



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΗΠΕΙΡΟΥ  
ΤΗΛΕΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗ

# “ΔΥΚΤΥΑ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ”

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΡΑΛΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ - ΓΕΡΓΟΥΛΑΣ ΠΑΝΤΕΛΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΛΑΜΠΡΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

2006

Θα θέλαμε να εκφράσουμε την μέγιστη ευγνωμοσύνη μας στον καθηγητή κ. Λάμπρου κωνσταντίνο για την καθοδήγηση, τη βοήθεια, και την υποστήριξη που μας πρόσφερε κατά την διάρκεια της πτυχιακής μας εργασίας.

Με τη σειρά μου θα ήθελα να ευχαριστήσω και να αφιερώσω την πτυχιακή εργασία στην οικογένεια μου για την συμπαράσταση και βοήθεια της σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω την κοπέλα μου, Πέννυ, για την πολύτιμη βοήθεια της.

**ΓΕΡΑΛΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

Αφιερώνω αυτή την εργασία στους γονείς μου και τα αδέρφια μου και τους ευχαριστώ πολύ για ό,τι έχουν κάνει για μένα μέχρι τώρα αλλά και ό,τι συνεχίζουν να κάνουν.

**ΓΕΩΡΓΟΥΛΑΣ ΠΑΝΤΕΛΗΣ**

<i>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</i> .....	12
1.1 Το Πείραμα του John Tyndall .....	13
1.2 Ο 20ος Αιώνας .....	14
1.3 Πέντε Γενιές Οπτικών Συστημάτων .....	17
<i>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</i> .....	24
2.1 Η Φύση του Φωτός .....	25
2.2 Ανάκλαση και Διάθλαση στη Διαχωριστική Επιφάνεια .....	27
2.3 Οπτικές Ύνες .....	29
2.3.1 ΕΞ' ΟΛΟΚΛΗΡΟΥ ΓΥΑΛΙΝΕΣ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ .....	30
2.3.2 ΎΝΕΣ ΓΥΑΛΙΝΟΥ ΠΥΡΗΝΑ ΚΑΙ ΠΛΑΣΤΙΚΟΥ ΜΑΝΔΥΑ (PLASTIC CLAD SILICA-PCS) .....	30
2.3.3 ΕΞ' ΟΛΟΚΛΗΡΟΥ ΠΛΑΣΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ (PLASTIC OPTICAL FIBER - POF) .....	31
2.4 Τρόποι Μετάδοσης Φωτός .....	31
2.5 Πολύτροπες Ύνες .....	32
2.5.1 ΎΝΕΣ ΒΗΜΑΤΙΚΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ .....	32
2.5.2 ΎΝΕΣ ΒΑΘΜΙΑΙΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ .....	33
2.6 Μονότροπες Ύνες .....	35
2.7 Βασική Αρχή Λειτουργίας της Οπτικής Ύνας .....	37
2.8 Λόγοι Απώλειας Σήματος στις Οπτικές Ύνες .....	39
2.8.1 ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗ .....	39
2.8.2 ΔΙΑΣΠΟΡΑ .....	43
2.8.3 ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΥΛΙΚΟΥ .....	44
2.8.4 ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΚΥΜΑΤΟΔΗΓΟΥ .....	45
2.8.5 Η ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ .....	45
2.8.6 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ .....	46
2.8.7 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	46
<i>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</i> .....	49
3.1 Συζεύκτες .....	50
3.2 WDM's (πολυπλέκτες με διαίρεση του μήκους κύματος) .....	53
3.3 Συζεύκτες Κολλημένων Ινών .....	55
3.4 Διακόπτες Οπτικών Ινών .....	57
3.5 Οπτικοί Πομποί .....	58
3.6 Η Θεωρία της Λειτουργίας τους .....	61
3.6.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΟΜΠΩΝ ΦΩΤΟΣ .....	62
3.6.2 ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ .....	63
3.7 Δίοδοι Εκπομπής Φωτός (LED's) .....	64
3.8 Κυκλώματα Οδήγησης LED .....	68
3.9 Δίοδοι LASER (LD's) .....	72
3.9.1 ΑΝΤΑΝΑΚΛΑΣΗ .....	76
3.9.2 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΑ LASER .....	78
3.9.3 ΨΗΚΤΡΕΣ PELTIER .....	79
3.10 Ασφάλεια των LASER .....	82
3.11 Σύγκριση των διόδων LED και LASER .....	84
3.12 Διαμόρφωση .....	86
3.13 Τρόποι Διαμόρφωσης .....	87
3.13.1 ΠΟΙΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΜΠΟΡΟΥΜΕ ΝΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΟΥΜΕ .....	87
3.14 Σύγκριση Μεταξύ "Άμεσης" και "Εξωτερικής" Διαμόρφωσης (Direct versus external) .....	89
3.15 Εξωτερική Διαμόρφωση Φάσης και Πλάτους .....	92
3.15.1 Ο ΑΚΟΥΣΤΟΟΠΤΙΚΟΣ ΕΚΤΡΟΠΕΑΣ .....	92

3.15.2	ΔΙΑΜΟΡΦΩΤΕΣ ΚΒΑΝΤΙΚΩΝ-ΦΡΕΑΤΩΝ .....	93
3.15.3	ΗΛΕΚΤΡΟΟΠΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΡΩΤΗΣ ΚΑΙ ΔΕΥΤΕΡΗΣ-ΤΑΞΗΣ. ....	93
3.15.4	ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΤΕΣ ΦΑΣΗΣ.....	95
3.15.5	ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΤΕΣ ΕΝΤΑΣΗΣ.....	95
3.15.6	ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΠΟΛΩΣΗΣ.....	96
3.16	Διαμόρφωση Πόλωσης και scramblers.....	97
3.16.1	ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ASK ΓΙΑ ΑΜΙΓΓΩΣ-ΟΠΤΙΚΕΣ ΠΥΛΕΣ (ALL -OPTICAL GATEWAYS) 98	
3.17	Οπτικοί δέκτες .....	100
3.18	Απόδοση Δέκτη .....	102
3.18.1	ΤΥΠΟΙ ΔΕΚΤΩΝ .....	107
3.18.2	ΤΥΠΟΙ ΦΩΤΟΦΩΡΑΤΩΝ.....	109
3.18.3	ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΟΥ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ .....	109
3.18.4	Ο ΡΥΘΜΟΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ BIT ΩΣ ΒΑΣΙΚΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ.....	110
3.18.5	Ο ΙΣΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΖΕΥΞΗΣ .....	112
3.18.6	ΤΟ ΠΛΗΘΟΣ ΦΩΤΟΝΙΩΝ ΑΝΑ BIT ΩΣ ΜΕΤΡΟ .....	113
3.19	Συνιστώσες του Ισολογισμού της Ζεύξης.....	113
3.19.1	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥ ΙΣΟΛΟΓΙΣΜΟΥ - ΖΕΥΞΗΣ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ.....	113
3.19.2	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥ ΙΣΟΛΟΓΙΣΜΟΥ-ΖΕΥΞΗΣ ΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ .....	114
3.20	Οπτικοί Ενισχυτές.....	116
3.21	Ενισχυτές Διόδου laser .....	120
3.21.1	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΟΙΛΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟ ΦΑΣΜΑ ΑΠΟΛΑΒΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ .....	121
3.22	Πρακτικές απόψεις.....	124
3.23	Θόρυβος του Ενισχυτή .....	127
3.24	Κόρος απολαβής σε ένα Σημείο .....	129
3.25	Κόρος Απολαβής της Όλης Διάταξης.....	131
3.25.1	ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ FABRY-PEROT.....	131
3.25.2	ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΟΔΕΥΟΝΤΟΣ-ΚΥΜΑΤΟΣ .....	132
3.25.3	Ο ΚΟΡΟΣ ΤΗΣ ΑΠΟΛΑΒΗΣ ΔΕΝ ΕΙΝΑΙ ΤΟ ΙΔΙΟ ΜΕ ΤΗΝ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΤΗΤΑ ...	134
3.26	Διαφωνία στους Ενισχυτές Ημιαγωγού .....	135
3.27	Ενισχυτές με Ίνα-Προσμείξεων Βασικές αρχές .....	139
3.27.1	ΦΥΣΙΚΗ ΔΟΜΗ.....	143
3.27.2	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ.....	144
3.27.3	ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΗΚΩΝ ΚΥΜΑΤΟΣ ΑΝΤΛΗΣΗΣ.....	146
3.28	Ενισχυτές Raman και Brillouin .....	148
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.	.....	153
4.1	SONET / SDH.....	154
4.2	Πολυπλεξία .....	156
4.3	Συστατικά του SONET/SDH.....	158
4.4	Το φυσικό επίπεδο του SONET/SDH.....	161
4.5	Διασύνδεση υπολογιστών .....	162
4.6	ESCON .....	164
4.7	Fiber Channel.....	164
4.8	HIPPI.....	165
4.9	Μητροπολιτικά δίκτυα.....	165
4.9.1	FDDI .....	165
4.9.2	ATM.....	167
4.9.3	IP.....	169
4.10	Αρχιτεκτονική επιπέδων .....	170
4.10.1	SONET/SDH ΕΠΙΠΕΔΑ .....	174

4.11 Επίπεδα οπτικών δικτύων δεύτερης γενιάς.....	175
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ....	179
5.1 Τοπολογία των Δικτύων Εκπομπής.....	180
5.2 Διασυνδεδεμένοι αστέρες (Interconnected Stars).....	183
5.3 Πρωτόκολλα Ελέγχου Πρόσβασης Μέσων (MAC) .....	184
5.3.1 ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ.....	186
5.3.2 DT-WDMA.....	188
5.3.3 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΖΟΝΤΑΣ ΤΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ .....	193
5.3.4 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΖΟΝΤΑΣ ΤΗΝ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ.....	197
5.3.5 SCALABILITY ΚΑΙ ΤΑΞΕΙΣ ΚΙΝΗΣΗΣ .....	198
5.4 Testbeds .....	199
5.4.1 LAMBDA NET .....	200
5.4.2 ΤΟ TESTBED ΤΗΣ NTT.....	201
5.4.3 RAINBOW.....	201
5.4.4 STARNET.....	202
5.4.5 LIGHTNING.....	204
5.5 Super Computer Super net testbed.....	206
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ....	208
6.1 Εισαγωγή .....	209
6.2 Αρχιτεκτονική δικτύου .....	210
6.3 Τα σημερινά δίκτυα άμεσης πρόσβασης .....	211
6.4 Μελλοντικά δίκτυα άμεσης πρόσβασης .....	212
6.5 HFC.....	214
6.6 FTTC.....	215
6.7 Αρχιτεκτονικές οπτικών δικτύων άμεσης πρόσβασης.....	216
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ....	227
7.1 Εισαγωγή .....	228
7.2 Υποβρύχια Δίκτυα .....	229
7.2.1 ΤΟ ΜΟΝΤΕΡΝΟ ΥΠΟΒΡΥΧΙΟ ΔΙΚΤΥΟ. ....	229
7.2.2 ΤΟ ΚΑΛΩΔΙΟ .....	230
7.2.3 ΑΝΑΜΕΤΑΔΟΤΕΣ .....	230
7.2.4 Ο ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ (ΙΣΧΥΟΣ) .....	231
7.2.5 Ο ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΥΠΟΒΡΥΧΙΑΣ ΤΕΡΜΑΤΙΚΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ.....	232
7.2.6 18 ΜΗΝΕΣ ΜΕΧΡΙ ΤΗΝ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ.....	233
7.2.7 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ .....	234
7.3 Η έρευνα της διαδρομής του καλωδίου .....	236
7.3.1 Η ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΒΡΥΧΙΑΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	237
7.3.2 ΣΤΗΣΙΜΟ ΚΑΛΩΔΙΟΥ .....	237
7.3.3 ΣΥΓΚΡΟΤΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ .....	238
7.4 Fiber To The Home.....	238
7.4.1 ΟΡΙΣΜΟΣ .....	238
7.4.2 ΣΥΝΟΨΗ.....	239
7.4.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	239
7.4.4 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ FTTH.....	240
7.4.5 ΟΙ ΑΝΑΓΚΕΣ ΤΟΥ ΤΩΡΑ ΚΑΙ ΟΙ ΠΡΟΣΔΟΚΙΕΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ ..	240
7.4.6 ΠΩΣ ΔΟΥΛΕΥΕΙ ΤΟ FTTH .....	241
7.4.7 ΤΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ FTTH.....	243
7.4.8 ΕΠΙΠΕΔΟ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΧΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΓΟΡΑ.....	243
7.4.9 ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ ΤΟΥ FTTH.....	244
7.4.10 ΠΑΡΟΧΗΣ FTTH.....	245

7.4.11	FTTH: ΤΟ ΝΕΟ STANDARD ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ; .....	245
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8.	.....	246
	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ.....	247

---

## ΑΚΡΩΝΥΜΑ

---

Κάθε επιστημονικό πεδίο έχει τη δική του ορολογία και το πεδίο των οπτικών επικοινωνιών δεν αποτελεί εξαίρεση. Για μεγαλύτερη βοήθεια, εδώ παραθέτουμε έναν κατάλογο με όλα τα ακρωνύμια, με αλφαβητική σειρά.

<b>AC</b>	εναλλασσόμενο ρεύμα
<b>AM</b>	διαμόρφωση πλάτους
<b>AON</b>	εξολοκλήρου οπτικό δίκτυο
<b>APD</b>	φωτοδίοδος χιονοστιβάδας
<b>ASE</b>	αυθόρμητη ενισχυμένη εκπομπή
<b>ASK</b>	ψηφιακή διαμόρφωση πλάτους
<b>ATM</b>	τρόπος διάδοσης ασύγχρονης μεταφοράς
<b>BER</b>	ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένων bit
<b>BH</b>	θαμμένη ετεροδομή
<b>BPF</b>	φίλτρο διέλευσης ζώνης συχνοτήτων
<b>C<sup>3</sup></b>	κοιλότητα διαχωρισμού-σύζευξης
<b>CATV</b>	καλωδιακή τηλεόραση
<b>CDM</b>	πολυπλεξία με διαίρεση κώδικα
<b>CNR</b>	λόγος φέροντος προς θόρυβο
<b>CPFSK</b>	ψηφιακή διαμόρφωση συχνότητας συνεχούς-φάσης
<b>CSMA</b>	πολλαπλή πρόσβαση φέροντος
<b>CSO</b>	σύνθετη δεύτερης-τάξης
<b>CVD</b>	χημική εναπόθεση ατμών
<b>CW</b>	συνεχές κύμα
<b>CTB</b>	σύνθετος τριπλός παλμός
<b>DBR</b>	κατανεμημένος ανακλαστήρας Bragg
<b>dc</b>	συνεχές ρεύμα
<b>DCF</b>	οπτική ίνα αντιστάθμισης της διασποράς
<b>DFB</b>	κατανεμημένη ανάδραση
<b>DIP</b>	διπλή συσκευασία σε-σειρά
<b>DPSK</b>	διαφορική ψηφιακή διαμόρφωση φάσης
<b>EDFA</b>	ενισχυτές οπτικών ινών εμπλουτισμένοι με έρβιο
<b>FDDI</b>	σύνδεση δεδομένων διάδοσης μέσω οπτικών ινών
<b>FDM</b>	πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας
<b>FET</b>	τρανζίστορ επίδρασης-πεδίου
<b>FM</b>	διαμόρφωση συχνότητας
<b>FSK</b>	ψηφιακή διαμόρφωση συχνότητας
<b>FWHM</b>	πλήρες εύρος στο μισό μέγιστο

<b>FWM</b>	ανάμιξη τεσσάρων κυμάτων
<b>GVD</b>	διασπορά ταχύτητας-ομάδας
<b>HBT</b>	διπολικό τρανζίστορ ετεροδομής
<b>HDTV</b>	τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας
<b>HEMT</b>	τρανζίστορ υψηλής κινητικότητας ηλεκτρονίων
<b>HFC</b>	υβριδική ομοαξονική οπτική ίνα
<b>HIPPI</b>	παράλληλη σύνδεση υψηλής απόδοσης
<b>IC</b>	ολοκληρωμένο κύκλωμα
<b>IF</b>	ενδιάμεση συχνότητα
<b>IMD</b>	παραμόρφωση ενδο-διαμόρφωσης
<b>IM/DD</b>	διαμόρφωση έντασης με άμεση ανίχνευση
<b>IMP</b>	προϊόν ενδο-διαμόρφωσης
<b>ISDN</b>	ψηφιακό δίκτυο ολοκληρωμένων υπηρεσιών
<b>ISI</b>	παρεμβολές μεταξύ συμβόλων
<b>LAN</b>	τοπικό δίκτυο
<b>LED</b>	φωτοεκπομπός δίοδος
<b>L-I</b>	φως- ρεύμα
<b>LO</b>	τοπικός ταλαντωτής
<b>LPE</b>	επιταξία υγρής φάσης
<b>LPF</b>	φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων
<b>MAN</b>	δίκτυο μεγαλούπολης
<b>MBE</b>	επιταξία μοριακής δέσμης
<b>MCVD</b>	τροποποιημένη χημική εναπόθεση ατμών
<b>MOCVD</b>	χημική εναπόθεση ατμών οργανικού -μετάλλου
<b>MONET</b>	οπτικό δίκτυο πολλαπλού μήκους κύματος
<b>MPEG</b>	ομάδα ψυχαγωγίας κινητής-εικόνας
<b>MPN</b>	θόρυβος διαίρεσης- τρόπου διάδοσης
<b>MQW</b>	πολυκβαντικό φρέαρ
<b>MSK</b>	ψηφιακή διαμόρφωση ελάχιστης ολίσθησης
<b>MSM</b>	μέταλλο-ημιαγωγός-μέταλλο
<b>MSR</b>	λόγος συμπίεσης-τρόπου διάδοσης
<b>MTTF</b>	μεσοδιάστημα ως την κατάρρευση
<b>MZ</b>	Mach-Zehnder
<b>NA</b>	αριθμητικό άνοιγμα
<b>NEP</b>	ισοδύναμη ισχύς θορύβου
<b>NOLM</b>	μη γραμμικό κάτοπτρο οπτικού-βρόχου
<b>NRZ</b>	χωρίς -επιστροφή στο μηδέν.
<b>NSE</b>	μη γραμμική εξίσωση Schrodinger
<b>OC</b>	οπτικό φέρον
<b>OEIC</b>	οπτό-ηλεκτρονικό ολοκληρωμένο κύκλωμα
<b>OOK</b>	ψηφιακή διαμόρφωση on-off
<b>OPC</b>	συζυγής οπτική φάση
<b>OTDM</b>	πολυπλεξία με διαίρεση οπτικού χρόνου
<b>OVD</b>	εναπόθεση εξωτερικών ατμών

<b>OXC</b>	οπτική διασύνδεση
<b>PCM</b>	παλμοκωδική διαμόρφωση
<b>PDF</b>	συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας
<b>PDM</b>	πολυπλεξία με διαίρεση πόλωσης
<b>PIC</b>	ολοκληρωμένο φωτονικό κύκλωμα
<b>PM</b>	διαμόρφωση φάσης
<b>PMD</b>	διασπορά πόλωσης τρόπου διάδοσης
<b>PON</b>	παθητικό οπτικό δίκτυο
<b>PSK</b>	ψηφιακή διαμόρφωση φάσης
<b>RIN</b>	σχετική ένταση θορύβου
<b>RMS</b>	τετραγωνική ρίζα των μέσων τετραγώνων
<b>RZ</b>	επιστροφή στο μηδέν
<b>SAGSM</b>	χωριστή απορρόφηση, διαβάθμιση, φόρτιση και πολλαπλασιασμός
<b>SAGM</b>	χωριστή απορρόφηση, διαβάθμιση και πολλαπλασιασμός
<b>SAM</b>	χωριστή απορρόφηση και πολλαπλασιασμός
<b>SBS</b>	εξαναγκασμένη σκέδαση Brillouin
<b>SCM</b>	πολυπλεξία υποφέροντος
<b>SDH</b>	σύγχρονη ψηφιακή ιεραρχία
<b>SI</b>	διεθνές σύστημα
<b>SLA</b>	ενισχυτής laser ημιαγωγού
<b>SLM</b>	απλός επιμήκης τρόπος διάδοσης
<b>SNR</b>	λόγος σήματος -προς- θόρυβο
<b>SONET</b>	συγχρονισμένο οπτικό δίκτυο
<b>SPM</b>	διαμόρφωση αυτόματης φάσης
<b>SRS</b>	εξαναγκασμένη σκέδαση Raman
<b>STM</b>	πρότυπο σύγχρονης μεταφοράς
<b>STS</b>	σήμα σύγχρονης μεταφοράς
<b>TCP/IP</b>	πρωτόκολλο ελέγχου μετάδοσης/ πρωτόκολλο internet
<b>TDM</b>	πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου
<b>TE</b>	εγκάρσιο ηλεκτρικό
<b>TM</b>	εγκάρσιο μαγνητικό
<b>TW</b>	οδεύον κύμα
<b>VAD</b>	αξονική εναπόθεση ατμών
<b>VCSEL</b>	Laser εκπομπής - επιφάνειας κατακόρυφης κοιλότητας
<b>VPE</b>	επιταξία φάσης ατμών
<b>VSB</b>	υπολειμματική πλευρική ζώνη
<b>WAN</b>	δίκτυο ευρείας-περιοχής
<b>WDM</b>	πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος
<b>WDMA</b>	πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης-μήκους κύματος
<b>WGR</b>	δρομολογητής σχάρας διάθλασης κυματοδηγού
<b>XPM</b>	διαμόρφωση διασταυρούμενης-φάσης
<b>YIG</b>	κρύσταλλος υτρίου σιδήρου

---

---

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

---

Οι οπτικές ίνες είναι μια γοητευτική περιοχή έρευνας, που έχει γνωρίσει τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερη ανάπτυξη. Παρ' όλα αυτά η ανάπτυξη αυτή πολύ δύσκολα θα πλησιάσει τις προβλέψεις και τις προδιαγραφές της.

Έτσι, λοιπόν, στις αρχές του 1970 οι πρώτες οπτικές ίνες είδαν το φως της ημέρας και σε λιγότερο από δέκα χρόνια έκαναν την εμφάνισή τους στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα σε όλο τον κόσμο. Η τεράστια επιτυχία των οπτικών ινών δεν οφείλεται στη ανεπάρκεια σε χαλκό, ο οποίος χρησιμοποιείται στην κατασκευή συμβατικών καλωδίων, ούτε και στη σχετικά εύκολη και απλή μέθοδο κατασκευής των αλλά στο ότι μια οπτική ίνα έχει μια απίστευτα υψηλή χωρητικότητα μεταδόσεως. Μπορεί π.χ. να μεταβιβάσει χιλιάδες τηλεφωνημάτων ή αρκετών τηλεοπτικών προγραμμάτων ταυτόχρονα σε μεγάλες αποστάσεις, χωρίς παρεμβολή ενισχυτών. Κανένα άλλο είδος καλωδίου δεν μπορεί να κάνει αυτό τόσο οικονομικά όσο μια οπτική ίνα.

Γι' αυτό το λόγο τα οπτικά δίκτυα στις μέρες μας έφτασαν να προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα στους παροχής υπηρεσιών. Με την εικονική τους άπειρη χωρητικότητα επιτυγχάνονται ταχύτητες που στο παρελθόν φάνταζαν απίστευτες. Η τεχνολογία των οπτικών επικοινωνιών ανοίγει νέους δρόμους για την παροχή κρίσιμων και σημαντικών υπηρεσιών για τους διάφορους πελάτες. Παρ' όλα αυτά η χωρητικότητα δεν είναι το παν. Τα σημερινά οπτικά δίκτυα πρέπει να έχουν μια έξυπνη υποδομή στο δίκτυο κορμού. Οφείλουν να είναι ενήμερα για τις εφαρμογές, τις υπηρεσίες και το περιεχόμενο που μεταφέρεται μέσα από αυτά – και πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να διακρίνουν τους διαφορετικούς τύπους δεδομένων, ώστε να προσφέρουν τη μέγιστη δυνατή απόδοση.

Τα παραδοσιακά οπτικά δίκτυα έχουν αναπτυχθεί και υλοποιηθεί για την υποστήριξη εφαρμογών φωνής και κίνησης, που βασίζονται στη μεταγωγή κυκλώματος. Όμως με τη συνεχή ανάπτυξη του Internet Protocol (IP), η κίνηση δρομολογείται κυρίως μέσα από δικτυακές εφαρμογές και υπηρεσίες δεδομένων. Τα κλασικά αυτά οπτικά δίκτυα δεν αποτελούν πλέον τη βέλτιστη λύση για την επικρατούσα κίνηση και τις υπηρεσίες που οι

χρήστες σήμερα αναζητούν. Το IP ανεβάζει τον πήχη. Συνεπώς χρειάζονται λύσεις που θα καλύπτουν τις συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες που καθημερινά προκύπτουν.

---

## ***ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.***

---

# ***ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ***

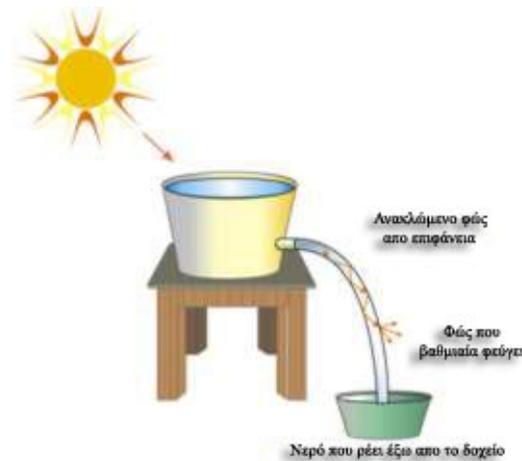
*Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται μια σύντομη ιστορική ανάδρομη στην εξέλιξη της οπτικής ίνας. Από τα πρώτα πειράματα του John Tyndall το 1870 μέχρι σήμερα η μορφή της οπτικής ίνας έχει να επιδείξει μεγάλη τεχνολογική ανάπτυξη προς όφελος του ανθρώπου.*

---

## 1.1 Το Πείραμα του John Tyndall

Το 1870 η κοινωνία του Λονδίνου υπήρξε μάρτυρας μιας πρωτοποριακής επίδειξης που έγινε δημόσια από τον ιστορικό και φιλόσοφο John Tyndall. Ο Tyndall, χρησιμοποιώντας μια υδάτινη φλέβα, που έρεε από ένα δοχείο προς ένα άλλο και μια δέσμη φωτός, απέδειξε ότι το φως αντανακλάτο εσωτερικά, για να ακολουθήσει την συγκεκριμένη διαδρομή της υδάτινης φλέβας. Καθώς το νερό έρεε από το σωλήνα του πρώτου δοχείου, ο Tyndall κατηύθυνε μια δέσμη φωτός στην πορεία της υδάτινης φλέβας. Το φως όπως μπορούσε να δει το κοινό, ακολουθούσε μια τεθλασμένη πορεία στο εσωτερικό της υδάτινης, φλέβας. Αυτό το απλό πείραμα, που απεικονίζεται στο σχήμα 1.1, ήταν το πρώτο βήμα της έρευνας για την κατευθυνόμενη διάδοση φωτός.

