια εσωτερική διεργασία που προκάλεσε μια εξωτερική τροφοδοσία. Η ίδια αρχή συναντάται και στους ηλεκτρονικούς και στους οπτικούς ενισχυτές. Η διαφορά έγκειται στην φύση των σημάτων (οπτικά ή ηλεκτρικά) και στην εσωτερική διεργασία που λαμβάνει χώρα. Στους οπτικούς ενισχυτές η εσωτερική διεργασία είναι συνήθως κάποιος μηχανισμός εξαναγκασμένης εκπομπής, όπως περίπου συναντήσαμε νωρίτερα στη λειτουργία του laser. Η εξωτερική τροφοδοσία είναι συνήθως ένα ισχυρό οπτικό σήμα άντλησης



Σχήμα 6.1 Οπτικός ενισχυτής

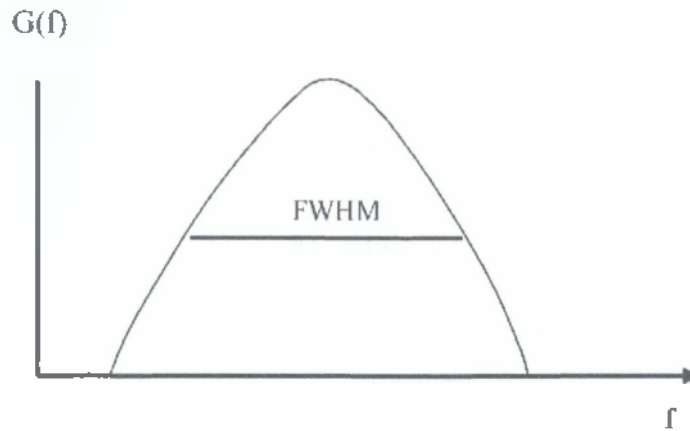
Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός ενισχυτή είναι ο συντελεστής απολαβής (gain coefficient ή απλά gain), η αποδοτικότητα απολαβής (gain efficiency), το φάσμα απολαβής (gain bandwidth), ο κόρος απολαβής (gain saturation) και ο θόρυβος. Οι οπτικοί ενισχυτές χαρακτηρίζονται επίσης και από την εναισθησία στην πόλωση (polarization sensitivity).

**Απολαβή ενισχυτή :** είναι ο λόγος της ισχύος εξόδου προς την ισχύ εισόδου και μετριέται σε dB. Συναντάται στη βιβλιογραφία και ως συντελεστής ενίσχυσης.

**Αποδοτικότητα απολαβής :** είναι ουσιαστικά η απολαβή εκφρασμένη σαν συνάρτηση της ισχύος εισόδου. Μετριέται σε dB/mW

**Φάσμα απολαβής:** είναι η περιοχή συχνοτήτων στην οποία ο ενισχυτής λειτουργεί, είναι δηλαδή αποτελεσματικός στην ενίσχυση του σήματος. Σημειώνουμε ότι το φάσμα απολαβής των οπτικών ενισχυτών είναι τουλάχιστον τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο αυτό των ηλεκτρονικών ενισχυτών. Το προφίλ του φάσματος απολαβής τυπικής περίπτωσης οπτικού ενισχυτή φαίνεται στο (σχ 6.2) Το εύρος της καμπύλης του φάσματος απολαβής στο μισό του μεγίστου της κορυφής (Full Half Width Maximum-FHWM) ονομάζεται εύρος ζώνης απολαβής του ενισχυτή. Στα οπτικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα προτιμώνται ενισχυτές με όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος ζώνης, μια και η απολαβή τους είναι σχεδόν σταθερή σ'όλο το εύρος ζώνης ακόμη και ενός συστήματος WDM πολλών καναλιών.

**Κόρος απολαβής :** Πρόκειται για ανεπιθύμητη ιδιότητα των οπτικών ενισχυτών. Στους οπτικούς ενισχυτές η απολαβή του ενισχυτή ελαττώνεται με την αύξηση του σήματος εισόδου (σχ6.2). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φαινόμενο κόρου απολαβής του οπτικού ενισχυτή. Συνέπεια του είναι η περιοχή λειτουργίας του ενισχυτή να βρίσκεται όχι και τόσο υψηλότερα από την στάθμη ισχύος κόρου.



Σχήμα 6.2 Τυπικό φάσμα απολαβής  $G(f)$  οπτικού ενισχυτή.

Αυτό οδηγεί και σε μια δεύτερη ανεπιθύμητη ιδιότητα των οπτικών ενισχυτών, που είναι βέβαια συνέπεια της πρώτης : τη διαφωνία (crosstalk). Όταν η απολαβή εξαρτάται από την στάθμη του σήματος εισόδου και το σημείο λειτουργίας είναι κοντά στον κόρο, ένα on-off σήμα σε ένα μήκος κύματος μπορεί να προξενήσει διακύμανση της απολαβής επηρεάζοντας ενδεχομένως το σήμα εξόδου σε γειτονικό μήκος κύματος.

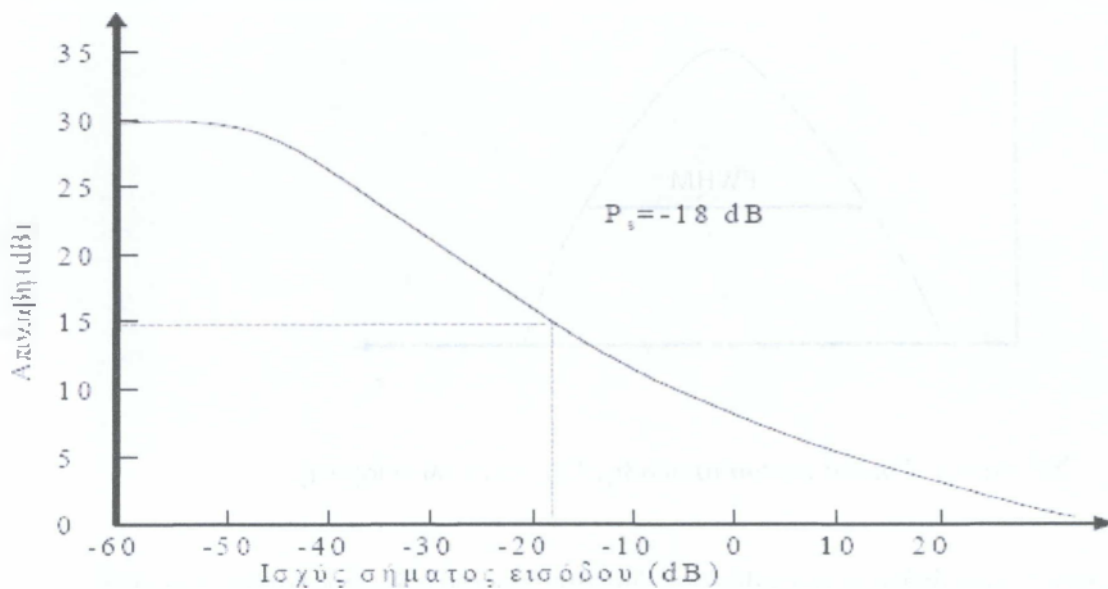
Το φαινόμενο του κόρου απολαβής μπορεί να αποτυπωθεί προσεγγιστικά από την εξίσωση

$$G = \left( 1 + \frac{P_s}{P_{IN}} \right) \ln \left( \frac{G_{max}}{G} \right)$$

Όπου  $G_{max}$  είναι η μέγιστη μη κορεσμένη απολαβή που έχουμε όταν είναι πολύ μικρή η τιμή του σήματος εισόδου και  $G$  η απολαβή του ενισχυτή για το συγκεκριμένο σήμα  $P_{in}$ . Η γραφική παράσταση της παραπάνω εξίσωσης αποτυπώνεται στο σχ.6.3 για τυπική περίπτωση ενισχυτή ίνας με προσμείξεις ερμπίου. Παρατηρούμε ότι για πολύ μικρές τιμές της ισχύος εισόδου  $P_{in}$  η απολαβή του ενισχυτή βρίσκεται κοντά στη μη κορεσμένη τιμή

$G_{\max} \sim 50 \text{ dB}$ , ενώ σε μεγάλες τιμές της  $r_{in}$  η απολαβή  $G \rightarrow 1$ , δηλ. δεν έχουμε ενίσχυση και  $P_{in} = P_{out}$ .

Η ισχύς του σήματος για την οποία η απολαβή ελαττώνεται στο μισό της μέγιστης τιμής της ονομάζεται ένταση κόρου (saturation intensity)  $P_s$ . Η  $P_s$  εξαρτάται στους οπτικούς ενισχυτές κυρίως από την τιμή της ισχύος εισόδου. Σημειώνουμε ότι δεν υπάρχει βασικός περιορισμός να λειτουργεί ένας οπτικός ενισχυτής π.χ. ίνας με προσμείξεις ερμπίου στην περιοχή κόρου. Ο μόνος περιορισμός είναι ότι στην πράξη η απολαβή που θα προσφέρει ο ενισχυτής στην περιοχή κόρου είναι μικρότερη από την μη κορεσμένη απολαβή.



Σχήμα 6.3 Σχηματικό διάγραμμα της απολαβής συναρτήσει του σήματος εισόδου για τυπικό οπτικό ενισχυτή για την επίδειξη του φαινομένου του κόρου απολαβής.

**Θόρυβος:** Στους ηλεκτρονικούς ενισχυτές η κύρια συνιστώσα θορύβου είναι ο θερμικός θόρυβος που οφείλεται στην τυχαία (θερμική) κίνηση των ηλεκτρονίων. Στους οπτικούς ενισχυτές ο μηχανισμός ενίσχυσης στηρίζεται στο φαινόμενο της εξαναγκασμένης εκπομπής, όπως θα δούμε αναλυτικότερα στη συνέχεια. Εκτός όμως από την εξαναγκασμένη εκπομπή στο ενεργό μέσο έχουμε και τη συνιστώσα της αυθόρμητης εκπομπής η οποία δεν συνεισφέρει στην απολαβή του ενισχυτή σε πρώτη προσέγγιση. Τα φωτόνια της αυθόρμητης εκπομπής έχουν την ίδια μεν συχνότητα με αυτά του εισερχόμενου σήματος (βλεπε κεφ 3) αλλά εκπέμπονται σε τυχαίες κατευθύνσεις με τυχαίες φάσεις, είναι δηλαδή ασύμφωνα φωτόνια. Η αυθόρμητη εκπομπή δυστυχώς έχει αρνητικές επιπτώσεις στη λειτουργία του συστήματος ο ενισχυτής δεν ξεχωρίζει το ασύμφωνο σήμα της αυθόρμητης εκπομπής και ενισχύει την ισχύ του μαζί με αυτή του σήματος εισόδου που μεταφέρει την πληροφορία. Η ενισχυμένη αυθόρμητη εκπομπή

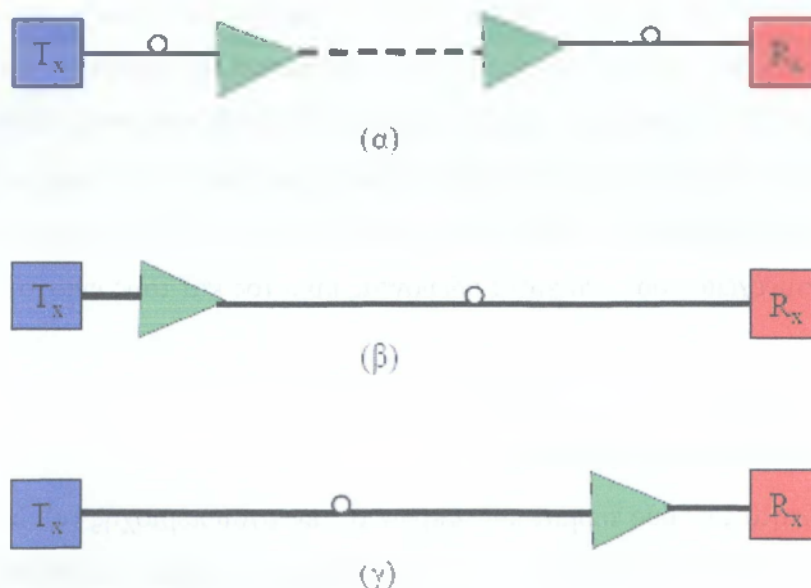
(Amplified Spontaneous Emission –ASE) ως ασύμφωνη ακτινοβολία εμφανίζεται σαν θόρυβος στην έξοδο του ενισχυτή . Οι επιπτώσεις της ASE πάντα λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό ενός οπτικού ενισχυτή.

## 6.2 Κατάταξη οπτικών ενισχυτών

Σ' ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο οπτικών ινών ένας οπτικός ενισχυτής μπορεί τυπικά να τοποθετηθεί σε τρεις διαφορετικές θέσεις (σχ6.4) αναλαμβάνοντας και αντίστοιχο ρόλο:

**Ενισχυτής ισχύος:** Τοποθετείται αμέσως μετά τον οπτικό πομπό και ο ρόλος του είναι να ανυψώσει τη στάθμη της εκπεμπόμενης ισχύος σε τιμές μεγαλύτερες των δυνατοτήτων ισχύος του πομπού. Ουσιαστικά δρα σαν επωθητικός ενισχυτής (booster amplifier) και σε κάποιες κατασκευές μπορεί να ολοκληρωθεί με τον οπτικό πομπό.

**Προενισχυτής:** Πρόκειται για οπτικό ενισχυτή πολύ χαμηλού εσωτερικού θορύβου που είναι σε θέση να ενισχύσει πολύ εξασθενημένα οπτικά σήματα στο βαθμό που να μπορούν να ανιχνευθούν αξιόπιστα από τον δέκτη. Τοποθετείται λίγο πριν τον οπτικό δέκτη και μπορεί να ολοκληρωθεί μαζί του.



Σχήμα 6.4 Οι τρεις ρόλοι των οπτικών ενισχυτών σε ένα οπτικό δίκτυο : (α) ενισχυτής γραμμής, (β) ενισχυτής ισχύος, (γ) προενισχυτής.

**Ενισχυτής γραμμής:** Πρόκειται για οπτικό ενισχυτή χαμηλού θορύβου που ενισχύει εξασθενημένο οπτικό σήμα έτσι ώστε να μπορεί αυτό να ταξιδέψει επί πλέον μήκος οπτικής ίνας. Τοποθετείται σ' ένα ή περισσότερα σημεία της οπτικής ζεύξης ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη και αντικαθιστά τον επαναλήπτη (αναλογικός ηλεκτρονικός ενισχυτής ) ή το αναγεννητή (ηλεκτρονικός ενισχυτής και αναμορφωτής της κυματομορφής του σήματος). Οι ενισχυτές γραμμής πρέπει να έχουν μεγάλη απολαβή και χαμηλά χαρακτηριστικά θορύβου , ώστε να μην προσθέτουν επί πλέον θόρυβο στο ήδη εξασθενημένο οπτικό σήμα.

Τα όρια των διαφόρων παραμέτρων λειτουργίας των οπτικών ενισχυτών, καθώς και οι εφαρμογές χρήσης τους δεν γίνονται τυχαία, αλλά έχουν καθορισθεί με συστάσεις από την Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU). Τέτοιες συστάσεις είναι για παράδειγμα οι G.662, G.663, G.957, G.973, όπου ο ενδιαφερόμενος μπορεί να ανατρέξει για περισσότερες λεπτομέρειες.

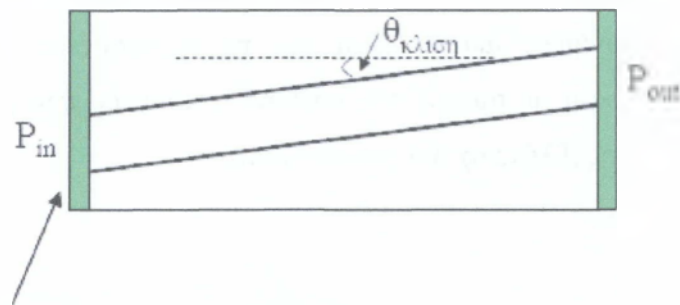
### **6.3 Οπτικοί ενισχυτές ημιαγωγών**

Κατ 'αρχήν όλα τα laser πριν φθάσουν στη στάθμη κατωφλίου για έναυση λειτουργούν σαν οπτικοί ενισχυτές, οπότε και τα laser ημιαγωγών δεν αποτελούν εξαίρεση. Οι οπτικοί ενισχυτές ημιαγωγών (Semiconductor Optical Amplifier-SOA) ή ενισχυτές διόδου laser (Semiconductor Laser Amplifiers-SLA) αναπτύχθηκαν για πρακτικές εφαρμογές στα οπτικά συστήματα στη δεκαετία του 1980. Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες τις οποίες και θα εξετάσουμε στη συνέχεια: τους ενισχυτές οδεύοντα κύματος και τους ενισχυτές Fabry Perot (FP).

#### **6.3.1 Ενισχυτής οδεύοντος κύματος**

Όταν η ανακλαστικότητα των δύο τερματικών άκρων της ενεργού περιοχής του laser είναι πολύ μικρή, της του  $10^{-5}$  με  $10^{-4}$ , τότε το φωτεινό σήμα δεν υπόκειται σε πολλαπλές ανακλάσεις, έχουμε δηλ. απουσία οπτικής ανάδρασης. Αν η απολαβή ανά μονάδα μήκους είναι αρκετά υψηλή, λαμβάνει χώρα ενίσχυση του οπτικού σήματος κατά την απλή διέλευσή του μέσα από την ενεργό περιοχή και ο ενισχυτής καλείται ενισχυτής οδεύοντος κύματος. Το φάσμα εξόδου του ενισχυτή δεν θα παρουσιάζει στην περίπτωση αυτή σημάδια συντονισμού της οπτικής κοιλότητας και θα είναι αρκετά ευρύ ώστε να το καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμο στα οπτικά δίκτυα με διαίρεση μήκους κύματος ( WDM).

το πρακτικό πρόβλημα που αντιμετωπίζουμε στην κατασκευή των ενισχυτών οδεύοντος κύματος είναι η επίτευξη της πολύ μικρής ανακλαστικότητας στις πλευρές της διάταξης. Ένας τρόπος για να κατασκευάσουμε έναν οπτικό ενισχυτή ημιαγωγών τύπου οδεύοντος κύματος, είναι να επικαλύψουμε τις πλευρές του με αντι-ανακλαστικό επίχρισμα, ώστε να μειωθεί η ανακλαστικότητά της. Παρ' όλα αυτά στην πράξη, απαιτείται μεγάλη προσπάθεια για να επιτύχουμε τις πολύ μικρές πλευρικές ανακλαστικότητες που αναφέραμε στην αρχή της παραγράφου. Έτσι έχουν αναπτυχθεί τεχνολογικά εναλλακτικές πρακτικές για τη μείωση της οπτικής ανάδρασης στους οπτικούς ενισχυτές SLA οδεύοντος κύματος. Ένας τέτοιος εναλλακτικός σχεδιασμός είναι και αυτός των κεκλιμένων τερματικών όψεων (angled facets). Η λωρίδα της



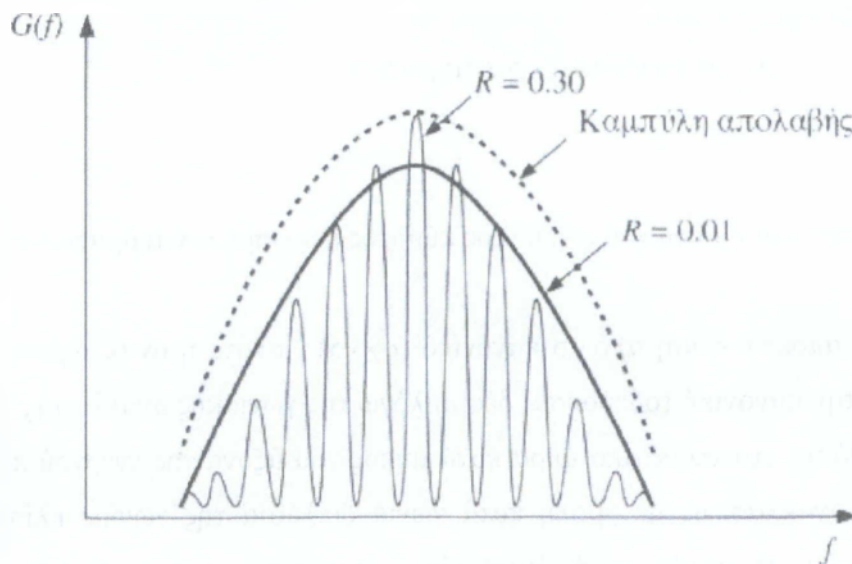
Αντιανακλαστικό επίχρισμα

Σχήμα 6.5 Δομή ενισχυτή ημιαγωγού οδεύοντος κύματος κεκλιμένων τερματικών όψεων.