Ο William Wheeling επεκτάθηκε πιο πέρα από το πείραμα του Tyndall, όταν το 1880 κατοχύρωσε μια μέθοδο μεταφοράς φωτός, την οποία ονόμασε "ripping" (φως δια μέσου σωλήνων). Ο Wheeling πίστευε ότι χρησιμοποιώντας σωλήνες με καθρέφτες, (οι οποίοι θα ξεκινούσαν από μια απλή πηγή φωτός, π.χ. ηλεκτρικό σπινθήρα, και θα διακλαδίζονταν στην πορεία), θα μπορούσε να στείλει το φως σε διαφορετικούς χώρους, με τον ίδιο τρόπο που το νερό μεταφέρεται δια μέσου των υδροσωλήνων στα κτίρια. Εξ αιτίας όμως της δυσκολίας πραγματοποίησης της ιδέας του, και της ταυτόχρονης ανακάλυψης του λαμπτήρα πυράκτωσης από τον Edison, η μέθοδος της μεταφοράς του φωτός δια μέσου σωλήνων δεν υλοποιήθηκε ποτέ (Πολλές πάντως Ιαπωνικές εταιρίες εξακολουθούν να επιδεικνύουν ενδιαφέρον για την ιδέα του και συνεχίζουν τις προσπάθειες για την υλοποίηση της, στηριζόμενες στην εξέλιξη της τεχνολογίας αφενός, και έχοντας σαν στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας αφετέρου).



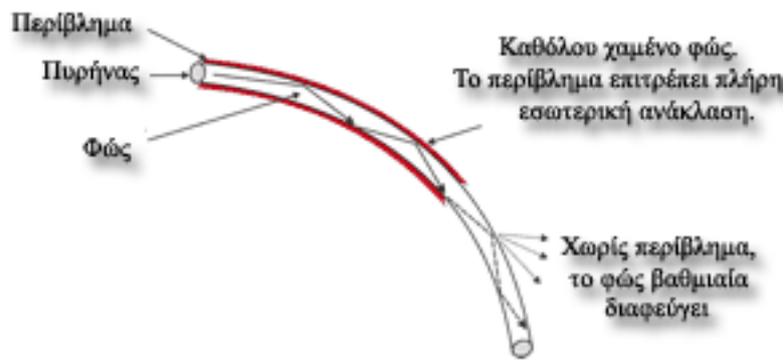
**Σχήμα 1.1** Το πείραμα του John Tyndall.

Τον ίδιο χρόνο ο Alexander Graham Bell ανέπτυξε ένα οπτικό σύστημα μετάδοσης φωνής, το οποίο ονόμασε *φωτόφωνο*. Δεκαετίες πριν από τον καιρό του, το φωτόφωνο χρησιμοποίησε το ορατό φως για να μεταφέρει την ανθρώπινη φωνή 200 μέτρα μακριά. Ειδικά τοποθετημένοι καθρέφτες ανακλούσαν το ηλιακό φως σε ένα διάφραγμα, το οποίο ήταν προσαρμοσμένο στο στόμιο του φωτοφώνου. Στο άλλο άκρο, συνδεδεμένη με ένα παραβολικό κάτοπτρο, υπήρχε μια φωτοαντίσταση σεληνίου. Η φωτοαντίσταση ήταν συνδεδεμένη με μια μπαταρία, η οποία με τη σειρά της συνδεόταν με έναν τηλεφωνικό δέκτη. Αν κάποιος μιλούσε στο φωτόφωνο, τότε το φωτισμένο διάφραγμα ταλαντωνόταν, στέλνοντας διάφορες ποσότητες φωτός στην φωτοαντίσταση. Η μεταβαλλόμενη ένταση του φωτός μετέβαλε την τιμή της αντίστασης η οποία με την σειρά της προκαλούσε μεταβολή της έντασης του ρεύματος που περνούσε από τον δέκτη, ο οποίος στην συνέχεια μετέτρεπε το φως σε φωνή. Η τεχνολογία για την υποστήριξη της εφεύρεσης δεν θα ήταν διαθέσιμη για αρκετά χρόνια, αλλά ο Bell πίστευε ότι η εφεύρεση του ήταν σπουδαιότερη από την εφεύρεση του τηλεφώνου, επειδή δεν απαιτούνταν αγωγοί σύνδεσης μεταξύ πομπού και δέκτη. Στην πραγματικότητα ήταν η πρώτη στον κόσμο οπτική ζεύξη με διαμόρφωση κατά πλάτος (AM - AMPLITUDE MODULATION).

## 1.2 Ο 20ος Αιώνας

Η τεχνολογία των οπτικών ινών γνώρισε ραγδαία ανάπτυξη στο δεύτερο μισό του 20ου αιώνα. Η επιτυχία ήρθε στην δεκαετία του 1950 μαζί με την ανάπτυξη του ινοσκόπιου. Αυτή η συσκευή εκπομπής εικόνας, η οποία χρησιμοποιούσε την πρώτη πρακτική ίνα κατασκευασμένη εξ ολοκλήρου από γυαλί, επινοήθηκε από κοινού από τους Brian O' Brien της εταιρείας American Optical Company, και από τον Narrinder Karany και τους Συνεργάτες του που εργάζονταν στο Imperial College of Science and Technology του Λονδίνου (πράγματι, ο Narrinder Karany πρότερος επινόησε τον όρο "fiber optics" το 1956).

Αφορμή για την κατασκευή της υπενδεδυμένης γυάλινης ίνας στάθηκε η απόσβεση που υφίστατο το σήμα μέσα στην γυάλινη ίνα χωρίς επένδυση. Η εσωτερική ίνα (πυρήνας) χρησιμοποιούνταν για την διάδοση του φωτός, ενώ η γυάλινη επένδυση ή περίβλημα εμπόδιζε το φως να διαφύγει έξω από τον πυρήνα με ανακλάσεις στα όρια του πυρήνα Σχήμα 1.2 . Αυτό εξηγείται από το νόμο του *Snell*, σύμφωνα με τον οποίο, η γωνία ανάκλασης του φωτός εξαρτάται από τους δείκτες διάθλασης των δύο υλικών (στην περίπτωση μας του πυρήνα και του περιβλήματος). Ο μικρότερος δείκτης διάθλασης του περιβλήματος, σε σχέση με τον δείκτη διάθλαση του πυρήνα, αναγκάζει το φως να επιστρέψει στον πυρήνα(ολική ανάκλαση).

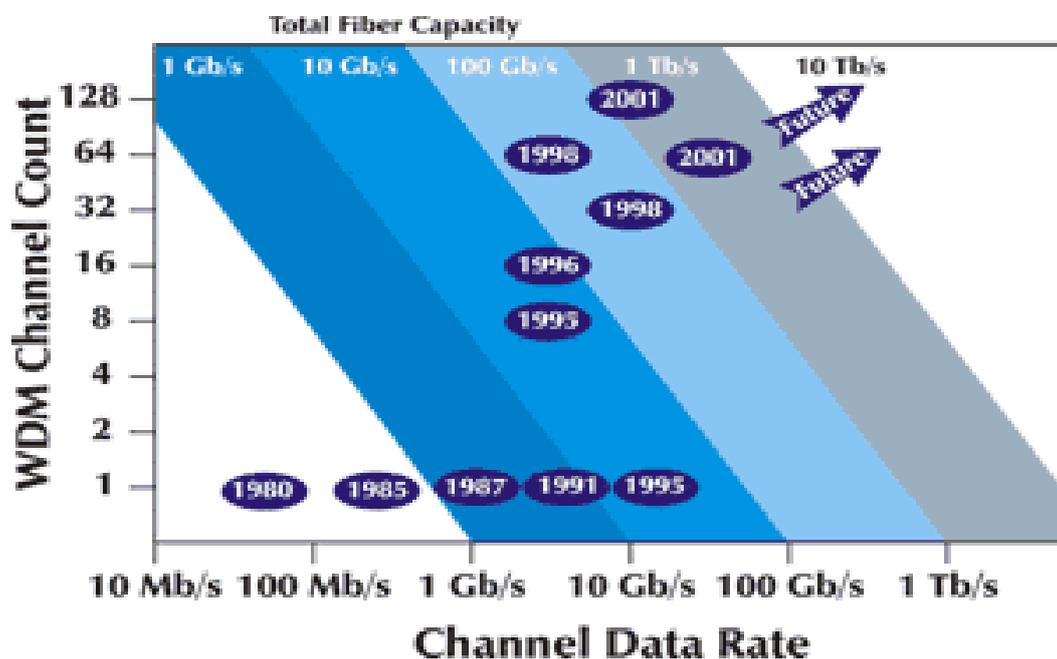


Σχήμα 1.2 Οπτική ίνα με περίβλημα.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας laser ήταν το επόμενο σημαντικό βήμα στην εγκαθίδρυση της βιομηχανίας των οπτικών ινών. Μόνο η *δίοδος laser* ή η χαμηλής ισχύος *φωτοεκπέμπουσα δίοδος (LED)*, είχε τη δυνατότητα να παράγει δέσμη φωτός τέτοια που να είναι χρήσιμη για τις οπτικές ίνες. Το 1957, ο Gordon Gould δημοσιοποίησε την ιδέα της χρήσης laser, όταν σαν μεταπτυχιακός σπουδαστής στο πανεπιστήμιο COLUMBIA περιέγραψε το laser σαν έντονη πηγή φωτός. Πολύ σύντομα οι Charles Towne και Arthur Schawlow των εργαστηρίων Bell υποστήριξαν το laser στους επιστημονικούς κύκλους. Τα laser πέρασαν από αρκετά στάδια, συμπεριλαμβανόμενης και της ανάπτυξης του laser *ρουμπινιού* και του laser *Ηλίου - Νέου* το έτος 1960. Τα laser *ημιαγωγών* παρουσιάστηκαν για πρώτη φορά το 1962, σηματοδοτώντας την έναρξη της ευρείας χρήσης τους στις οπτικές επικοινωνίες.

Λόγω της υψηλότερης συχνότητας λειτουργίας του, το laser σαν μέσο μετάδοσης πληροφοριών, δεν άφησε αδιάφορους τους μηχανικούς των επικοινωνιών. Το φως έχει δυνατότητα μεταφοράς πληροφοριών 10.000 φορές μεγαλύτερη από τις υψηλότερες ραδιοσυχνότητες που χρησιμοποιούνται σήμερα. Παρόλα αυτά το laser ήταν ακατάλληλο για μετάδοση πληροφοριών διά μέσου του περιβάλλοντος επειδή επηρεάζονταν δυσμενώς από τις καιρικές συνθήκες και το νέφος. Αντιμέτωποι με την πρόκληση της εξεύρεσης άλλου μέσου μετάδοσης, οι Charles Kao και Charles Hockham, οι οποίοι εργάζονταν στα εργαστήρια Standard Telecommunication στην Βρετανία, το 1966 δημοσίευσαν ένα μνημειώδες δοκίμιο, στο οποίο

αποδείκνυαν θεωρητικά ότι η οπτική ίνα θα μπορούσε να χρησιμεύσει σαν μέσο μετάδοσης, αν η εξασθένηση (η μείωση της ισχύος του σήματος), γινόταν μικρότερη των 20 db/Km. Κατά την περίοδο αυτής της δημοσίευσης, η απόσβεση της μετάδοσης του σήματος διαμέσου των οπτικών ινών υπερέβαινε τα 1000 db/Km. Το πρόβλημα ήταν ότι με απώλεια σήματος 20 db/Km, το 99% του φωτός θα χανόταν στα 1000 μέτρα (3.300ft), ή αλλιώς μόνο το 1% της οπτικής ισχύος του σήματος θα έφθανε στο δέκτη. Πολύ διορατικά λοιπόν (οι Charles Kao και Charles Hockham) επεσήμαναν, ότι οι απαγορευτικά μεγάλες απώλειες οφείλονταν στην έλλειψη καθαρότητας του γυαλιού και όχι στο ίδιο το υλικό.



Σχήμα 1.3 Ιστορικά στοιχεία ανάπτυξης χωρητικότητας οπτικής ίνας.

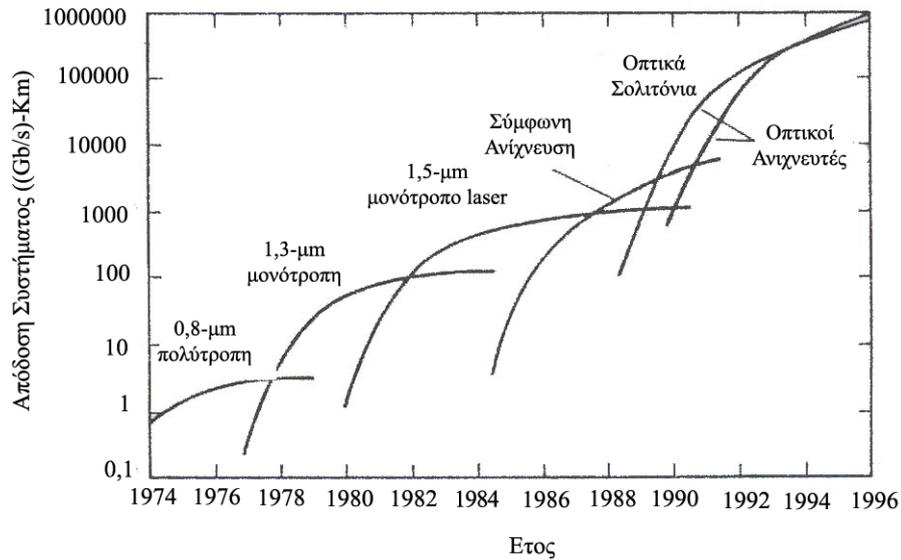
Ορμώμενοι από την πρόταση των Charles Kao και Charles Hockham οι ερευνητές άρχισαν να εργάζονται στην κατεύθυνση της βελτίωσης της καθαρότητας του γυαλιού. Το 1970 οι Drs. Robert Mauer, Donald Keck, και Peter Schulz της εταιρείας Corning[1] κατασκεύασαν ίνα από γυαλί, με εξασθένηση μικρότερη των 20 dB/Km (το κατώφλι), που θα επέτρεπε να αναπτυχθούν ως βιώσιμη τεχνολογία οι οπτικές επικοινωνίες. Ήταν το καθαρότερο γυαλί που κατασκευάστηκε ποτέ. Σύγχρονες εξελίξεις στην τεχνολογία του laser, τα chips ημιαγωγών, φωτοανιχνευτές και συνδετήρες συνδυασμένοι με οπτικές ίνες συνόδευσαν το πραγματικό ξεκίνημα της βιομηχανίας των οπτικών ινών.

Οι πρώτες εργασίες πάνω στους φωτοπομπούς και στους φωτοανιχνευτές έγιναν με αργούς ρυθμούς και πολλές φορές απαιτήθηκε η συνδρομή τεχνολογίας, που αναπτύχθηκε για άλλους λόγους, π.χ. οι πρώτες πηγές μετάδοσης φωτός μέσω οπτικής ίνας προέρχονταν από τα LED ορατού φωτός. Καθώς οι απαιτήσεις μεγάλωναν, αναπτύχθηκαν φωτοπομποί οπτικών επικοινωνιών, οι οποίοι προσέφεραν μεγαλύτερες ταχύτητες μεταγωγής, πλέον κατάλληλα μήκη κύματος και μεγαλύτερη έξοδο ισχύος.

### 1.3 Πέντε Γενιές Οπτικών Συστημάτων

Η ιστορική αναδρομή στα συστήματα επικοινωνιών με φως στο πέρασμα του χρόνου, μας δείχνει με τον καλύτερο τρόπο τα διάφορα στάδια εξέλιξής τους. Την εμπορική ανάπτυξη των οπτικών συστημάτων επικοινωνίας ακολούθησε η έρευνα. Μετά από πολλές δοκιμές, η πρώτη-γενιά οπτικών συστημάτων που λειτουργούσε κοντά στα 0.8  $\mu\text{m}$  έγινε εμπορικά διαθέσιμη το 1980[2]. Τα συστήματα αυτά λειτούργησαν σε ρυθμό μετάδοσης 45 Mb/s και επέτρεψαν απόσταση μεταξύ επαναληπτών γύρω στα 10 Km.

Η μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ επαναληπτών συγκρινόμενη με εκείνη ενός ομοαξονικού συστήματος ήταν ένα σπουδαίο κίνητρο για σχεδιαστές συστημάτων. Έτσι μειώθηκε το κόστος εγκατάστασης που σχετίζεται με κάθε επαναλήπτη. Έγινε ξεκάθαρο κατά τη διάρκεια του 1970, ότι η απόσταση μεταξύ επαναληπτών μπορούσε να αυξηθεί σημαντικά για λειτουργία των οπτικών συστημάτων σε μήκη κύματος στην περιοχή του 1.3  $\mu\text{m}$ , όπου οι απώλειες των οπτικών ινών ήταν κάτω από 1 db/Km. Επιπλέον, οι οπτικές ίνες παρουσιάζουν ελάχιστη διασπορά σε αυτήν την περιοχή μηκών κύματος. Αυτό το γεγονός οδήγησε σε μεγάλη προσπάθεια για την ανάπτυξη Laser και ανιχνευτών από ημιαγωγούς InGaAsP, που λειτουργούν κοντά στα 1.3  $\mu\text{m}$ .

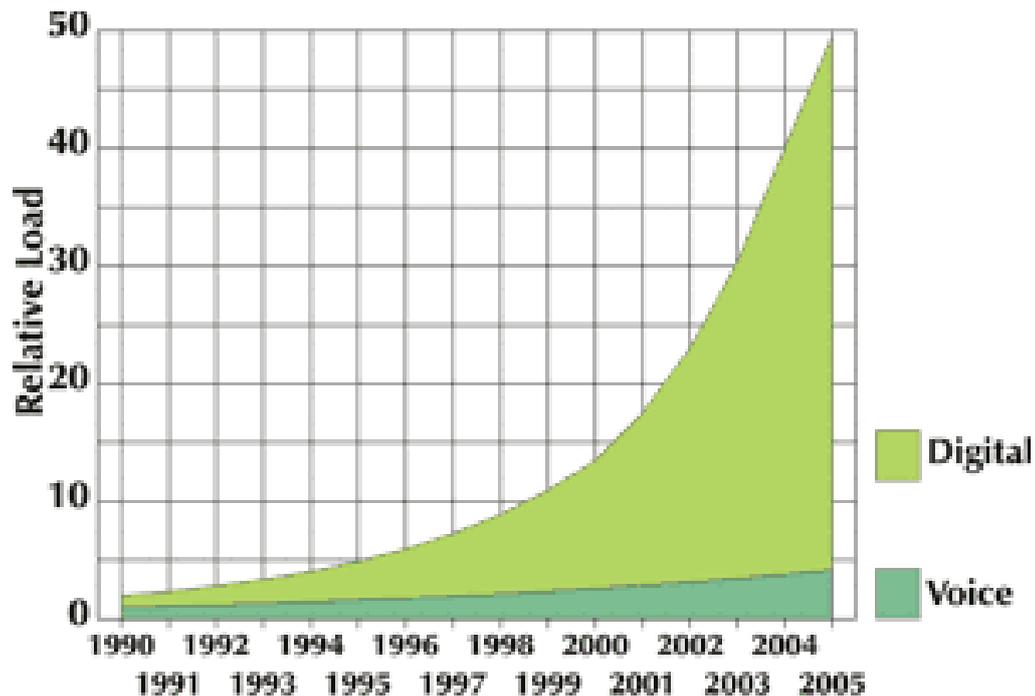


**Σχήμα 1.4** Εξέλιξη στην τεχνολογία των με φως την περίοδο 1974-1996. Οι διάφορες καμπύλες δείχνουν αύξηση στο γινόμενο ρυθμού των bits επί απόσταση, BL, για πέντε γενιές συστημάτων με οπτικές ίνες.

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

Πράγματι, απώλειες των 0.2 db/Km διαπιστώθηκαν σ' αυτήν την περιοχή του φάσματος, το 1979. Όμως, η εισαγωγή των οπτικών συστημάτων τρίτης γενιάς, που λειτουργούσαν στα 1.55 μm καθυστέρησε σημαντικά, από μεγάλες διασπορές της ίνας κοντά στα 1.55 μm. Συμβατικά laser ημιαγωγού InGaAsP δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν εξαιτίας του απλώματος του παλμού που συνέβαινε σαν αποτέλεσμα ταυτόχρονης ταλάντωσης πολλών διαμηκών τρόπων μετάδοσης. Το πρόβλημα της διασποράς μπορούσε να ξεπεραστεί είτε χρησιμοποιώντας ίνες με ολίσθηση στη διασπορά, σχεδιασμένες να έχουν ελάχιστη διασπορά κοντά στα 1.55 μm ή περιορίζοντας το φάσμα του laser σε ένα απλό διαμήκη τρόπο ταλάντωσης. Και οι δύο προσεγγίσεις πραγματοποιήθηκαν τη δεκαετία του 1980. Από το 1985, εργαστηριακά πειράματα έδειξαν τη δυνατότητα μετάδοσης της πληροφορίας σε

ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 4Gb/s σε αποστάσεις που υπερβαίνουν τα 100 Km. Η τρίτη-γενιά συστημάτων στα 1.55  $\mu\text{m}$ , που λειτουργούσε στα 2.5 Gb/s, εμφανίστηκε στο εμπόριο το 1990. Τέτοια συστήματα είναι ικανά να λειτουργούν σε ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 10 Gb/s. Η καλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας οπτικές ίνες με ολίσθηση στη διασπορά μαζί με laser διαμήκους τρόπου μετάδοσης.



Σχήμα 1.5 Τεχνολογική εξέλιξη οπτικής ίνας.

Ένα μειονέκτημα των συστημάτων τρίτης γενεάς στα 1.55  $\mu\text{m}$  είναι ότι το σήμα αναγεννάται περιοδικά με τη χρήση ηλεκτρονικών επαναληπτών που απέχουν μεταξύ τους αποστάσεις τυπικά περίπου 60 έως 80 Km. Η απόσταση μεταξύ επαναληπτών μπορεί να αυξηθεί χρησιμοποιώντας ομόδουνη ή ετερόδουνη τεχνική φώρασης, αφού η χρήση της βελτιώνει την ευαισθησία του δέκτη. Τέτοια συστήματα αναφέρονται σαν «σύμφωνα συστήματα οπτικών επικοινωνιών». Τα σύμφωνα συστήματα ήταν υπό ανάπτυξη παγκοσμίως κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980 και τα δυναμικά τους πλεονεκτήματα αποδείχτηκαν σε πολλά πειράματα συστημάτων. Όμως, η εμπορική εισαγωγή αυτών των συστημάτων είχε καθυστερήσει λόγω της εμφάνισης των ενισχυτών οπτικών ινών το 1989.

Η τέταρτη γενιά οπτικών συστημάτων χρησιμοποιεί την οπτική ενίσχυση για αύξηση της απόστασης μεταξύ επαναληπτών και πολυπλεξία με διαίρεση του μήκους κύματος (WDM) για αύξηση του

ρυθμού μετάδοσης. Σε τέτοια συστήματα, οι απώλειες οπτικών ινών αντισταθμίζονται περιοδικά με τη χρήση ενισχυτών οπτικών ινών εμπλουτισμένες με έρβιο, οι οποίοι τοποθετούνται σε αποστάσεις 60-100 Km.. Το 1991, ένα πείραμα έδειξε τη δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων (data) σε αποστάσεις πάνω από 21.000 Km με ρυθμούς 2.5 Gb/s και σε αποστάσεις πάνω από 14.300 Km με ρυθμούς 5 Gb/s χρησιμοποιώντας μία διάταξη βρόχου. Αυτή η απόδοση έδειξε ότι ένα υποθαλάσσιο σύστημα μετάδοσης, εξ' ολοκλήρου οπτικό και με ενισχυτές πάνω σε ένα οπτικό υποθαλάσσιο σύστημα μετάδοσης μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για διεπειρωτικές επικοινωνίες. Το 1996, όχι μόνο μετάδοση πάνω από 11.300 Km με ρυθμό 5 Gb/s είχε γίνει με τη χρήση υποθαλάσσιων καλωδίων, αλλά λειτούργησε και ένα εμπορικό υπερωκεάνιο καλώδιο (TPC-5).

Το Σχήμα 1.3 δείχνει ένα διεθνή δίκτυο υποθαλάσσιων οπτικών συστημάτων που λειτούργησε το 1996. Έχουν σχεδιαστεί πολλά άλλα υπερωκεάνια οπτικά συστήματα. Η ζεύξη των 27.300 Km οπτικών ινών ανά τον κόσμο (γνωστή σαν FLAG) άρχισε να λειτουργεί το 1997, συνδέοντας χώρες της Ασίας και της Ευρώπης σε 5 Gb/s με αρκετά τμήματα να λειτουργούν στα 10 Gb/s.



Σχήμα 1.6 Εξωτερικό οπτικής ίνας.

Ένα άλλο δίκτυο οπτικών ινών, γνωστό σαν *Africa One*, θα κυκλώσει την Αφρικανική ήπειρο και θα καλύψει μία συνολική απόσταση μετάδοσης περίπου 35.000 Km. Ξεκάθαρα πλέον, η τέταρτη γενιά συστημάτων έχει προκαλέσει επανάσταση στην τεχνική των οπτικών συστημάτων. Το χαρακτηριστικό γνώρισμα των οπτικών συστημάτων της τέταρτης γενιάς είναι η αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος με τη μετάδοση πολλών καναλιών μέσω της τεχνικής WDM. Οι οπτικοί ενισχυτές είναι ιδανικοί για πολυκαναλικά συστήματα οπτικών επικοινωνιών αφού όλα τα κανάλια μπορούν να ενισχυθούν ταυτόχρονα χωρίς να απαιτείται αποπολυπλεξία ξεχωριστών καναλιών. Σε μία επίδειξη το 1996, είκοσι κανάλια 5 Gb/s μεταδόθηκαν σε απόσταση πάνω από 9100 Km σε μια διάταξη ανακυκλωμένου βρόχου, με αποτέλεσμα ένα ολικό ρυθμό μετάδοσης 100 Gb/s, ενώ το γινόμενο BL (ρυθμό μετάδοσης \* απόσταση) ήταν 910 (Tb/s) - Km. Σε μία άλλη πειραματική καταχώρηση,

επιτεύχθηκε συνολικός ρυθμός μετάδοσης 1.1 Tb/s με πολυπλεξία 55 καναλιών που το καθένα λειτουργούσε με 20 Gb/s. Παρά τη χρήση τεχνικών αποφυγής της διασποράς, τα φαινόμενα διασποράς περιόρισαν την ολική απόσταση μετάδοσης σε 150 Km. Εμπορικά συστήματα WDM που λειτουργούσαν με ρυθμό μετάδοσης μέχρι 40 Gb/s διατέθηκαν στο τέλος του 1996. Ένα μεγάλο σύστημα που διέσχιζε τον Ειρηνικό (TPC-6) και λειτουργούσε στα 100 Gb/s σχεδιάστηκε για να αρχίσει να λειτουργεί το έτος 2000. Το γινόμενο ρυθμού μετάδοσης bit\*απόσταση για ένα τέτοιο σύστημα υπερβαίνει τα 900 (Tb/s)-Km, δείχνοντας την πρόοδο που πραγματοποιήθηκε μέσα σε μία περίοδο 20 ετών.

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



**Σχήμα 1.7** Διεθνές υποθαλάσσιο δίκτυο συστημάτων επικοινωνιών με οπτικές ίνες όπως διαμορφώνεται κατά το τέλος του 1996.