Ενεργού περιοχής αποκτά κλίση από το κανονικό (σχ6.5) , οπότε η ανακλώμενη δέσμη διαχωρίζεται από την κανονική (οδεύουσα) δέσμη λόγω της γωνιακής ανάκλασης. Όταν η φωτεινή δέσμη φθάσει στα τερματικά άκρα κατά μήκος του άξονα της ενεργού περιοχής θα υποστεί λόγω ανακλάσεως μεταβολή κατά γωνία διπλάσια της γωνίας κλίσης των τερματικών πλευρών. Η γωνία αυτή όμως είναι έτσι σχεδιασμένη, ώστε να είναι μεγαλύτερη από αυτή που θα συντηρούσε πολλαπλές εσωτερικές ανακλάσεις στην οπτική κοιλότητα. Το αποτέλεσμα είναι η ανακλώμενη δέσμη να απορροφάται τελικά από τα τοιχώματα της διάταξης και να καταστέλλεται έτσι η ανάπτυξη και συντήρηση πολλαπλών ανακλάσεων. Για τέτοιες δομές οι πρακτικές δυσκολίες που αντιμετωπίζουμε στα κεκλιμένα άκρα της διάταξης. Στην πράξη, ο συνδυασμός χρήσης αντιανακλαστικού επιχρίσματος και κεκλιμένης λωρίδας μπορεί να μας δώσει ανακλαστικότητες της τάξης του  $10^{-4}$  σε μια βέλτιστα σχεδιασμένη διάταξη.

### 6.3.2 Ενισχυτής Fabry Perot

Όταν η ανακλαστικότητα του οπτικού ενισχυτή ημιαγωγού (SLA) είναι αρκετά σημαντική, της τάξης του 30%, τότε ο ενισχυτής διόδου LASER ονομάζεται ενισχυτής Fabry Perot. Το φως υφίσταται οπτική ανάδραση, αφού ανακλάται πολλές φορές στα πλευρικά τοιχώματα της κοιλότητας συντονισμού, όπως ακριβώς και στα laser Fabry Perot. Σαν αποτέλεσμα, το φάσμα απολαβής  $G(f)$  παρουσιάζει μια σειρά από στενές ζώνες διέλευσης που έχουν ως περιβάλλουσα την καμπύλη απολαβής του (σχ5.11) . Η  $G(f)$  γίνεται μέγιστη κάθε φορά που η συχνότητα του φωτεινού σήματος συμπίπτει με μια από τις συχνότητες συντονισμού της οπτικής κοιλότητας. Λόγω του μικρού εύρους ζώνης τους οι ενισχυτές Fabry Perot είναι συνήθως ακατάλληλοι για τις περισσότερες εφαρμογές οπτικών συστημάτων, σε αντίθεση με αυτούς του οδεύοντος κύματος που χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερο εύρος ζώνης (βλέπε σχ 6.6 για σύγκριση)



Σχήμα 6.6 Τυπικό φάσμα απολαβής  $G(f)$  για ενισχυτή οδεύοντος κύματος ( $R=0.01$ ) και ενισχυτή Fabry-Perot ( $R=0.3$ ).



### 6.3.3 Μειονεκτήματα ενισχυτών ημιαγωγού

Ένα μειονέκτημα των ενισχυτών ημιαγωγού είναι η ευαισθησία που παρουσιάζουν στην πόλωση του φωτεινού σήματος με την απολαβή του ενισχυτή να είναι διαφορετική για τους τρόπους πόλωσης TE και TM. Η διαφορά αυτή μπορεί να φθάσει και τα 5-8 dB. Η ευαισθησία αυτή στην πόλωση είναι ιδιαίτερα ανεπιθύμητη, αν λάβουμε υπόψη ότι η κατάσταση πόλωσης μεταβάλλεται ανάλογα με τη μετάδοση κατά μήκος της διαδρομής, εκτός κι χρησιμοποιήσουμε ειδικές οπτικές ίνες που διατηρούν την κατάσταση πόλωσης. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές για την μείωση της ευαισθησίας στην πόλωση. Επιγραμματικά αναφέρουμε αυτή που ο ενισχυτής σχεδιάζεται με συγκρίσιμο εύρος και πάχος της ενεργού περιοχής. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο ενισχυτές συνδεδεμένοι στη σειρά ή δύο διελεύσεις μέσω του ίδιου ενισχυτή. Το σύστημα σχεδιάζεται έτσι ώστε το σήμα TE στον έναν ενισχυτή να γίνεται TM στον άλλο και αντίστροφα. Αν οι δύο ενισχυτές έχουν ίδια χαρακτηριστικά απολαβής, η τελική του συστήματος είναι ανεξάρτητη της πόλωσης.

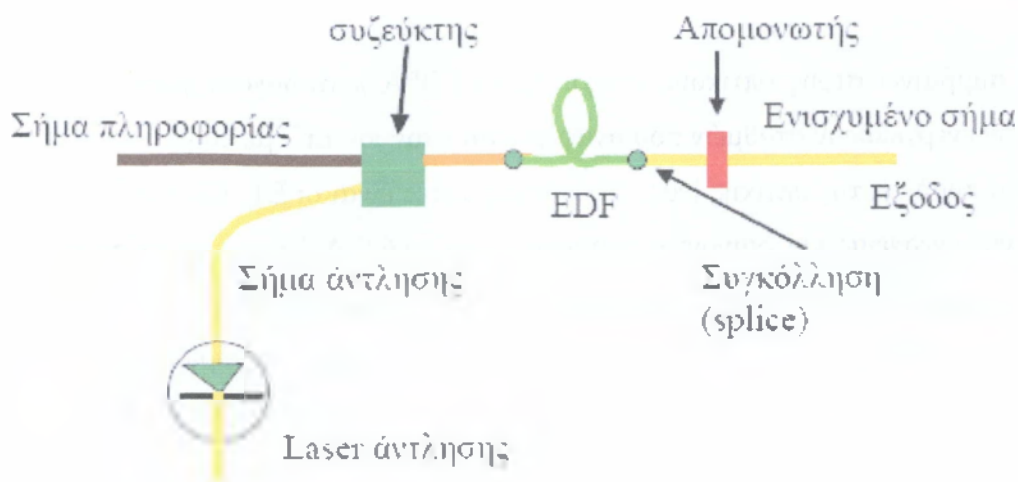
Στα μειονεκτήματα των ενισχυτών διόδου laser θα προσθέταμε, πέρα από την ευαισθησία στην πόλωση, και τη διαφωνία μεταξύ των καναλιών, καθώς και τη σχετική μεγάλη απώλεια ζεύξης. Παρ' όλα αυτά έχουν βρίσκουν εφαρμογές στα οπτικά συστήματα όπως σαν μετατροπείς μήκους κύματος, γρήγοροι διακόπτες δρομολόγησης μήκους κύματος στα δίκτυα WDM, καθώς και σαν μη-γραμμικά στοιχεία για ανάκτηση του παλμού χρονισμού και αποπολυπλεξία στα συστήματα διαίρεσης χρόνου (TDM). Έτσι λοιπόν για οπτική ενίσχυση στην πλέον δημοφιλή περιοχή των 1,5 μm των οπτικών ζεύξεων μεγάλων αποστάσεων καταφεύγουμε στους ενισχυτές οπτικών ινών με προσμείξεις. Για την περιοχή των 1,3 μm, που συναντούμε κυρίως στα LAN, οι ιδιότητες των ενισχυτών ίνας δεν είναι και τόσο ικανοποιητικές οπότε οι ενισχυτές διόδου laser αποτελούν μια ικανοποιητική εναλλακτική λύση.

## 6.4 Ενισχυτές οπτικών ινών με προσμίξεις

Στους ενισχυτές οπτικών ινών με προσμίξεις χρησιμοποιούνται σαν μέσο απολαβής στοιχεία σπανίων γαιών με τα οποία εμπλουτίζεται ο πυρήνας της οπτικής ίνας. Τα στοιχεία πρόσμιξης που χρησιμοποιούνται κάθε φορά καθορίζουν και τα χαρακτηριστικά του οπτικού ενισχυτή, όπως λειτουργικό μήκος κύματος, φάσμα απολαβής κλπ. Επί της αρχής, διάφορα διάφορα ιόντα σπανίων γαιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρόσμιξη όπως το έρπιο, το όλμπιο, το νεοδύμιο, υτέρμπιο κλπ, που μας επιτρέπουν να κατασκευάσουμε οπτικούς ενισχυτές για την κάλυψη μιας μεγάλης περιοχής μήκους κύματος από τα 0.5-3.5 μm. Επειδή όμως στις οπτικές επικοινωνίες μας ενδιαφέρει κυρίως η περιοχή των 1.55 μm, όπου έχουμε την ελάχιστη απώλεια, η ιδανικότερη χρήση είναι αυτή των ενισχυτών οπτικής ίνας με προσμίξεις ιόντων ερμπίου ( $Er^{+3}$ ), που είναι και οι πλέον δημοφιλείς της κατηγορίας. Οι ενισχυτές με προσμίξεις ιόντων ερμπίου (Erbium Doped Fiber Amplifiers-EDFA) έφεραν ουσιαστικά επανάσταση στη σχεδίαση των οπτικών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά εμπορικά το 1992, ενώ από το 1996 εισήχθησαν ως ενισχυτές σε οπτικά καλώδια που διασχίζουν τον Ατλαντικό και Ειρηνικό ωκεανό λειτουργώντας στα 5 Gb/s.

### 6.4.1 Ενισχυτές οπτικής ίνας με προσμίξεις ιόντων ερβίου (EDFA)

Ένας ενισχυτής EDFA φαίνεται σχηματικά στο σχ. 6.7 αποτελείται ουσιαστικά από ικανό μήκος οπτικής ίνας που κυμαίνεται τυπικά από μερικά μέτρα μέχρι μερικές δεκάδες μέτρα για βέλτιστη απολαβή και ελάχιστο θόρυβο στη έξοδο. Ο πυρήνας της ίνας είναι εμπλουτισμένος με ιόντα  $Er^{+3}$ . Στην νοθευμένη αυτή οπτική ίνα διοχετεύεται οπτικό σήμα άντλησης από κάποιο ισχυρό laser τυπικά σε μήκος κύματος των 980nm ή 1480nm. Έτσι λοιπόν στην αρχή της νοθευμένης οπτικής ίνας υπάρχει συζεύκτης 2x1, επιλεκτικός ως προς το μήκος κύματος, ώστε να διοχετεύεται τόσο η ισχύς του τηλεπικοινωνιακού σήματος, όσο και η



Σχήμα 6.7 Βασική δομή EDFA

Ισχύς του σήματος άντλησης στην οπτική ίνα με προσμίξεις. Συνήθως ένας οπτικός απομονωτής χρησιμοποιείται στην έξοδο ή/και στην είσοδο του οπτικού ενισχυτή για να αποτρέψει ανακλώμενα σήματα να εισέλθουν στον ενισχυτή. Τέτοια ανακλώμενα σήματα μπορούν να μετατρέψουν έναν οπτικό ενισχυτή σε laser, καθιστώντας τον ουσιαστικά άχρηστο ως ενισχυτή των οπτικών τηλεπικοινωνιακών σημάτων.

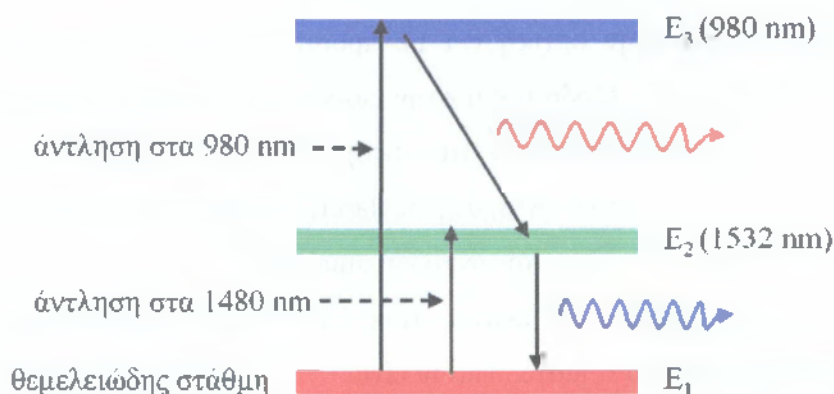
Μια σειρά από θετικά χαρακτηριστικά, έκαναν τους EDFA ιδιαίτερα δημοφιλείς στα σύγχρονα οπτικά τηλεπικοινωνιακά σήματα. Τέτοια είναι:

- ✓ Η διαθεσιμότητα σήμερα συμπαγών και αξιόπιστων ημιαγωγικών laser άντλησης υψηλής ισχύος.
- ✓ Το καθόλου ευκαταφρόνητο γεγονός ότι ο ενισχυτής είναι ουσιαστικά ολόκληρος μια .... Οπτική ίνα!
- ✓ Είναι ανεξάρτητος της πόλωσης του φωτεινού σήματος.
- ✓ Είναι σχετικά εύκολη η σύζευξη φωτός από και προς τον ενισχυτή.
- ✓ Η δομή του είναι πολύ απλή.

Έχει ανοσία σε διαφωνία (crosstalk) όταν ενισχύει σήματα σε πολυκαναλικές ζεύξεις WDM.

## Αρχή λειτουργίας

Όπως συνήθως συμβαίνει στους οπτικούς ενισχυτές, οι EDFA λειτουργούν μέσω ενός συστήματος τριών ενεργειακών σταθμών που αναφέρονται στον ιόν  $\text{Er}^{3+}$  με το οποίο είναι εμπλουτισμένος ο πυρήνας της οπτικής ίνας. Οι στάθμες αυτές είναι οι  $E_1$ ,  $E_2$ , και  $E_3$  με σειρά αυξανόμενης ενέργειας και φαίνονται σχηματικά στο σχ.6.8 Αξίζει να αναφέρουμε ότι ενώ σ'ένα απομονωμένο ιόν  $\text{Er}^{3+}$  οι ενεργειακές στάθμες είναι διακριτές γραμμές, όταν αυτό εισάγεται στο άμορφο γυαλί (silica glass), οι στάθμες διαχωρίζονται σε πολλαπλότητες ενεργειακών σταθμών. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στα τοπικά ηλεκτρικά πεδία που αισθάνεται το κάθε ιόν, όταν αυτό διαλυθεί στο γυαλί, και ονομάζεται φαινόμενο Stark. Όταν έχουμε ικανό αριθμό ιόντων  $\text{Er}^{3+}$  διαλυμένων στο γυαλί οι πολλαπλότητες των ενεργειακών σταθμών εμφανίζονται μακροσκοπικά σαν συνεχείς ενεργειακές ζώνες, Δεν θα μας απασχολούσε το



Σχήμα 6.8 Διάγραμμα ενεργειακών σταθμών ιόντων ερμπίου στις οπτικές ίνες από silica. Η αποδιέγερση από την  $E_3$  στην  $E_2$  είναι αυθόρμητη ( $T_{32}=1\mu\text{s}$ ) ενώ από την  $E_2$  στην  $E_1$  εξαναγκασμένη ( $T_{21}\sim 10\text{ms}$ ).

Φαινόμενο Stark και θα το αντιμετωπίζαμε σαν λεπτομέρεια αν δεν είχε επιπτώσεις στα χαρακτηριστικά λειτουργίας των οπτικών ενισχυτών με άμεσες τεχνολογικές συνέπειες: αυξάνεται το εύρος συχνοτήτων (μηκών κύματος) των προς ενίσχυση σημάτων. Το εύρος

αυτό βρίσκεται ανάμεσα στα μήκη κύματος 1525-1570 είναι περίπου 50nm με κορυφή γύρω στα 1532nm. Είναι ευτυχής συγκυρία το γεγονός ότι η κορυφή αυτή βρίσκεται στο παράθυρο ελάχιστης απορρόφησης που χρησιμοποιούμε στις οπτικές τηλεπικοινωνίες. Επίσης, επειδή ένα ιόν μπορεί να διεγερθεί σε οποιαδήποτε ενεργειακή κατάσταση της επιτρεπτής ζώνης ενέργειας, μπορούμε να ενισχύσουμε ταυτόχρονα διάφορα μήκη κύματος.

Ας χαρακτηρίσουμε με  $N_i$ ,  $i=1,2,3$  τους πληθυσμούς των ιόντων στην στάθμη  $E_i$ . Σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας είναι  $N_1 > N_2 > N_3$ . Αν τώρα εγχύσουμε ένα ισχυρό οπτικό σήμα στα 980nm στον ενισχυτή, αυτό θα προκαλέσει διεγέρσεις ιόντων από τη στάθμη

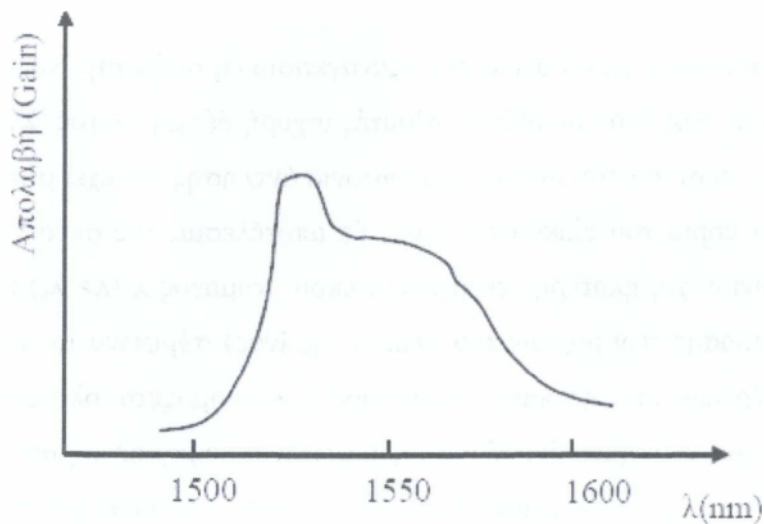
$E_1$  στη στάθμη  $E_3$  και αντίστροφα. Επειδή όμως είναι  $N_1 > N_3$ , θα έχουμε καθαρή απορρόφηση οπτικής ισχύος. Το οπτικό σήμα στα 980 nm που εισάγεται στον ενισχυτή ονομάζεται σήμα άντλησης και η διαδικασία που περιγράψαμε άντλησης οπτικής ισχύος. Τα ιόντα όμως που διεγέρθηκαν στη στάθμη  $E_3$  γρήγορα αποδιεγείρονται στη στάθμη  $E_2$  με τη διαδικασία της αυθόρμητης εκπομπής. Ο μέσος χρόνος (lifetime) για αυτήν τη διαδικασία είναι  $T_{32}=1\mu s$ . Τα διεγερμένα ιόντα στη στάθμη  $E_2$  επίσης αποδιεγείρονται αυθόρμητα μεταπίπτοντας στη στάθμη  $E_1$  μετά από μέσο χρόνο όμως  $T_{21} \sim 10ms$ . Ο χρόνος αυτός είναι πολύ μεγάλος σχετικά, αρκεί να συγκρίνουμε απλά ότι τα ιόντα στην στάθμη  $E_2$  διαμένουν για χρόνο που είναι περίπου 10.000 φορές μεγαλύτερος από αυτόν που της στάθμης  $E_3$ . Η στάθμη  $E_2$  ονομάζεται μετασταθής. Έτσι αν η ισχύς άντλησης είναι αρκετά μεγάλη πετυχαίνουμε τελικά τη συσσώρευση μεγάλου αριθμού ιόντων στη μετασταθή στάθμη  $E_2$ . Ο πληθυσμός της  $E_2$  γρήγορα γίνεται μεγαλύτερος και από αυτόν της  $E_1$ , κατάσταση που είναι γνωστή σαν αντιστροφή πληθυσμού. Εάν τώρα ένα οπτικό τηλεπικοινωνιακό σήμα στην περιοχή των 1525-1570 nm εισαχθεί στην οπτική ίνα, θα προκαλέσει επαγόμενη (εξαναγκασμένη) αποδιέγερση του μεγάλου πληθυσμού ατόμων της στάθμης  $E_2$  στην  $E_1$  με αντίστοιχη εκπομπή πανομοιότυπων φωτονίων ίσης συχνότητας και φάσης. Αυτό αποτελεί ουσιαστικά ενίσχυση του τηλεπικοινωνιακού σήματος.