Μία τελική λύση βασίζεται στην πρωτότυπη ιδέα των οπτικών σολιτονίων, οπτικών παλμών που συντηρούν το σχήμα τους κατά τη διάρκεια της μετάδοσης σε μία οπτική ίνα με απώλειες αντισταθμίζοντας την επίδραση της διασποράς μέσω της μη γραμμικότητας της οπτικής ίνας. Παρόλο που η βασική ιδέα προτάθηκε αρκετά νωρίς, το 1973, μόνο το 1988 ένα εργαστηριακό πείραμα απέδειξε τη μετάδοση δεδομένων (data) σε απόσταση πάνω από 4.000 Km αντισταθμίζοντας τις απώλειες της οπτικής ίνας λόγω εξαναγκασμένης σκέδασης Raman. Για την ενίσχυση των σολιτονίων,

χρησιμοποιήθηκαν ενισχυτές οπτικών ινών εμπλουτισμένοι με έρβιο μετά το 1989. Από τότε, πολλά πειράματα συστημάτων έχουν αποδείξει την προφανή δυναμική των συστημάτων επικοινωνίας με σολιτόνια. Από το 1994, μεταδόθηκαν σε αποστάσεις πάνω από 35.000 Km με ρυθμό 10 Gb/s και πάνω από 24.000 Km με ρυθμό 15 Gb/s. Το 1996, σε ένα πείραμα ανακυκλωμένου βρόχου, η μετάδοση σολιτονίου έγινε σε απόσταση 9.400 Km με ρυθμό 70 Gb/s πολυπλέκοντας επτά κανάλια των 10 Gb/s το καθένα. Παρόλο που η τεχνολογία της επικοινωνίας με οπτικές ίνες καλύπτει μόνο δύο δεκαετίες έχει εξελιχθεί ραγδαία και έχει φθάσει σε ένα συγκεκριμένο στάδιο ωρίμανσης.

---

---

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

---

---

1. 1982.*just the Facts*. New Jersey: Corning, Incorporated. Palladino, John R. 1990. *Fiber Optics: Communicating By Light*. Piscataway,NJ: Bellcore
2. 1982. *Designers Guid to Fiber Optics*. Harrisburg, PA: AMP, Incorporated. Hecht, Jeff. 1993 *Understanding Fiber Optics*. 2<sup>nd</sup> edition. Indianapolis, IN: Sams Publishing.
3. <http://www.fiber-optics.info>
4. <http://www.mrfiber.com>
5. <http://www.networkcomputing.de>
6. <http://www.ap.stmarys.ca>

---

---

## ***ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.***

---

---

# ***ΟΠΤΙΚΕΣ ΊΝΕΣ***

*Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται λόγος για τη φύση του φωτός,, τον τρόπο της μετάδοσης του μέσα στην οπτική ίνα ,άλλα και στη βασική αρχή λειτουργίας της οπτικής ίνας, ενώ τέλος αναδεικνύονται και τα είδη της.*

---

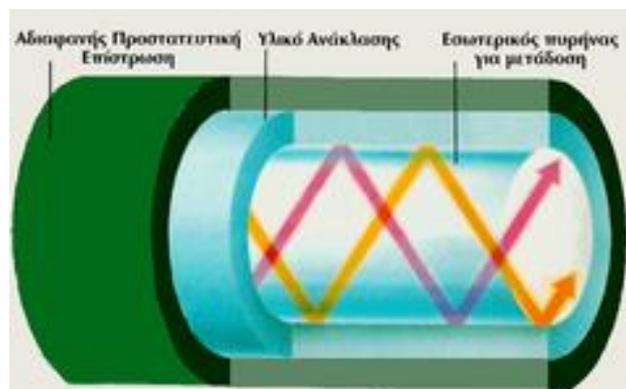
## 2.1 Η Φύση του Φωτός

Ήδη από το 16<sup>ο</sup> -17<sup>ο</sup> αιώνα το φως θεωρείτο είτε σαν σωματίδιο είτε σαν κύμα- αν και για την εποχή εκείνη τα δύο μοντέλα ήταν ασύμβατα. Τον εικοστό αιώνα έγινε ξεκάθαρο ότι το φως μπορεί να θεωρηθεί είτε σαν κύμα είτε σαν σωματίδιο, αν και δεν ήταν ακριβώς ούτε το ένα ούτε το άλλο ενώ τη λύση τελικά έδωσε η θεωρία της κβαντικής ηλεκτροδυναμικής.

Η μελέτη του φωτός σαν κύμα επιτρέπει κάποιες προσεγγίσεις στις οποίες το μήκος κύματος θεωρείται ότι είναι αμελητέο μέγεθος σε σχέση με τις διαστάσεις του οπτικού συστήματος. Η προσέγγιση αυτή καλείται προσέγγιση γεωμετρικής οπτικής. Το επιστημονικό πεδίο το οποίο εξετάζει την κυματική φύση του φωτός είναι γνωστό σαν φυσική οπτική, θα μπορούσε λοιπόν κανείς να πει ότι:

$$\lim_{\lambda \rightarrow 0} \{\text{physical optics}\} = \{\text{geometrical optics}\} \quad (2.1)$$

**Εγκάρσια κύματα** είναι εκείνα που κάθε σωματίδιο του μέσου διάδοσης ταλαντεύονται κατά διεύθυνση κάθετη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Η ηλεκτρομαγνητική θεωρία παραδέχεται ότι τα δύο πεδία ηλεκτρικό και μαγνητικό είναι κάθετα μεταξύ τους και προς τη διεύθυνση διάδοσης και κατά συνέπεια ότι το φως είναι ένα εγκάρσιο κύμα.



Σχήμα 2.1 Τομή οπτικής ίνας(υλικά κατασκευής).

Ονομάζουμε **συμβολή του φωτός** το φαινόμενο κατά το οποίο, όταν σε κάποιο σημείο του χώρου συναντηθούν δύο ή περισσότερα φωτεινά κύματα, που προέρχονται από σύμφωνες φωτεινές πηγές, δημιουργούν κύμα που είναι η συνιστάμενη των περιοδικών μεταβολών που αντιστοιχούν σε αυτά (πρόσθεση των τιμών των εντάσεων του E ή του H πεδίου).

Δύο φωτεινές πηγές είναι σύμφωνες όταν εκπέμπουν κύματα της ίδιας συχνότητας και έχουν σταθερή διαφορά φάσης μεταξύ τους ( $\Delta\phi$ ).

Η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι  $c_0$ . Εντούτοις, το φως δεν ταξιδεύει με την ίδια ταχύτητα στα διάφορα μέσα. Η ταχύτητα του φωτός στα διάφορα υλικά δίνεται από τον τύπο:  $c=c_0 / n$  όπου n ονομάζεται **δείκτης διάθλασης** του μέσου.

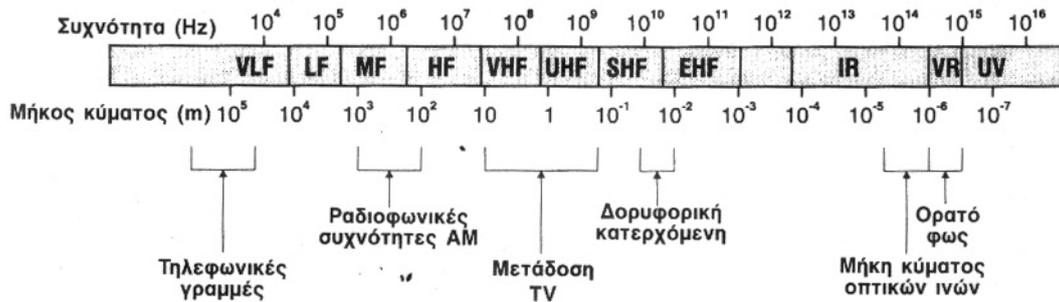
Ενδεικτικές τιμές του δείκτη διάθλασης δίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

**Πίνακας 2.1** Δείκτης διάθλασης

Μέσο	Δείκτης διάθλασης
Αέρα	1
Γυαλί	1.45

Το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος το οποίο χρησιμοποιείται στις ηλεκτρικές επικοινωνίες φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Το κανάλι μεταφοράς σε αυτό το φάσμα μπορεί να είναι millimeter και microwave κυματοδηγοί, μεταλλικά καλώδια, και ραδιοφωνικά κύματα. Ανάμεσα στα συστήματα επικοινωνίας που χρησιμοποιούν τα παραπάνω μέσα είναι το τηλέφωνο, το ραδιόφωνο AM και FM, η τηλεόραση, το CB (citizen's band radio), το radar, οι δορυφορικές συνδέσεις κλπ. Οι συχνότητες αυτών των εφαρμογών κυμαίνονται από 300 Hz μέχρι και 90 GHz.

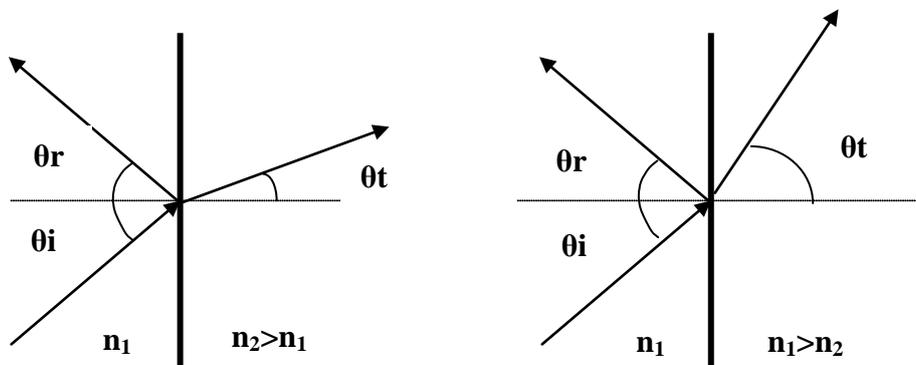
Ένα επίσης σημαντικό τμήμα του φάσματος είναι και η οπτική περιοχή για την οποία είναι προτιμότερο να αναφερόμαστε χρησιμοποιώντας το μήκος κύματος αντί για τη συχνότητα. Το οπτικό φάσμα κυμαίνεται από 50 nm (ultraviolet) μέχρι και 100  $\mu$ m (far infrared). Το ορατό φάσμα είναι από 400 – 700 nm. Σε αυτήν την περίπτωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν κυματοδηγούμενα (πχ. με τη χρήση καλωδίων ή κυματοδηγών) και μη κυματοδηγούμενα (πχ. με τη χρήση ατμοσφαιρικών καναλιών) κανάλια επικοινωνίας.



Σχήμα 2.2 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

## 2.2 Ανάκλαση και Διάθλαση στη Διαχωριστική Επιφάνεια

Ας υποθέσουμε ότι ένα επίπεδο ηλεκτρομαγνητικό κύμα συναντά μια επιφάνεια ανάμεσα σε δύο μέσα διαφορετικών διηλεκτρικών σταθερών, με δείκτη διάθλασης  $n_1$  και  $n_2$  - σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3 Ανάκλαση και Διάθλαση στη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων.

Στο παραπάνω σχήμα ισχύουν οι εξής βασικές σχέσεις:

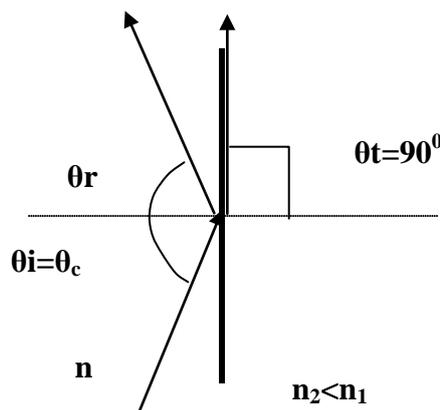
- Νόμος της ανάκλασης:  $\theta_r = \theta_i$  (2.2)

• Νόμος της διάθλασης του Snell:  $\sin\theta_t / \sin\theta_i = n_1/n_2$  (2.3)

- Εξισώσεις Fresnel ( δίνουν πληροφορίες για την ένταση, φάση και πόλωση του κύματος) - Αυτές ορίζουν τους συντελεστές ανάκλασης **R** (πηλίκο της έντασης του ανακλώμενου πεδίου ως προς την ένταση του προσπίπτοντος πεδίου), ενώ οι συντελεστές διέλευσης **T** (λόγος διαδιδόμενων προς τις προσπίπτουσες εντάσεις του φωτός) είναι: **T=1- R**.

Στην περίπτωση **κάθετης πρόσπτωσης**  $\theta_i=0$  το φως περνάει στο άλλο μέσο και όλες οι ακτίνες είναι συγγραμμικές.

Στην περίπτωση που  $n_1 > n_2$  – σχήμα 2.3 – καθώς αυξάνει η  $\theta_i$  παίρνει μια τιμή στην οποία η  $\theta_t = 90^\circ$  και η διαδιδόμενη ακτίνα κατευθύνεται κατά μήκος της διαχωριστικής επιφάνειας.



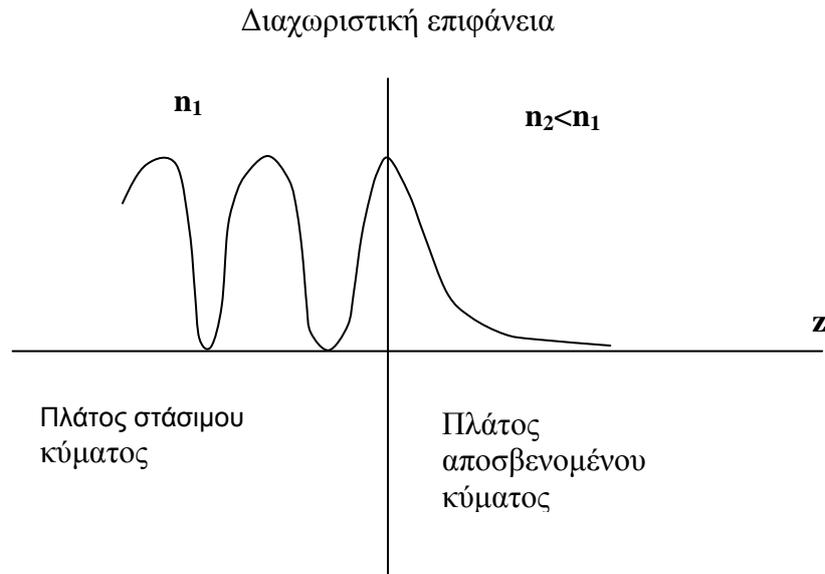
Σχήμα 2.4 Κρίσιμη γωνία.

Η τιμή αυτή της  $\theta_i$  λέγεται **κρίσιμη γωνία** και για αυτήν ισχύει:

$$\sin\theta_c = n_2/n_1 \tag{2.4}$$

Για κάθε  $\theta_i \geq \theta_c$  οι εξισώσεις Fresnel δίνουν **R=|P|^2=1**. Τότε στο εσωτερικό της ίνας για έχουμε **ολική ανάκλαση (~100%) προς τα μέσα**.

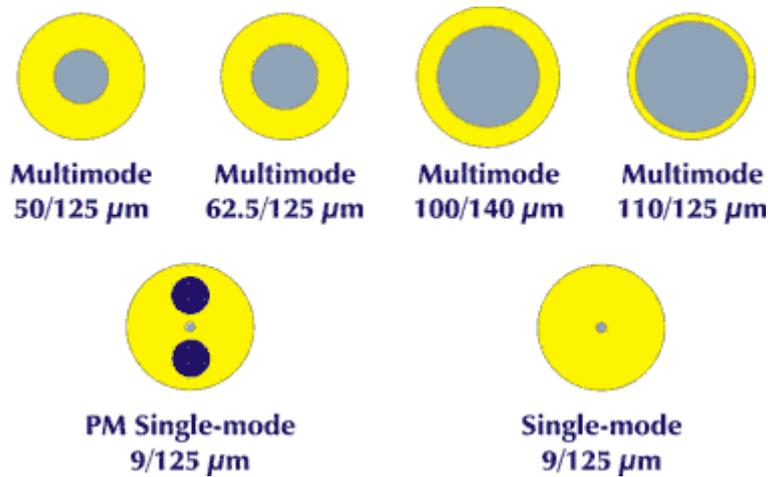
Για γωνίες  $\theta_i \geq \theta_c$  οι οριακές συνθήκες για τα E και H απαιτούν, αν και θα έχουμε τέλεια ανάκλαση, ένα μέρος του κύματος να υφίσταται και προς τα δεξιά της διαχωριστικής επιφάνειας (συνθήκες συνέχειας των πεδίων – εξισώσεις του Maxwell). Το σχήμα 2.5 δείχνει από τα αριστερά της διαχωριστικής επιφάνειας τη δημιουργία του στάσιμου κύματος από την επαλληλία των δύο κυμάτων που διαδίδονται αντίθετα το ένα προς το άλλο αλλά και το αποσβεσμένο κύμα (Evanescent wave) από τα δεξιά. Στο αποσβεσμένο κύμα η ένταση εξασθενεί με την απόσταση z αμέσως μετά τη διαχωριστική επιφάνεια.



**Σχήμα 2.5** Στάσιμο και αποσβεσμένο κύμα στη διαχωριστική επιφάνεια.

## 2.3 Οπτικές Ϊνες

Ο όρος οπτική ίνα αναφέρεται σε κάθε συσκευή που έχει τη δυνατότητα μετάδοσης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, στο ορατό ή κοντά στο ορατό φάσμα συχνοτήτων, κατά μήκος του άξονα της. Οι οπτικές ίνες[1] είναι εξαιρετικά πολύ λεπτά νήματα κατασκευασμένα συνήθως από μεγάλης καθαρότητας γυαλί (διοξείδιο του πυριτίου,  $\text{SiO}_2$ ) σχεδιασμένες να μεταφέρουν το φως από το ένα άκρο τους στο άλλο. Υπάρχει ένας κεντρικός κυλινδρικός πυρήνας (core), μέσα στο οποίο πρέπει να περιοριστεί το οπτικό πεδίο, ο οποίος περιβάλλεται από το μανδύα (cladding) με δείκτη διάθλασης χαμηλότερο από εκείνον του πυρήνα που με τη σειρά του περιβάλλεται από ένα προστατευτικό περίβλημα (jacket).



Σχήμα 2.6 Είδη ίνας.

Μια πρώτη κατηγοριοποίηση στις οπτικές ίνες γίνεται σύμφωνα με το υλικό κατασκευής τους. Η κατηγοριοποίηση ως προς το υλικό κατασκευής δίδει :

### 2.3.1 Εξ' ολοκλήρου γυάλινες οπτικές ίνες

Αποτελούν το κυριότερο είδος οπτικών ινών στις τηλεπικοινωνίες και ως εκ τούτου θα αποτελέσουν το κύριο αντικείμενο αναφοράς. Τόσο ο πυρήνας, όσο και ο μανδύας, είναι κατασκευασμένα από συνθετικό γυαλί (με το εμπορικό όνομα quartz), υψηλής καθαρότητας σε διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ), στο οποίο έχουν προστεθεί κατάλληλες προσμίξεις, προκειμένου να επιτευχθεί η επιδιωκόμενη διάφορα στο δείκτη διάθλασης πυρήνα και μανδύα. Πιο συνηθισμένοι τύποι προσμίξεων είναι :

- Το **γερμάνιο (Ge)** και ο **φώσφορος (P)** που χρησιμοποιούνται κυρίως στον πυρήνα, αυξάνοντας το δείκτη διάθλασης του γυαλιού .
- Το **βόριο (B)** και το **φθόριο (F)** που χρησιμοποιούνται κυρίως στο μανδύα, μειώνοντας το δείκτη διάθλασης του γυαλιού .

### 2.3.2 Ϊνες γυάλινου πυρήνα και πλαστικού μανδύα (Plastic Clad Silica-PCS)

Χρησιμοποιούνται κυρίως για μεταφορά φωτός και εικόνας σε μικρές αποστάσεις σε εξειδικευμένες εφαρμογές (ενδοσκοπήσεις). Η χρήση τους σήμερα φθίνει και τείνουν να αντικατασταθούν από εξ' ολοκλήρου πλαστικές ίνες.

### 2.3.3 Εξ'ολοκλήρου πλαστικές ίνες (*Plastic Optical Fiber - POF*)

Συγκρινόμενες με τα άλλα είδη ινών παρουσιάζουν εμφανώς κατώτερες επιδόσεις, ως προς την ελάχιστη εξασθένιση (0,15 dB/m στα 650 nm) και το διαθέσιμο εύρος ζώνης, καθώς και μεγάλη ευαισθησία σε θερμοκρασιακές μεταβολές. Βρίσκουν όμως εφαρμογή στη μεταφορά φωτός (αυτοκινητοβιομηχανία), σε τοπικά δίκτυα και εσωτερικές καλωδιώσεις κτιρίων, κυρίως λόγω του πολύ χαμηλού κόστους.

## 2.4 Τρόποι Μετάδοσης Φωτός

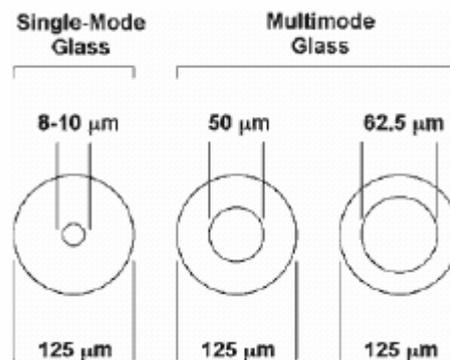
Ένας ακόμη διαχωρισμός έγκειται στον τρόπο με τον οποίο η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια κατανέμεται μέσα από μια οπτική ίνα. Ο τρόπος μετάδοσης είναι φυσική έννοια, που αναφέρεται στη μετάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσα από ένα μέσο κυματοδότησης. Στη μαθηματική του μορφή, η θεωρία των τρόπων μετάδοσης προέρχεται από τις εξισώσεις του Maxwell, που αποτελούν τη βάση της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας. Οι τρόποι μετάδοσης αποτελούν λύσεις των εξισώσεων του Maxwell, προσαρμοσμένων σε συνθήκες μετάδοσης οπτικής ακτινοβολίας σε διηλεκτρικό κυματοδηγό κυλινδρικής διατομής. Στην πράξη μια οπτική ίνα μπορεί να υποστηρίξει από 1 έως και 100.000 τρόπους μετάδοσης, ανάλογα με τις διαστάσεις της. Η κατανομή της ενέργειας στους διάφορους τρόπους μιας πολύτροπης ίνας γίνεται κατά την εισαγωγή του φωτός στην ίνα και εξαρτάται από τις συνοριακές συνθήκες. Ακόμη κι αν κάποιοι τρόποι δε διεγείρονται κατά την εισαγωγή, μετά από κάποιο μήκος μετάδοσης, μικρές κατασκευαστικές ατέλειες της ίνας, καθώς και καμπυλότητες κατά μήκος της διαδρομής, οδηγούν στη διέγερση όλων των δυνατών τρόπων μετάδοσης μέσω φαινομένων οπτικής σύζευξης. Το μήκος αυτό, γνωστό και ως «μήκος υπερπλήρωσης», είναι μερικά μέτρα για πλαστικές ίνες, ενώ για πολύτροπες γυάλινες ίνες φθάνει το ένα χιλιόμετρο .

## 2.5 Πολύτροπες ΎΓΝΕΣ

Οι πολύτροπες ίνες υποστηρίζουν περισσότερους του ενός τρόπους μετάδοσης και κατηγοριοποιούνται ως προς την κατανομή του δείκτη διάθλασης σε :

i) Βηματικής μεταβολής

ii) Βαθμιαίας μεταβολής

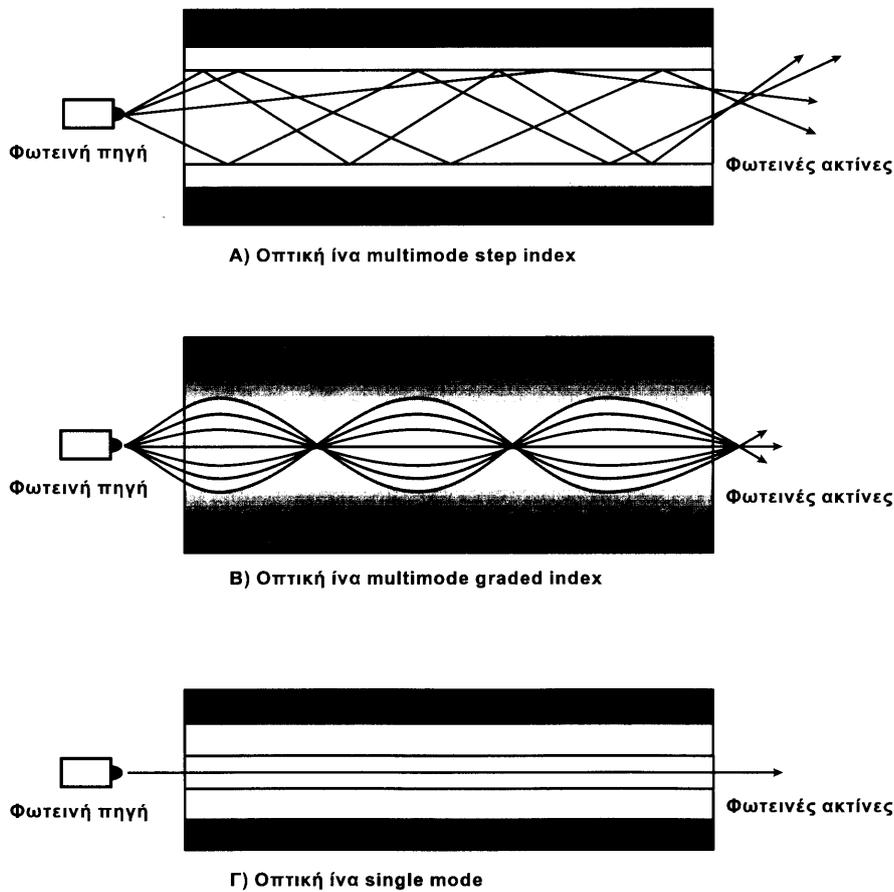


Σχήμα 2.7 Μέγεθος ινών.

### 2.5.1 ΎΓΝΕΣ βηματικού δείκτη διάθλασης

Οι πολύτροπες ίνες βηματικού δείκτη διάθλασης αποτελούν το απλούστερο είδος οπτικής ίνας, έχουν διάμετρο πυρήνα από 100 έως 970 μm και μπορεί να είναι εξ' ολοκλήρου γυάλινες, γυάλινου πυρήνα με πλαστικό μανδύα ή και εξ' ολοκλήρου πλαστικές. Επειδή κάθε τρόπος μετάδοσης κυματοδηγείται με διαφορετική γωνία ολικής ανάκλασης στην κοινή επιφάνεια πυρήνα/μανδύα, ακολουθεί διαδρομή διαφορετικού μήκους. Πιο συγκεκριμένα, ο τρόπος που κινείται κατά μήκος της οπτικής ίνας στο κέντρο του πυρήνα, γνωστός ως βασικός τρόπος, έχει τη μικρότερη διαδρομή, ενώ ο τρόπος με τη μικρότερη γωνία ολικής ανάκλασης τη μεγαλύτερη διαδρομή. Σαν αποτέλεσμα, η μεταφερόμενη από τους διαφορετικούς τρόπους ενέργεια του σήματος πληροφορίας, καταφθάνει στην έξοδο της ίνας σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, προκαλώντας παραμόρφωση του σήματος στο δέκτη, που είναι γνωστή ως διασπορά τρόπου μετάδοσης. Οι τιμές του συντελεστή διασποράς τρόπου μετάδοσης, για πολύτροπες ίνες Βηματικής μεταβολής δείκτη διάθλασης, κυμαίνονται από 15 έως 30 ns/km, περιορίζοντας το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε 60 και 30 MHz.km αντίστοιχα. Η μείωση της διασποράς τρόπου μετάδοσης αυξάνει το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Οι πολύτροπες ίνες βηματικής μεταβολής δείκτη διάθλασης δεν

χρησιμοποιούνται πλέον για μετάδοση δεδομένων και έχουν αντικατασταθεί από πολύτροπες ίνες βαθμιαίας μεταβολής δείκτη διάθλασης .