Για την οπτική άντληση στους EDFA μπορούμε, επί της αρχής, να χρησιμοποιήσουμε και άλλα σήματα πέρα αυτού των 980 nm που αντιστοιχεί στη στάθμη  $E_3$ . Στην πράξη όμως η διαδικασία άντλησης αποδεικνύεται πιο αποτελεσματική (απαιτείται λιγότερη οπτική ισχύς) χρησιμοποιώντας σήμα των 980 nm. Μια άλλη πιθανή επιλογή είναι η χρήση σήματος άντλησης στα 1480 nm (σχ 6.8). Τώρα έχουμε άντληση από τον πάτο της θεμελιώδους στάθμης  $E_1$  απευθείας στην κορυφή της μετασταθούς  $E_2$ . Η αποτελεσματικότητα της άντλησης στα 1480 nm δεν είναι στο ίδιο επίπεδο με αυτόν στα 980 nm, ενώ και ο βαθμός αντιστροφής πληθυσμού που επιτυγχάνεται είναι επίσης χαμηλότερος. Τονίζουμε ότι όσο υψηλότερη είναι η αντιστροφή πληθυσμού,

τόσο χαμηλότερος είναι ο θόρυβος της ενισχυμένης αυθόρμητης εκπομπής (ASE) που εισάγει ο οπτικός ενισχυτής. Έτσι λοιπόν αν μας ενδιαφέρει η κατασκευή ενισχυτών χαμηλού θορύβου θα καταφύγουμε σε άντληση στα 980 nm. Τελευταία είναι διαθέσιμα lasers άντλησης στα 1480 nm υψηλής ισχύος, σε σχέση με αυτούς των 980 nm, τα οποία βρίσκουν εφαρμογή σε οπτικούς ενισχυτές ειδικά σχεδιασμένους για μεγάλη οπτική ισχύ στην έξοδο. Ένα άλλο πλεονέκτημα των ενισχυτών με άντληση στα 1480 nm είναι ότι το σήμα άντλησης διαδίδεται με χαμηλότερες απώλειες στην οπτική ίνα. Έτσι λοιπόν το laser άντλησης μπορεί να τοποθετηθεί σε μεγαλύτερη απόσταση από τη θέση του οπτικού ενισχυτή. Αυτό το εκμεταλλευόμαστε σε κάποια συστήματα όπου δεν είναι επιθυμητή η τοποθέτηση ενεργών στοιχείων στο μέσο της ζεύξης.

Όπως αναφέραμε παραπάνω το σχετικά μεγάλο εύρος του φάσματος απολαβής των EDFA οφείλεται στο πεπερασμένο εύρος των ενεργειακών ζωνών των ιόντων  $\text{Er}^{+3}$  στη silica. Επί πλέον επειδή ο πληθυσμός των ιόντων δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένος στη ζώνη  $E_2$ , το φάσμα απολαβής δεν είναι επίπεδο.

Θα δούμε αμέσως παρακάτω ότι αυτό έχει σημαντικές τεχνολογικές επιπτώσεις στις οπτικές τηλεπικοινωνίες. Τυλικό προφίλ του φάσματος απολαβής σε συνάρτηση με το μήκος κύματος για ενισχυτή EDFA φαίνεται σχηματικά στο (σχ.6.9). Από το (σχ.6.9) παρατηρούμε ότι διάφορα μήκη κύματος ενισχύονται διαφορετικά από τον ενισχυτή. Αυτό μας δημιουργεί σημαντικά προβλήματα στα



Σχημα 6.9 Τυπικό προφίλ του φάσματος απολαβής σε συναρτήση με το μήκος κύματος για ενισχυτή EDFA

Πολυκαναλικά συστήματα WDM, όπου συχνά καταφεύγουμε στη χρήση πολλών ενισχυτών σε σειρά. Στα συστήματα WDM πολλά κανάλια διαδίδονται ταυτόχρονα και επιθυμούμε την ισοδύναμη ενίσχυση τους. Ένας τρόπος να καταστήσουμε το φάσμα απολαβής πιο επίπεδο είναι να χρησιμοποιήσουμε οπτικές ίνες από φθοριούχο γυαλί (fluoride glass). Τέτοιοι οπτικοί ενισχυτές ονομάζονται Erbium Doped Fluoride Fiber Amplifiers (EDFFA) και προτάθηκαν το 1994. Αν και παρουσιάζουν διάφορα άλλα μειονεκτήματα-προβλήματα σε σχέση με τους ενισχυτές πυριτίου, εν τούτοις είναι διαθέσιμοι σήμερα στο εμπόριο. Άλλες προσεγγίσεις για την επίλυση του προβλήματος είναι αυτή της εξισορροπημένης απολαβής (gain equalization) με χρήση ελεγχόμενων εξασθενητών (attenuators) ή με τη χρήση κατάλληλων φίλτρων.

## 6.4.2 Οπτικός Ενισχυτής Raman

Ο οπτικός ενισχυτής Raman αξιοποιεί τεχνολογικά την εξαναγκασμένη σκέδαση Raman που λαμβάνει χώρα στις οπτικές ίνες όταν διαδίδεται σ' αυτές ισχυρή δέσμη φωτός. Στην περίπτωση αυτή το προσπίπτον φωτόνιο που ονομάζεται φωτόνιο άντλησης και έχει μήκος κύματος  $\lambda_s$  σκεδάζεται από τα μόρια του υλικού της ίνας. Το αποτέλεσμα της σκέδασης είναι η δημιουργία ενός φωτονίου χαμηλότερης ενέργειας μήκους κύματος  $\lambda$  ( $\lambda > \lambda_s$ ) και ενός φωτονίου (κβάντα ταλάντωσης των μορίων του υλικού της ίνας) σύμφωνα με τους νόμους της διατήρησης της ενέργειας και της ορμής. Η διαφορά  $\lambda - \lambda_s$  ονομάζεται ολίσθηση Stokes. Στην περίπτωση που στην οπτική ίνα διαδίδονται ήδη φωτόνια με μήκος κύματος  $\lambda$  (είναι αυτά που μεταφέρουν την πληροφορία), τότε η σκέδαση Raman λαμβάνει χώρα με εξαναγκασμένο τρόπο όταν τα προσπίπτοντα φωτόνια με μήκος άντλησης έχουν μήκος κύματος  $\lambda_s$ . Με τον όρο <<εξαναγκασμένη σκέδαση Raman>> εννοούμε ότι το φωτόνιο που προκύπτει από τη σκέδαση είναι πανομοιότυπο (σύμφωνα) σε φάση και ορμή με το φωτόνιο της πληροφορίας. Το τελευταίο φαίνεται σαν να διπλασιάζεται. Το τελικό αποτέλεσμα είναι να έχουμε μεταφορά οπτικής ισχύος από το σήμα άντλησης  $\lambda_s$  στο σήμα πληροφορίας  $\lambda$ . Αυτό ισοδυναμεί ουσιαστικά με ενίσχυση (απολαβή) του σήματος πληροφορίας.

Η μεγάλη διαφορά στη λειτουργία των οπτικών ενισχυτών Raman σε σχέση με τους ενισχυτές ημιαγωγών είναι ότι δεν απαιτείται πληθυσμιακή αντιστροφή για την ενίσχυση του σήματος πληροφορίας, ενώ η άντληση είναι τώρα μόνο οπτική και όχι ηλεκτρική όπως στους ημιαγωγούς. Η απολαβή στους ενισχυτές Raman γίνεται μέγιστη όταν η ολίσθηση Stokes είναι περίπου 13.2 THz, ενώ το εύρος ζώνης της απολαβής είναι περίπου 6 THz. Το μεγάλο εύρος ζώνης των ενισχυτών Raman τους καθιστά ελκυστικούς για εφαρμογή στις τηλεπικοινωνίες οπτικών ινών. Το μειονέκτημα όμως είναι ότι χρειαζόμαστε για την ενίσχυση οπτική ίνα μεγάλου μήκους της τάξης των μερικών χιλιομέτρων, ενώ το laser άντλησης πρέπει να έχει υψηλή οπτική ισχύ εξόδου ( $>1\text{W}$ ). Σαν τυπικές τιμές των παραμέτρων λειτουργίας των ενισχυτών Raman μπορούμε να πούμε ότι έχουν απολαβή 30dB με ισχύ άντλησης 1.5 W για οπτική ίνα μήκους 1.3 km.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ – ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

#### 7.1 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Κριτήρια για τη σχεδίαση ενός συστήματος  
μίας συγκεκριμένης απόδοσης BER

Απόσταση μετάδοσης  $L$  περιορίζεται λόγω των απώλειες των οπτικών ινών  
Ρυθμός μετάδοσης bit  $B$  περιορίζεται λόγω της διασποράς των οπτικών ινών

#### Διαχείριση ισχύος

Σκοπός: Εξασφάλιση αρκετής οπτικής ισχύος στο δέκτη ώστε να διατηρηθεί η αξιόπιστη μετάδοση του σήματος σε όλη τη διάρκεια ζωής του συστήματος

$$\bar{P}_{IN} = \bar{P}_{OUT} + C_L + M_s \quad (\text{σε dB ή dBm})$$

$P_{IN}$  : Μέση εκπεμπόμενη οπτική ισχύ

$P_{OUT}$  : Μέση ισχύ που απαιτείται στον δέκτη για δεδομένη τιμή BER

$C_L$  : Ολική απώλεια οπτικού καναλιού μετάδοσης

$M_s$  : Περιθώριο ασφάλειας (τυπική τιμή 5-10 dB)

#### Απώλειες οπτικού καναλιού μετάδοσης

Περιλαμβάνει όλες τις πιθανές πηγές απώλειας ισχύος (ενώσεις οπτικών ινών, συνδετήρες)

$$C_L = a_f L + a_{con} + a_{splice}$$

$\alpha_l$  : Απώλεια οπτικού καλωδίου σε dB/km

L : Μήκος οπτικού καλωδίου

$\alpha_{con}$  : Απώλειες λόγω των συνδετήρων στα άκρα πομπού, δέκτη και κατά μήκος της ζεύξης

$\alpha_{splice}$  : Απώλειες λόγω ενώσεων οπτικών ινών (σε dB ανά ένωση ή σε dB/km για όλο το μήκος της ίνας. Στην δεύτερη περίπτωση ο όρος  $\alpha_{splice}$  γίνεται  $\alpha_{splice}L$ )

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις μπορούμε να υπολογίσουμε τη μέγιστη απόσταση μετάδοσης ή να προσδιορίσουμε τα χαρακτηριστικά ενός στοιχείου της ζεύξης ώστε η μετάδοση ώστε η μετάδοση να είναι εφικτή σε συγκεκριμένη απόσταση.

Διαχείριση εύρους ζώνης (χρόνου ανόδου)

Σκοπός: Εξασφάλιση σωστής λειτουργίας στο ζητούμενο ρυθμό μετάδοσης bit

Οι οπτικές πηγές και οι ανιχνευτές παρουσιάζουν μία χρονική καθυστέρηση στις απότομες αλλαγές των τιμών του σήματος. Οι χρόνοι ανόδου και καθόδου καθορίζουν τη χρονική απόκριση του συστήματος και συνεπώς το εύρος ζώνης (ταχύτητα λειτουργίας). Αντίστοιχα στην οπτική ίνα το εύρος ζώνης περιορίζεται λόγω διασποράς.

Ο συνολικός χρόνος ανόδου του συστήματος μπορεί να προσδιοριστεί από τους επιμέρους χρόνους ανόδου των τμημάτων του:

$$T_{ΟΛΙΚΟΣ} = 1.1(T_{ΠΟΜΠΟΥ}^2 + T_{ΔΕΚΤΗ}^2 + T_{ΔΙΑΤΡ.ΔΙΑΣΠ}^2 + T_{ΕΝΔΟ.ΔΙΑΣΠ}^2)^{\frac{1}{2}}$$

Όπου

$T_{ΠΟΜΠΟΥ}$  : ο χρόνος ανόδου της πομπού

$T_{ΔΕΚΤΗ}$  : ο χρόνος ανόδου του δέκτη

$T_{ΔΙΑΤΡ/ΔΙΑΣΠ}$  : ο χρόνος ανόδου της οπτικής ίνας λόγω διατροπικής διασποράς διασποράς (intermodal dispersion). Μηδενικός στις μονότροπες ίνες

$T_{ΕΝΔΟΤΡ/ΔΙΑΣΠ}$  : ο χρόνος ανόδου της οπτικής ίνας λόγω ενδοτροπικής διασποράς (intramodal dispersion)

Ο παράγοντας 1,1 στην παραπάνω εξίσωση εισέρχεται για να επιτρέψει μια 10% υποβάθμιση στο υπολογιζόμενο χρόνο ανόδου του συστήματος.

Η εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον υπολογισμό του απαιτούμενου χρόνου ανόδου ενός τμήματος του συστήματος για μία συγκεκριμένη ζεύξη, στην περίπτωση αυτή ο παράγοντας 1,1 δεν χρησιμοποιείται.

Η σχέση χρόνου ανόδου T- εύρους ζώνης  $f_{3dB}$  κατά προσέγγιση υπολογίζεται ως :

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

Η σχέση μεταξύ του εύρους ζώνης  $f_{3dB}$  και του μέγιστου ρυθμού μετάδοσης των bit B εξαρτάται από την ψηφιακή διαμόρφωση που χρησιμοποιείται.

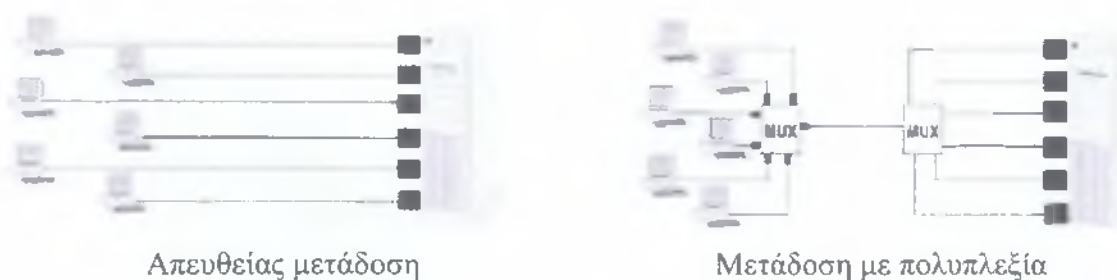
### Πολυπλεξία

Το εύρος ζώνης των οπτικών συστημάτων θεωρητικά υπερβαίνει το 1 THz.

Στην πράξη, ο ρυθμός μετάδοσης bit περιορίζεται στα 10 Gbps λόγω των περιορισμών που επιβάλλονται από τη διασπορά της οπτικής ίνας και την ταχύτητα των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων.

Με την μετάδοση περισσότερων από ένα οπτικών σημάτων μέσω της ίδιας οπτικής ίνας μπορεί να αξιοποιηθεί μεγαλύτερο μέρος του εύρους ζώνης της ζεύξης.

Η πολυπλεξία N σημάτων με ρυθμό bit B έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ζεύξης με συνολικό ρυθμό μετάδοσης N\*B

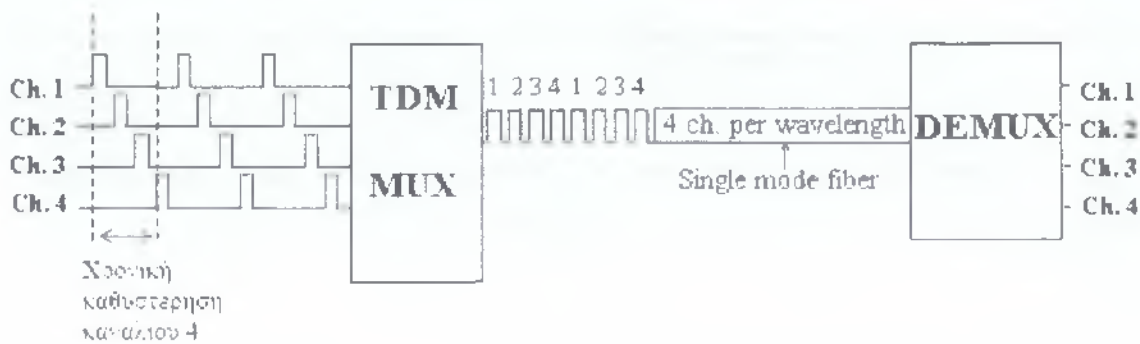


Σχήμα 7.1 Πολυπλεξία

## 7.2 Πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου

### Time division multiplexing- TDM

Το χρονικό διάστημα της περιόδου ενός bit διαιρείται σε μικρότερα υποδιαστήματα οπότε κάθε σήμα μπορεί να χρησιμοποιεί το δικό του υποδιάστημα αφήνοντας το υπόλοιπο χρονικό διάστημα για να παρεμβληθούν τα bit των άλλων σημάτων. Αυτό επιτυγχάνεται με την εισαγωγή ελεγχόμενης χρονικής καθυστέρησης στις ροές των bit διαδοχικών καναλιών.



Σχήμα 7.2 Πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου

## 7.3 Πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος

### Wavelength division multiplexing –WDM

Εκμεταλλεύεται την ικανότητα των οπτικών ινών να μεταφέρουν περισσότερα από ένα οπτικά κύματα, με διαφορετικό μήκος κύματος  $\lambda$  το καθένα, χωρίς να υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Καθένα από τα οπτικά κύματα μεταφέρει και διαφορετικό σήμα.



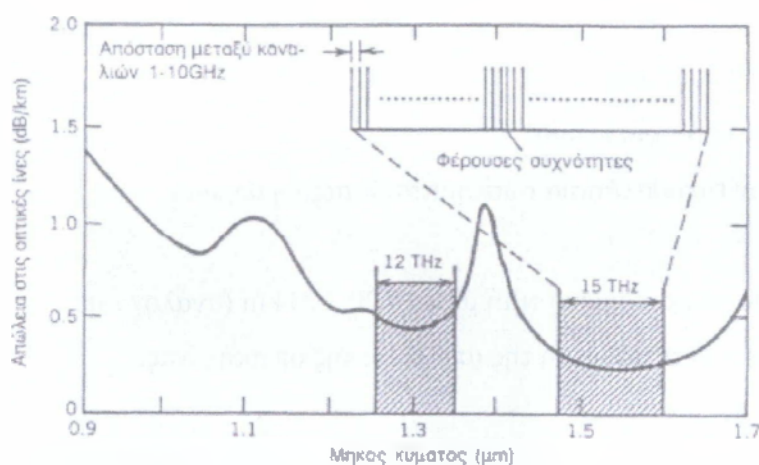
Σχήμα 7.3 Πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος

Πολυπλεξία δύο καναλιών σε διαφορετικά "παράθυρα" μετάδοσης της οπτικής ίνας.