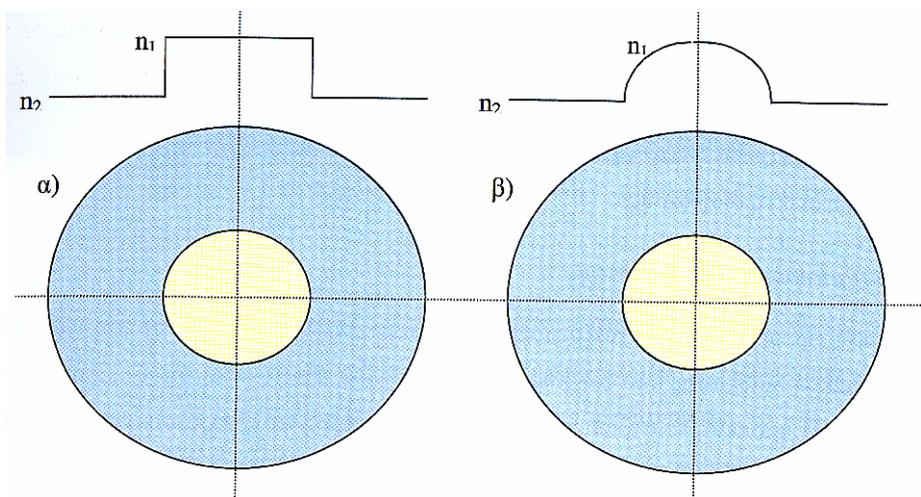
Σχήμα 2.8 Τρόποι μετάδοσης φωτός.

### 2.5.2 Ίνες βαθμιαίου δείκτη διάθλασης

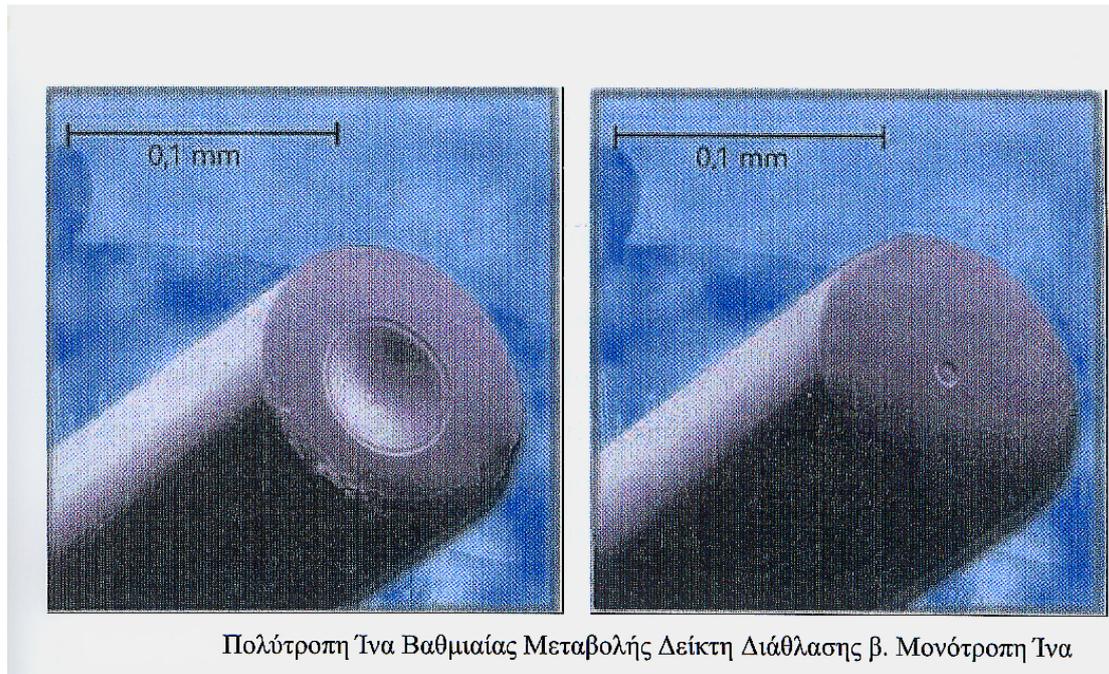
Η μείωση της διασποράς σε πολύτροπες ίνες μπορεί να επιτευχθεί με χρήση ινών βαθμιαίου δείκτη διάθλασης από τον πυρήνα στον μανδύα. Στις ίνες αυτές, ο πυρήνας αποτελείται από ομόκεντρες στρώσεις, με αυξανόμενη προς το κέντρο πυκνότητα νόθευσης που αυξάνει την τιμή του δείκτη διάθλασης σχήμα 2.10. Οι διάφοροι τρόποι μετάδοσης δεν ακολουθούν ευθύγραμμες διαδρομές εντός του πυρήνα, όπως στις ίνες βηματικής μεταβολής, αλλά καμπύλες, διαθλώμενοι συνεχώς σε κάθε στρώση, μέχρις ότου επιτευχθεί η απαιτούμενη για την κυματοδήγηση ολική ανάκλαση. Επειδή το φως κινείται με μεγαλύτερη ταχύτητα σε υλικά με μικρότερο δείκτη διάθλασης, οι τρόποι μετάδοσης, που διέρχονται μακρύτερα από το κέντρο του πυρήνα, καλύπτουν μεν μεγαλύτερη διαδρομή, κινούμενοι

όμως γρηγορότερα από άλλους, που διέρχονται κοντύτερα στο κέντρο του πυρήνα, εξισορροπούν κάπως το φαινόμενο της διασποράς τρόπου μετάδοσης.

Ως αποτέλεσμα, η διασπορά τρόπου μετάδοσης περιορίζεται σε λιγότερο από 1 ns/km. Οι ίνες βαθμιαίου δείκτη διάθλασης χρησιμοποιούνται σήμερα σε καλωδιώσεις τοπικών δικτύων, καθώς και σε δίκτυα δομημένης καλωδίωσης (κυρίως καλωδίωση κορμού). Η διάμετρος του πυρήνα έχει τυποποιηθεί σε 50, 62,5 και σπανιότερα 85  $\mu\text{m}$ , ενώ η διάμετρος του περιβλήματος σε 125  $\mu\text{m}$ . Αν και το κόστος ινών βαθμιαίας μεταβολής δείκτη διάθλασης είναι σήμερα μεγαλύτερο από το κόστος των μονότροπων ινών, η συνολική εξοικονόμηση, λόγω του χαμηλότερου κόστους των παρελκομένων (πομποδεκτών, συνδέσμων κλπ), καθιστά τη χρήση πολύτροπων ινών οικονομικότερη για καλωδιώσεις μικρού σχετικά μήκους .



**Σχήμα 2.9** α)κατανομή δείκτη διάθλασης σε πυρήνα βηματικής μεταβολής  
β)κατανομή δείκτη διάθλασης σε πυρήνα βαθμιαίας μεταβολής.



Σχήμα 2.10 Είδη Ίνας.

## 2.6 Μονότροπες Ίνες

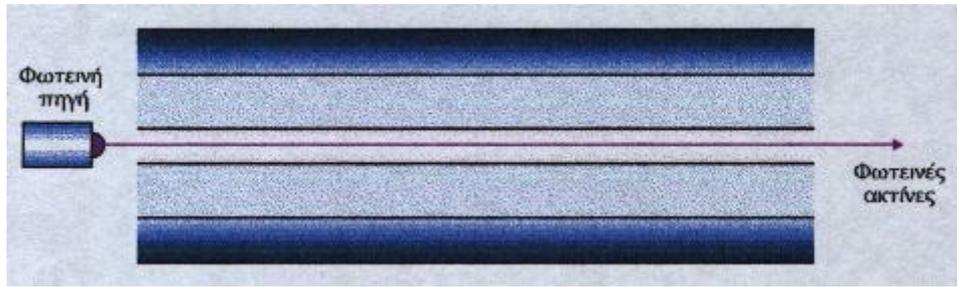
Στις μονότροπες ίνες, το φως δεν μεταδίδεται με συνεχείς ανακλάσεις στα κοινά τοιχώματα πυρήνα/μανδύα, αλλά κινείται κατά μήκος του πυρήνα. Ο τρόπος αυτός είναι γνωστός σαν **βασικός τρόπος μετάδοσης**.

Οι μονότροπες ίνες υποστηρίζουν τη μετάδοση μόνο του βασικού τρόπου, μηδενίζοντας έτσι τις επιπτώσεις της διασποράς τρόπου μετάδοσης που εμφανίζεται στις πολύτροπες ίνες. Αυτό επιτυγχάνεται με ελάττωση της διαμέτρου του πυρήνα σε τιμές κάτω των 10  $\mu\text{m}$ , ενώ για λόγους τυποποίησης, η διάμετρος του μανδύα παραμένει στα 125  $\mu\text{m}$ . Ο συσχετισμός της μονότροπης λειτουργίας με τις γεωμετρικές παραμέτρους της οπτικής ίνας, γίνεται από τον εμπειρικό τύπο :

$$V \leq 2405 \quad (2.5)$$

όπου  $V$  η κανονικοποιημένη συχνότητα της ίνας. Από τον ορισμό της παραμέτρου  $V$ , η μονότροπη λειτουργία φαίνεται ότι εξαρτάται και από το μήκος κύματος της κυματοδηγούμενης ακτινοβολίας. Οι μονότροπες οπτικές ίνες που χρησιμοποιούνται σήμερα στις τηλεπικοινωνίες, έχουν σχεδιασθεί για

λειτουργία είτε στα 1300 nm (αστικό δίκτυο) είτε στα 1550 nm (υπεραστικό δίκτυο και υποβρύχιο δίκτυο).

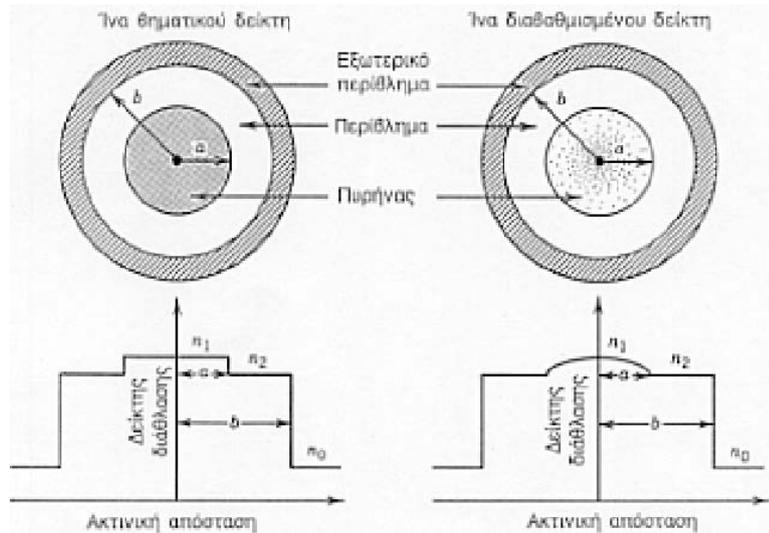


**Σχήμα 2.11** Μονότροπη οπτική ίνα.

Ως **μήκος κύματος αποκοπής** ορίζεται το μήκος κύματος, πάνω από το οποίο η οπτική ίνα συμπεριφέρεται ως μονότροπη. Υπολογίζεται από τον τύπο :

$$\lambda_{co} = 2\pi \cdot d \cdot (NA) / 2405 \quad (2.6)$$

Προκειμένου να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή διάμετρος πυρήνα,  $d$ , το μήκος κύματος λειτουργίας,  $\lambda$ , επιλέγεται να είναι λίγο μεγαλύτερο από το μήκος κύματος αποκοπής  $\lambda_{co}$ . Για παράδειγμα, σε μια ίνα που έχει σχεδιασθεί για μονότροπη λειτουργία στα 1300 nm, το μήκος κύματος αποκοπής είναι συνήθως στα 1200 nm. Στις μονότροπες ίνες, ένα σημαντικό μέρος της κυματοδηγούμενης ισχύος βρίσκεται στο μανδύα, κοντά στην κοινή επιφάνεια πυρήνα/μανδύα. Το ποσοστό αυτό αυξάνεται όταν η τιμή της παραμέτρου  $V$  μικραίνει. Για παράδειγμα, σε ίνες με παράμετρο  $V$  μικρότερη από 1,4, περισσότερο από το μισό της κυματοδηγούμενης ισχύος βρίσκεται στο μανδύα. Το είδος αυτό της κυματοδότησης είναι γνωστό σαν **χαλαρή κυματοδότηση**.



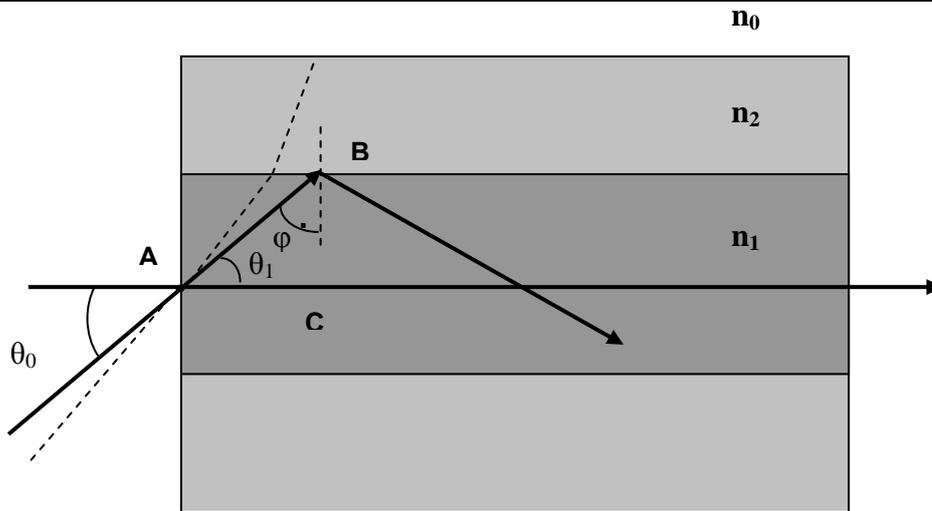
**Σχήμα 2.12** Τομή και προφίλ του δείκτη διάθλασης μιας ίνας βηματικού και μιας διαβαθμισμένου δείκτη.

Για μετάδοση με μικρή εξασθένηση, η οπτική ποιότητα του υλικού του περιβλήματος γύρω από τον πυρήνα, πρέπει να είναι αντίστοιχη με εκείνη του πυρήνα. Πρέπει επομένως να εξασφαλισθεί μανδύας υψηλής ποιότητας υλικού, πάχους περίπου 50  $\mu\text{m}$ , γύρω από τον πυρήνα. Αντίθετα, σε πολύτροπες ίνες, το ποσοστό της ισχύος στον μανδύα είναι ελάχιστο και δεν απαιτείται έτσι υψηλής ποιότητας υλικό μανδύα .

## 2.7 Βασική Αρχή Λειτουργίας της Οπτικής Ίνας

Η βασική αρχή λειτουργίας των οπτικών ινών είναι το φαινόμενο της ολικής ανάκλασης η οποία γίνεται στην εσωτερική επιφάνεια διαχωρισμού πυρήνα και μανδύα της ίνας. Με βάση όσα έχουν ειπωθεί σε προηγούμενη ενότητα η ελάχιστη γωνία για να έχω ολική ανάκλαση δίνεται από το νόμο του Snell και είναι:

$$\text{Sin } \varphi_{\min} = n_2/n_1$$



Σχήμα 2.13 Αριθμητικό άνοιγμα.

Όπως όμως φαίνεται στο σχήμα 2.13 υπάρχει μια ορισμένη γωνία αποδοχής,  $\theta_0$ , στο εσωτερικό της οποίας αν πέφτει το φως που εισέρχεται στην ίνα θα ανακλαστεί ολικά και θα διαδοθεί μέσα στον πυρήνα της. Αν η εξωτερική γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη της  $\theta_0$  τότε δεν έχουμε ολική ανάκλαση στο εσωτερικό και το φως θα περάσει στο μανδύα και θα χαθεί (διακεκομμένη γραμμή).

Οι δείκτες διάθλασης που εμπλέκονται είναι  $n_0$  του αέρα ( $=1$ ),  $n_1$  του πυρήνα και,  $n_2$  του μανδύα. Χρησιμοποιώντας το νόμο του Snell έχουμε:

$$n_0 \sin\theta_0 = n_1 \sin\theta_1 \quad (2.7)$$

$$n_0 \sin\theta_0 = n_1 \cos\phi = n_1 \sqrt{1 - \sin^2\phi} \quad (\text{από το τρίγωνο ABC}) \quad (2.8)$$

$$n_0 \sin\theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.9)$$

Συμπερασματικά μια ίνα κυκλικής διατομής, εμφανίζει έναν κώνο αποδοχής και κάθε σύζευξη φωτός με την ίνα πρέπει να είναι μέσα σε αυτόν τον κώνο. Η ποσότητα  $n_0 \sin\theta_0 = \text{numerical aperture} = \text{αριθμητικό άνοιγμα} = \text{NA}$ .

Όταν η διαφορά δ.δ. μεταξύ πυρήνα και μανδύα είναι πολύ μικρότερη από τη μονάδα και μπορούμε να αντικαταστήσουμε  $\sin\theta_0 \sim \theta_0$  (rad), οπότε προκύπτει:

$$NA = \theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \sim n_1 \sqrt{2\Delta} \quad \text{όπου} \quad \Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2.10)$$

$$\text{Πχ. } n_1 = 1.45, 1\% \text{ διαφορά δ.δ.} \Rightarrow NA \approx 0.21 \text{ rad ή } 12^\circ \quad (2.11)$$

Το φως εισάγεται στην ίνα χρησιμοποιώντας είτε συμβατικό φακό ή ένα φακό διαβαθμισμένου δ.δ. (Graded index lens=GRIN)

Στο φακό GRIN συνήθως χρησιμοποιείται ένα τμήμα μιας πολύτροπης ίνας διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης που δημιουργεί τις προϋποθέσεις για σύγκλιση των ακτινών στην ίνα. Οι φακοί GRIN είναι μικροί σε μέγεθος (2 mm).

## 2.8 Λόγοι Απώλειας Σήματος στις Οπτικές Ϊνες

Όπως και σε κάθε άλλη περίπτωση μεταφοράς σήματος μέσα από παντός τύπου γραμμές, έτσι και στην οπτική ίνα έχουμε απώλεια σήματος. Οι απώλειες αυτές του σήματος οφείλονται κυρίως στους παρακάτω λόγους[2].

### 2.8.1 Εξασθένηση

Οι απώλειες εξασθένησης είναι μια λογαριθμική σχέση μεταξύ της *εξερχόμενης οπτικής ισχύος* και της *εισερχόμενης οπτικής ισχύος* σε ένα σύστημα οπτικής ίνας. Είναι ένα μέτρο της αποδυνάμωσης της έντασης του σήματος, ή απώλεια της ισχύος του φωτός που συμβαίνει καθώς οι παλμοί του φωτός διαδίδονται κατά μήκος της ίνας. Η αποδυνάμωση κατά μήκος της ίνας είναι εκθετική και μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$P(z) = P_0 \exp(-a'z) \quad (2.12)$$

όπου:

$P(z)$  = η οπτική ισχύς σε απόσταση  $z$  από την είσοδο.

$P_0$  = η οπτική ισχύς στην είσοδο της ίνας.

$a'$  = συντελεστής εξασθένησης της ίνας, [1/km].

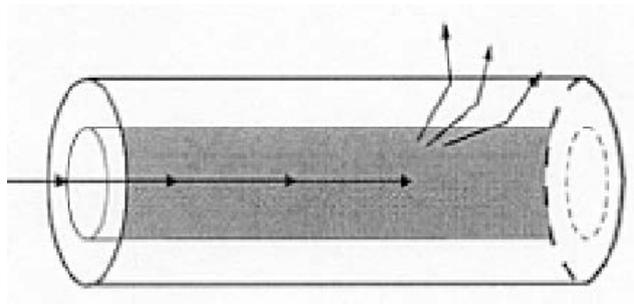
Οι μηχανικοί συνήθως μετρούν την εξασθένηση σε decibels, για αυτό η εξίσωση μπορεί να ξαναγραφεί χρησιμοποιώντας  $\alpha = 4.343a'$ , από την μετατροπή βάσης από βάση  $e$  σε βάση 10.

$$\begin{aligned}
 P(z) &= P_0 \cdot 10^{-\alpha z} \\
 \log P(z) &= -\alpha z / \log 10 + \log P_0 \\
 \alpha &= \alpha_{\text{σκέδασης}} + \alpha_{\text{απορρόφησης}} + \alpha_{\text{αλυσισμού}}
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

όπου:

$\alpha$  = απώλειας ίνας, [dB/km]

Η εξασθένηση στην οπτική ίνα προκαλείται από πολλούς εσωτερικούς και εξωτερικούς παράγοντες. Δύο εσωτερικοί παράγοντες είναι η σκέδαση και η απορρόφηση.

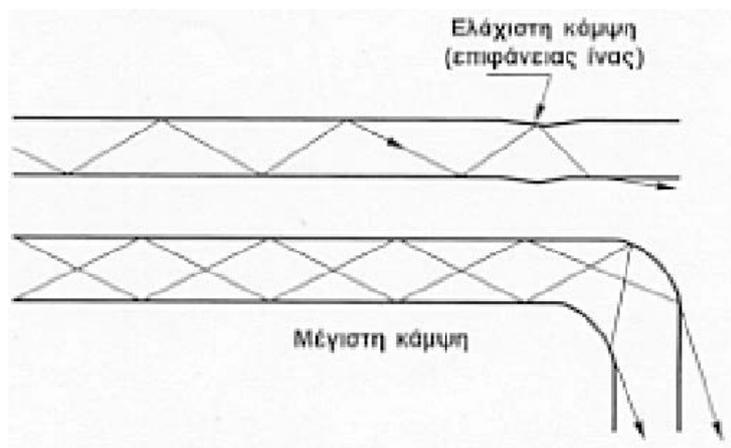


**Σχήμα 2.14** Σκέδαση

Ο πιο κοινός τρόπος σκέδασης, ή *σκέδαση Rayleigh*, προκαλείται από μικροσκοπικές ανομοιομορφίες στην οπτική ίνα. Αυτές οι ανομοιομορφίες αναγκάζουν τις ακτίνες φωτός να διασκορπιστούν κατά ένα μέρος, καθώς μεταδίδονται μέσα στην ίνα, με αποτέλεσμα κάποια ενέργεια φωτός να χάνεται. Η σκέδαση κατά Rayleigh αντιπροσωπεύει τον ισχυρότερο μηχανισμό εξασθένησης στις πιο σύγχρονες οπτικές ίνες, περίπου το 90% της ολικής εξασθένησης μπορεί να αποδοθεί σε αυτόν. Σημαντικό είναι όταν το μέγεθος της σύνθεσης του γυαλιού είναι συγκρίσιμο με το μέγεθος του μήκους κύματος φωτός με το οποίο μεταδίδεται στο γυαλί. Έτσι, όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος, τόσο λιγότερο επηρεάζεται. Ο *συντελεστής εξασθένησης* ( $\alpha$ ) ελαττώνεται καθώς το μήκος κύματος ( $\lambda$ ) αυξάνεται και είναι ανάλογο προς  $\lambda^{-4}$ . Η σκέδαση κατά Rayleigh αυξάνεται πολύ σε μικρά μήκη κύματος.

Η απορρόφηση μπορεί να προκληθεί από τη μοριακή δομή του υλικού από προσμίξεις στην ίνα, όπως μεταλλικά ιόντα και ιόντα  $\text{OH}^-$  (νερό) και ατομικά σφάλματα όπως ανεπιθύμητα οξειδωμένα μέταλλα στη σύνθεση του γυαλιού. Αυτές οι ακαθαρσίες απορροφούν την οπτική ενέργεια και την μετατρέπουν σε ένα μικρό ποσό θερμότητας. Στα μήκη κύματος 1,25 και 1,39  $\mu\text{m}$  συμβαίνουν οπτικές απώλειες εξαιτίας της παρουσίας ιόντων  $\text{OH}$  στην ίνα. Πάνω από 1,7  $\mu\text{m}$  μήκος κύματος, το γυαλί αρχίζει να απορροφά ενέργεια φωτός εξαιτίας του μοριακού συντονισμού του μορίου  $\text{SiO}_2$ .

Εξωτερικοί παράγοντες εξασθένησης, περιλαμβάνουν παραγόμενες τάσεις καλωδίων, περιβαλλοντολογικές επιδράσεις και φυσικές κάμψεις της ίνας. Οι φυσικές κάμψεις μιας ίνας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: Στις *μικροκάμψεις* και στις *μακροκάμψεις* (βλ. σχήμα 16). Η μικροκάμψη είναι το αποτέλεσμα των μικροσκοπικών ατελειών στη γεωμετρία της ίνας. Αυτές οι ατέλειες μπορεί να είναι περιστροφικές ασυμμετρίες, αλλαγές στη διάμετρο του πυρήνα, ισχυρά εμπόδια μεταξύ του πυρήνα και του περιβλήματος αποτέλεσμα της κατασκευής, ή μηχανική τάση, πίεση ή στρόφη. Οι μακροκάμψεις αφορούν τις κυρτότητες της ίνας με διαμέτρους της τάξης των cm.

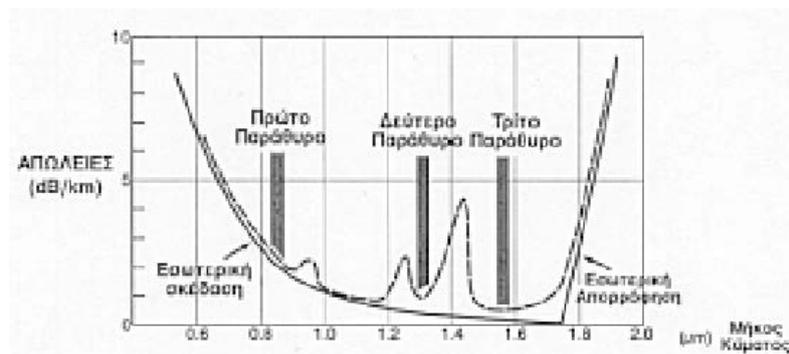


Σχήμα 2.15 Κάμψη.

Το ποσό εξασθένησης που προκαλείται από μια οπτική ίνα καθορίζεται από το μήκος της και το μήκος κύματος φωτός καθώς ταξιδεύει μέσα στην ίνα. Υπάρχουν επίσης και πολλοί δευτερεύοντες και τριτεύοντες παράγοντες που συνεισφέρουν. Το σχήμα 2.16 δείχνει την απώλεια ανά μονάδα μήκους μιας τυπικής σύγχρονης ίνας. Το σχήμα καλύπτει μήκη κύματος 0,5 $\mu\text{m}$  -1,9  $\mu\text{m}$ . Σαν σημείο αναφοράς, το ανθρώπινο μάτι βλέπει φως εύρους 0,4 $\mu\text{m}$  (μπλε)- 0,7 $\mu\text{m}$  (κόκκινο). Οι περισσότερες σύγχρονες

μεταδόσεις οπτικής ίνας γίνονται σε μήκη κύματος μεγαλύτερα από το κόκκινο, στην υπέρυθη περιοχή. Υπάρχουν τρεις σημαντικές περιοχές μηκών κύματος οπτικών ινών 850nm, 1300nm και 1550nm. Αυτά τα συγκεκριμένα μήκη κύματος επιλέχθηκαν γιατί η απώλεια της ίνας είναι χαμηλότερη σ' αυτά τα μήκη κύματος.

Σε μεγαλύτερα μήκη κύματος, η απορρόφηση κυριαρχεί καθώς τα μόρια του γυαλιού αρχίζουν να συντονίζονται. Στο μεταξύ σημαντική είναι και η απορρόφηση από προσμίξεις. Η στικτή γραμμή στο σχήμα 2.16 δείχνει περίπου τη θέση της απορρόφησης που προκαλείται από τα ιόντα  $\text{OH}^-$ . Αυτή είναι συνήθως η πιο βλαβερή πρόσμιξη στην ίνα. Το σχήμα δείχνει ότι στην πραγματικότητα υπάρχουν τέσσερις διακυμάνσεις. Η περιοχή 850nm, που ονομάζεται **πρώτο παράθυρο**, ήταν η πρώτη που εκμεταλλεύτηκε ευρέως εξαιτίας της LED και της ανιχνευτικής τεχνολογίας που ήταν διαθέσιμη εκείνη την εποχή. Η περιοχή 1300nm, το **δεύτερο παράθυρο**, είναι πολύ δημοφιλής σήμερα εξαιτίας των δραματικά χαμηλών απωλειών, που θα αναλυθεί ακολούθως, και της χαμηλότερης διασποράς σ' αυτό το μήκος κύματος. Η περιοχή 1550nm, το **τρίτο παράθυρο**, χρησιμοποιείται γενικά σε περιπτώσεις όπου η χρήση των επαναληπτών απαιτείται αλλιώς σε συνδυασμό με άλλα μήκη κύματος όπως σε ένα σύστημα πολυπλεξίας με διαίρεση του μήκους κύματος. Ένας καλός κανόνας είναι ότι η απόδοση και το κόστος αυξάνονται όσο αυξάνεται το μήκος κύματος. Χρησιμοποιείται επίσης ένα τέταρτο μήκος κύματος 780nm. Χαμηλού κόστους lasers σ' αυτό το μήκος κύματος κατασκευάζονται σε μεγάλες ποσότητες πράγμα που τους κάνει πολύ οικονομικούς.



**Σχήμα 2.16** Οπτική Απώλεια σε συνάρτηση με το μήκος κύματος.

## 2.8.2 Διασπορά

*Διασπορά* είναι ο τεχνικός όρος για τη διεύρυνση των παλμών φωτός, καθώς ταξιδεύουν μέσα στην οπτική ίνα. Η διασπορά περιορίζει το εύρος ζώνης στην οπτική ίνα, ελαττώνοντας την ποσότητα των πληροφοριών που μπορεί να μεταφέρει η ίνα. Υπάρχουν διάφορες φυσικές αιτίες της διασποράς στις ίνες. Οι πιο βασικές είναι:

### 2.8.2.1 Πολύτροπη διασπορά

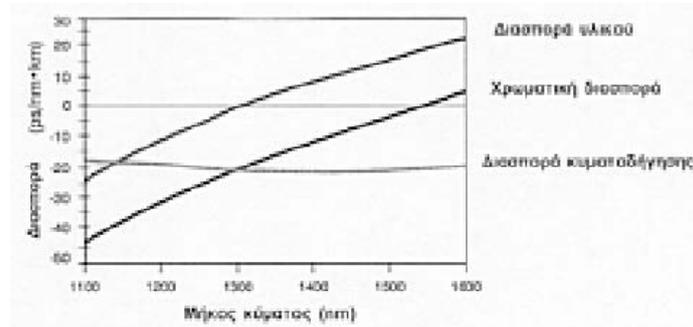
Η *πολύτροπη διασπορά* περιγράφει τη διεύρυνση του παλμού στις πολύτροπες ίνες που προκαλείται από τους διάφορους τρόπους μετάδοσης, με διαφορετικές ταχύτητες μέσα στην ίνα. Αυτός ο τύπος διασποράς ονομάζεται μερικές φορές *διασπορά στον τρόπο* επειδή είναι χαρακτηριστικό μόνο μιας πολύτροπης ίνας. Η πολύτροπη διασπορά μπορεί να ελαττωθεί με τρεις τρόπους:

1. Χρησιμοποιώντας ίνα μικρότερης διαμέτρου πυρήνα ώστε να ελαττωθούν οι τρόποι μετάδοσης μέσα από την ίνα.
2. Χρησιμοποιώντας ίνα διαβαθμισμένου δείκτη. Όπως αναφέρθηκε, ίνες διαβαθμισμένου δείκτη χρησιμοποιούν διαφορετικούς δείκτες διάθλασης στην ίνα ώστε όλοι οι τρόποι να φτάνουν στο τέλος της μαζί.
3. Χρησιμοποιώντας μονότροπη ίνα. Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες αυτή η επιλογή εξαλείφει την πολύτροπη διασπορά.

### 2.8.2.2 Χρωματική Διασπορά

Η *χρωματική διασπορά* αντιπροσωπεύει το γεγονός ότι διαφορετικά χρώματα ή μήκη κύματος διάδοσης, μεταδίδονται σε διαφορετικές ταχύτητες ακόμα και στον ίδιο τρόπο. Η χρωματική διασπορά είναι αποτέλεσμα της υλικής διασποράς, κυματοδηγούμενης διασποράς και κατανεμημένης διασποράς. Στο σχήμα 18 παρακάτω φαίνεται η χρωματική διασπορά μαζί με τις άλλες συνιστώσες της κυματοδηγούμενης διασποράς και διασποράς υλικού. Σε αυτό παράδειγμα, η χρωματική διασπορά μηδενίζεται σε ένα μήκος κύματος κοντά στα 1550nm. Αυτό είναι χαρακτηριστικό ίνας μετατοπισμένης

διασποράς. Η κοινή μονότροπη ίνα ή πολύτροπη έχει διασπορά 0 σε μήκος κύματος 1300nm. Σε αυτό το μήκος κύματος, η κυματοδηγούμενη διασπορά είναι μικρή. Σήμερα μπορεί να κατασκευαστεί ίνα μετατοπισμένης διασποράς όπου το ελάχιστο της εξασθένησης βρίσκεται στο 1.5 μm ή ακόμη και ίνα πεπλατυσμένης διασποράς στην οποία το δ μεταβάλλεται πιο αργά με το λ από ότι σε μια κανονική ίνα.



Σχήμα 2.17 Χρωματική διασπορά.

### 2.8.3 Διασπορά Υλικού

Διαφορετικά μήκη κύματος μεταδίδονται με διαφορετικές ταχύτητες σε μια ίνα, ακόμα με τον ίδιο τρόπο. Ξέρουμε ότι ο δείκτης διάθλασης (n) δίδεται από τη σχέση:

$$n = c/v \tag{2.14}$$

όπου:

c = η ταχύτητα φωτός στο κενό

v = η ταχύτητα του ίδιου μήκους κύματος στο υλικό.

Κάθε μήκος κύματος μεταδίδεται με διαφορετική ταχύτητα μέσα σ' ένα υλικό. Αυτό αλλάζει τις τιμές v στην εξίσωση για κάθε μήκος κύματος. Η διασπορά που προκαλείται από αυτό το φαινόμενο ονομάζεται *διασπορά υλικού*.

Η διασπορά υλικού επηρεάζει αρκετά τις μονότροπες ίνες. Στις πολύτροπες ίνες, η πολύτροπη διασπορά αντικαθιστά την διασπορά υλικού όσο αφορά το αποτέλεσμα που έχει στο σύστημα.

### 2.8.4 Διασπορά Κυματοδηγού

Η διασπορά κυματοδηγού ορίζεται ως η εξάρτηση από το μήκος κύματος ενός δεδομένου τρόπου λόγω του σχήματος και του προφίλ του δείκτη διάθλασης κατά μήκος μιας διαμέτρου της περιοχής κυματοδότησης. Ελέγχοντας το δείκτη διάθλασης στα όρια πυρήνα – μανδύα καθώς και το προφίλ του στο εσωτερικό του πυρήνα μπορούμε να επιτύχουμε διάφορες χαρακτηριστικές διασποράς κυματοδηγού. Οι πρακτικές μονότροπες ίνες σχεδιάζονται ώστε η διασπορά υλικού και η κυματοδηγούμενη να αλληλοαναιρούνται στο μήκος κύματος που θέλουμε.

### 2.8.5 Η Απορρόφηση

Το φως απορροφάται από το υλικό μετάδοσης και η ενέργειά του μετατρέπεται σε θερμότητα. Δυο μορφές απορρόφησης εμφανίζονται σε γυάλινες οπτικές ίνες :

A) Η απορρόφηση από ξένες μοριακές δομές στο διοξείδιο του πυριτίου, όπως υδροξύλια ( $\text{OH}^-$ ), ιόντα σιδήρου ( $\text{Fe}^{3+}$ ), χαλκού ( $\text{Cu}^{2+}$ ), νικελίου ( $\text{Ni}^{2+}$ ) και χρωμίου ( $\text{Cr}^{3+}$ ). Οι σύγχρονες μέθοδοι παραγωγής οπτικών ινών, ελέγχουν αποτελεσματικά την παρουσία των περισσότερων από τα ανωτέρω στοιχεία, περιορίζοντας την εξασθένηση λόγω απορρόφησης αυτής της μορφής.

B) Η απορρόφηση υπέρυθρης ακτινοβολίας που οφείλεται σε ταλάντωση των δομικών στοιχείων του υλικού της ίνας, όπως οι δεσμοί Si-O (9,2  $\mu\text{m}$ ), P-O (8,1  $\mu\text{m}$ ), B-O (7,2  $\mu\text{m}$ ) και Ge-O (11,0  $\mu\text{m}$ ) εντός του γυαλιού. Για μήκη κύματος άνω του 1,7  $\mu\text{m}$ , οι σωρευτικές επιδράσεις στις ανωτέρω φασματικές περιοχές απορρόφησης, προξενούν εξασθένηση του οπτικού σήματος.

Σε μονότροπες ίνες, η μεταβολή της εξασθένησης σαν συνάρτηση του μήκους κύματος όπως διαμορφώνεται από την επίδραση των μηχανισμών σκέδασης και απορρόφησης, ορίζει δυο περιοχές λειτουργίας, στα 1300 nm και 1550 nm, με τιμές απόσβεσης 0,35dB και 0,21 dB αντίστοιχα. Η αύξηση της εξασθένησης που παρατηρείται στα 1400nm, διαχωρίζοντας τις δυο αυτές περιοχές, οφείλεται σε απορρόφηση από ιόντα  $\text{OH}^-$ , που δεν είναι δυνατόν να ελεγχθούν πλήρως, ακόμη και σε γυαλί πολύ υψηλής καθαρότητας. Οι φασματικές περιοχές, που αντιστοιχούν στα ελάχιστα της εξασθένησης, είναι γνωστές και σαν “ παράθυρα ” λειτουργίας. Έτσι λειτουργία στο δεύτερο παράθυρο, υπονοεί μήκος κύματος 1300nm, ενώ στο τρίτο παράθυρο, το μήκος κύματος είναι 1500nm. Ως πρώτο παράθυρο νοείται η περιοχή των 850nm, με εξασθένηση περίπου 2,5dB/km, που δεν χρησιμοποιείται πλέον στις τηλεπικοινωνίες.

Η επιλογή του παραθύρου λειτουργίας γίνεται με βάση τεχνοοικονομικά κριτήρια. Στο υπεραστικό και υποβρύχιο δίκτυο, που οι αποστάσεις μετάδοσης είναι μεγάλες, απαιτείται η μικρότερη δυνατή εξασθένηση, και ως εκ τούτου επιλέγεται το τρίτο παράθυρο λειτουργίας. Αντίθετα στο αστικό και ζευκτικό δίκτυο, που οι ζεύξεις είναι πολλές μεν αλλά μικρών αποστάσεων, επικρατεί η επιλογή του δεύτερου παραθύρου λειτουργίας, κυρίως λόγω του σημαντικά χαμηλού κόστους του πομπού laser στα 1300nm, σε σύγκριση με τον αντίστοιχο στα 1500nm.

Οι οπτικές ίνες σχεδιάζονται έτσι ώστε να διατηρούν τις επιδόσεις τους, ως προς την εξασθένηση και μετά την εγκατάστασή τους. Έχει όμως παρατηρηθεί ότι οι επιδόσεις αυτές μπορεί να επιδεινωθούν, υπό την επίδραση εξωτερικών παραγόντων, όπως λόγω κάμψης της ίνας κατά την εγκατάσταση του οπτικού καλωδίου, καθώς και λόγω έκθεσης της οπτικής ίνας σε περιβάλλοντα υδρογόνου και πυρηνικής ραδιενέργειας.

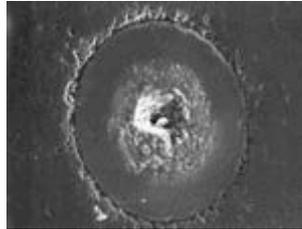
#### **2.8.6 Η Επίδραση του Υδρογόνου**

Η εμφάνιση του υδρογόνου οφείλεται στην εισχώρηση υγρασίας στο εσωτερικό του οπτικού καλωδίου. Το υδρογόνο εκλύεται είτε από τη χημική αποσύνθεση των υλικών του μανδύα, είτε από την ηλεκτρολυτική επίδραση της υγρασίας στη μεταλλική θωράκιση του καλωδίου. Η έκθεση της οπτικής ίνας σε υδρογόνο, προκαλεί τη διάχυση του υδρογόνου στο υλικό του γυαλιού, μεταβάλλοντας έτσι τη χαρακτηριστική καμπύλη εξασθένησης της ίνας και αυξάνοντας τις απώλειες. Η πρόσθετη εξασθένηση εμφανίζεται σωρευτικά και είναι της τάξης των 0,15 dB/(Km.Atm) για μήκος κύματος 1550 nm και θερμοκρασία 25°C. Οι επιπτώσεις του φαινομένου αυτού είναι σημαντικότερες σε υποβρύχιες ζεύξεις όπου το νερό μπορεί να εισχωρήσει σε μεγάλο μήκος του καλωδίου, από μικρούς τραυματισμούς του εξωτερικού μανδύα και να προκαλέσει καταστροφική για τη ζεύξη αύξηση της συνολικής εξασθένησης.

#### **2.8.7 Η Επίδραση της Ραδιενέργειας**

Τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις μπορούν να εκτεθούν σε ραδιενέργεια κατά τη διάρκεια ενός πυρηνικού ατυχήματος ή πολεμικής σύγκρουσης. Σε πιο περιορισμένη κλίμακα, η έκθεση αυτή μπορεί να γίνει στο

εσωτερικό ή περιβάλλοντα χώρο ενός πυρηνικού αντιδραστήρα, ή σε χώρο νοσοκομείου όπου ραδιενεργές πηγές χρησιμοποιούνται για θεραπευτικούς σκοπούς.



**Σχήμα 2.18** Επίδραση ραδιενέργειας .

Η ραδιενέργεια (κυρίως ακτίνες  $\gamma$ ) επιδρά στη μοριακή δομή του υλικού της οπτικής ίνας, δημιουργώντας χρωματικά κέντρα απορρόφησης. Άρα, η έκθεση οπτικών ινών σε ραδιενεργό περιβάλλον μεταβάλλει τη χαρακτηριστική απόσβεσης αυξάνοντας την εξασθένηση κατά ποσό, που εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, όπως :

- το υλικό της ίνας
- το είδος της ραδιενέργειας
- τη συνολική δόση
- τον ρυθμό δόσης
- τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και
- την ισχύ του οπτικού σήματος.

Ορισμένοι κατασκευαστές προσφέρουν, για εξειδικευμένες εφαρμογές, ειδικών προδιαγραφών ίνες ‘ανθεκτικές στη ραδιενέργεια’, που έχουν ήδη εκτεθεί σε ραδιενεργό περιβάλλον και ως εκ τούτου, παρουσιάζουν μικρότερη ευαισθησία στην επίδραση της ραδιενέργειας.

---

---

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

---

---

- 1 . 1993 *Understanding Fiber Optics*. 2<sup>nd</sup> edition. Indianapolis, IN: Sams Publishing.
2. Baack, Clemens. 1986. *Optical Wideband Transmission System*. Florida: CRC Press, Inc.
3. <http://www.howstuffworks.com>
4. <http://www.phnoxoptics.com>
5. <http://egnatia.ce.auth.gr>

---

---

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.**

---

---

# ***ΤΑ ΜΕΡΗ ΕΝΟΣ ΟΠΤΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΙ Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥΣ***

*Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στις συσκευές, που απαρτίζουν ένα οπτικό δίκτυο και στο τρόπο λειτουργίας τους. Οι συσκευές οπτικών ινών, οι διακόπτες οπτικών ινών, οι οπτικοί πομποί, οπτικοί ενισχυτές αλλά και οι οπτικοί δέκτες είναι κάποιες από αυτές. Επιπρόσθετα, γίνεται προσπάθεια για όσον το δυνατόν πιο εύκολη και κατανοητή ανάλυση της λειτουργίας των συσκευών αυτών*

---

### 3.1 Συζεύκτες

Οι συζεύκτες οπτικών ινών διαχωρίζουν τα οπτικά σήματα σε πολλαπλές διαδρομές ή το αντίστροφο. Τα οπτικά σήματα διαφέρουν από τα ηλεκτρικά σήματα κάνοντας τους οπτικούς συζεύκτες πιο δύσκολους στο σχεδιασμό απ' τους αντίστοιχους ηλεκτρικούς. Ένα οπτικό σήμα είναι μια ροή από μεταφορείς σημάτων (σ' αυτήν την περίπτωση φωτονίων) παρόμοιων με το ηλεκτρικό ρεύμα. Ωστόσο ένα οπτικό σήμα δεν ρέει μέσω του δέκτη στο έδαφος. Αντίθετα σταματάει στον δέκτη όπου απορροφάτε από τον ανιχνευτή. Αν δέκτες πολλαπλών οπτικών ινών συνδέονταν σε σειρά κανένα σήμα δεν θα μπορούσε να φθάσει πέρα από τον πρώτο δέκτη γιατί ο ανιχνευτής σ' αυτόν τον δέκτη θα απορροφούσε σχεδόν όλο το σήμα. Ωστόσο οι θύρες εξόδου δεδομένων πρέπει να είναι παράλληλα και επιπλέον το σήμα πρέπει να χωριστεί ανάμεσα στις θύρες μειώνοντας το πλάτος του.

Ένας συζεύκτης αναγνωρίζεται από τον χαρακτηριστικό αριθμό θυρών εισόδου και εξόδου δεδομένων που έχει. Αυτό εκφράζεται με τον τύπο  $N \times M$  όπου  $N$  είναι αριθμός των ινών εισόδου και  $M$  ο αριθμός των ινών εξόδου. Οι συζευκτες με ασφάλειες μπορούν να φτιαχτούν με οποιαδήποτε μορφή αλλά πιο κοινή είναι η μορφή των ίσων πολλαπλάσιων (2x2, 4x4, 8x8 κλπ.).



**Σχήμα 3.1** Τυπικός συζεύκτης.

Οι πιο απλοί συζεύκτες είναι οι διαχωριστές οπτικών ινών. Αυτές οι συσκευές έχουν τουλάχιστον τρεις θύρες αλλά μπορεί να έχουν περισσότερες από 32 θύρες για περισσότερο σύνθετες συσκευές. Μια απλή συσκευή με τρεις θύρες που μπορεί επίσης να ονομασθεί *συζεύκτης TEE* μπορεί να θεωρηθεί ως *κατευθυντήριος συζεύκτης*. Η μια ίνα ονομάζεται *κοινή* ενώ οι άλλες δύο ονομάζονται *θύρες εισαγωγής και εξαγωγής*. Μια κοινή εφαρμογή περιλαμβάνει τη διοχέτευση φωτός στην κοινή θύρα και τον διαχωρισμό του σε δύο ανεξάρτητα πόδια (τις θύρες εξαγωγής). Ο λόγος της κατανομής του φωτός

ανάμεσα στα δύο πόδια εξαγωγής μπορεί να καθοριστεί από τον κατασκευαστή του συζεύκτη. Δημοφιλής αναλογίες διαχωρισμού είναι 50%-50%, 90%-10%, 95%- 5% και 99%-1%. Ωστόσο οποιαδήποτε τιμή μπορεί να επιτευχθεί επί παραγγελία. (Αυτές οι τιμές μερικές φορές μετριοούνται σε dB). Αν ένας διαχωριστής 90%-10% χρησιμοποιείται με μια πηγή φωτός 50μW στις θύρες εξόδου θα ήταν, 45μW και 5μW. Στην πραγματικότητα οι έξοδοι ποτέ δεν το επιτυγχάνουν τελείως. Και αυτό λόγω του *ορίου απώλειας*, μια παράμετρος που υπάρχει σε όλους τους συζεύκτες και διαχωριστές. Το όριο απώλειας διασφαλίζει ότι η συνολική έξοδος δεν είναι ποτέ τόσο υψηλή όσο η είσοδος. Οι τιμές απώλειας κυμαίνονται από 0,05dB ως 2dB για διαφορετικά είδη συζευκτών. Μια ενδιαφέρουσα και μη αναμενόμενη ιδιότητα των διαχωριστών είναι ότι είναι συμμετρικοί. Π.χ. αν ο ίδιος συζεύκτης δεχθεί 50μW σε μια μονάδα εξόδου 10% μόνο 5μW θα φθάσουν στην κοινή θύρα. Κοινές εφαρμογές για συζεύκτες και διαχωριστές περιλαμβάνουν:

- Το τοπικό έλεγχο της εξόδου φωτεινής πηγής (συνήθως για σκοπούς ελέγχου).
- Τη διανομή ενός κοινού σήματος ταυτόχρονα σε διάφορες περιοχές. Ένας οκτάθυρος συζεύκτης επιτρέπει σ' ένα απαλό αναμεταδότη να οδηγήσει οχτώ δέκτες.
- Την δημιουργία μιας γραμμικής αρτηρίας με θύρες οπτικών ινών. Εδώ ο κάθε διαχωριστής θα είναι μια συσκευή 95%-5% που επιτρέπει ένα μικρό ποσό της ενέργειας να σταματήσει ενώ το κυρίως μέρος της ενέργειας να συνεχίσει την
- κύρια διαδρομή.

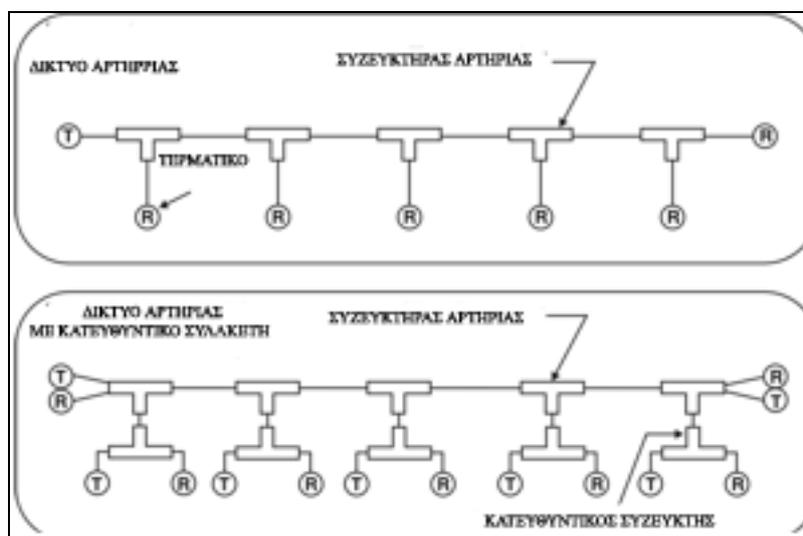
Οι οπτικοί συζεύκτες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτούνται ζεύξεις διαφορετικές από τις ζεύξεις σημείου προς σημείο. Παραδείγματα είναι οι ζεύξεις διπλής κατευθύνσεως και τα *δίκτυα τοπικής περιοχής* (LAN). Σε εφαρμογές σύζευξης τοπικής περιοχής οι συζεύκτες δομούνται είτε ως *τοπολογία αστέρα* (star topology) είτε ως *τοπολογία αρτηρίας* (bus topology). Στην τοπολογία αστέρα οι σταθμοί διακλαδίζονται από ένα κεντρικό σημείο όπως οι ακτίνες ενός τροχού. Με ένα συζεύκτη αστέρα ο αριθμός των σταθμών εργασίας μπορεί εύκολα να αυξηθεί. Για παράδειγμα, αλλάζοντας από ένα 4x4 σε έναν 8x8 διπλασιάζει την χωρητικότητα του συστήματος. Να σημειωθεί ότι η εισαγωγή στον συζεύκτη αστέρα διαιρείται σε όλες τις εξόδους επιτρέποντας σε κάθε σταθμό να ακούει οποιοδήποτε άλλο σταθμό. Οι συζεύκτες αστέρα έχουν πολλές θύρες (συνήθως δύναμης του δύο) και οι συζεύκτες με 32 και 64 θύρες δεν είναι ασυνήθιστοι. Η χρήση κλειδί ενός συζεύκτη αστέρα είναι να κάνει ένα μεγάλο κύκλωμα ταυτόχρονης ομιλίας. Πολύ αναμεταδότες μπορούν να συνδεθούν με ένα συζεύκτη αστέρα και μπορούν ελεύθερα να επικοινωνούν με όλους τους άλλους αναμεταδότες προϋποθέτοντας ότι ένα είδος πρωτοκόλλου έχει καθιερωθεί για να αποτρέψει δύο ή περισσότερους αναμεταδότες από το να επικοινωνήσουν ταυτόχρονα. Το μειονέκτημα κλειδί ενός συζεύκτη αστέρα είναι η αρκετά μεγάλη

εισαγόμενη απώλεια (20dB τυπικά για μια 64-θυρη συσκευή) και η ανάγκη για ένα σύνθετο πρωτόκολλο αποφυγής συγκρούσεων.



Σχήμα 3.2 Διάφορα είδη συζευκτών.

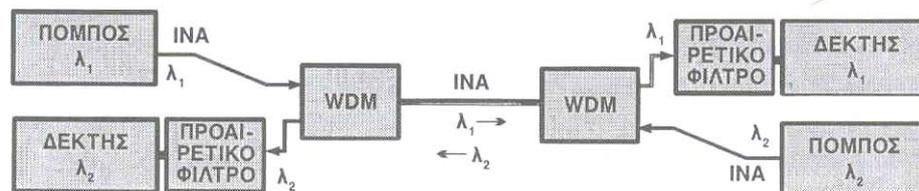
Η τοπολογία αρτηρίας χρησιμοποιεί ένα συζεύκτη T και κατασκευάζεται έτσι ώστε μια σειρά σταθμών να μπορεί να ακούσει το κυρίως καλώδιο. Σ' ένα τυπικό δίκτυο αρτηρίας ένας συζεύκτης σε κάθε κόμβο διαχωρίζει μέρος της ενέργειας από την αρτηρία και την μεταφέρει σ' έναν αναμεταδότη του επισυναπτόμενου εξοπλισμού. Σ' ένα σύστημα με N τερματικά ένα σήμα πρέπει να περάσει από N-1 συζεύκτες πριν φθάσει στον δέκτη. Η απώλεια αυξάνεται γραμμικά καθώς το N αυξάνεται. Η τοπολογία αρτηρίας μπορεί να δρομολογηθεί για μια κατεύθυνση ή μπορεί να έχει διπλή δράση. Σε μια κατασκευή μονής κατεύθυνσης ένας αναμεταδότης στο ένα άκρο της αρτηρίας επικοινωνεί με έναν δέκτη στο άλλο άκρο. Κάθε τερματικό περιέχει επίσης ένα δέκτη. Ένα διπλό δίκτυο μπορεί να επιτευχθεί προσθέτοντας μια δεύτερη αρτηρία ινών ή χρησιμοποιώντας έναν επιπλέον κατευθυντήριο συζεύκτη σε κάθε άκρο και σε κάθε τερματικό. Αυτή η δεύτερη τοπολογία επιτρέπει σήματα να ρέουν προς τις δύο κατευθύνσεις. Το σχήμα 3.3 δείχνει τις διαφορές μιας αρτηρίας μονής κατεύθυνσης και αρτηρίας διπλής κατεύθυνσης.



Σχήμα 3.3 Διατάξεις δικτύου αρτηρίας.