Η χωρητικότητα ενός οπτικού συστήματος που λειτουργεί για παράδειγμα στα 1300 nm μπορεί να αναβαθμιστεί αν το πλέξουμε με ένα κανάλι στα 1550 nm με αποτέλεσμα ένα σύστημα WDM όπου τα κανάλια που υποστηρίζονται απέχουν απόσταση 250 nm.

Πυκνή πολυπλεξία μήκους κύματος Dense Wavelength Division Multiplexing-DWDM

Η απόσταση μεταξύ των καναλιών είναι πολύ μικρή της τάξης των 0,8-1,6 nm. Η πολυπλεξία εφαρμόζεται πλέον σε ένα παράθυρο μετάδοσης της οπτικής ίνας κυρίως στην περιοχή των 1550 nm.



$$\Delta v = \frac{c}{\lambda^2} \Delta \lambda$$

Σχήμα 7.4 Πολυπλεξία δύο καναλιών

Ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης μίας ζεύξης που χρησιμοποιεί την τεχνική WDM εξαρτάται από την ελάχιστη απαιτούμενη απόσταση μεταξύ διαδοχικών καναλιών που καθορίζεται έτσι ώστε να περιοριστούν οι παρεμβολές μεταξύ διαφορετικών σημάτων. Τυπικά η απόσταση μεταξύ των καναλιών πρέπει να υπερβαίνει το τετραπλάσιο του ρυθμού μετάδοσης των bit

## 7.4 Δίκτυα οπτικών ινών

### 1 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Ζεύξη από σημείο σε σημείο (απλή ζεύξη μονόδρομη ή αμφίδρομη)



Μεταφορά πληροφορίας με τη μορφή ψηφιακής αλληλουχίας bit από το ένα σημείο στο άλλο με όσον το δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια.

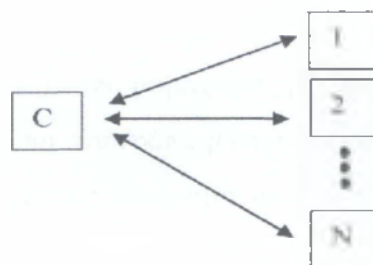
Κριτήρια σχεδιασμού ανάλογα με την εφαρμογή

- Μήκος μερικών χιλιομέτρων (στο ίδιο κτίριο)
- Μήκος χιλιάδων χιλιομέτρων (υποθαλάσσια συστήματα μεταξύ ηπείρων)

Για συστήματα μήκους πάνω από μία συγκεκριμένη τιμή μεταξύ 20-100 km (ανάλογα με το μήκος κύματος) είναι απαραίτητη η αντιστάθμιση της απώλειας της οπτικής ίνας:

- Αναμεταδότες
- Οπτικοί ενισχυτές

### 2. Δίκτυα μετάδοσης και διανομής



Σχήμα 7.5 Μετάδοση της πληροφορίας και κατανομή σε ομάδα συνδρομητών

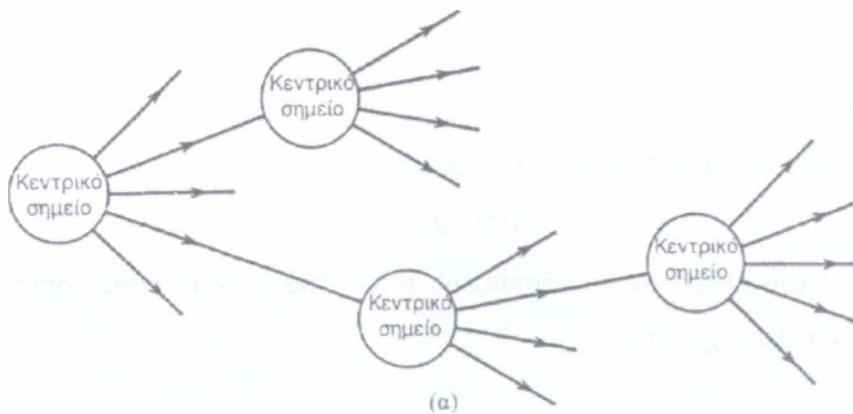
- Μετάδοση πολλών καναλιών (πάνω από 100) στην καλωδιακή τηλεόραση (CATV-Cable TV)
- Δίκτυο ολοκληρωμένων ψηφιακών υπηρεσιών integrated Services Digital Networks-ISDN

Κατανέμει μεγάλο πλήθος υπηρεσιών : τηλέφωνο, fax, δεδομένα υπολογιστών, εκπομπή εικόνας. Οι αποστάσεις μετάδοσης είναι σχετικά μικρές ( $L < 50\text{km}$ ) αλλά ο ρυθμός μετάδοσης μπορεί να είναι μέχρι και 10 Gbps

#### Τοπολογίες δικτύων μετάδοσης και κατανομής

α) Τοπολογία κέντρου :Κατανομή καναλιών σε κεντρικές περιοχές

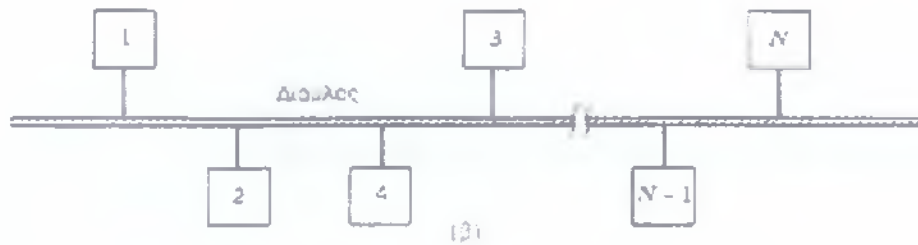
Σχήμα 7.6 Τοπολογία κέντρου



Χρησιμοποιείται από τα τηλεφωνικά δίκτυα για κατανομή των ακουστικών καναλιών στο εσωτερικό μιας πόλης.

- Ο ρόλος της ίνας είναι παρόμοιος με εκείνο των ζεύξεων σημείο προς σημείο.
- Πολύ σημαντική η αξιοπιστία της ίνας στη μετάδοση σήματος αφού ένα τμήμα της επηρεάζει τη λειτουργία μεγάλου μέρους του δικτύου
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιπλέον ζεύξης σημείο προς σημείο για τη σύνδεση σημαντικών κεντρικών σημείων

β) Τοπολογία διαύλου: Μια οπτική ίνα μεταφέρει το οπτικό σήμα σε όλη την περιοχή που καλύπτει η υπηρεσία. Η κατανομή γίνεται χρησιμοποιώντας οπτικές διακλαδώσεις οι οποίες εκτρέπουν ένα μικρό κλάσμα της οπτικής ισχύς στον κάθε συνδρομητή

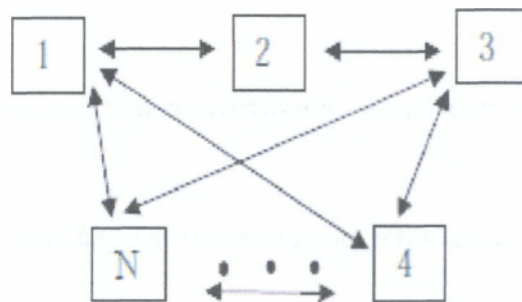


Σχήμα 7.7 Τοπολογία διαύλου

Η απώλεια σήματος αυξάνεται εκθετικά με τον αριθμό των διακλαδώσεων και περιορίζει τον αριθμό των συνδρομητών που εξυπηρετούνται από ένα μόνο δίαυλο. (Αυτό αντισταθμίζεται από την χρήση οπτικών ενισχυτών)

### 3. Δίκτυα

Μεγάλος αριθμός συνδρομητών συνδέονται με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε χρήστης να έχει πρόσβαση σε όλους τους χρήστες.



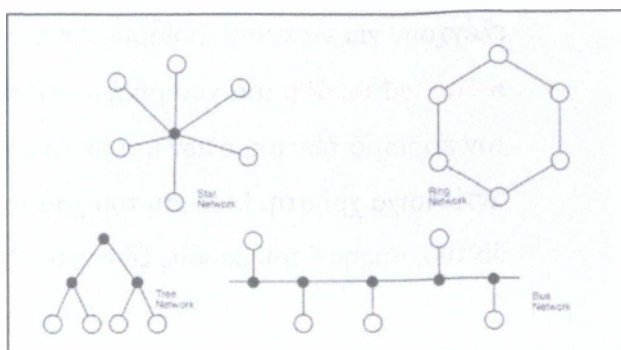
- Τοπικά δίκτυα, Local Area Network- LAN  
Καλύπτουν αποστάσεις μέχρι μερικά χιλιόμετρα πχ Ethernet, FDDI
- Μητροπολιτικά δίκτυα, Metropolitan Area Network- MAN  
Μέχρι 100 περίπου χιλιόμετρα πχ τηλεφωνικά τοπικά κέντρα
- Δίκτυα ευρείας περιοχής, Wide Area Networks- WAN



Μέχρι χιλιάδες χιλιόμετρα, πχ Telent

Τοπολογίες:

- Διαύλου
- Δακτυλίου
- Αστέρος
- Δέντρου
- Συνδυασμός των παραπάνω



Σχήμα 7.8 Τοπολογίες

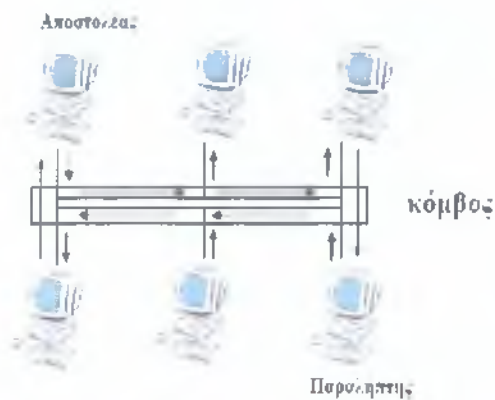
Μέθοδος Πρόσβασης (Access method)

Τα δίκτυα διαχωρίζονται με τον τρόπο που ένας χρήστης αποκτά την ικανότητα να στείλει σήμα

- CSMA/CD (Carrier sense multiple access with collision detection-  
Πολλαπλή πρόσβαση με ακρόαση φέροντος και ανίχνευση συγκρούσεων)  
Όλοι οι χρήστες έχουν δικαίωμα πρόσβασης διαρκώς. Κάθε χρήστης πριν να στείλει σήμα ελέγχει αν κάποιος άλλος χρήστης χρησιμοποιεί το δίκτυο (carrier sense) και περιμένει μέχρι το δίκτυο να είναι διαθέσιμο. Αν δύο χρήστες στείλουν σήμα συγχρόνως υπάρχει "σύγκρουση" σημάτων την οποία το σύστημα να την ανιχνεύσει (collision detection) και να διακόψει τη λειτουργία του δικτύου προσωρινά.
- Token passing  
Μια ειδική σκυτάλη (token) μεταφέρεται στο δίκτυο και μόνο τη στιγμή που βρίσκεται στην κατοχή ενός χρήστη μπορεί αυτός να εκπέμψει σήμα.

## Κατανομή σήματος

- **Shared-media:** τα σήματα πηγαίνουν σε όλους τους χρήστες που τα ελέγχουν για να προσδιορίσουν τον τελικό προορισμό τους
- **Switched media:** μια κεντρική μονάδα ελέγχου (hub-switch) αποφασίζει για τον πορισμό των σημάτων και με τη χρήση διακόπτη το προωθεί στον αντίστοιχο χρήστη. Μείωση του χρόνου που το σήμα κυκλοφορεί στο δίκτυο, αύξηση του εύρους ζώνης διαθέσιμο στον κάθε χρήστη



**Shared media**

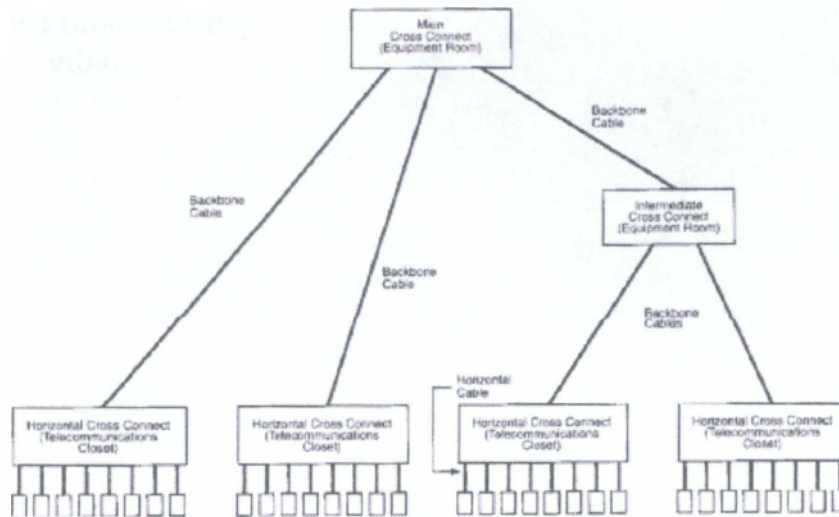
Σχήμα 7.9 Shared media



**Switch media**

Σχήμα 7.10 Switch media

## Καλωδίωση

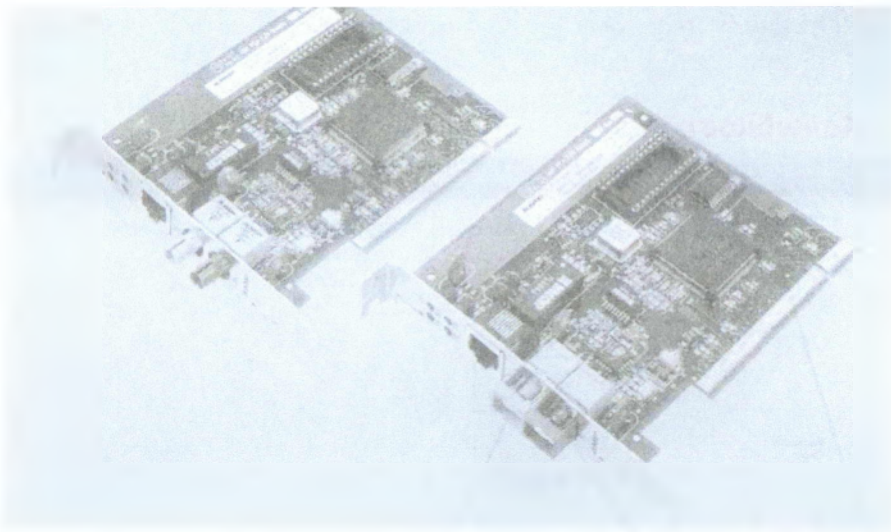


Backbone cable ⇒ Οπτική ίνα  
Horizontal cable ⇒ Καλώδιο χαλκού

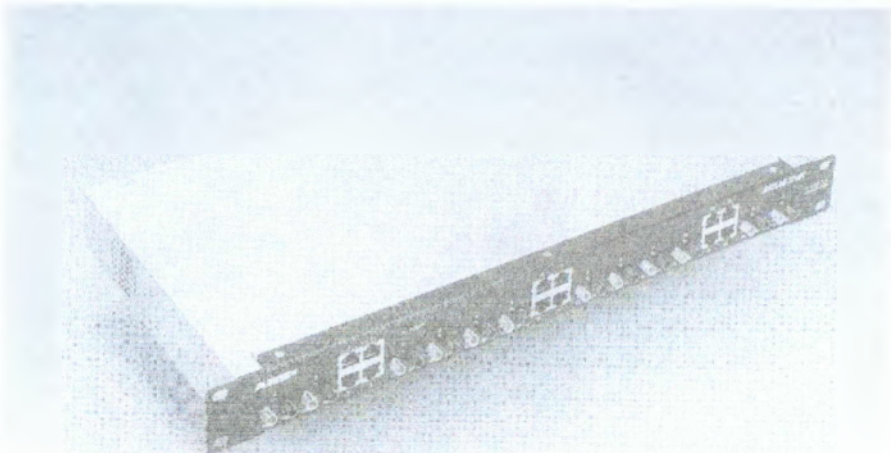
Fiber to the desk

Περιοριστικοί παράγοντες στη αποκλειστική χρήση οπτικών ινών

- Κόστος
- Ήδη εγκατεστημένα δομικά στοιχεία
- Εκπαιδευόμενο προσωπικό



**Κάρτες δικτύου Η / Υ  
για καλώδια οπτικών  
ινών**



**Μετατροπέας  
καλωδίων χαλκού-  
οπτικών ινών**

## Αντιπροσωπευτικά τοπικά δίκτυα

### 7.4.1 ETHERNET

- Μέθοδος πρόσβασης: CSMA/CD
- Ρυθμός μετάδοσης : 10-1000 Mbps
- Υπάρχουν διαφορετικές "γεύσεις- favors" με διαφορετικά χαρακτηριστικά :

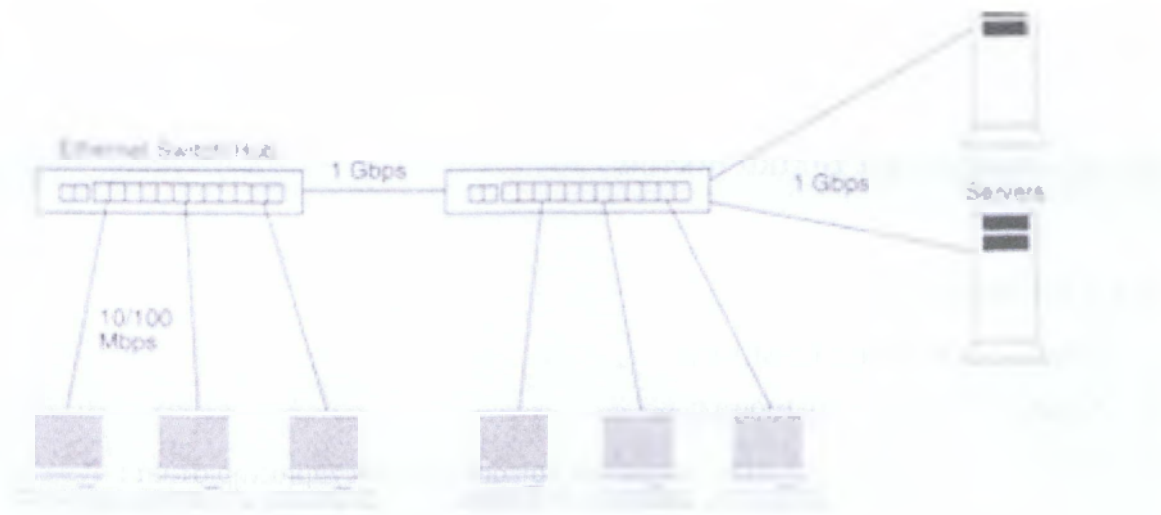
Συμβολισμός: xBASEy

x: Ρυθμός μετάδοσης bit

y: Μέσο μετάδοσης, πηγή

Flavor		Cable Type	Segment Length*	Speed
Ethernet	10BASE-5	Thick Coax	500 m	10 Mbps
	10BASE-2	Thin Coax	185 m	
	10BASE-T	Cat. 3 UTP	100 m	
	10BASE-FP	Fiber	1000 m	
	10BASE-FB	Fiber	2000 m	
	10BASE-FL	Fiber	2000 m	
Fast Ethernet	100BASE-TX	Cat. 5 UTP	100 m	100 Mbps
	100BASE-T4	Cat. 3 UTP	100 m	
	100BASE-FX	Fiber	2000 m	
Gigabit Ethernet	1000BASE-T	Cat. 5 UTP	100 m	1 Gbps
	1000BASE-CX	Shielded Copper	25 m	
	1000BASE-SX (850 nm)	Fiber (62.5)	260 m	
		Fiber (50)	525 m	
	1000BASE-LX (1300 nm)	Fiber (62.5)	550 m	
Fiber (50)		550 m		
	Fiber (SM)	3000 m		