### 3.2 WDM's (πολυπλέκτες με διαίρεση του μήκους κύματος)

Ένας πιο σύνθετος συζεύκτης είναι ο *πολυπλέκτης με διαίρεση του μήκους κύματος* [1]. Ένας πολυπλέκτης με διαίρεση του μήκους κύματος είναι μια παθητική συσκευή που επιτρέπει δύο ή περισσότερα διαφορετικά μήκη κύματος φωτός να διαχωριστούν σε πολλαπλές ίνες ή να ενωθούν πάνω σε μια ίνα. Οι πολυπλέκτες με διαίρεση του μήκους κύματος επιτρέπουν την εν δυνάμει χωρητικότητα της φερόμενης πληροφορίας που έχει μια οπτική ίνα να αυξηθεί σημαντικά. Όπως ο απλός διαχωριστής οι πολυπλέκτες με διαίρεση του μήκους κύματος τυπικά έχουν μια κοινή σύνδεση και ένα αριθμό μονάδων εισόδου και εξόδου. Σε αντίθεση με τον διαχωριστή ωστόσο έχουν πολύ μικρή εισαγόμενη απώλεια. Αυτοί έχουν όμως την ίδια περιοχή ορίου απώλειας. Δύο βασικοί παράγοντες σε μια συσκευή πολυπλέκτη με διαίρεση του μήκους κύματος είναι η *διαφωνία* (crosstalk) και ο *διαχωρισμός καναλιών*. Η διαφωνία, που αναφέρεται και ως *κατευθυντικότητα*, αναφέρεται στο πόσο καλά διαχωρίζονται τα πολυπλεγμένα κανάλια. Κάθε κανάλι πρέπει να εμφανίζεται μόνο στη σχεδιασμένη γι' αυτό θύρα και όχι σε οποιαδήποτε άλλη θύρα εξόδου. Τα χαρακτηριστικά της διαφωνίας εκφράζουν πόσο καλά ένας συζεύκτης διατηρεί αυτό τον διαχωρισμό θύρας προς θύρα. Ο διαχωρισμός καναλιών περιγράφει πόσο καλά ένας συζεύκτης μπορεί να ξεχωρίσει τα μήκη κύματος.



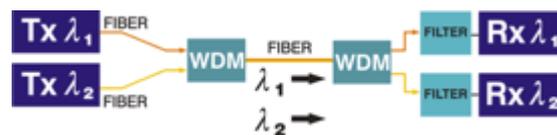
Σχήμα 3.4 Δικατευθυντικό WDM.

Στους περισσότερους συζεύκτες τα μήκη κύματος πρέπει να διαχωριστούν ευρέως. Το φως μπορεί να ταξιδέψει σε οποιαδήποτε κατεύθυνση χωρίς το μειονέκτημα που βρίσκουμε στους διαχωριστές. Οι πολυπλέκτες με διαίρεση του μήκους κύματος επιτρέπουν τη πολλαπλή ανεξάρτητη ροή δεδομένων να σταλεί σε μια ίνα. Το πιο κοινό σύστημα πολυπλεξίας WDM χρησιμοποιεί δύο μήκη κύματος, παρόλο που συστήματα με τέσσερα ή περισσότερα μήκη κύματος είναι διαθέσιμα. Τα σύνθετα συστήματα πολυπλεξίας WDM που χρησιμοποιούν παραπάνω από δώδεκα μήκη κύματος έχουν περιγραφεί, αλλά

είναι συνήθως απαγορευτικά ακριβά λόγω του εξαιρετικού κόστους των πηγών φωτός και της απαιτούμενης ανοχής και σταθερότητας μήκους κύματος.

Το σχήμα 3.4 δείχνει δύο πολυπλέκτες διαίρεσης του μήκους κύματος που χρησιμοποιούνται ώστε να επιτρέψουν την αμφίδρομη ροή δεδομένων να μεταφερθεί σε μια απλή ίνα. Δεν έχει σημασία ποια θα είναι η ροή δεδομένων. Θα μπορούσε να είναι ένα σήμα video ή μια ροή δεδομένων RS-232. Εναλλακτικά και τα δύο σήματα μπορεί να είναι σήματα video ή σήματα υψηλής ταχύτητας δεδομένων με 1,26Gb/s.

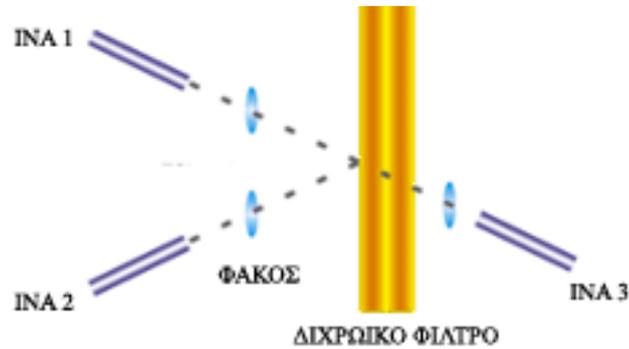
Το σχήμα 3.5 δείχνει μια δεύτερη χρήση των πολυπλεκτών με διαίρεση του μήκους κύματος. Σ' αυτό το παράδειγμα δύο μήκη κύματος φωτός χρησιμοποιούνται για να μεταδώσουν δύο ανεξάρτητα σήματα στην ίδια κατεύθυνση πάνω σε μια ίνα. Όπως το προηγούμενο παραδείγματα δύο σήματα μπορεί να είναι οποιοδήποτε.



Σχήμα 3.5 WDM-Διπλά σήματα, ίδια κατεύθυνση.

Ο πολυπλέκτης με διαίρεση του μήκους κύματος που φαίνεται στο σχήμα 3.6 ονομάζεται πολυπλέκτης διαχωρισμού μήκους κύματος φορτίου οπτικών σημάτων γιατί κατασκευάζεται από ευδιάκριτους φακούς και φίλτρα. Η καρδιά αυτού του τύπου πολυπλέκτη WDM είναι το *διχρωϊκό φίλτρο* (dichroic filter). Τα διχρωϊκά φίλτρα βασίζονται σε *ιντερφερομετρικές τεχνικές* (interferometric techniques) και έχουν κάποιες ενδιαφέρουσες ιδιότητες. Η πιο καινούρια ιδιότητα είναι ότι αντανακλούν το φως που δεν μεταδίδουν. Αναφερόμενοι στο σχήμα φανταστείτε ότι η ίνα 1 μεταφέρει δύο μήκη κύματος 850 nm και 1300 nm. Επίσης φανταστείτε ότι το διχρωϊκό φίλτρο είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να περνάει μήκη κύματος μεγαλύτερα των 1100 nm. Αυτό ονομάζεται *φίλτρο διέλευσης μεγάλου μήκους κύματος* (LWP). Καθώς το φως εξέρχεται από την ίνα 1 περνάει πρώτα μέσα από τον φακό έτσι ώστε να εστιάσει σε ένα σημείο. Καθώς το φως χτυπά το φίλτρο, το φως των 1300 nm περνά μέσα από το φίλτρο και συλλέγεται από την ίνα 3. Το φως των 850 nm εξερχόμενο από την ίνα 1 απ' την άλλη αντανακλάται από το φίλτρο και συλλέγεται από την ίνα 2. Έτσι τα δύο μήκη κύματος έχουν αποτελεσματικά διαχωριστεί και η μεταφερόμενη πληροφορία σε κάθε μήκος κύματος μπορεί να αποκωδικοποιηθεί ανεξάρτητα. Το διχρωϊκό φίλτρο μπορεί άριστα να απομονώσει τον τρόπο μετάδοσης αλλά μπορεί φτωχά να απομονώσει τον τρόπο ανάκλασης. Συνήθως αυτοί οι τύποι πολυπλέκτη WDM φτιάχνονται και με *διελεύσεις μικρού*

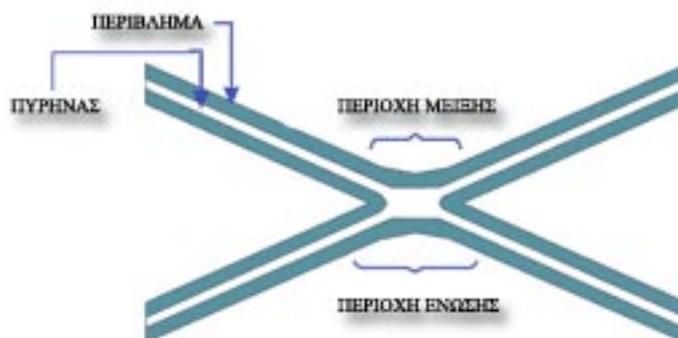
μήκους κύματος (SWP) και με φίλτρο διέλευσης μεγάλου μήκους κύματος (LWP) και χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό για να επιτευχθεί η καλύτερη απόδοση του συστήματος.



Σχήμα 3.6 Οπτική μαζική συσσώρευση WDM.

### 3.3 Συζεύκτες Κολλημένων Ινών

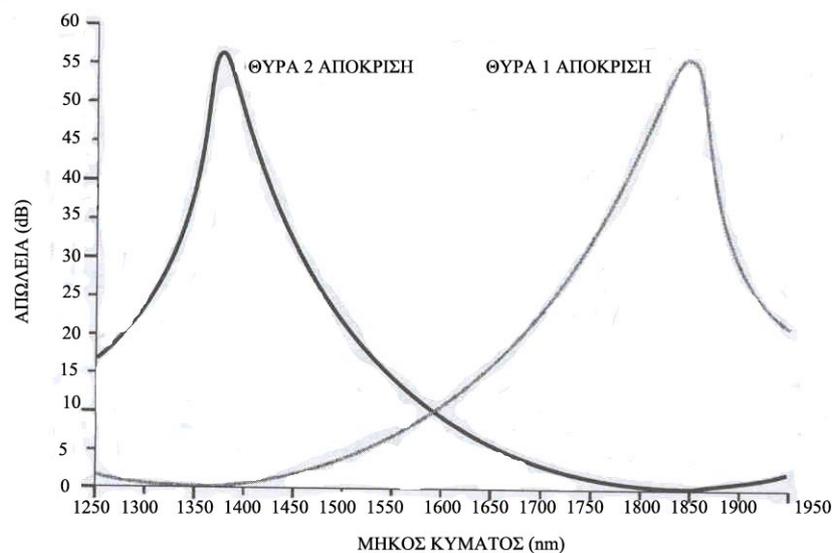
Κατά πολύ ο πιο δημοφιλής τύπος συζεύκτη σε χρήση σήμερα είναι ο συζεύκτης κολλημένων ινών. Σ' αυτόν τον τύπο συζεύκτη δύο ή περισσότερες ίνες τυλίγονται και λιώνονται σε φλόγα. Η βασική κατασκευή φαίνεται στο σχήμα 3.7 παρακάτω.



Σχήμα 3.7 Συζεύκτης ένωσης ίνας.

Αυτή η απλή κατασκευαστική τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να κάνουμε 50%-50% συζεύκτες, 99%-1% συζεύκτες και πολυπλέκτες WDM. Το μήκος της περιοχής σύζευξης (η περιοχή κολλησεως) καθώς επίσης και ο βαθμός στον οποίο τυλίγουμε και τραβάμε την ίνα ενώ λιώνετε καθορίζει το αποτέλεσμα. Αυτός ο τύπος συζεύκτη έχει γίνει πολύ δημοφιλής γιατί τα βασικά υλικά είναι σχεδόν δωρεάν, λίγα μέτρα ίνας και ένας μεταλλικός σωλήνας είναι όλα όσα χρειάζονται για τον πιο βασικό συζεύκτη. Το κόλπο είναι να ξέρεις πώς να λιώσεις, να τυλίξεις και να τραβήξεις την ίνα.

Ο πιο ενδιαφέρον τύπος συζεύκτη κολλημένων ινών είναι ο πολυπλέκτης WDM. Είναι μόνο δυνατός με μονότροπη ίνα. Απλοί διαχωριστές μπορούν να φτιαχτούν με τη μέθοδο συζεύκτη κολλημένων ινών και για μονότροπους και για πολύτροπους τύπους ινών. Ένας πολυπλέκτης WDM σχηματίζεται από την ιντερφερομετρική δράση μέσα στην περιοχή κόλλησης. Όπως ένα ιντερφερόμετρο προκαλεί καμπυλοειδή απόκριση καθώς το μήκος αυξάνεται. Οι πολυπλέκτες WDM σχεδιάζονται για να λειτουργούν σε δύο συγκεκριμένα μήκη κύματος. Προσαρμόζοντας το ελάχιστο της καμπύλης για να αντιστοιχεί στο πρώτο μήκος κύματος που μας ενδιαφέρει και το μέγιστο της καμπύλης στο δεύτερο μήκος κύματος που μας ενδιαφέρει σχηματίζουμε ένα πολυπλέκτη WDM. Το σχήμα παρακάτω δείχνει τα οπτικά χαρακτηριστικά ενός συζεύκτη κολλημένων ινών WDM ο οποίος έχει σχεδιαστεί για μήκη κύματος 1300nm και 1550nm. Η απόκριση της θύρας 1 είναι η θύρα η οποία έχει σχεδιαστεί για χρήση με 1300nm ενώ η θύρα 2 είναι η θύρα που έχει σχεδιαστεί για χρήση 1550nm. Ενώ τα σχήματα από τις καμπύλες δεν μας είναι πολύ οικεία, πρέπει να σημειωθεί ότι βασικά σχηματίζονται παίρνοντας τον λογάριθμο του ημίτονου.



**Σχήμα 3.8** Οπτικά χαρακτηριστικά ενός πολυπλέκτη WDM από ένωση οπτικών ινών.

Ο πολυπλέκτης WDM που φαίνεται στην εικόνα έχει μέγιστη απομόνωση περίπου 28 dB. Αυτή μπορεί να είναι επαρκής για κάποιες εφαρμογές αλλά πολλές θα απαιτούσαν ακόμα μεγαλύτερη απομόνωση. Αυτό συνήθως πετυχαίνεται συνδέοντας σε σειρά δύο ή περισσότερους πολυπλέκτες WDM για να αυξηθεί η απομόνωση. Συνήθως αυτός ο τύπος πολυπλέκτη WDM μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε πηγές laser εξ' αιτίας της κορυφής της σχετικά μικρής απομόνωσης σε κάθε μήκος κύματος. Απ' την άλλη η κορυφή της ζώνης περάσματος είναι αρκετά ευρεία.

### 3.4 Διακόπτες Οπτικών Ινών

Οι διακόπτες οπτικών ινών είναι στοιχεία που επιλεκτικά καθοδηγούν οπτικά σε ηλεκτρικά. Οι διακόπτες μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες : *οπτομηχανικοί, ηλεκτρο-οπτική και φωτονική.*

Οι *οπτομηχανικοί διακόπτες* περιέχουν ένα οπτικά κινούμενο στοιχείο όπως μια ίνα, ένα ομοίωμα φακού ή ένα πρίσμα που κατευθύνει το φωτεινό σήμα από τη μια ίνα στην άλλη. Αυτοί οι διακόπτες αντιπροσωπεύουν την πλειοψηφία των διακοπών με οπτικές ίνες. Βρίσκουν εφαρμογή σε υψηλής ανάλυσης βηματικούς κινητήρες ή σε πιεζοηλεκτρικούς κινητήρες και φθάνει μέχρι και σε διατάξεις 1xM και NxM μέχρι 100 καναλιών. Οι παράμετροι απόδοσης περιλαμβάνουν χαμηλή απώλεια εισόδου ( 0,5 dB ), χαμηλές αντανάκλασεις ( -55 dB ) και υψηλή αξιοπιστία ( δέκα εκατομμύρια κύκλοι ζωής ). Οι οπτικομηχανικοί διακόπτες από άποψη φυσικής περιορίζονται σε ταχύτητες msec και έτσι δεν είναι κατάλληλοι για οπτικούς υπολογιστές ή κεντρικά γραφεία. Παρά αυτόν τον περιορισμό οι οπτικομηχανικοί διακόπτες συνεισφέρουν σημαντικά στις τηλεπικοινωνίες, στα δίκτυα και τα αισθητήρια συστήματα, και αρκετές επιτροπές διεθνών standard έχουν ολοκληρώσει προδιαγραφές και ελεγκτικές διαδικασίες περιλαμβανομένου Bell core TA-NWT-001073, U.S Navy MIL-S-24725, IECSC86B, EIA/TIA PN-2984.

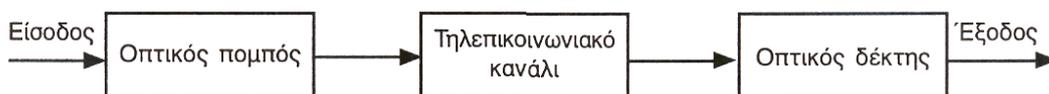
Οι *ηλεκτρο-οπτικοί διακόπτες* επιλέγουν τις διαδρομές φωτεινών κυμάτων μέσα σε ενεργές συσκευές χρησιμοποιώντας πολωμένο ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτοί οι διακόπτες δεν έχουν τους φυσικούς περιορισμούς της ταχύτητας των οπτικό-μηχανικών διακοπών. Οι περισσότεροι αποτελούνται από κυματοδηγούς διάχυσης τιτανίου μέσα σε υπόστρωμα Λιθίου – Νιοβίου και προσφέρουν ταχύτητες nanosecond. Ωστόσο αυτές οι συσκευές υποφέρουν από υψηλή διαφωνία ( 20 dB ) και υψηλή εισαγόμενη απώλεια.

Οι *φωτονικοί διακόπτες* είναι στ' αλήθεια όλοι οπτικοί διακόπτες που ανοίγουν κανάλια φωτός σε απόκριση προς σήματα οπτικού ελέγχου. Ως ανταγωνιστική τεχνολογία ίσως τελικά θα αντικαταστήσουν τους ηλεκτρο-οπτικοί διακόπτες η πιο ενδιαφέρουσα προοπτική για τους φωτονικοί διακόπτες περιλαμβάνει την χρήση αυτόματων ηλεκτρο-οπτικών συσκευών ( SEEDs ) που ενεργούν σαν οπτικές λογικές θύρες που θα επιτρέπουν τους διακόπτες να χρησιμοποιούνται για να κάνουν λογικές λειτουργίες σε ψηφιακούς υπολογιστές.

### 3.5 Οπτικοί Πομποί

Το γενικό λειτουργικό (block) διάγραμμα του σχήματος 3.9 είναι ένα σύστημα επικοινωνίας οπτικών ινών με τη μόνη διαφορά ότι το τηλεπικοινωνιακό κανάλι είναι ένα οπτικό καλώδιο. Τα αλλά δυο εξαρτήματα, ο οπτικός πομπός και οπτικός δέκτης σχεδιάζονται για τις ανάγκες για τις ανάγκες ενός τέτοιου ειδικού.

Ο ρόλος του τηλεπικοινωνιακού καναλιού είναι να μεταφέρει το οπτικό σήμα από τον πομπό στο δέκτη χωρίς να το παραμορφώνει. Τα περισσότερα συστήματα οπτικών κυμάτων χρησιμοποιούν οπτικές ίνες σαν τηλεπικοινωνιακό κανάλι επειδή οι οπτικές ίνες μπορούν να μεταδώσουν το φως με σχετικά μικρές απώλειες ισχύος.

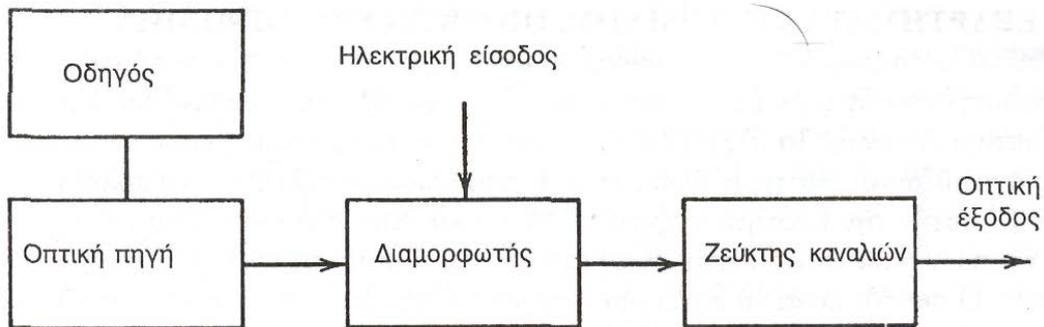


**Σχήμα 3.9** Γενικό σύστημα οπτικών επικοινωνιών.

Ο ρόλος ενός οπτικού πομπού είναι να μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα σε μία οπτική μορφή και να εισάγει το τελικό οπτικό σήμα μέσα στην οπτική ίνα. Το σχήμα 3.10 δείχνει το λειτουργικό διάγραμμα ενός οπτικού πομπού. Αυτό αποτελείται από μια οπτική πηγή, ένα διαμορφωτή, και ένα ζεύκτη με το τηλεπικοινωνιακό κανάλι.

Σαν οπτικές πηγές χρησιμοποιούνται lasers ημιαγωγού ή LED λόγω της συμβατότητας τους με το κανάλι( οπτική ίνα ) του οπτικού τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Το οπτικό σήμα δημιουργείται με διαμόρφωση του οπτικού φέροντος κύματος. Παρόλο που μερικές φορές χρησιμοποιείται ένας εξωτερικός διαμορφωτής, στις περισσότερες περιπτώσεις παραλείπεται, αφού η έξοδος μιας οπτικής πηγής από ημιαγωγό μπορεί να διαμορφωθεί κατευθείαν αλλάζοντας το ρεύμα που τη διαρρέει. Μια

τέτοια τεχνική απλοποιεί τη σχεδίαση του πομπού και είναι γενικά αποδεκτή ως προς το κόστος. Ο ζεύκτης είναι τυπικά ένας μικροφακός που εστιάζει το οπτικό σήμα στο επίπεδο εισόδου της οπτικής ίνας με τη μέγιστη δυνατή απόδοση.



Σχήμα 3.10 Εξαρτήματα ενός οπτικού πομπού.

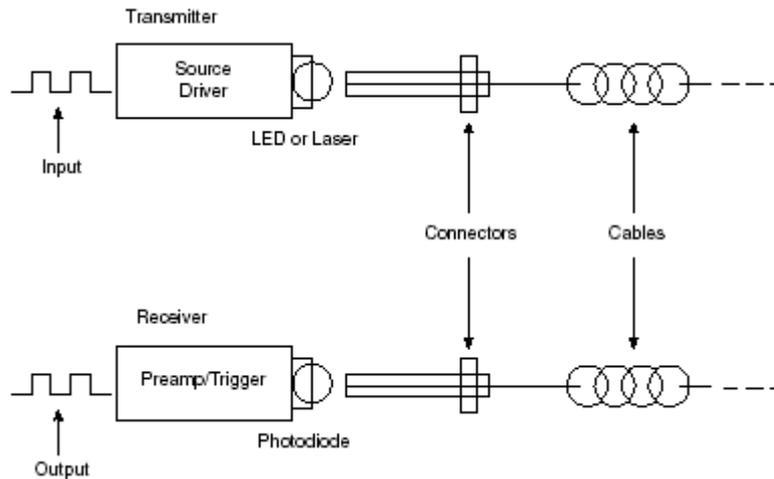
Η εκπεμπόμενη ισχύς είναι μια σπουδαία παράμετρος σχεδίασης, διότι μάς δείχνει την απώλεια ισχύος που μπορούμε να ανεχθούμε. Αυτή γενικά εκφράζεται σε μονάδες dbm με στάθμη αναφοράς το 1 mW. Ο γενικός ορισμός είναι:

$$\text{Ισχύς(dBm)} = 10 \log_{10} (\text{ισχύς}/1\text{mW}) \quad (3.1)$$

Έτσι 1 mW είναι 0 dbm, αλλά το 1  $\mu$ W αντιστοιχεί σε -30 dbm. Η εκπεμπόμενη ισχύς είναι μάλλον χαμηλή (<-10 dbm) στην περίπτωση των διόδων LED, ενώ τα LASERS ημιαγωγού μπορούν να εκπέμπουν ισχύς ~10 dbm. Αφού οι LED έχουν περιορισμένες δυνατότητες διαμόρφωσης, τα περισσότερα σήματα οπτικών κυμάτων υψηλής απόδοσης χρησιμοποιούν LASERS ημιαγωγού σαν οπτικές πηγές. Ο ρυθμός μετάδοσης bit των οπτικών πομπών περιορίζεται μάλλον από τα ηλεκτρονικά μέρη παρά από το ίδιο το LASERS του ημιαγωγού. Με την κατάλληλη σχεδίαση μπορεί να κατασκευασθούν οπτικοί πομποί που να λειτουργούν με ρυθμό μετάδοσης bit μέχρι 20 Gb/s.

Οι πομποί φωτός είναι βασικά στοιχεία σε κάθε σύστημα οπτικών ινών. Ο πομπός φωτός είναι σημαντικός, γιατί είναι συχνά ένα από τα πιο δαπανηρά στοιχεία στο σύστημα και τα χαρακτηριστικά του συχνά, με αποτελεσματικό τρόπο, επηρεάζουν τη τελική απόδοση μιας δεδομένης ζεύξης οπτικών ινών. Υπάρχουν δύο τύποι πομπών φωτός που είναι ευρέως διαδεδομένοι και χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα συστήματα οπτικών ινών: οι *δίοδοι laser (LD's)* και οι *δίοδοι εκπομπής φωτός (LED's)*. Οι *δίοδοι laser*

μπορεί να είναι τύπου Farby-Perot ή παραλληλισμένης ανάδρασης (DFB), ενώ τα LED's συνήθως καθορίζονται σαν *δίοδοι εκπομπής επιφάνειας* ή *δίοδοι εκπομπής άκρης*.



**Σχήμα 3.11** Γενικό σύστημα οπτικών ινών.

Οι διάφορες αυτές ταξινομήσεις θα συζητηθούν με λεπτομέρεια παρακάτω στο κεφάλαιο. Όλοι οι εκπομποί φωτός είναι σύνθετοι ημιαγωγοί που μετατρέπουν το ηλεκτρικό ρεύμα σε φως. Η διαδικασία μετατροπής είναι αρκετά αποτελεσματική τόσο ώστε να δημιουργεί πολύ μικρή θερμότητα σε σύγκριση με τη θερμότητα που παράγεται από λάμπες πυράκτωσης. Τα LED's και οι δίοδοι *laser* είναι ενδιαφέροντα για τις οπτικές ίνες, γιατί έχουν πέντε βασικά χαρακτηριστικά:

1. Μικρό μέγεθος
2. Υψηλή ακτινοβολία (π.χ. εκπέμπουν πολύ φως σε μια μικρή περιοχή).
3. Μικρή περιοχή εκπομπής (η περιοχή είναι συγκρίσιμη με τις διαστάσεις του πυρήνα της οπτικής ίνας).
4. Μεγάλη διάρκεια ζωής (π.χ. προσφέρουν υψηλή αξιοπιστία)
5. Μπορούν να διαμορφωθούν με υψηλές ταχύτητες.

Τα LED's και οι δίοδοι *laser* υπάρχουν σε μεγάλη ποικιλία στα ηλεκτρονικά προϊόντα κατανάλωσης. Τα LED's χρησιμοποιούνται ως ορατοί ενδείκτες στους περισσότερους ηλεκτρονικούς εξοπλισμούς, ενώ οι δίοδοι *laser* χρησιμοποιούνται εκτεταμένα στα CD's. Τα LED's που χρησιμοποιούνται στις οπτικές ίνες διαφέρουν από τους περισσότερους κοινούς ενδείκτες LED's σε δυο τρόπους:

1. Το μήκος κύματος είναι γενικά στο κοντινό υπέρυθρο, γιατί η οπτική απώλεια της ίνας είναι η χαμηλότερη σε αυτά τα μήκη κύματος.
2. Η περιοχή εκπομπής των LED's είναι γενικά πολύ μικρότερη για να επιτρέπει το υψηλότερο δυνατό εύρος ζώνης διαμόρφωσης και για να βελτιώνει την απόδοση σύζευξης με μικρού πυρήνα οπτικές ίνες.