Πίνακας 7.1 Τοπικά δίκτυα

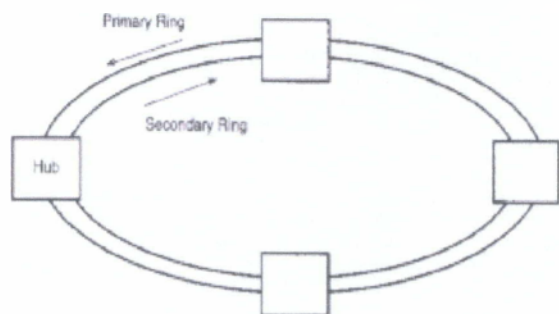


### Συνδυασμός ταχυτήτων ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου

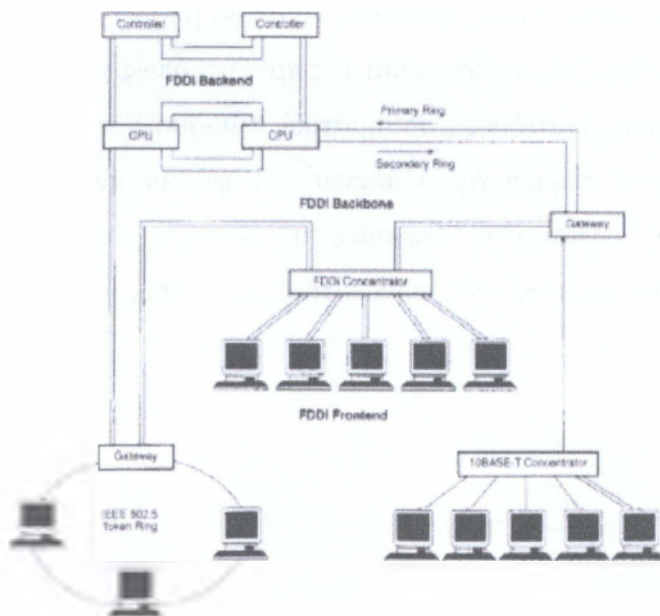
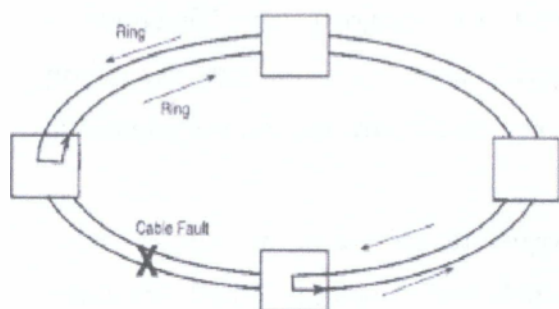
#### Δίκτυο με ίνες των κατανεμημένων δεδομένων

#### 7.4.2 Fiber Distributed Data Interface- FDDI

- Μέθοδος πρόσβασης: Token passing
- Δίκτυο σχεδιασμένο ειδικά για οπτικές ίνες που μπορεί να περιλαμβάνει και προϋπάρχοντα δίκτυα άλλου είδους
- Το πρώτο δίκτυο στα 100Mbps (Την ίδια χρονική περίοδο το Ethernet λειτουργούσε στα 10 Mbps)
- Λειτουργεί στα 1300 nm με πολύτροπες ίνες και οπτικές πηγές LED
- Μπορεί να περιλαμβάνει περισσότερους από 1000 σταθμούς σε απόσταση 100 km
- Χρήση πρωτεύοντα και δευτερεύοντα δακτυλίου για αντιμετώπιση προβλημάτων



Σχήμα 7.11 Λειτουργία  
Πρωτεύοντα/Δευτερεύοντα  
δακτυλίου



Σχήμα 7.12 Παράδειγμα  
Δικτύου  
FDDI

# ΠΡΑΚΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

### 8.1 Λίγα λόγια για το Matlab

Το MATLAB είναι ένα λογισμικό πακέτο για υψηλής απόδοσης αριθμητικούς υπολογισμούς (numerical computations). Παρέχει στο χρήστη ένα διαδραστικό περιβάλλον με χιλιάδες ενσωματωμένες συναρτήσεις, κατάλληλες για την υλοποίηση απαιτητικών υπολογιστικών αναλύσεων, γραφημάτων καθώς επίσης και για την παραγωγή διαφόρων *animations*.

Επιπλέον, το MATLAB προσφέρει τη δυνατότητα επέκτασης σε ποικίλα πεδία εφαρμογών με τη αξιοποίηση την υψηλού επιπέδου γλώσσας προγραμματισμού, την οποία διαθέτει σε όλες τις εκδόσεις του. Για λόγους πληρότητας, να αναφερθεί ότι το όνομα MATLAB προέρχεται από τις λέξεις MATrix και LABoratory.

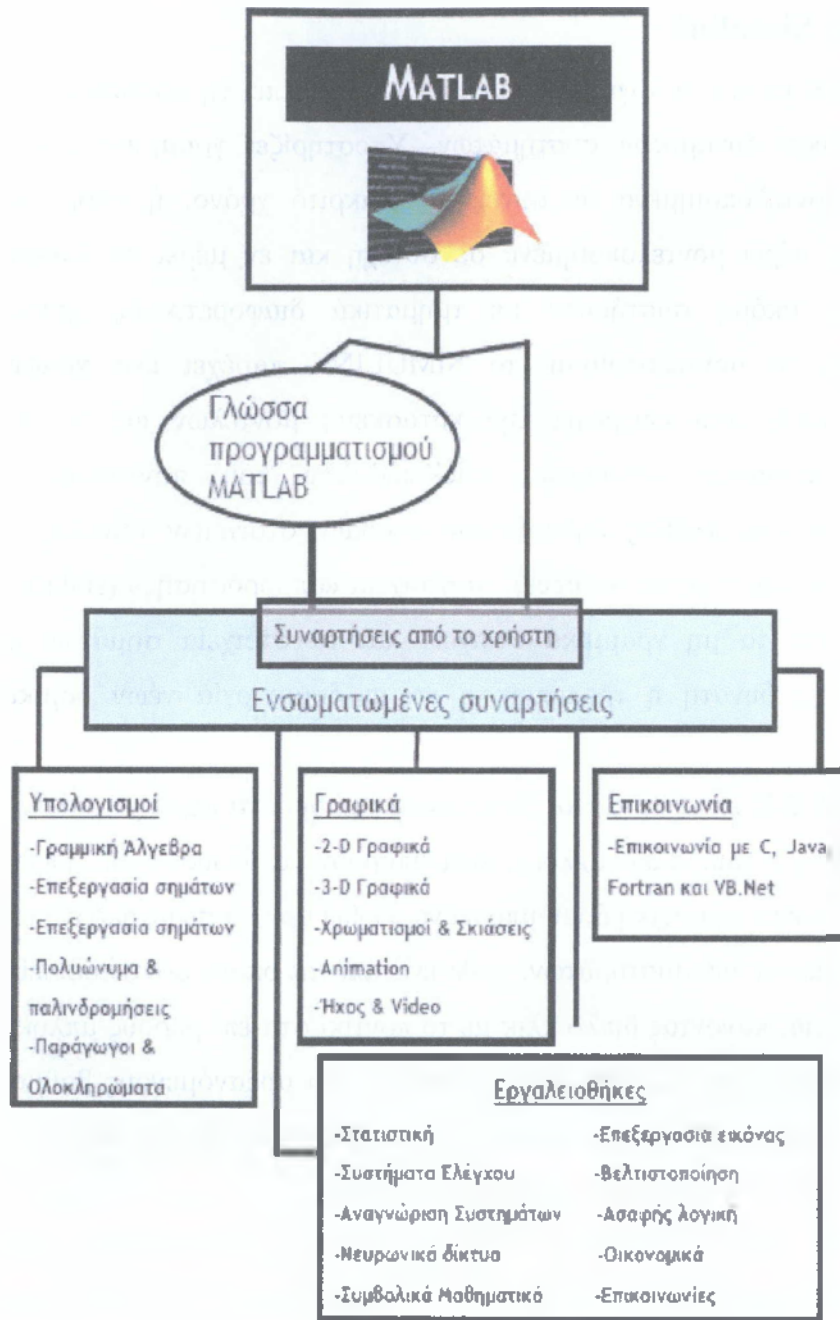
Το MATLAB αποτελεί ένα εξελιγμένο υπολογιστικό εργαλείο, το οποίο μπορεί να βρει εφαρμογή σε διάφορους τομείς της επιστήμης αλλά βέβαια και της πράξης, όπως για παράδειγμα τη μηχανική, την ιατρική, τις θετικές επιστήμες (Μαθηματικά - Φυσική), την οικονομία καθώς και γενικά τη βιομηχανική παραγωγή. Μάλιστα, το φάσμα των εφαρμογών του συγκεκριμένου πακέτου λογισμικού διευρύνεται συνεχώς και περισσότερο, αναδεικνύοντας με αυτό τον τρόπο τις πολλαπλές δυνατότητες του, όπως:



- ✓ Υψηλή απόδοση και ταχύτητα υπολογιστικών αναλύσεων
  
- ✓ Δυνατότητα προσομοίωσης φυσικών συστημάτων
  
- ✓ Δυνατότητα υλοποίησης αλγορίθμων
  
- ✓ Δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας με πληθώρα άλλων προγραμμάτων και εφαρμογών
  
- ✓ Υψηλής ποιότητας γραφικές απεικονίσεις και animations . Δυνατότητα σύνδεσης με διάφορες συσκευές καταγραφής.
  
- ✓ Φιλικότητα προς το χρήστη και διαδραστικός χαρακτήρας.

Στο σχήμα 8.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα κύρια χαρακτηριστικά και δυνατότητες του MATLAB. Οι ενσωματωμένες συναρτήσεις του λογισμικού παρέχουν τα απαραίτητα πακέτα εργαλείων για υπολογισμούς γραμμικής άλγεβρας, ανάλυσης δεδομένων, επεξεργασία σημάτων, αριθμητικές λύσεις κανονικών διαφορικών εξισώσεων. Οι περισσότερες από τις προαναφερόμενες συναρτήσεις εφαρμόζουν την πλέον πρόσφατη και εξελιγμένη γνώση στο κάθε τομέα επιστήμης. Επίσης, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αναπτύξει τις δικές του συναρτήσεις, κάνοντας χρήση της δικής του γλώσσας προγραμματισμού. Από τη στιγμή που θα αναπτυχθούν οι συναρτήσεις αυτές, λειτουργούν ως ενσωματωμένες συναρτήσεις του εν λόγω λογισμικού.

Τέλος παρέχονται από το MATLAB πολλές προαιρετικές εργαλειοθήκες, οι οποίες προορίζονται για την ανάπτυξη ειδικών εφαρμογών, όπως συμβολικοί υπολογισμοί (*symbolic computation*), επεξεργασία εικόνων (*image processing*), στατιστική (*statistics*), σχεδιασμός ελέγχου συστημάτων (*control system design*), νευρωνικά δίκτυα (*neural networks*), ασαφή λογική (*fuzzy logic*). Η λίστα με τις διαθέσιμες εργαλειοθήκες συνεχώς διευρύνεται (στην τελευταία έκδοση του λογισμικού ο αριθμός των εργαλειοθηκών έχει ξεπεράσει τις 50).



Σχήμα 8.1 Δυνατότητες του MATLAB

## 8.2 Λίγα λόγια για το Simulink

Το SIMULINK είναι ένα λογισμικό πακέτο που επιτρέπει τη μοντελοποίηση, προσομοίωση και ανάλυση δυναμικών συστημάτων. Υποστηρίζει γραμμικά και μη γραμμικά συστήματα, μοντελοποιημένα σε συνεχή ή διακριτό χρόνο, ή ακόμη και υβριδικά συστήματα (εν μέρει μοντελοποιημένα σε συνεχή και εν μέρει σε διακριτό χρόνο). Υποστηρίζονται ακόμη συστήματα με τμηματικά διαφορετικούς χρόνους δειγματοληψίας. Για τη μοντελοποίηση, το SIMULINK παρέχει ένα γραφικό περιβάλλον διεπαφής (GUI) που επιτρέπει την κατασκευή μοντέλων ως δομικών διαγραμμάτων, χρησιμοποιώντας λειτουργίες click-and-drag του ποντικιού. Το SIMULINK περιλαμβάνει ένα πλήθος βιβλιοθηκών δομικών στοιχείων (blocks), τα βασικότερα από τα οποία είναι οι πηγές (sources), τα στοιχεία «απορρόφησης» (sinks), τα συνεχή γραμμικά στοιχεία, τα μη γραμμικά στοιχεία και τα στοιχεία σημάτων και συστημάτων. Είναι επίσης δυνατή η τροποποίηση και η δημιουργία νέων δομικών στοιχείων από το χρήστη.

Τα μοντέλα SIMULINK είναι *ιεραρχικά* (ένα μοντέλο μπορεί να περιέχει μπλοκ τα οποία περιέχουν με τη σειρά τους άλλα μπλοκ), έτσι μπορούν να ιδωθούν σε διάφορα επίπεδα. Ένα σύστημα που έχει ιεραρχική δομή μπορεί να ιδωθεί αρχικά σε υψηλό επίπεδο ως ένα σύνολο διασυνδεμένων υποσυστημάτων, κάθε ένα από τα οποία μοντελοποιείται ως ένα μπλοκ. Στη συνέχεια, κάνοντας διπλό κλικ με το ποντίκι στα επί μέρους μπλοκ, ο χρήστης μπορεί να κατέβει σε χαμηλότερα επίπεδα ώστε να δει αυξανόμενους βαθμούς λεπτομέρειας. Μετά τη δημιουργία ενός μοντέλου, είναι δυνατή η προσομοίωση του, χρησιμοποιώντας μια από τις διάφορες μεθόδους ολοκλήρωσης που παρέχει το SIMULINK. Χρησιμοποιώντας παλμογράφους (scopes) και άλλα μπλοκ απεικόνισης, είναι δυνατή η παρακολούθηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης καθώς αυτή εξελίσσεται. Επιπλέον, είναι δυνατή η εξαγωγή αποτελεσμάτων της προσομοίωσης στο χώρο εργασίας της MATLAB για περαιτέρω επεξεργασία. Είναι ακόμη δυνατή η χρήση του SIMULINK για προσομοίωση αλλά και έλεγχο συστημάτων σε πραγματικό χρόνο, μέσω της εργαλειοθήκης πραγματικού χρόνου (Real Time Workshop).

Στη συνέχεια θα δοθούν κάποιες βασικές οδηγίες χρήσης με έμφαση στην προσομοίωση έτοιμων μοντέλων SIMULINK και θα γίνει μια συνοπτική περιγραφή των βιβλιοθηκών και ορισμένων δομικών στοιχείων.

Περαιτέρω πληροφορίες για τα δομικά στοιχεία και τις βιβλιοθήκες του SIMULINK είναι διαθέσιμες μέσω της βοήθειας της MATLAB.

### 8.3 Link budget

#### Ισολογισμός οπτικής ισχύος σε μια τηλεπικοινωνιακή ζεύξη με οπτικές ίνες

Γενικά, ένας ισολογισμός ζεύξης είναι ο απολογισμός όλων των κερδών και απωλειών από τη συσκευή αποστολής σήματος, μέσω του μέσου (ελεύθερο διάστημα, καλώδιο, κυματοηγός, ίνα, κ.λπ...) στο δέκτη σε ένα σύστημα τηλεπικοινωνιών. Εξηγεί τη μείωση του διαβιβασθέντος σήματος λόγω της διάδοσης και των διάφορων απωλειών, λαμβάνοντας υπόψη και την ενίσχυση που τυχόν υφίσταται το σήμα διερχόμενο μέσω ενεργών διατάξεων (π.χ. ενισχυτών).

Μία εξίσωση ισολογισμού ζεύξης μπορεί να έχει ως εξής:

$$\begin{aligned} \text{Received Power (dBm)} \\ = \text{Transmitted Power (dBm)} + \text{Gain (dB)} - \text{Losses (dB)} \end{aligned}$$

Ο σημαντικότερος στόχος στο σχεδιασμό μιας ζεύξης οπτικών ινών είναι να καθοριστεί η ισορροπία της οπτικής ισχύος στη σύνδεση. Αυτό θα βοηθήσει να βρούμε τις βέλτιστες παραμέτρους των συσκευών διαβίβασης και λήψης για να εξασφαλίσουμε κατάλληλη μετάδοση του σήματος.

Για να πετύχουμε την ισορροπία της ισχύος είναι απαραίτητο να συζητηθεί η έννοια decibel (dB) και decibel που αναφέρεται σε ένα milliwatt (dBm) - οι μονάδες που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της απώλειας των οπτικών καλωδίων και της ευαισθησίας των φωτοανιχνευτών.

Το Decibel είναι μια λογαριθμική μονάδα που χρησιμοποιείται στη σύγκριση δύο επιπέδων της ίδιας φυσικής παραμέτρου, όπου ένα από αυτά τα είναι το επίπεδο αναφοράς. Για τις οπτικές ίνες η αναλογία της οπτικής ισχύος στην είσοδο της ίνας ως προς την ισχύ στην έξοδό της δίνεται σε decibels. Το Decibel που αναφέρεται σε ένα milliwatt (dBm) είναι η αναγωγή της ισχύος εισόδου στην ισχύ αναφοράς του 1 mW.

Οι ορισμοί των επιπέδων σημάτων που δίνονται σε DB και dBm:

$$P[\text{dB}] = 10 \log_{10} \frac{P_s}{P_r}$$

$$P[\text{dBm}] = 10 \log_{10} \frac{P_s}{1\text{mW}}$$

όπου:

$P_1$  - ισχύς εισόδου

$P_2$  - ισχύς εξόδου

Γενικά, ο επαρκής ισολογισμός μιας ζεύξης απαιτεί:

$$P_{t,x1} - P_{r,x1} < P_1 - P_f + P_m$$

$$P_{t,x2} - P_{r,x2} < P_1 - P_f + P_m$$

όπου:

$P_{t,x1}$   $P_{t,x2}$  η οπτική ισχύς στην πηγή της οπτικής ζεύξης, που δίνεται σε dBm.

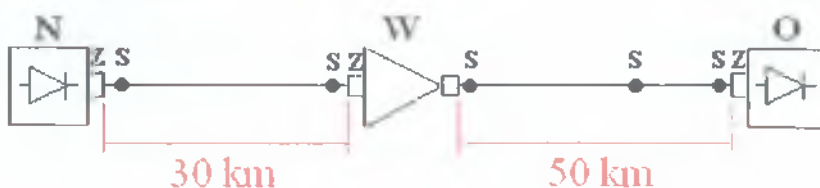
$P_{r,x1}$   $P_{r,x2}$  η ευαισθησία του φωτοανιχνευτή στον δέκτη της οπτικής ζεύξης, που δίνεται σε dBm.

PL - συνολική απώλεια των παθητικών στοιχείων της οπτικής ζεύξης δηλ. της ίνας και των οπτικών συνδετήρων/ συναρμογών, που δίνεται σε dB

PG - συνολικό κέρδος των οπτικών ενισχυτών κατά μήκος της ζεύξης, που δίνεται σε dB

P.m. - το περιθώριο ασφάλειας που λαμβάνει υπόψη τη γήρανση των στοιχείων, την επίδραση της θερμοκρασίας στις ηλεκτρονικές και οπτικές διατάξεις, την πρόσθετη απώλεια ισχύος στις οπτικές ίνες λόγω της κάμψης, κ.λπ., που δίνεται σε dB. Το συνηθισμένο περιθώριο ασφάλειας είναι μεταξύ 3 και 6 dB.

Ο σχεδιαστής, που ξέρει τις παραμέτρους της σύνδεσης και τα οπτικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται, είναι σε θέση να υπολογίσει την απώλεια σήματος για οποιοδήποτε σημείο της πορείας. Αυτό μπορεί να φανεί καλύτερα στο παράδειγμα που παρουσιάζεται παρακάτω:



διάγραμμα μιας οπτικής σύνδεσης, όπου:

N - συσκευή αποστολής οπτικού σήματος

w - ενισχυτής

O - δέκτης

Z - συνδετήρας

S - συναρμογή

Εκτός από τη συσκευή αποστολής οπτικού σήματος (N) και το δέκτη (O), η οπτική ζεύξη περιέχει οπτικό ενισχυτή (W), 4 οπτικούς συνδετήρες (Z) και 5 συναρμογές (S). Ο ακόλουθος πίνακας δίνει για κάθε στοιχείο την απώλεια ή το κέρδος του. Με αυτές τις τιμές κάποιος μπορεί κατάλληλα να επιλέξει την ευαισθησία του δέκτη:

Tx power:	3 dBm
Connector loss:	0.15 dB
Splice loss:	0.15 dB
Amplifier gain:	10 dB
Fiber optic loss:	0.2 dB/km

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: Οι υπολογισμοί εκτελούνται για το παράθυρο «III» της οπτικής μετάδοσης (απώλεια ινών 0,2 dB χλμ).

Η συνολική απώλεια οπτικής ισχύος εξαρτάται από το μήκος της ζεύξης και τον αριθμό και την ποιότητα (απώλεια) των οπτικών συνδετήρων και των συναρμογών. Η συνολική απώλεια της ζεύξης είναι το ποσό:

$$\text{οπτική απώλεια ινών: } (30\text{km} + 50\text{km}) * 0.2 \text{ dB/km} = 16\text{dB}$$

$$\text{απώλεια των συνδετήρων: } 4 * 0.15\text{dB} = 0.60\text{dB}$$

$$\text{απώλεια των συναρμογών: } 5 * 0.15\text{dB} = 0.75\text{dB}$$

$$P_l = 16\text{dB} + 0.60\text{dB} + 0.75\text{dB} = 17.35\text{dB}$$

Το συνολικό κέρδος της ζεύξης είναι σε αυτήν την περίπτωση ίσο με την ενίσχυση (απολαβή) του οπτικού ενισχυτή (W).

$$PG = 10 \text{ dB}$$

Κατά το σχεδιασμό μιας ζεύξης πρέπει να ληφθεί υπόψη η γήρανση του ηλεκτροοπτικού στοιχείου του πομπού (συνήθως 1dB έως 3dB), και η επίδραση της θερμοκρασίας στις ηλεκτρονικές και ηλεκτροοπτικές συσκευές (χαρακτηριστικά +/- 2dB). Ένα καλό περιθώριο ασφάλειας είναι 6 dB.

$$P.m. = 6 \text{ dB}$$

Για να επιλέξουμε την ευαισθησία του δέκτη είναι αρκετό να λυθεί η εξίσωση:

$$P_{rx} - P_{tx} < P_s - P_G + P_m$$

$$P_{rx} > P_{tx} - P_s + P_G - P_m$$

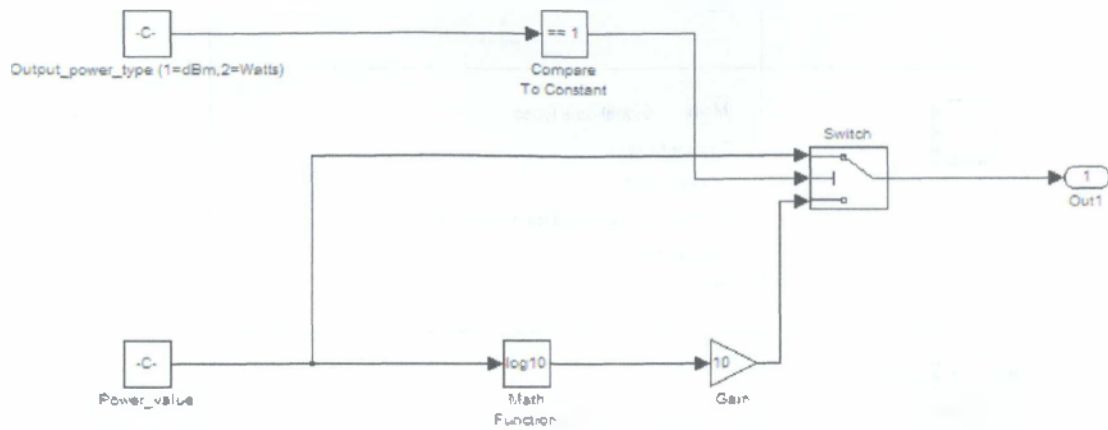
$$P_{rx} > 3\text{dBm} - 17.35\text{dB} + 10\text{dB} - 6\text{dB}$$

$$P_{rx} > -10.35\text{dB}$$







Ο δέκτης πρέπει να παρέχει μια ευαισθησία καλύτερη από -10.35 dB

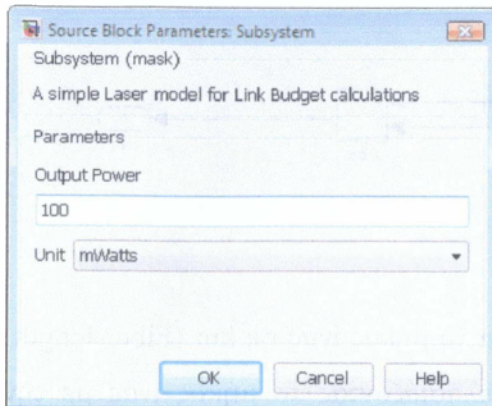


## 1) ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ LASER



Έχουμε την Power\_Value η οποία είναι η σταθερά η οποία μετριέται σε mWatt. Το Main Function και το Gain τα χρησιμοποιούμε για να μετατρέπουμε την ισχύ από mWatt σε dBm. Έπειτα χρησιμοποιούμε ένα switch το οποίο φροντίζει ότι η ισχύς στην έξοδο πρέπει να είναι σε dBm. Αν ο χρήστης έχει δώσει dBm στην είσοδο θα πάρει dBm στην έξοδο. Αν ο χρήστης έχει δώσει mWatt στην είσοδο θα κάνει μετατροπή και θα πάρει στην έξοδο dBm.

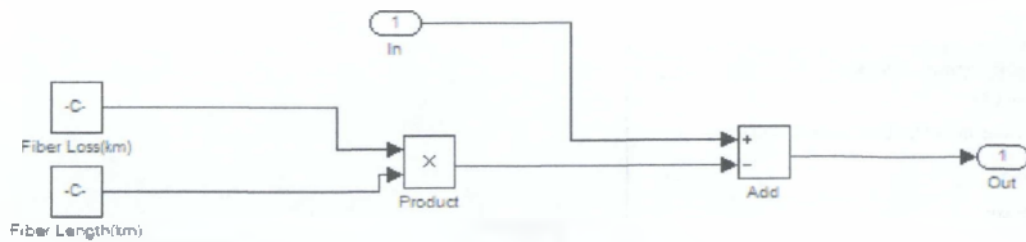
Στοιχείο	Παράμετροι
 <p>output_power_type (1=dBm,2=Watts)</p>	<p>Main   Signal data types</p> <p>Constant value:</p> <p>power_unit</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Interpret vector parameters as 1-D</p> <p>Sample time:</p> <p>inf</p>
 <p>Power_value</p>	<p>Main   Signal data types</p> <p>Constant value:</p> <p>power_value</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Interpret vector parameters as 1-D</p> <p>Sample time:</p> <p>inf</p>
 <p>Compare To Constant</p>	<p>Parameters</p> <p>Operator: ==</p> <p>Constant value:</p> <p>1</p> <p>Output data type mode: boolean</p>
 <p>Math Function</p>	<p>Main   Signal data types</p> <p>Function: log10</p> <p>Output signal type: auto</p> <p>Sample time (-1 for inherited):</p> <p>-1</p>
 <p>Gain</p>	<p>Main   Signal data types   Parameter data types</p> <p>Gain:</p> <p>10</p> <p>Multiplication: Element-wise(K,*u)</p> <p>Sample time (-1 for inherited):</p> <p>-1</p>
 <p>Switch</p>	<p>Main   Signal data types</p> <p>Criteria for passing first input:  u2  &gt;= 0</p> <p>Threshold:</p> <p>0</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Enable zero crossing detection</p> <p>Sample time (-1 for inherited):</p> <p>-1</p>



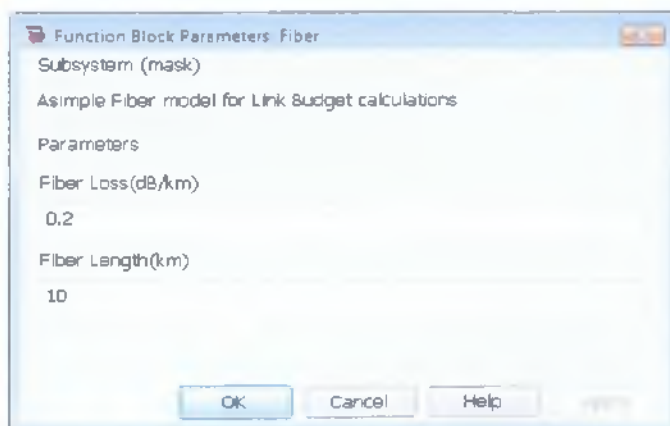
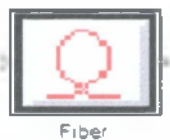
Ρυθμίζοντας το Laser 100mWatt βγάζει 20 dBm.

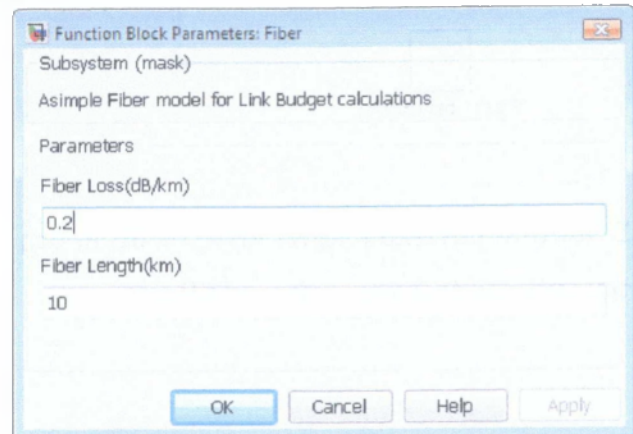
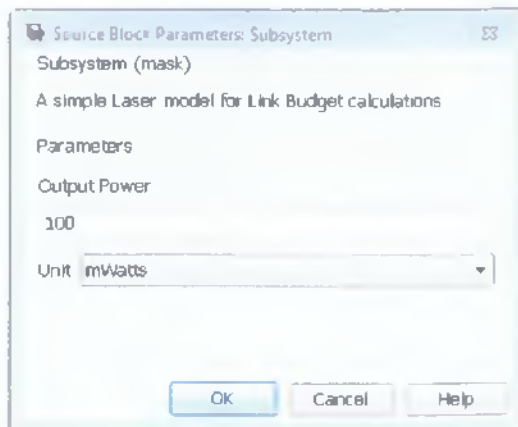
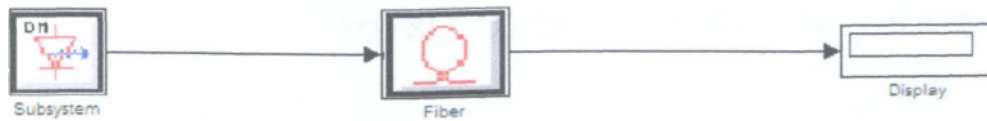


## 2) ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΟΠΤΙΚΗΣ ΙΝΑΣ



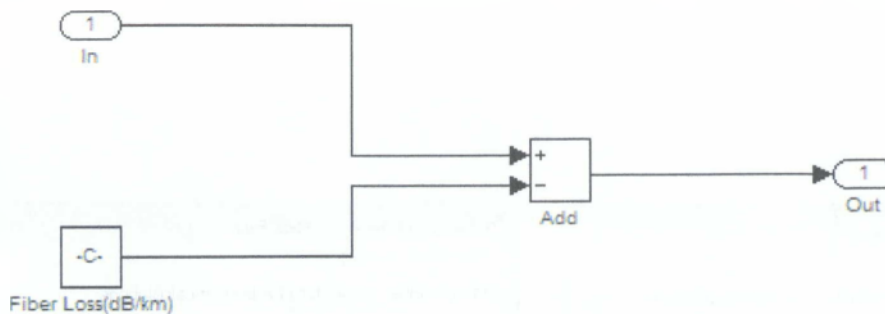
Σ' αυτό το μοντέλο έχουμε δύο σταθερές, η μία είναι το μήκος ίνας σε km (Fiber length) και η άλλη η απώλεια ίνας σε km. Έπειτα πολλαπλασιάζοντας το μήκος ίνας με την απώλεια ίνας βρίσκουμε την συνολική απώλεια από την είσοδο της ίνας μέχρι την έξοδο. Στην είσοδο In, από την ισχύ του σήματος (dBm) αφαιρώ την απώλεια (την παραπάνω) και την ισχύ που παραμένει.



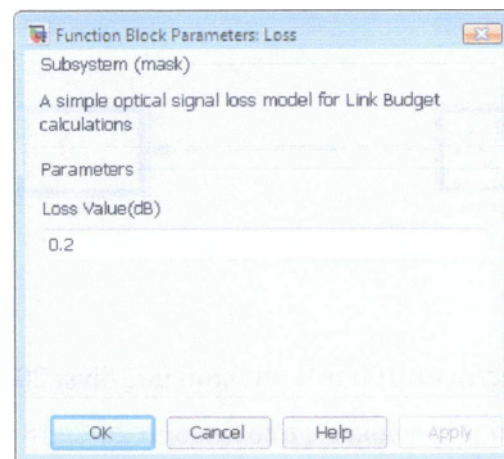
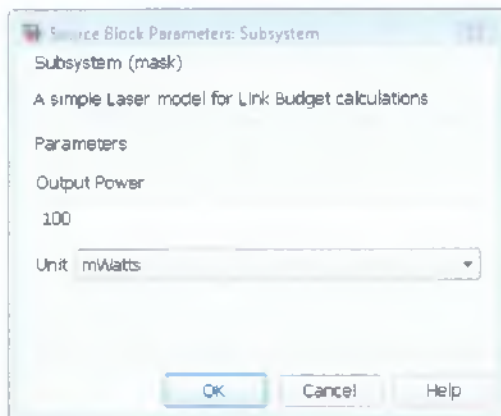


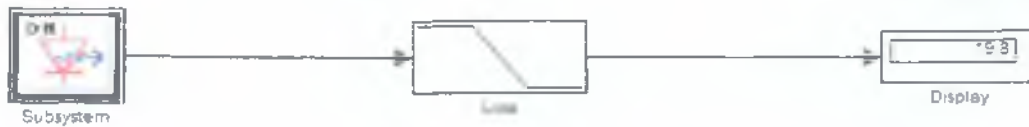
Ρυθμίζοντας το σε 100 mWatt όπου μας δίνει 20dBm και πολλαπλασιάζοντας το  $0,2 \cdot 10 = 2$  και τέλος θα μας δώσει ως αποτέλεσμα  $20 - 2 = 18$  dBm

### 3) ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΙΧΥΟΣ



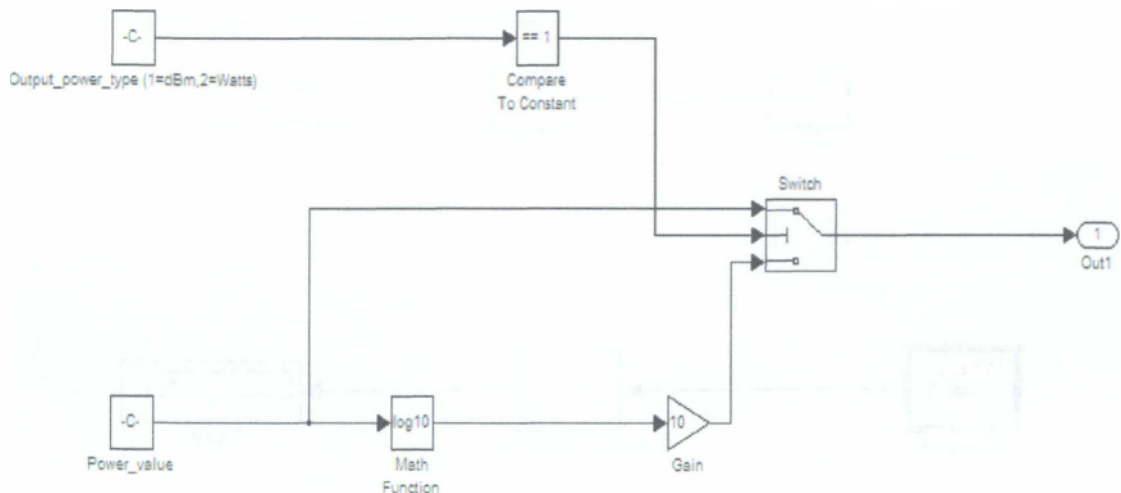
Σ' αυτό το μοντέλο μπαίνει ισχύς σε dBm, στη συνέχεια αφαιρώ την απώλεια και βρίσκω την ισχύ που έχει παραμείνει σε dBm.



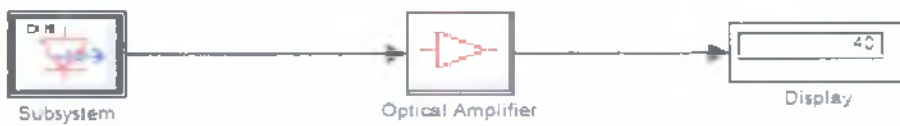
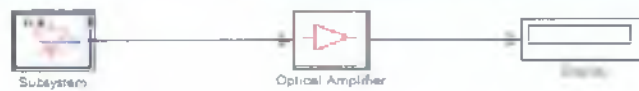
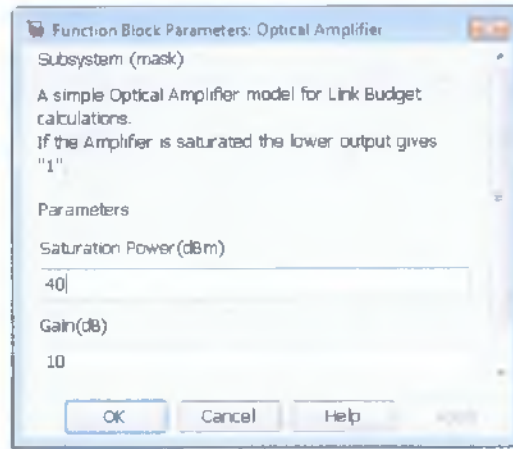
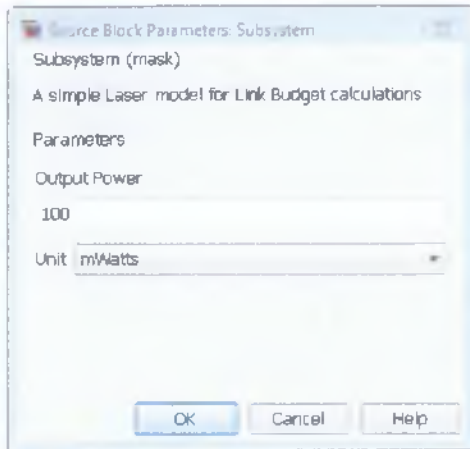
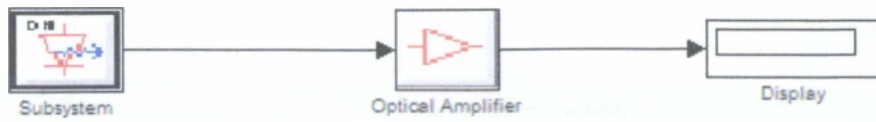


Ρυθμίζοντας το σε 100 mWatt όπου μας δίνει 20 dBm και αφαιρώντας την απώλεια  $20 - 0,2 = 19,8$  βρίσκω την ισχύ που έχει παραμείνει.