### 3.6 Η Θεωρία της Λειτουργίας τους

Οι δίοδοι *laser* και τα LED's λειτουργούν πάνω στην ίδια βασική αρχή. Χρησιμοποιούν την αρχή ημιαγωγών επαφών p-n που τις βρίσκουμε σε τρανζίστορ και διόδους. Μια επαφή p-n αποτελείται από στοιχεία της ομάδας IV (Si, Ge, κτλ.) που ενώνονται με στοιχεία της ομάδας III (Al, Ga, In) και με στοιχεία της ομάδας V (P, As). (Αυτές οι ομάδες στοιχείων βρίσκονται στο βασικό περιοδικό πίνακα των στοιχείων, αντίγραφο του οποίου υπάρχει στα περισσότερα λεξικά.) Οι ομάδες III, IV και V των στοιχείων σχηματίζουν τη δομή ενός κρυσταλλικού πλέγματος και οι προσμείξεις που προστίθενται (ομάδες III & V) αντικαθιστούν τα άτομα της ομάδας IV ένα-ένα. Τα άτομα της ομάδας V που προστίθενται έχουν ένα παραπάνω ηλεκτρόνιο σθένους, από τα άτομα της ομάδας IV και έτσι σχηματίζουν μια περιοχή με πλεόνασμα ηλεκτρονίων, που λέγεται *ημιαγωγός τύπου-n*. Τα άτομα της ομάδας III που προστίθενται έχουν ένα λιγότερο ηλεκτρόνιο σθένους, σχηματίζοντας έτσι μια περιοχή που λέγεται *ημιαγωγός τύπου-p*. Αν και η περιοχή προσμίξεων του ημιαγωγού έχει πλεόνασμα και έλλειμμα ηλεκτρονίων ωστόσο είναι ηλεκτρικά ουδέτερη.

Όταν ημιαγωγοί τύπου-n και τύπου-p τοποθετηθούν μαζί το πλεόνασμα ηλεκτρονίων από τη n- περιοχή μετακινείται προς τη p- περιοχή για να γεμίσει τις σπές που έμειναν από το έλλειμμα των ηλεκτρονίων στο υλικό τύπου - p. Τα ηλεκτρόνια σταματούν να κινούνται προς τη περιοχή τύπου - p όταν αρκετά από αυτά αρχίζουν να απωθούν ηλεκτρόνια που μετακινούνται προς αυτή τη περιοχή (ηλεκτρόνια με το ίδιο φορτίο απωθούνται μεταξύ τους). Αυτός ο σχηματισμός φορτίων δημιουργεί ένα δυναμικό που εμποδίζει τη ροή του ρεύματος μέσα στην επαφή.

Τοποθετώντας ένα δυναμικό κατά μήκος της επαφής p-n αντιδρά το εσωτερικό δυναμικό αρκετά ώστε να επιτρέπει τη διέλευση του ρεύματος. Στους άμεσους ημιαγωγούς (ημιαγωγοί σχεδιασμένοι για οπτικά) τα ηλεκτρόνια χάνουν ένα ποσό ενέργειας που αντιστοιχεί σε μια ιδιότητα του υλικού του ημιαγωγού. Η απώλεια αυτή ονομάζεται *ενεργειακό χάσμα*. Η συγκεκριμένη ενέργεια ελευθερώνεται σαν φως (φωτόνια) που έχει μήκος κύματος σχετιζόμενο με το ενεργειακό χάσμα σύμφωνα με το τύπο:

$$E_g = hc/\lambda = 1240\text{eVnm}/\lambda \quad (3.2)$$

όπου  $\lambda$  = μήκος κύματος φωτονίου (nm)

$E_g$  - ενεργειακό χάσμα (eV)

Το ενεργειακό χάσμα και το μήκος κύματος διάφορων ημιαγωγών δίνονται στο πίνακα 3.1.

**Πίνακας 3.1** Ενεργειακό χάσμα και μήκος κύματος διάφορων ημιαγωγών

ΥΛΙΚΟ	ΤΥΠΟΣ	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΧΑΣΜΑ	ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ
Φωσφορούχο Γάλλιο	GaP	2.24eV	550 nm
Αρσενικούχο Αλουμίνιο	AlAs	2.09 eV	590 nm
Αρσενικούχο Γάλλιο	GaAs	1.42 eV	870 nm
Φωσφορούχο Ίνδιο	InP	1.33 eV	930 nm
AlGaAs	AlGaAs	1.42-1.61 eV	770-870 nm
InGaAsP	InGaAsP	0.74-1.13 eV	1100-1670 nm

### 3.6.1 Χαρακτηριστικά πομπών φωτός

Ιδιαίτερα βασικά χαρακτηριστικά των LED's και των *laser* καθορίζουν τη χρησιμότητα τους σε δεδομένη εφαρμογή. Αυτά είναι:

- **Μήκος κύματος κορυφής:** Είναι το μήκος κύματος στο οποίο η πηγή εκπέμπει τη περισσότερη ισχύ. Θα πρέπει να ταιριάζει με τα μήκη κύματος που μετατρέπονται με την ελάχιστη εξασθένηση διαμέσου της οπτικής ίνας. Τα πιο συνηθισμένα μήκη κύματος κορυφής είναι 780, 850, 1300 και 1550nm.
- **Εύρος φάσματος:** Θεωρητικά όλο το φως που εκπέμπεται από ένα LED's ή ένα *laser* βρίσκεται στο μήκος κύματος κορυφής, πρακτικά όμως το φως εκπέμπεται σε μια σειρά από μήκη κύματος που έχουν κέντρο το μήκος κύματος κορυφής. Η κλίμακα αυτή λέγεται *εύρος φάσματος της πηγής*.
- **Διάγραμμα εκπομπής:** Το διάγραμμα του εκπεμπόμενου φωτός επηρεάζει τη ποσότητα του φωτός που περνάει από την οπτική ίνα. Το μέγεθος της περιοχής εκπομπής πρέπει να είναι όμοιο με τη διάμετρο του πυρήνα της ίνας.
- **Ισχύς:** Τα καλύτερα αποτελέσματα συνήθως πετυχαίνονται περνώντας όσο το δυνατό περισσότερη ισχύ πηγής μέσα στην οπτική ίνα. Βασική απαίτηση είναι η ισχύς εξόδου της πηγής να είναι αρκετή ώστε να παρέχει επαρκή ισχύ στο τελικό ανιχνευτή στο άκρο της λήψης.

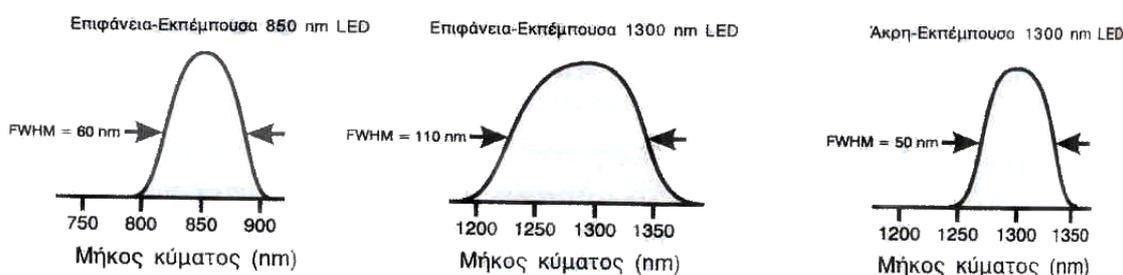
λαμβάνοντας υπ όψιν την εξασθένηση της ίνας, την απώλεια ζεύξης και άλλους περιορισμούς του συστήματος. Γενικά, τα *laser* είναι πιο ισχυρά από τα LED's.

- **Ταχύτητα:** Μια πηγή πρέπει να ανοίγει και να κλείνει αρκετά γρήγορα, ώστε να συναντά τα όρια του εύρους ζώνης του συστήματος. Η ταχύτητα δίνεται σύμφωνα με το χρόνο ανόδου και καθόδου της πηγής, το χρόνο που χρειάζεται για να πάει από το 10% στο 90% της κορυφής ισχύος. Τα *laser* έχουν γρηγορότερους χρόνους ανόδου και καθόδου από τα LED's.

### 3.6.2 Φασματικά χαρακτηριστικά

Τα φασματικά χαρακτηριστικά των LED's και των *laser* είναι σημαντικά. Το σχήμα 3.12 δείχνει τυπικά οπτικά φάσματα των LED's. LED's

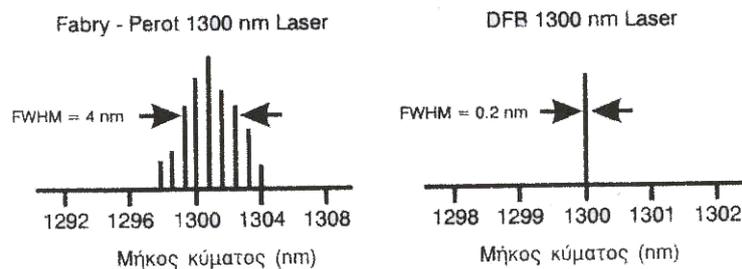
Ένα LED's επιφανειακής εκπομπής στα 850 nm έχει ένα FWHM των 60 nm. Το FWHM σημαίνει πλήρες εύρος μισού μεγίστου. Είναι ένα μέτρο του εύρους οπτικού φάσματος που παίρνεται στο σημείο όπου η φωτεινότητα πέφτει στο μισό της μέγιστης τιμής. Ένα LED επιφανειακής εκπομπής στα 1300 nm έχει ένα πιο ευρύ φάσμα με FWHM των 110 nm. Το πιο ευρύ αυτό φάσμα προκαλεί αυξανόμενη διασπορά και επιπλέον δημιουργεί δυσκολίες στα συστήματα WDM. Ένα LED επιφανειακής εκπομπής στα 1550 nm είναι πιο ευρύ. Το τελευταίο σχήμα δείχνει ένα LED με άκρη εκπομπής 1300 nm. Έχει ένα πιο συμπαγές φάσμα με FWHM γύρω στα 50 nm.



Σχήμα 3.12 Οπτικό φάσμα του LED.

Το 3.13 δείχνει παρόμοιες πληροφορίες για τις διόδους *laser*. Φαίνονται δύο διαφορετικοί τύποι *laser*. Αρχικά, φαίνεται ένα *laser* Fabry-Perot των 1300 nm. Το φάσμα αποτελείται από εννέα διακριτές γραμμές. Θα μπορούσε κατάλληλα να λέγεται *πολύτροπο laser*, όχι αναφερόμενοι στη πολύτροπη ίνα

αλλά στο γεγονός ότι το *laser* εκπέμπει φως σε ένα αριθμό από διακριτές συχνότητες. Αντίθετα προς ένα *laser* (HeNe) που εκπέμπει μια απλή γραμμή στα 633 nm, τα *laser* Fabry-Perot εκπέμπουν ταυτόχρονα σε πολλαπλά μήκη κύματος σε μικρές αποστάσεις. Μπορούμε να πούμε, ότι το φως από τη δίοδο *laser* είναι λιγότερο συμφασικό από το φως του *laser* (HeNe). Το ευρύτερο φάσμα προκαλεί μια πρόσθετη διασπορά στην ίνα, αλλά μειώνει ένα δυσάρεστο πρόβλημα που εμφανίζεται όταν χρησιμοποιούμε πολύτροπη ίνα και ονομάζεται *θόρυβος οφειλόμενος στο τρόπο διάδοσης (modal noise)*.



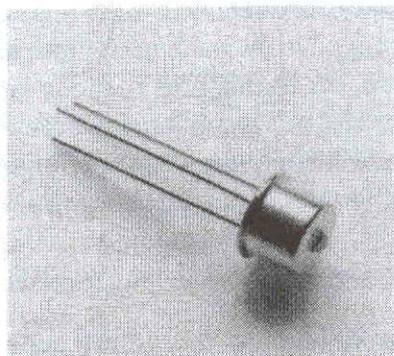
**Σχήμα 3.13** Οπτικό φάσμα του *laser*.

Μια δέσμη *laser* (HeNe) έχει μια περίεργη ζοηράδα στην εμφάνιση της. Αυτός είναι ο θόρυβος που οφείλεται στο τρόπο διάδοσης. Προκαλείται από δομικές και αποκοδομητικές παρεμβολές του φωτός, παράγοντας σκοτεινές και φωτεινές δέσμες. Δίοδοι *laser* μεγάλης συμφωνίας θα παράγουν ένα αντίστοιχο δείγμα κηλίδας μέσα στην οπτική ίνα. Αυτό το δείγμα κηλίδας μπορεί εύκολα να διαταραχθεί από συνδετήρες και ασυνέχειες μέσα στην ίνα. Το αποτέλεσμα είναι μια απότομη αύξηση στο θόρυβο του συστήματος. Γενικά τα πολύτροπα *laser* είναι μια καλύτερη επιλογή όταν χρησιμοποιούνται με πολύτροπες ίνες, αφού έχουν μικρότερη συμφωνία και παράγουν ένα εξασθετισμένο δείγμα κηλίδας. Σε αντίθεση, το DFB *laser* έχει σχεδόν τέλεια συμφασικά εκπεμπόμενο φως σε μια μόνο συχνότητα όπως το *laser* (HeNe).

### 3.7 Δίοδοι Εκπομπής Φωτός (LED's)

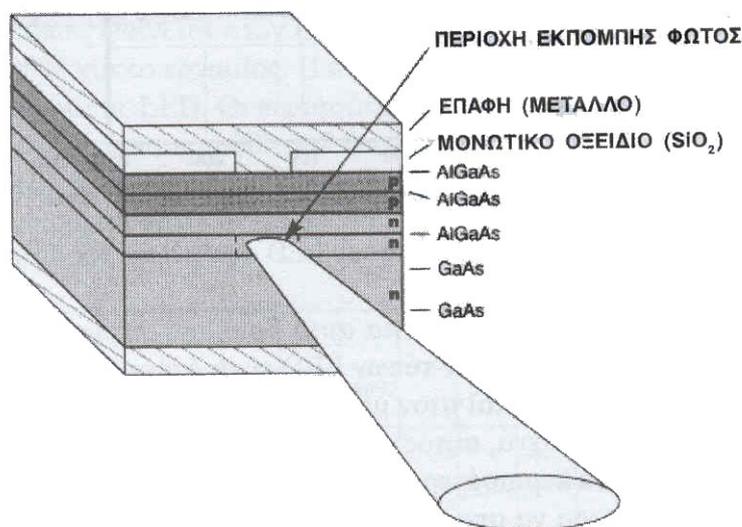
Τα LED's[2] κατασκευάζονται από χωριστά στρώματα ημιαγωγών τύπου-p και τύπου-n. Μια επαφή p-n δημιουργεί τα φωτόνια, και διάφορες επαφές p-p και n-n κατευθύνουν τα φωτόνια να δημιουργήσουν μια εστιασμένη εκπομπή φωτός. Οι επαφές p-p και n-n κατευθύνουν το φως, παρέχοντας φραγμούς ενέργειας

και αλλαγές στο δείκτη διάθλασης. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι LED's που χρησιμοποιούνται, οι πομποί επιφάνειας (ή επιφανειακής εκπομπής) και οι πομποί κορυφής.



Σχήμα 3.14 Τυπικό LED.

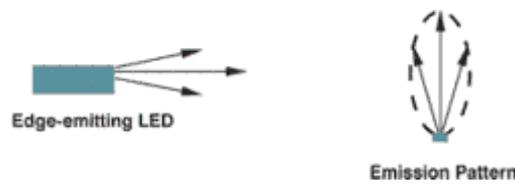
Οι εκπομποί επιφάνειας κατασκευάζονται από στρώματα ημιαγωγίων υλικών που εκπέμπουν φως σε 180° τόξο. Είναι σχετικά φτηνά και πολύ αξιόπιστα, αλλά το διάγραμμα εκπομπής περιορίζει τον βαθμό σύζευξης με την ίνα, και επιπλέον, την ισχύ που μπορεί να εκπεμφθεί. Οι εκπομποί επιφάνειας είναι οι πιο οικονομικοί από τους δύο τύπους LED, αλλά έχουν χαμηλή ισχύ εξόδου και είναι γενικά αργές συσκευές.



Σχήμα 3.15 Τυπικό LED.

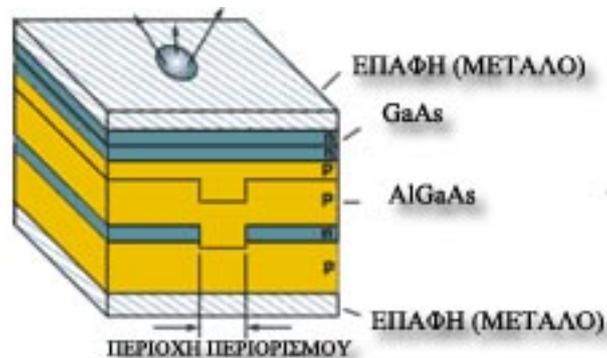
Οι πομποί κορυφής έχουν σχεδιαστεί για να περιορίζουν το φως μέσα σε ένα στενό αυλάκι κατευθυνόμενο στην έξω πλευρά του πομπού. Αυτή η εστίαση του φωτός σημαίνει ότι περισσότερη ισχύς εκπέμπεται και περισσότερη ισχύς μπορεί να συνδεθεί στην ίνα αφού το αυλάκι μπορεί να συγκριθεί με το μέγεθος του πυρήνα της οπτικής ίνας. Οι πομποί κορυφής εξασφαλίζουν υψηλές στάθμες οπτικής

ισχύος (ακόμα και σε μικρότερου πυρήνα ίνες) και είναι γενικά γρηγορότερες συσκευές από ότι τα LED's επιφανειακής εκπομπής.



Σχήμα 3.16 Ένας τρόπος εκπομπής.

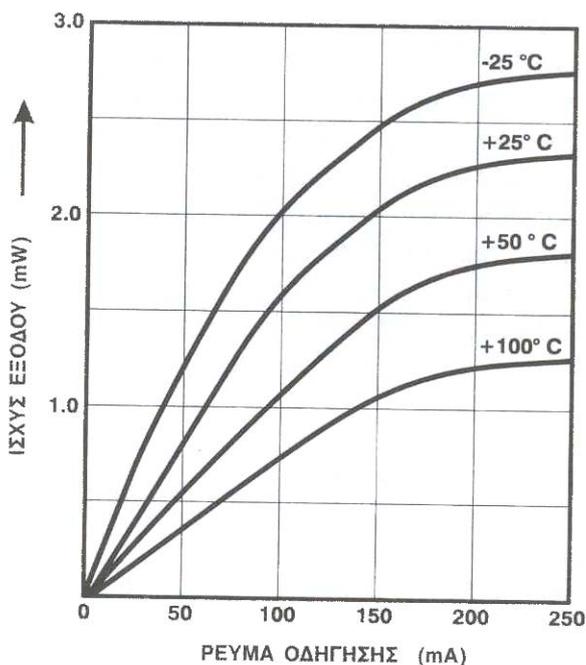
Τα LED's αντέχουν και λειτουργούν σε ακραίες περιοχές θερμοκρασίας (με πλήρεις στρατιωτικές προδιαγραφές  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  έως  $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), αν και η οπτική ισχύς εξόδου τους μπορεί να μεταβάλλεται αξιοσημείωτα καθώς η θερμοκρασία αλλάζει. Γενικά, LED's μικρότερου μήκους κύματος είναι λιγότερο επιρρεπείς στο να μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία. Επιπλέον, τα LED's εκπομπής επιφάνειας είναι σχεδόν πάντα περισσότερο σταθερά στη θερμοκρασία από ότι του τύπου εκπομπής κορυφής. Ένα LED 850 nm μπορεί να μεταβληθεί  $-0.03\text{dB}/^{\circ}\text{C}$ , ενώ ένα LED 1300 nm μπορεί να μεταβληθεί τρεις με πέντε φορές περισσότερο.



Σχήμα 3.17 LED επιφανειακής εκπομπής

Πάντα, η οπτική ισχύς των LED's πέφτει όταν η θερμοκρασία αυξάνει. Η θερμοκρασία επίσης επηρεάζει το μήκος κύματος της μέγιστης εκπομπής. Τα περισσότερα LED's παρουσιάζουν μια μεταβολή  $0.3\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$  έως  $0.6\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$  στο μήκος κύματος της μέγιστης εκπομπής καθώς η θερμοκρασία αλλάζει. Αυτό μπορεί να είναι σημαντικό σε συστήματα πολλαπλών μηκών κυμάτων όπου υπάρχει η πιθανότητα διαφωνίας μεταξύ των καναλιών, εάν μεταβάλλεται το μήκος κύματος του LED.

Από τους δύο τύπους πηγής φωτός, τα LED's είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιημένα σε εφαρμογές συστημάτων οπτικών ινών. Γενικά, τα LED's κοστίζουν λιγότερο από ότι οι δίοδοι *laser*, για αυτό βρίσκουν περισσότερες εφαρμογές.



Σχήμα 3.18 Τυπική συμπεριφορά του LED συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Ένα κοινό γνώρισμα όλων των τύπων LED είναι ότι ανάβουν πιο γρήγορα από ότι κλείνουν. Αυτό οφείλεται στον μεγαλύτερο χρόνο ζωής των φορέων επανασύνδεσης στα LED. Συχνά, αυτός ο φορέας επανασύνδεσης θα είναι της τάξης των nanoseconds. Τα περισσότερα κυκλώματα οδήγησης των LED, εφαρμόζουν ειδικά τεχνάσματα για να αποφύγουν αυτό το ελάττωμα. Τα τεχνάσματα αυτά, γενικά, αφορούν εφαρμογή γρήγορης ανάστροφης πόλωσης στο LED κατά τη διάρκεια του σβησίματος σε περισσότερο γρήγορη σάρωση των φορέων της ενεργού περιοχής.

Ακόμα και με αυτά τα τεχνάσματα κυκλώματος, τα LED's περιορίζονται για εφαρμογές χαμηλότερων ταχυτήτων από ότι οι δίοδοι *laser*. Τα περισσότερα εμπορικά LED's έχουν ένα εύρος συχνοτήτων 100-200MHz. Λίγα ειδικά LED's είναι διαθέσιμα για περιοχές συχνοτήτων μέχρι 600MHz, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του κατασκευαστή, ενώ είναι μόνο ευρέως χρησιμοποιημένα για βαθμούς πληροφορίας κάτω των 266Mb/s. Μια αιτία είναι ότι το μεγαλύτερο φασματικό εύρος ζώνης των LED's προκαλεί περισσότερη διασπορά στην οπτική ίνα. Αυτή η αυξανόμενη διασπορά περιορίζει τη μέγιστη απόσταση που μπορεί να σταλεί το οπτικό σήμα.

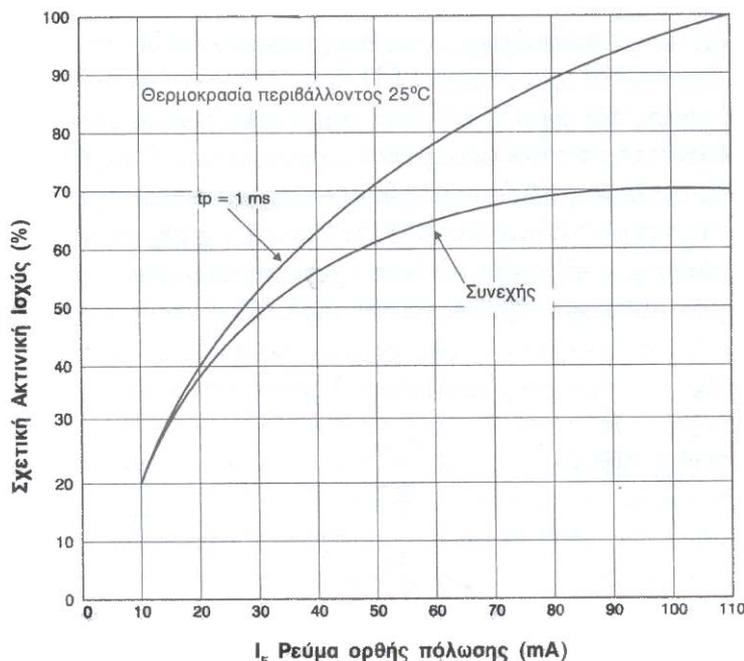


Σχήμα 3.19 Άλλος ένας τρόπος εκπομπής.

Ο άλλος παράγοντας που έχει περιορίσει τη χρησιμότητα των LED's σε εφαρμογές υψηλού ρυθμού δεδομένων, είναι η διαθεσιμότητα των χαμηλού κόστους "CD" laser. Τα laser αυτά κατασκευάζονται σε πολύ μεγάλες ποσότητες (πάνω από ένα εκατομμύριο το μήνα) κάνοντας τα πολύ οικονομικά. Αν και αυτά τα laser δεν είναι ειδικά ανεπτυγμένα για εφαρμογές πληροφορίας, ωστόσο, πολύ συχνά είναι ικανά να εργαστούν σε ρυθμούς δεδομένων από ένα Gb/s ή περισσότερο.

### 3.8 Κυκλώματα Οδήγησης LED

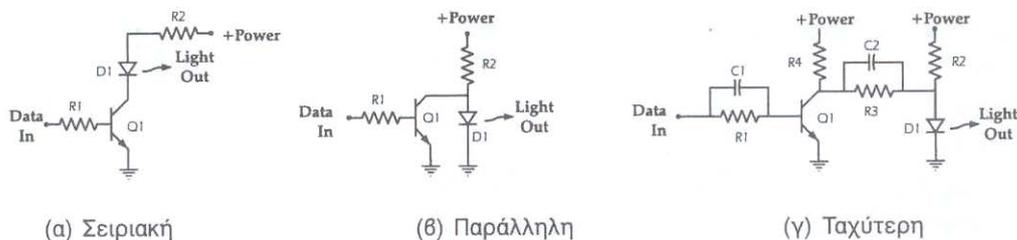
Η οπτική έξοδος της LED είναι περίπου ανάλογη του ρεύματος οδήγησης. Άλλοι παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, επηρεάζουν επίσης την οπτική έξοδο. Το σχήμα 5.7 δείχνει τη τυπική συμπεριφορά μιας LED. Παρουσιάζονται δύο καμπύλες. Η πάνω καμπύλη αντιπροσωπεύει ένα 0.1% του κύκλου εργασίας με τη κορυφή ρεύματος όπως φαίνεται στον οριζόντιο άξονα. Η κάτω καμπύλη δείχνει την έξοδο με 100% κύκλο εργασίας. Η πτώση οφείλεται αρχικά στη θερμότητα του ολοκληρωμένου της LED. Οι περισσότερες LED's έχουν καμπύλες του φωτός σε σχέση με το ρεύμα, που φθίνουν ή πέφτουν κάτω από μια γραμμική καμπύλη. Λίγες όπως οι υπερακτινοβολούμενες LED's, μπορούν να έχουν καμπύλες που κλίνουν προς τα πάνω αντί προς τα κάτω.



Σχήμα 3.20 Οπτική έξοδος συναρτήσει του ρεύματος σε μια δίοδο εκπομπής φωτός InGaAsP.