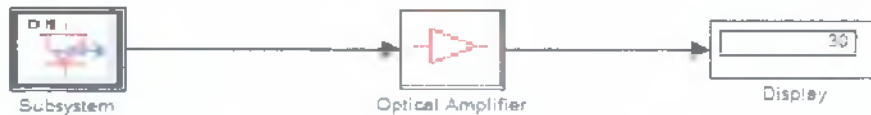
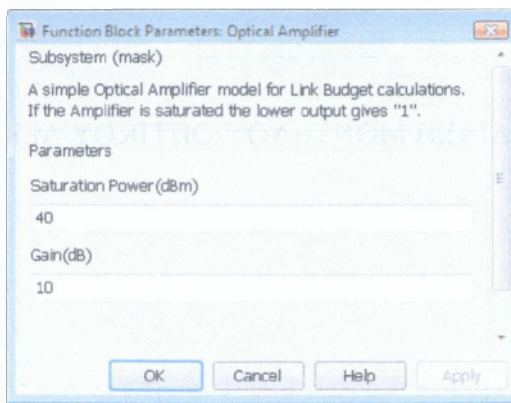
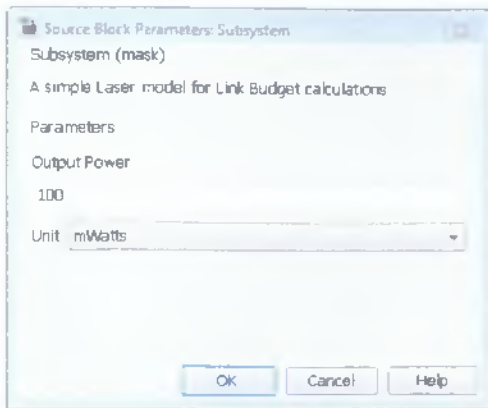
#### 4) ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΟΠΤΙΚΟΥ ΕΝΙΣΧΥΤΗ



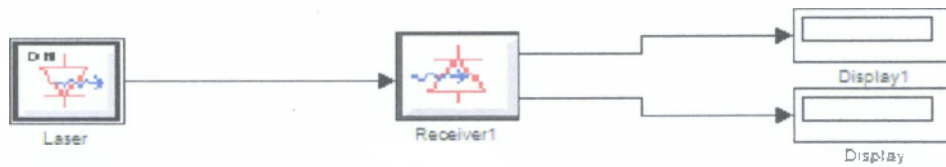
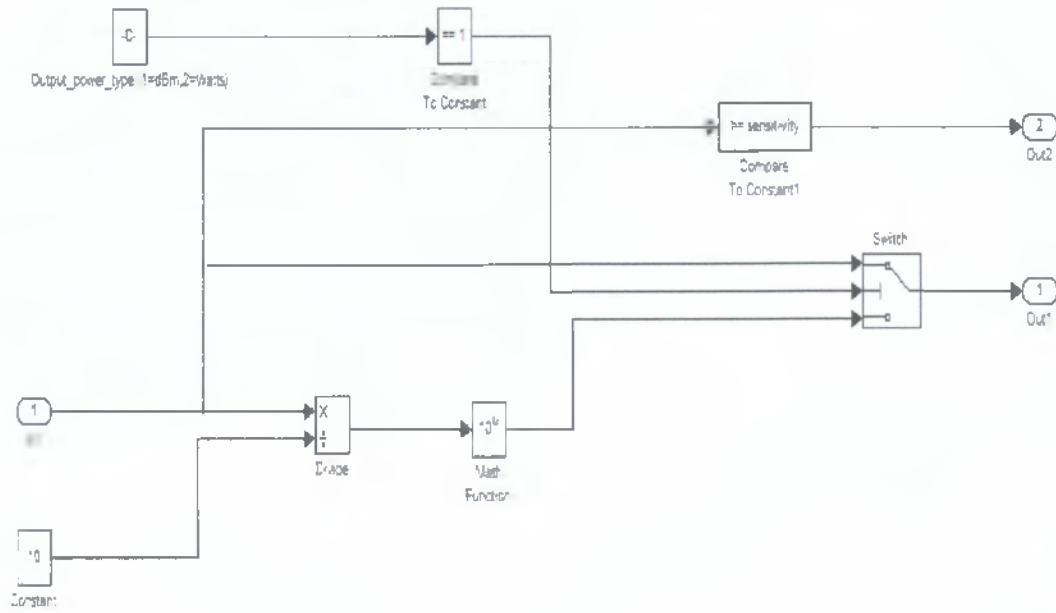
Στην ισχύς που μπαίνει προσθέτω τα dB της απολαβής του ενισχυτή. Άμα η ισχύς που θα βρούμε είναι, μεγαλύτερη από την ισχύ κόρου τότε ο ενισχυτής βγάζει την ισχύ κόρου. Το compare to constant συγκρίνει την ισχύ με την ισχύ κόρου. Αν είναι μικρότερη περνάει την ισχύ όσο την βρήκε άμα είναι μεγαλύτερη περνάει την ισχύ κόρου.







## 5) ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΟΠΤΙΚΟΥ ΔΕΚΤΗ

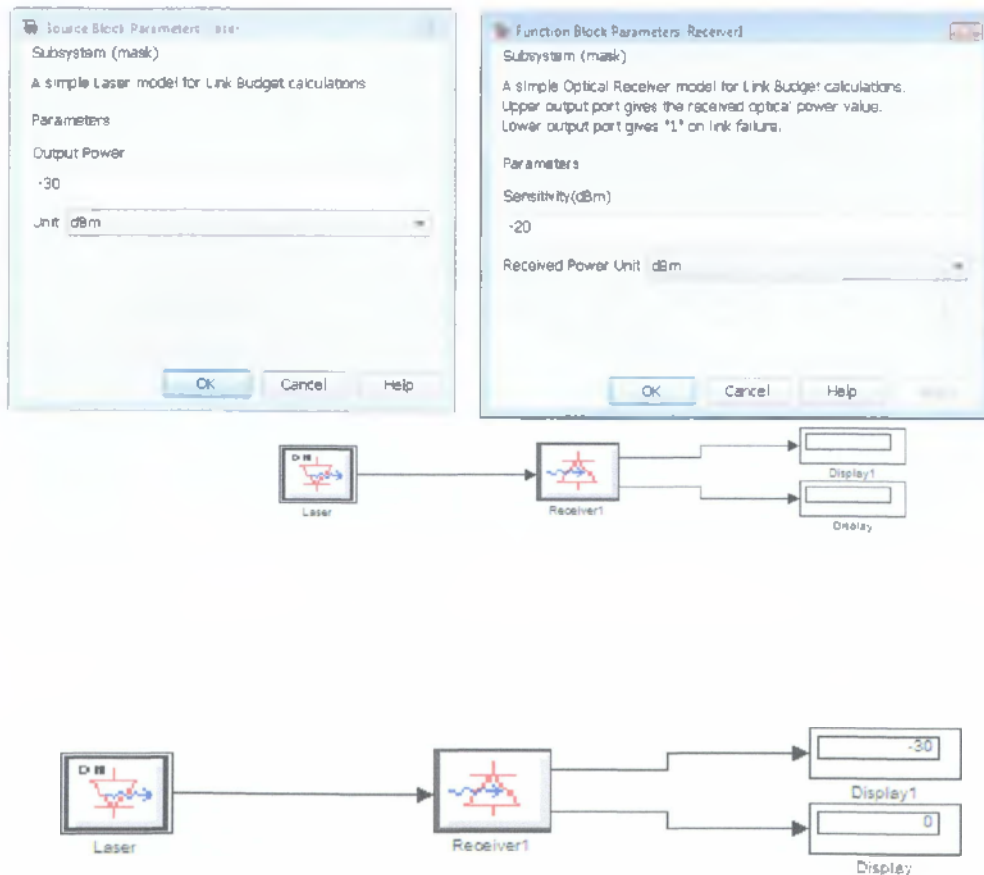


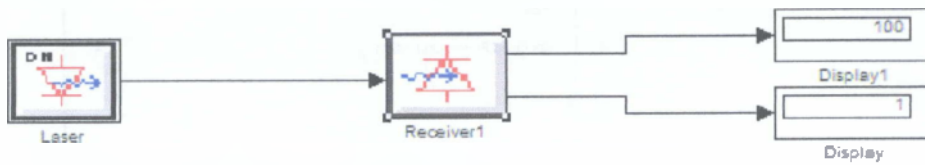
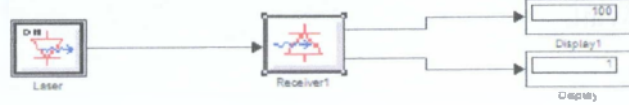
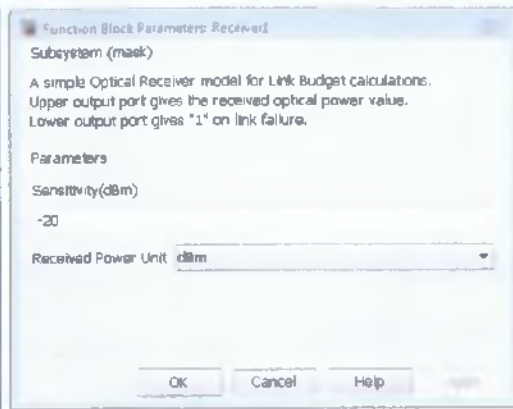
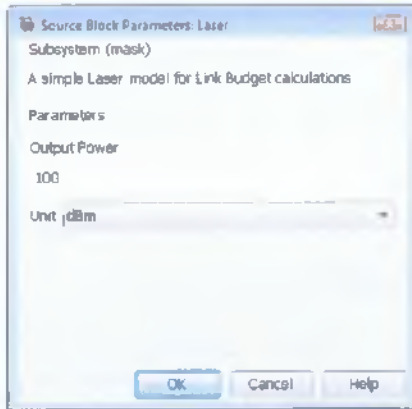
Σ' αυτό το μοντέλο, αν η ισχύς που λάβει στην είσοδο in1 είναι  $\geq$  με την ευαισθησία του δέκτη τότε η έξοδος 2 βγάζει 1 και σημαίνει ότι λειτουργεί η ζεύξη και ότι ο δέκτης λαμβάνει αρκετή ισχύ ώστε να λειτουργήσει κανονικά. Αλλιώς, αν η ισχύς που λάβει στην είσοδο είναι  $<$  από την ευαισθησία του δέκτη τότε η έξοδος 2 βγάζει 2 άρα σημαίνει ότι δεν λειτουργεί σωστά και ότι δεν φτάνει η ισχύς.

Για την έξοδο 1 ανάλογα με το τι έχω ρυθμίσει στην σταθερά out-power είτε μας βγάζει την ισχύ σε dBm απευθείας είτε μετατρέπει τα dBm σε mWatt.

Μετατροπή dBm  $\rightarrow$  mWatt

Παίρνουμε την ισχύ εισόδου την διαιρούμε με το 10 και ότι βρούμε  $10^{\text{ισχύ εισόδου}/10}$  και μας δίνει ισχύ σε mWatt.





## ΑΣΚΗΣΕΙΣ

Α) Μια οπτική ζεύξη κορμού (long-haul) λειτουργεί στα 1.3 μm με παραμέτρους: Μέση ισχύς εκπομπής: -3dBm, εξασθένιση οπτικής ίνας 0.4 dB/km, Απώλειες συγκολλήσεων 0.1 dB/km, απώλειες οπτικών συνδέσμων (connectors) 1 dB/km, ευαισθησία δέκτη -55 dBm στα 35 Mbps με BER = 10<sup>-9</sup>. Να υπολογιστεί το μέγιστο μήκος ζεύξης χωρίς αναγεννητή στον δεδομένο ρυθμό μετάδοσης. Ποιο το αντίστοιχο μήκος αν ο ρυθμός μετάδοσης αυξηθεί στα 400 Mbps;

Δίνεται ότι η σχέση που δίνει την ευαισθησία φωτοφωρατή σε συνάρτηση με το ρυθμό μετάδοσης είναι  $P_R = P_{R0} + 10 \log(R/R_0)$

### Λύση

i) Ο ισολογισμός της ζεύξης είναι:

$$P_R = P_T - a * L - a_{\text{συγκ}} * L - a_{\text{συνδ}} * L \rightarrow (a + a_{\text{συγκ}} + a_{\text{συνδ}}) * L = P_T - P_R \rightarrow$$

$$L = \frac{P_T - P_R}{a + a_{\text{συγκ}} + a_{\text{συνδ}}} \rightarrow$$

$$L = \frac{-3 - (-55)}{0.4 + 0.1 + 1} \approx 34 \text{ km}$$

ii) Για R=400Mbps η ευαισθησία του φωτοφωρατή γίνεται:

$$P_R = P_{R0} + 10 \log \frac{R_0}{R}$$

$$\rightarrow P_R = -55 + 10 \log \frac{35}{350} \approx -45 \text{ dBm}$$

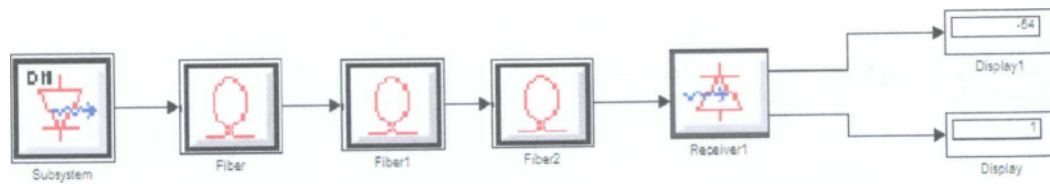
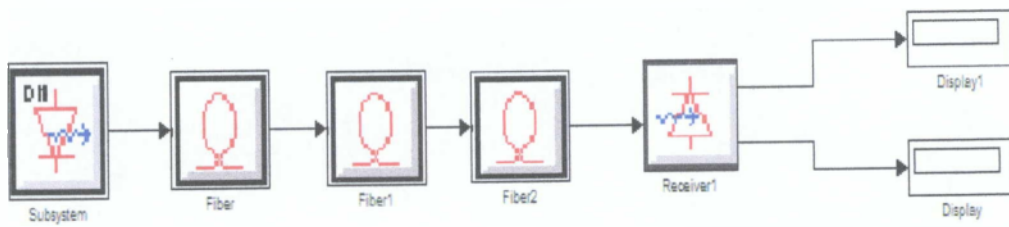
Άρα η σχέση

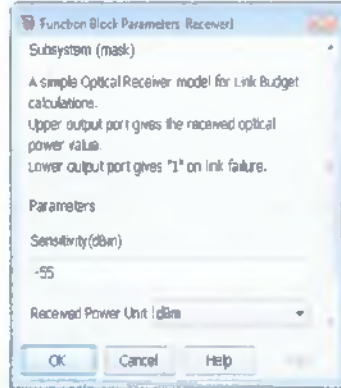
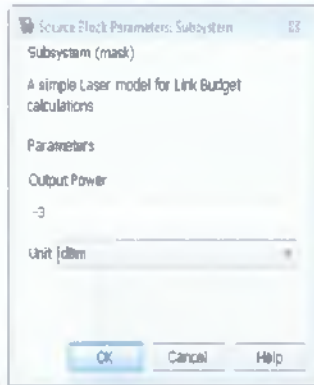
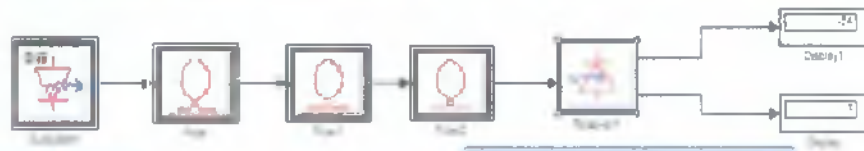
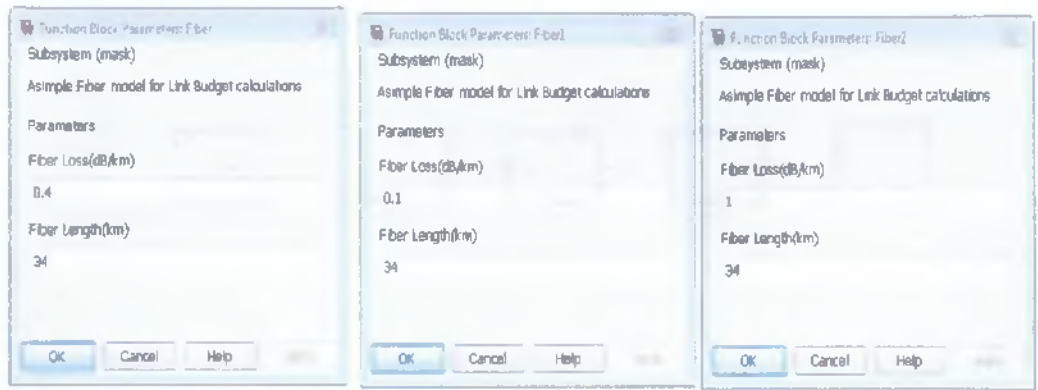
$$L = \frac{P_T - P_R}{\alpha + \alpha_{\text{συγκ}} + \alpha_{\text{αυτδ}}}$$

δίνει:

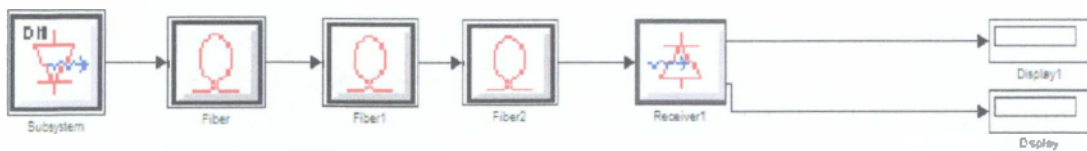
$$L = \frac{-3 - (-45)}{0.4 + 0.1 + 1} \approx 28 \text{ km}$$

i)





ii)





Function Block Parameters: Fiber1

Subsystem (mask)

A simple Fiber model for Link Budget calculations

Parameters

Fiber Loss(dB/km)

0.4

Fiber Length(km)

28

OK Cancel Help Apply

Function Block Parameters: Fiber2

Subsystem (mask)

A simple Fiber model for Link Budget calculations

Parameters

Fiber Loss(dB/km)

0.1

Fiber Length(km)

28

OK Cancel Help Apply

Function Block Parameters: Fiber2

Subsystem (mask)

A simple Fiber model for Link Budget calculations

Parameters

Fiber Loss(dB/km)

1

Fiber Length(km)

28

OK Cancel Help Apply



Function Block Parameters: Subsystem

Subsystem (mask)

A simple Laser model for Link Budget calculations

Parameters

Output Power

-3

Unit: dBm

OK Cancel Help

Function Block Parameters: Receiver

Subsystem (mask)

A simple Optical Receiver model for Link Budget calculations

Upper output port gives the received optical power value.

Lower output port gives "1" on link failure.

Parameters

Sensitivity(dBm)

-42

Received Power Unit: dBm

OK Cancel Help



Β) Στην λειτουργούσα οπτική ζεύξη του παρακάτω σχήματος το ποσοστό σύζευξης πομπού-ίνας είναι 50%. Το ποσοστό σύζευξης ίνας-φωτοδέκτη είναι 79%. Οι απώλειες σύζευξης ΟΑ και ίνας είναι 1dB σε κάθε σύνδεση. Η εξασθένηση της ίνας είναι  $\alpha=0.2\text{dB/Km}$ . Η εσωτερική απολαβή του ενισχυτή είναι  $<40\text{dB}$ . Η ευαισθησία του φωτοδέκτη στο ρυθμό σηματοδοσίας της ζεύξης είναι  $-40\text{dBm}$ . Η ισχύς κόρου του ΟΑ είναι  $100\text{mW}$ , το δε συνολικό μήκος της ίνας είναι  $300\text{Km}$ .

α) Ποια η ελάχιστη μέση οπτική ισχύς που απαιτείται; (σε mW)

β) Να προσδιορίσετε τις θέσεις που πρέπει να τοποθετηθεί ο ΟΑ ώστε να λειτουργεί η ζεύξη.



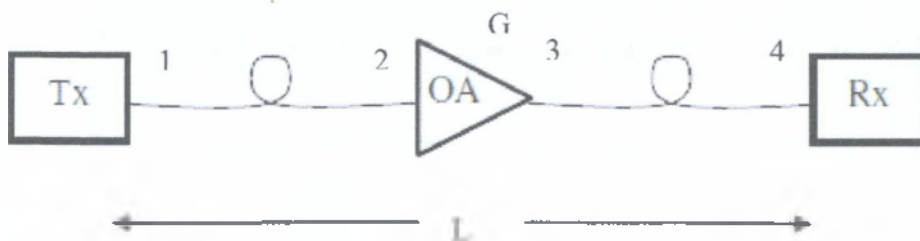
### Λύση

Α) Θα μετατρέψω τα ποσοστά σύζευξης σε dB:

$$50\% \rightarrow 10 \log 0.5 \approx -3\text{dB}$$

$$79\% \rightarrow 10 \log 0.79 \approx -1\text{dB}$$

Ο ισολογισμός ισχύος έχει ως εξής:



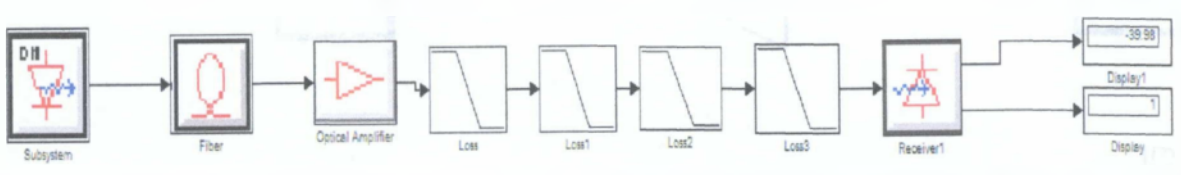
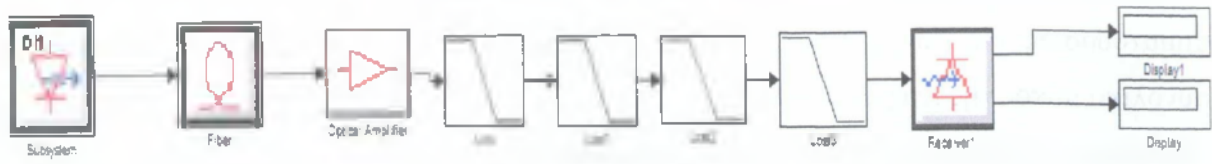
$$P_R = P_T - A_1 - A_2 + G - A_3 - A_4 - \alpha * L \rightarrow$$

$$\rightarrow P_T = P_R - G + A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + \alpha * L$$

$$\rightarrow P_T = -40 - 40 + 3 + 1 + 1 + 1 + 0.2 * 300$$

$$\rightarrow P_T = -14\text{dBm}$$

$$\rightarrow P_T = 10^{\frac{-14}{10}} \text{mW} \approx 0.04\text{mW}$$



**Function Block Parameters: Fiber**

Subsystem (mask)

A simple Fiber model for Link Budget calculations

Parameters

Fiber Loss(dB/km): 0.2

Fiber Length (km): 300

Cancel Help

**Function Block Parameters: Loss1**

Subsystem (mask)

A simple optical signal loss model for Link Budget calculations

Parameters

Loss Value(dB): 3

Cancel Help

**Function Block Parameters: Loss2**

Subsystem (mask)

A simple optical signal loss model for Link Budget calculations

Parameters

Loss Value(dB): 1

Cancel Help

**Function Block Parameters: Loss3**

Subsystem (mask)

A simple optical signal loss model for Link Budget calculations

Parameters

Loss Value(dB): 1

Cancel Help



**Function Block Parameters: Subsystem**

Subsystem (mask)

A simple Laser model for Link Budget calculations

Parameters

Output Power: 0 dBm

Cancel Help

**Function Block Parameters: Optical Amplifier**

Subsystem (mask)

A simple Optical Amplifier model for Link Budget calculations. If the Amplifier is saturated the lower output gives "1".

Parameters

Saturation Power(dBm): 20

Gain(dB): 40

Cancel Help

**Function Block Parameters: Loss4**

Subsystem (mask)

A simple optical signal loss model for Link Budget calculations

Parameters

Loss Value(dB): 1

Cancel Help

**Function Block Parameters: Receiver**

Subsystem (mask)

A simple Optical Receiver model for Link Budget calculations. Upper output port gives the received optical power value. Lower output port gives "1" on link failure.

Parameters

Sensitivity(dBm): -40

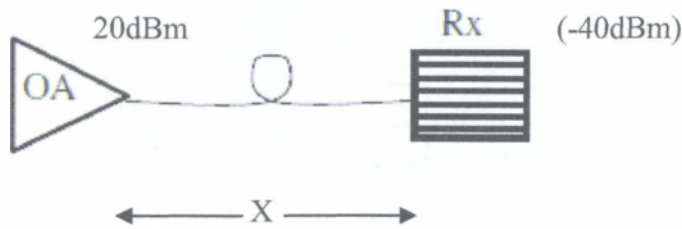
Receiver Power Unit: dBm

Cancel Help

B) Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να αποδώσει ο ΟΑ είναι  $100mW$  ή

$$10 \log \frac{100mW}{1mW} = 20dBm$$

Θα βρω την απόσταση  $x$  από τον δέκτη στην οποία αν τοποθετηθεί ο ΟΑ θα δίνει οριακά στον δέκτη τα  $-40dBm$  που χρειάζεται για να λειτουργήσει:

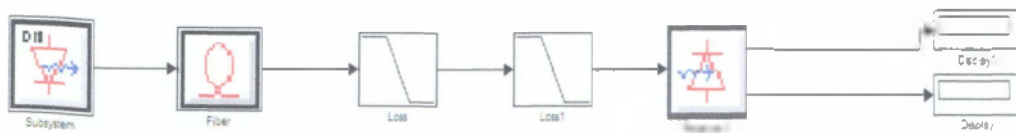


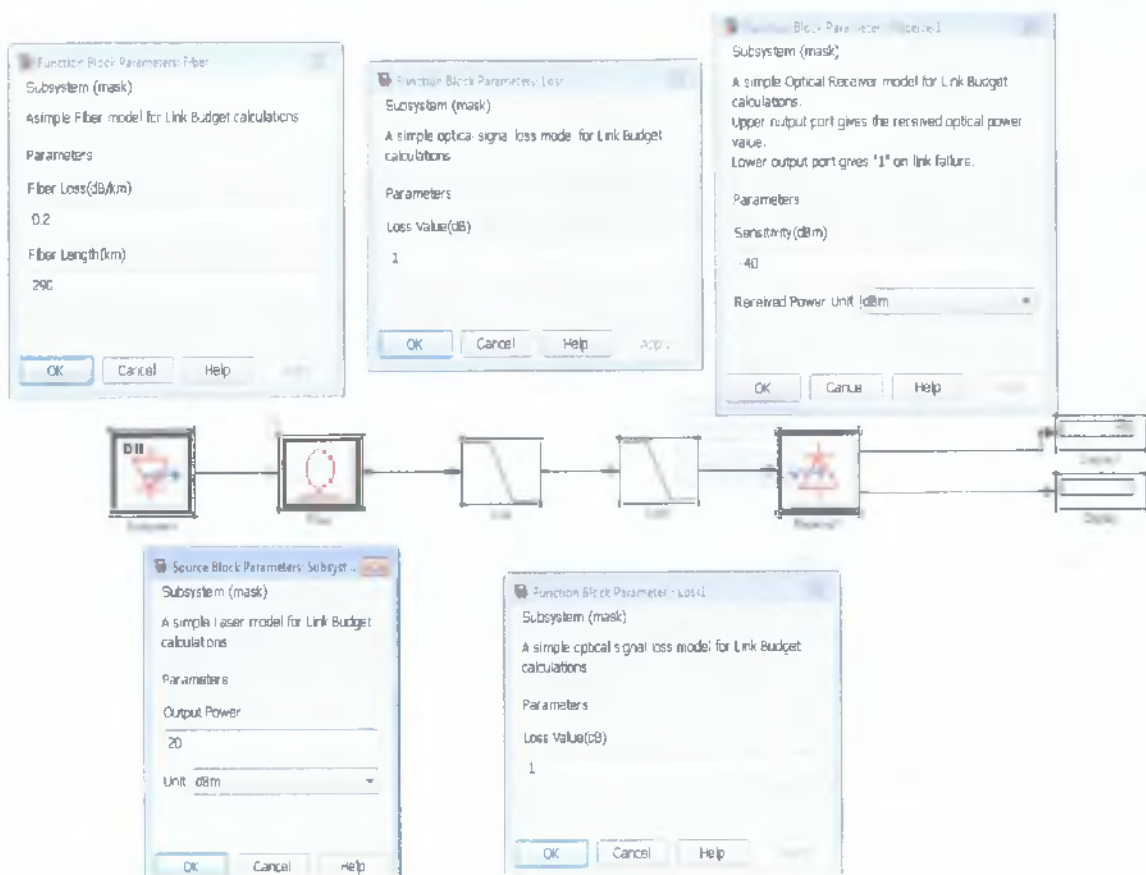
Ο αντίστοιχος ισολογισμός ισχύος είναι:

$$20 - 1 - 0.2 * x - 1 = -40 \rightarrow$$

$$\rightarrow 0.2x = 58 \rightarrow x = \frac{58}{0.2} \rightarrow x = 290km$$

Άρα η μέγιστη απόσταση του ενισχυτή από τον δέκτη είναι ίση με  $290km$





## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ - ΠΙΝΑΚΩΝ

ΣΧΗΜΑ		
1.1	Βασικό σύστημα οπτικών επικοινωνιών	ΣΕΛ 10
1.2	Ιστορική αναδρομή τηλεπικοινωνιών	ΣΕΛ 10
1.3 <sup>α,β</sup>	Οι οπτικές επικοινωνίες έχουν θεωρητικά διαθέσιμο εύρος ζώνης ως 100 THz	ΣΕΛ12
1.4	Κυματική φύση του φωτός	ΣΕΛ 14
1.5	Ανάκλαση και διάθλαση φωτός που διαδίδεται από οπτικό αραιότερο μέσο σε οπτικώς πυκνότερο	ΣΕΛ 16
1.6	Προσπίπτουσες ακτίνες φωτός από οπτικώς πυκνότερο σε οπτικώς αραιότερο μέσο	ΣΕΛ 18
1.7	Κυματοδήγηση φωτεινού σήματος μέσα από οπτική ίνα στα πλαίσια του φαινομένου της ολικής ανάκλασης	ΣΕΛ 19
1.8	Ανακλαστικότητα Ρ σαν συνάρτηση πρόσπτωσης για κάθετη (P <sub>s</sub> ) και παράλληλη πόλωση (P <sub>p</sub> ).	ΣΕΛ 21
2.1	Λειτουργία οπτικού πομπού	ΣΕΛ 23
2.2	Ημιαγωγοί	ΣΕΛ 24
2.3	Ημιαγωγοί	ΣΕΛ 24
2.4	Το ενσωματωμένο ηλεκτρικό πεδίο εμποδίζει την μετακίνηση και επανασύνδεση ελεύθερων φορτίων	ΣΕΛ 25
2.5	Ορθά πολωμένη επαφή pn- LED	ΣΕΛ 25
2.6	Ενσωματωμένο ηλεκτρικό πεδίο	ΣΕΛ 26
2.7	Ετερογενείς επαφές	ΣΕΛ 27
2.8	LED γεωμετρίας ακμής	ΣΕΛ 28
2.9	Θερμική ισορροπία και αναστροφή πληθυσμών	ΣΕΛ 29
2.10	Το ενεργό υλικό σε μία συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων (μήκος κύματος) που λέγεται οπτικό κέρδος	ΣΕΛ 29

2.11	Οπτικό κέρος => οπτικές αιώσεις	ΣΕΛ 30
2.12	Laser γεωμετρίας ακμής	ΣΕΛ 31
2.13	Ρεύμα κατωφλίου Laser	ΣΕΛ 32
2.14	Οπτική ισχύ LED- LASER	ΣΕΛ 32
2.15	Χωρική κατανομή ακτινοβολίας LED- LASER	ΣΕΛ 33
2.16	Μήκος κύματος	ΣΕΛ 33
2.17	Άμεση διαμόρφωση	ΣΕΛ 34
2.18	Κυκλώματα τροφοδοσίας – διαμόρφωσης ανάλογα με το είδος της πηγής και το είδος του σήματος	ΣΕΛ 35
2.19	Ηλεκτρικό και οπτικό εύρος ζώνης	ΣΕΛ 37
2.20	Οπτικός παλμός	ΣΕΛ 38
2.21	Εξωτερική διαμόρφωση	ΣΕΛ 28
2.22	Πηγές συνδεδεμένες με οπτική ίνα	ΣΕΛ 39
3.1	Ανατομία οπτική ίνας	ΣΕΛ 40
3.2	Κρίσιμη γωνία	ΣΕΛ 40
3.3	Διαστάσεις οπτικής ίνας	ΣΕΛ 41
3.4	Μέγιστη γωνία εισόδου	ΣΕΛ 41
3.5	Αριθμητικό άνοιγμα	ΣΕΛ 42
3.6	Κατανομή του δείκτη διάθλασης	ΣΕΛ 44
3.7	Διάδοση ακτίνας σε ίνα διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης (βηματική προσέγγιση)	ΣΕΛ 45
3.8	Οπτικοί τρόποι μετάδοσης	ΣΕΛ 46
3.9	Διάγραμμα οπτικών τρόπων μετάδοσης ίνας βηματικού δείκτη διάθλασης	ΣΕΛ 47
3.10	Διασπορά	ΣΕΛ 48
3.11	Ταχύτητα ακτινοβολίας στον πυρήνα και στο περίβλημα	ΣΕΛ 51
3.12	Οι παράγοντες που συμβάλλουν στις απώλειες στις γυάλινες ίνες	ΣΕΛ 54
3.13	Παράθυρα μετάδοσης	ΣΕΛ 56
3.14	Ζεύξη μικρού μικρού μήκους στα 650nm ως 670nm	ΣΕΛ 57
3.15	Στάδιο 1 <sup>ο</sup> κατασκευή οπτική ίνας	ΣΕΛ 58
3.16	Στάδιο 2 <sup>ο</sup> κατασκευή οπτικής ίνας	ΣΕΛ 59
4.1	Οπτικός δέκτης	ΣΕΛ 60

4.2	Αντικειμενική φωτός απο αναστροφα πολωμένη επαφή ρη	ΣΕΛ 60
4.3	Δημιουργία ρεύματος	ΣΕΛ 61
4.4	Αποκρισιμότητα	ΣΕΛ 63
4.5	Φωτοδίοδος pin	ΣΕΛ 65
4.6	Φωτοδίοδος APD	ΣΕΛ 65
4.7	Κύκλωμα δέκτη	ΣΕΛ 68
4.8	Διάγραμμα οφθαλμού	ΣΕΛ 71
5.1	Όργανα που προκαλούν μόνιμες ενώσεις τήξης	ΣΕΛ 77
5.2	Λεπτυσμένοι διακλαδωτές – συζευκτές τήξης	ΣΕΛ 79
5.3	Διαχωρισμός ισχύος	ΣΕΛ 80
5.4	Πολυπλέκτης - αποπολυπλέκτης	ΣΕΛ 82
5.5	FBG	ΣΕΛ 84
6.1	Οπτικός ενισχυτής	ΣΕΛ 87
6.2	Τυπικό φάσμα απολαβής G(f) οπτικού ενισχυτή	ΣΕΛ 88
6.3	Σχηματικό διάγραμμα της απολαβής συναρτήσει του σήματος εισόδου για τυπικό οπτικό ενισχυτή για την επίδειξη του φαινομένου του κόρου απολαβής	ΣΕΛ 90
6.4	Οι τρεις ρόλοι των οπτικών ενισχυτών σε ένα οπτικό δίκτυο : (α) ενισχυτής γραμμής, (β) ενισχυτής ισχύος, (γ) προενισχυτής	ΣΕΛ 91
6.5	Δομή ενισχυτή ημιαγωγού οδεύοντος κύματος κεκλεισμένων τερματικών όψεων	ΣΕΛ 93
6.6	Τυπικό φάσμα απολαβής G(f) για ενισχυτή οδεύοντος κύματος (R=0.01) και ενισχυτή Fabry –Perot (R=0.3)	ΣΕΛ 95
6.7	Βασική δομή EDFA	ΣΕΛ 97
6.8	Διάγραμμα ενεργειακών σταθμών ιόντων ερπίου στις οπτικές ίνες από silica	ΣΕΛ 99
6.9	Τυπικό προφίλ του φάσματος απολαβής σε συναρτήσει με το μήκος κύματος για ενισχυτή EDFA	ΣΕΛ 102
7.1	Πολυπλεξία	ΣΕΛ 107
7.2	Πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου	ΣΕΛ 107
7.3	Πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος	ΣΕΛ 108
7.4	Πολυπλεξία δύο καναλιών	ΣΕΛ 109

7.5	Μεταουσι της πληροφορίας και κατανομή σε ομάδα συνδρομητών	ΣΕΛ 111
7.6	Τοπολογία κέντρου	ΣΕΛ 112
7.7	Τοπολογία διαύλου	ΣΕΛ 113
7.8	Τοπολογίες	ΣΕΛ 114
7.9	Shared media	ΣΕΛ 114
7.10	Switch media	ΣΕΛ 119
7.11	Λειτουργία πρωτεύοντα/δευτερεύοντα δακτυλίου	ΣΕΛ 119
7.12	Παράδειγμα δικτύου FDDI	ΣΕΛ 123
8.1	Δυνατότητες του Matlab	ΣΕΛ 123

ΠΙΝΑΚΑΣ		
1.1	Εύρος ζώνης διαφόρων σημάτων	ΣΕΛ 11
1.2	Ταχύτητα του φωτός και ο δείκτης διάθλασης ανάλογα με το υλικό	ΣΕΛ 15
1.3	Η περιοχή του ορατού φάσματος	ΣΕΛ 15
2.1	Ημιαγωγοί και εκπεμπόμενα μήκη κύματος	ΣΕΛ 26
2.2	Τύποι ηλεκτρικού εύρους ζώνης $f_{3dB}$ και οπτικού εύρους ζώνης $f_{3dB,OP}$	ΣΕΛ 36
4.1	Φασματική περιοχή ανίχνευση	ΣΕΛ 64
4.2	Κριτήρια για την τιμή της αντίστασης	ΣΕΛ 69
7.10	Τοπικά δίκτυα	ΣΕΛ 117



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Δίκτυα Οπτικών Ινών, Paul Green, Μιφρ Κ. Καρούμπαλος Εκδ. Παπασωτηρίου
2. Ινσοπτικές Επικοινωνίες, Παγιατάκης Γ. , Εκδ. Τζιόλα 2004,
3. Οπτικά Δίκτυα Τεχνολογίας WDM, Πομπόρτσης Α. κ.λπ, Εκδ. Κλειδάριθμος 2005
4. Optical Communications, Gagliardi R. Sherman K., Εκδ. John Wiley & Sons, 1995
5. Fiber Optics Communications, Downing J. , Εκδ. Thomson Learning, 2004
6. Fiber Optic Communications, Palais J., Εκδ. Pearson Education, 2004
7. Σημειώσεις από Μάθημα Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα II , Λιαπέρδου Ιωάννη Καθηγητή Εφαρμογών.

## ΠΗΓΕΣ ΑΠΟ ΤΟ INTERNET

[http://www.dipolnet.com/optical\\_power\\_budget\\_in\\_a\\_fiber-optic\\_communication\\_link\\_bib320.htm](http://www.dipolnet.com/optical_power_budget_in_a_fiber-optic_communication_link_bib320.htm)

[http://www.transition.com/transitionnetworks/Resources/en/PDF/pwrbud\\_wp.pdf](http://www.transition.com/transitionnetworks/Resources/en/PDF/pwrbud_wp.pdf)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Link\\_budget](http://en.wikipedia.org/wiki/Link_budget)

<http://www.mathworks.com/products/matlab/index.html>