Οι LED's οδηγούνται συνήθως είτε από ψηφιακό σήμα, είτε από αναλογικό σήμα. Όταν το σήμα οδήγησης είναι ψηφιακό, τότε δεν υπάρχει ενδιαφέρον για τη γραμμικότητα της LED. Η LED είναι είτε

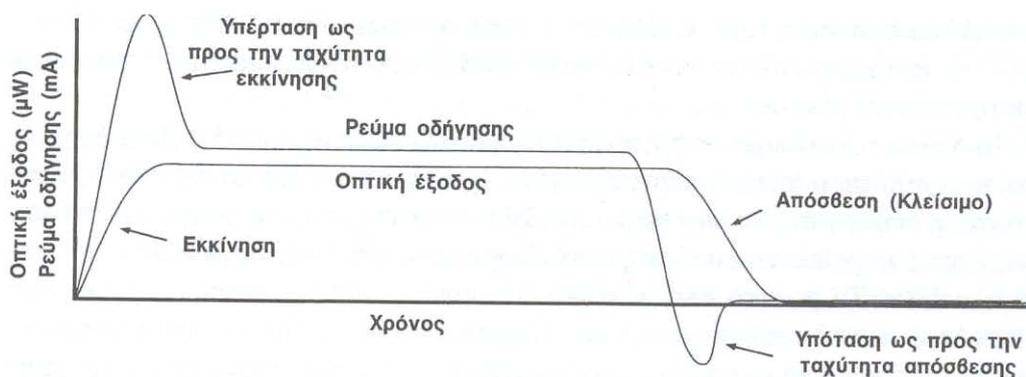
ανοιχτή είτε κλειστή. Υπάρχουν ειδικά προβλήματα που πρέπει να διευθετηθούν όταν σχεδιάζεται ένας οδηγός LED. Το κλειδί είναι, να οδηγηθεί η LED ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη ταχύτητα. Τα σχήματα 3.21.α, 3.21.β και 3.21.γ δείχνουν τρία από τα πιο γνωστά ψηφιακά κυκλώματα οδήγησης LED. Το πρώτο κύκλωμα, φαίνεται στο Σχήμα 3.21.α, είναι ένα απλό κύκλωμα οδήγησης σειράς. Η τάση εισόδου εφαρμόζεται στη βάση του τρανζίστορ Q1 διαμέσου της αντίστασης R1. Το τρανζίστορ θα είναι κλειστό ή ανοικτό. Όταν το τρανζίστορ Q1 είναι κλειστό, δε θα ρέει ρεύμα στο LED, και δε θα εκπέμπεται φως. Όταν το τρανζίστορ Q1 είναι ανοικτό, η κάθοδος της LED οδηγείται σε χαμηλότερο δυναμικό. Το τρανζίστορ Q1 θα μειώσει το συλλέκτη του στα 0.25volts. Το ρεύμα είναι ίσο με τη τάση πάνω στην αντίσταση R2 διαιρεμένο με την αντίσταση R2. Η τάση στην αντίσταση R2 είναι ίση με την τάση τροφοδοσίας μείον τη πτώση τάσης στο LED και τη τάση κόρου του τρανζίστορ οδήγησης. Το βασικό πλεονέκτημα των οδηγών σειράς, που φαίνεται στο σχήμα 3.21.α, είναι ο χαμηλός μέσος όρος του ρεύματος τροφοδοσίας. Εάν κάποιος καθορίσει τη κορυφή του ρεύματος οδήγησης LED σαν  $I_{LEDmax}$  υποθέτει ότι ο κύκλος εργασίας του LED είναι 50%, τότε ο μέσος όρος του ρεύματος τροφοδοσίας είναι μόνο  $I_{LEDmax} / 2$ . Επιπλέον, η καταναλισκόμενη ισχύς είναι ίση με  $(I_{LEDmax} / 2)V_{SUPPLY}$  όπου η  $V_{SUPPLY}$  είναι η τάση τροφοδοσίας. Η ισχύς που χάνεται από τα ξεχωριστά εξαρτήματα LED, τρανζίστορ και αντίσταση R1, είναι ίση με τη πτώση τάσης πάνω σε κάθε εξάρτημα πολλαπλασιασμένη με  $(I_{LEDmax} / 2)$ . Το βασικό μειονέκτημα του κυκλώματος του σχήματος 3.21.α είναι η χαμηλή ταχύτητα. Αυτός ο τύπος κυκλώματος οδήγησης χρησιμοποιείται σπανίως σε ρυθμούς δεδομένων πάνω από τα 30-50Mb/s. Γενικά, υπάρχουν δύο τρόποι να σχεδιαστεί ένα κύκλωμα οδήγησης LED για χαμηλή απώλεια ισχύος. Ο πρώτος είναι να χρησιμοποιηθεί μια υψηλής απόδοσης LED και να μειωθεί το  $I_{LEDmax}$  χαμηλότερη δυνατή τιμή. Ο δεύτερος είναι να μειωθεί ο κύκλος εργασίας της LED σε μια χαμηλή τιμή. Μεγαλύτερες απολαβές συνήθως πραγματοποιούνται με τη δεύτερη μέθοδο.



Σχήμα 3.21 Κύκλωμα οδήγησης LED.

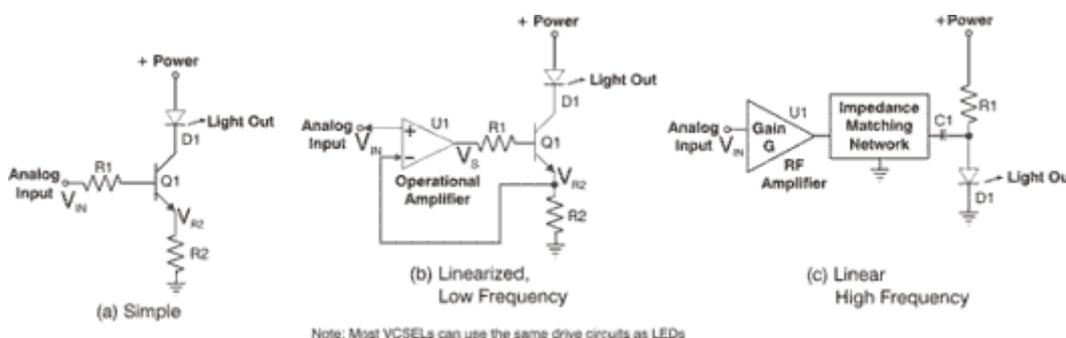
Το δεύτερο κύκλωμα οδήγησης LED, φαίνεται στο σχήμα 3.21.β, προσφέρει πολύ μεγαλύτερη δυνατότητα ταχύτητας. Χρησιμοποιεί ένα τρανζίστορ Q1 για γρήγορη εκφόρτιση για να κλείσει το LED. Το κύκλωμα αυτό οδηγεί περισσότερες φορές γρηγορότερα από ότι το κύκλωμα οδήγησης σειράς που φαίνεται στο Σχήμα 3.21.α. Το βασικό πλεονέκτημα του κυκλώματος οδήγησης μετατόπισης είναι ότι δίνει καλύτερη συμμετρική οδήγηση. Οι LED's μπορούν εύκολα να ανοίγουν γρήγορα, αλλά κλείνουν δύσκολα λόγω της σχετικά μεγάλης διάρκειας ζωής των φορέων. Στο κύκλωμα του σχήματος 3.21.β, η αντίσταση R2 προκαλεί ένα θετικό ρεύμα για το άνοιγμα της LED. Τυπική τιμή της αντίστασης R2 είναι τα 40Ω. Συνεπώς το ρεύμα αποκοπής είναι στα 100mA. Το τρανζίστορ Q1 εξασφαλίζει το ρεύμα αποκοπής. Όταν έρθει στον κόρο, το τρανζίστορ Q1 θα έχει μια αντίσταση μερικών Ohms. Αυτό παρέχει ένα πολύ μεγαλύτερο ρεύμα εκφόρτισης που επιτρέπει το LED να κλείνει γρήγορα. Το βασικό μειονέκτημα του κυκλώματος σχήματος 3.21.β είναι η απώλεια ισχύος. Είναι τυπικά η διπλάσια από το κύκλωμα σειράς. Στη πραγματικότητα το κύκλωμα τραβάει περισσότερο ρεύμα και ισχύ όταν το LED είναι κλειστό από ότι όταν είναι ανοικτό. Η ακριβής απώλεια ισχύος μπορεί να υπολογιστεί αναλύοντας τα ρεύματα κόρου και αποκοπής και έπειτα συγκρίνοντας τις δύο τιμές χρησιμοποιώντας πληροφορίες για το κύκλο εργασίας.

Το τελευταίο κύκλωμα οδήγησης, σχήμα 3.21.γ, είναι μια παραλλαγή του κυκλώματος στο σχήμα 3.21.β. Έχουν προστεθεί δύο αντιστάσεις και δύο πυκνωτές στο βασικό κύκλωμα. Ο σκοπός των πρόσθετων εξαρτημάτων είναι για παραπέρα αύξηση της ταχύτητας λειτουργίας. Ο πυκνωτής C1 χρησιμοποιείται στην αύξηση των χαρακτηριστικών κόρου και αποκοπής του Q1. Πρέπει να προσέξουμε ο πυκνωτής C1 να μην είναι μεγάλος. Αν είναι μεγάλο, τότε η βάση του τρανζίστορ θα υπεροδηγηθεί και θα καταστραφεί. Τα πρόσθετα εξαρτήματα αντιστάσεις R3 και R4, και ο πυκνωτής C2 εξασφαλίζουν την υπεροδήγηση όταν η LED είναι ανοικτή και την υποοδήγηση όταν το τρανζίστορ είναι κλειστό. Οι δύο αυτές καταστάσεις επιταχύνουν τις μεταβολές του LED. Τυπικά, η σταθερά χρόνου RC των R3 και C2 είναι περίπου ίση με το χρόνο ανύψωσης ή πτώσης του LED όταν οδηγείται από τετραγωνικό σήμα. Όλα τα τεχνάσματα μαζί μπορούν να αυξήσουν τη ταχύτητα λειτουργίας της LED και το κύκλωμα οδήγησης κοντά στα 270Mb/s. Έχουν γίνει πολυάριθμα εργαστηριακά τεστ και πρωτότυπα κυκλώματα που έχουν φτάσει σε τιμές 500-1000Mb/s, αλλά σε κανένα από αυτά δεν έγινε μαζική παραγωγή. Τυπικά αυτά τα επίπεδα απόδοσης απαιτούν μεγάλη εμπορική συναλλαγή κάθε μέρους ώστε να υπάρξουν υψηλοί ρυθμοί δεδομένων.



**Σχήμα 3.22** Απόκριση μιας LED σε ένα διαμορφωμένο ψηφιακό σήμα.

Το σχήμα 3.22 δείχνει την απόκριση μιας LED σε ένα ψηφιακό διαμορφωμένο σήμα. Το ηλεκτρικό σήμα που φαίνεται είναι ο τύπος που παράγεται από πιο πολύπλοκα κυκλώματα οδήγησης LED όπως του σχήματος 3.21.γ. Ξεκινώντας από χρόνο μηδέν βλέπουμε ότι το ψηφιακό σήμα πηγαίνει στο λογικό επίπεδο 1. Το πιο αξιοσημείωτο μέρος αυτού του γεγονότος είναι η απότομη πτώση που παρουσιάζει το ηλεκτρικό σήμα οδήγησης. Η πτώση αυτή μπορεί να είναι δυο φορές το σταθερό οδηγό ρεύμα λογικού επιπέδου 1. Η πτώση επιταχύνει το χρόνο ανόδου της LED. Ακόμα και έτσι, βλέπουμε ότι η οπτική έξοδος καθυστερεί σε σχέση με το ηλεκτρικό σήμα. Τυπικές τιμές για υψηλής απόδοσης LED's και κυκλώματα οδήγησης είναι 0.7ns χρόνος ανόδου του ηλεκτρικού σήματος και 1.5ns οπτικού χρόνου ανόδου.



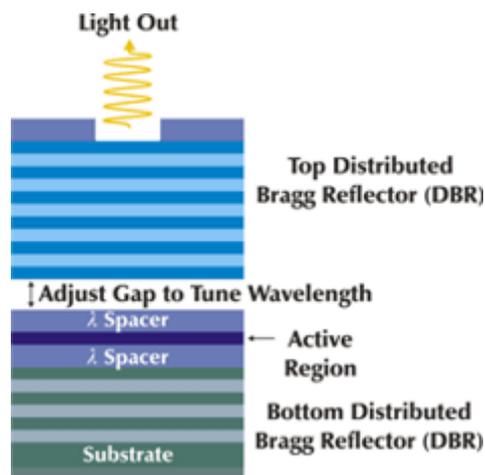
**Σχήμα 3.23** Αναλογικό κύκλωμα LED.

Στη συνέχεια όταν το ψηφιακό σήμα επιστρέφει στο λογικό 0, βλέπουμε να επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία. Το ηλεκτρικό σήμα έχει μια απότομη ανύψωση που ενεργεί στην επιτάχυνση του κλεισίματος της LED, Οι LED's πιο γρήγορα ανοίγουν από ότι κλείνουν. Αυτό συμβαίνει λόγω της σχετικά μεγάλης διάρκειας ζωής των φορέων στην ενεργό περιοχή. Η απότομη ανύψωση εξυπηρετεί στην αντιστροφή της πόλωσης της LED, σαρώνοντας τους φορείς. Ακόμα, ο χρόνος κλεισίματος στις περισσότερες LED's είναι πάντα πιο αργός από ότι του χρόνου ανοίγματος. Τυπικές τιμές για ημιαγωγούς

χρόνους κλεισίματος είναι 0.7ns για το ηλεκτρικό σήμα και 2.5ns για το οπτικό σήμα. Σημειώστε ότι σε λογικό 0, το οδηγό ρεύμα δεν είναι ακριβώς στο μηδέν. Είναι συνηθισμένο να παρέχεται ένα μικρό ποσό από ρεύμα προπόλωσης, τυπικά ένα μικρό ποσοστό της κορυφής του οδηγού ρεύματος, ώστε να κρατείται η LED ορθά πολωμένη και να αυξηθεί η δυναμική απόκριση.

### 3.9 Δίοδοι LASER (LD's)

Υπάρχουν δυο κύριοι τύποι διόδου laser[3], Fabry-Perot(FP) και κατανεμημένης ανάδρασης (DFB). Τα laser DFB προσφέρουν τα υψηλότερα επίπεδα απόδοσης και την μεγαλύτερη δαπάνη από τους δυο τύπους. Είναι σχεδόν μονοχρωματικά ενώ τα laser FP εκπέμπουν φως σε ένα αριθμό από διακριτά μήκη κύματος. Τα laser DFB τείνουν να χρησιμοποιούνται σε ψηφιακές εφαρμογές υψηλής ταχύτητας και στις περισσότερες αναλογικές εφαρμογές εξαιτίας της υψηλής ταχύτητας τους, του χαμηλού θορύβου και της καλύτερης γραμμικότητας. Τα laser FP χωρίζονται στους τύπους Buried Hetero (BH) και πολυκβαντικών φρεάτων (MQW: multi-quantum well). Τα BH και παρόμοια μοντέλα επικρατούσαν για πολλά χρόνια αλλά τώρα είναι ευρέως διαδεδομένοι οι τύποι MQW. Τα laser MQW προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με όλους τους τύπους laser. Παρουσιάζουν χαμηλότερο ρεύμα κατωφλίου, υψηλότερη αποδοτικότητα, χαμηλότερο θόρυβο, καλύτερη γραμμικότητα και πολύ μεγαλύτερη σταθερότητα στη θερμοκρασία. Σαν πλεονέκτημα τα όρια απόδοσης των laser MQW είναι τόσο μεγάλα, ώστε οι κατασκευαστές LASER να παίρνουν καλύτερες προμήθειες και η τιμή των laser να μειώνεται. Ένα μειονέκτημα των laser MQW είναι ότι τείνουν να είναι πολύ επιρρεπή στις αντανάκλασεις.



Σχήμα 3.24 Μήκος κύματος laser.

Όλες οι δίοδοι laser που χρησιμοποιούνται για μεταδόσεις σε οπτική ίνα, συγχωνεύουν μια φωτοδίοδο πίσω όψης για να παρέχουν πραγματικού χρόνου παρακολούθηση της εξόδου του laser. Αυτό είναι

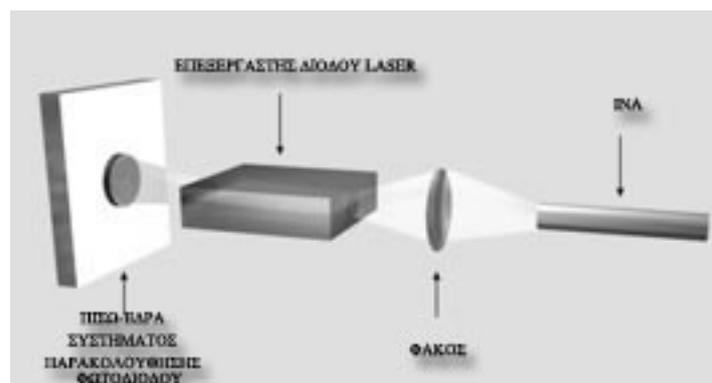
απαραίτητο γιατί το ρεύμα κατωφλίου του laser αλλάζει με τη θερμοκρασία καθώς έχει κλίση η αποδοτικότητα. (Το σχήμα 3.33, παρακάτω σε αυτό το κεφάλαιο, δείχνει αυτές τις επιδράσεις.)

Το σχήμα 3.25 δείχνει τη τυπική οπτική κατασκευή μιας διόδου laser. Η διόδος laser εκπέμπει φως σε δυο κατευθύνσεις. Το φως από τη μια άκρη του laser εστιάζεται πάνω στην ίνα και παρέχει την χρήσιμη έξοδο. Το φως από την άλλη άκρη πέφτει πάνω σε μια μεγάλη περιοχή της φωτοδίοδου. Συνήθως, αυτή η φωτοδίοδος τοποθετείται σε μια απόσταση από το laser και κάνει γωνία για μείωση των αντανακλάσεων μέσα στη κοιλότητα του laser.

Τα laser FP είναι τα πιο οικονομικά, αλλά είναι γενικώς θορυβώδη και αργές συσκευές.

Τα laser DFB είναι πιο ήσυχες συσκευές (έχουν υψηλό σήμα προς θόρυβο) περιορισμένο φασματικό πλάτος και είναι συνήθως γρηγορότερες συσκευές. Ο θόρυβος του laser εκφράζεται σαν *θόρυβος σχετικής έντασης* (RIN: Relative Intensity Noise) με μονάδες dB/Hz. Τυπικές τιμές RIN για καλές συσκευές FP είναι -125 έως -130 dB/Hz. ενώ ένα καλό laser DFB έχει τιμές RIN κάτω από τα -155 dB/Hz.. Για να μετατρέψετε τις τιμές RIN σε μια αποτελεσματική σχέση σήμα προς θόρυβο, πάρτε την απόλυτη τιμή RIN και αφαιρέστε  $10\log_{10}(BW)$  όπου BW είναι το εύρος ζώνης που εκφράζεται σε Hertz.

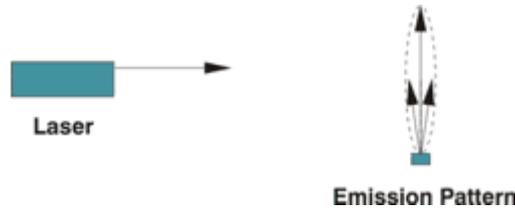
Για παράδειγμα, αν το laser έχει ένα RIN των -130 dB/Hz. και το σύστημα έχει ένα εύρος ζώνης του 1 MHz, ο λόγος σήμα προς θόρυβο του οπτικού σήματος του laser θα είναι 70dB.



Σχήμα 3.25 Κατασκευή του laser.

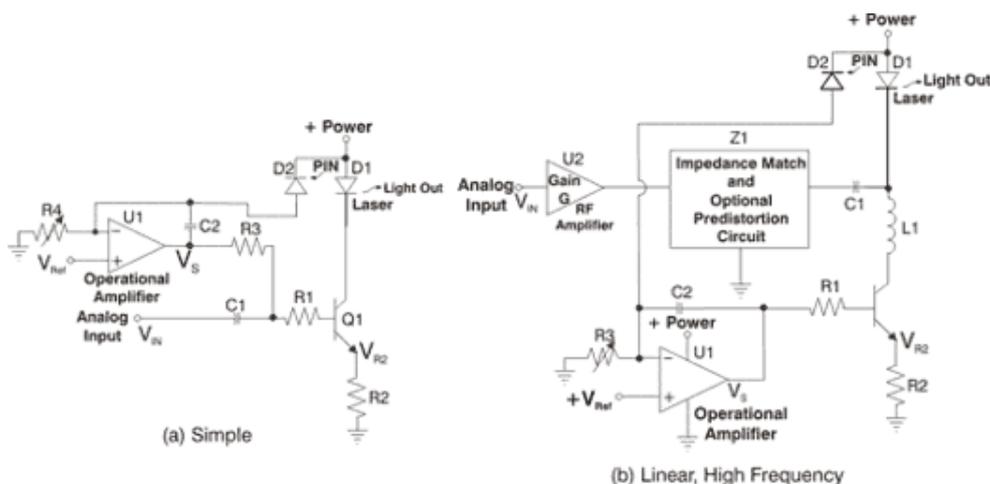
Όλα τα laser είναι ευαίσθητα στις αντανακλάσεις. Οι αντανακλάσεις ενοχλούν το στάσιμο κύμα στη κοιλότητα του laser και η επίδραση του δικτύου είναι μια αύξηση στο ενεργό στρώμα θορύβου του laser. Μια δυνατή αντανάκλαση μπορεί να προκαλέσει μερικά laser να γίνουν ευρέως ασταθή και εντελώς

άχρηστα σε μερικές εφαρμογές. Η αντανάκλαση μπορεί ακόμη να προκαλέσει μη γραμμικότητες στην απόκριση του . Αυτές οι μη γραμμικότητες συχνά περιγράφονται σαν *κόμποι* (Kinks). Οι περισσότερες αναλογικές εφαρμογές και μερικές ψηφιακές εφαρμογές δε μπορούν να ανεχτούν αυτόν τον υποβιβασμό. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ένας οπτικός απομονωτής χρησιμοποιείται για να εμποδίσει τις ανακλάσεις να επιστρέψουν στη κοιλότητα του laser.



Σχήμα 3.26 Τρόπος εκπομπής laser.

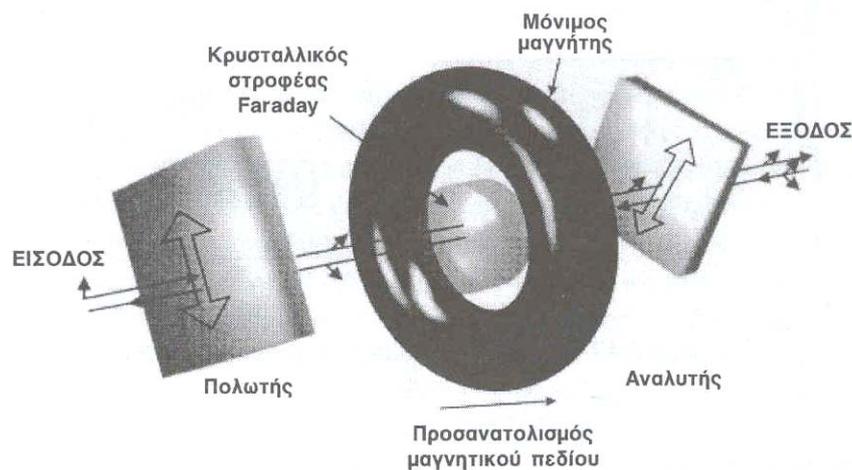
Η σπουδαιότητα στον έλεγχο των ανακλάσεων εξαρτάται από το τύπο πληροφορίας που στέλνεται και από το laser. Μερικά laser είναι πολύ ευαίσθητα στις αντανάκλασεις λόγω του σχεδίου του κάθε τσιπ. Αρκετά συχνά ο καθοριστικός παράγοντας είναι το πόσο σφιχτά η ίνα ταιριάζει στο τσιπ. Ένα laser χαμηλής ισχύος έχει αδύναμο ταιριασμο στην ίνα. Ίσως μόνο το 5-10% της ισχύος του laser οδηγείται μέσα στην ίνα. Αυτό σημαίνει ότι μόνο το 5-10% της αντανάκλασης θα οδηγηθεί στη κοιλότητα του laser, κάνοντας το laser σχετικά απρόσβλητο από αντανάκλασεις. Από την άλλη, ένα υψηλής ισχύος laser μπορεί να οδηγηθεί το 50-70% της εξόδου του laser στην ίνα. Αυτό σημαίνει ότι το 50-70% της αντανάκλασης θα οδηγηθεί στη κοιλότητα του laser. Αυτό κάνει τα υψηλής ισχύος laser περισσότερο ευαίσθητα στις αντανάκλασεις.



Σχήμα 3.27 Αναλογικό κύκλωμα LASER.

Ένας τρόπος να μειωθούν οι αντανακλάσεις είναι να τοποθετηθεί ένας οπτικός απομονωτής στην έξοδο του laser. Ο οπτικός απομονωτής θα μειώσει τις αντανακλάσεις κατά 20 με 45dB στρέφοντας τη πόλωση του φωτός 45° κάθε φορά που περνάει μέσα από τον απομονωτή και μετά μπλοκάροντας το επιστρεφόμενο φως (το οποίο έχει περιστραφεί 90°) με έναν πολωτή. Δυστυχώς, οι οπτικοί απομονωτές δεν αντικαθιστούν κατάλληλα γυαλισμένους, χαμηλής αντανάκλασης συνδετήρες. Το ποσό της απόρριψης που προσφέρεται από ένα οπτικό απομονωτή, θα βελτιώσει προβλήματα που προκαλούνται από αντανακλάσεις αλλά δε θα τα εξαλείψει. Οι οπτικοί απομονωτές απαιτούν η πόλωση του φωτός να συντηρείται για κατάλληλη λειτουργία. Σύνδεσμοι βρόμικοι ή γδαρμένοι ή μικρά κομμάτια πολύτροπης ίνας μπορούν να καταστρέψουν την πόλωση, κάνοντας τον οπτικό απομονωτή άχρηστο.

Ένας τύπος απομονωτή είναι ο *στροφέας Faraday*, μια συσκευή που βασίζεται στο φαινόμενο Faraday, που χρησιμοποιείται για να περιστρέφει το επίπεδο της πόλωσης ενός φωτεινού κύματος. Το σχήμα 3.28 δείχνει αυτόν τον απομονωτή.



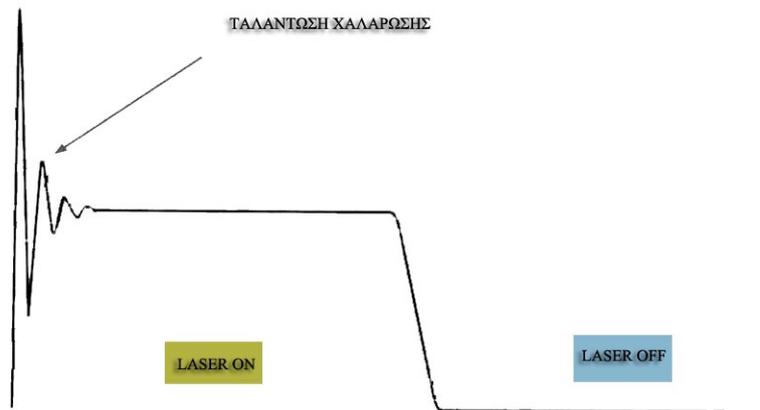
**Σχήμα 3.28** Απομονωτής που βασίζεται στον στροφέα Faraday.

Πριν εισαχθεί ο στροφέας *Faraday*, που είναι συνήθως ένα υλικό Ύτριο-Σίδηρος-Διαμάντι (YIG), η δέσμη φωτός περνάει μέσα από ένα πολωτή ο οποίος είναι προσανατολισμένος παράλληλα με την εισερχόμενη κατάσταση της πόλωσης. Τότε ο στροφέας *Faraday* περιστρέφει τη πόλωση κατά 45°. Στην έξοδο, η δέσμη περνάει έναν αναλυτή ο οποίος προσανατολίζεται σε μια γωνία 45° σχετικά με τον πρώτο πολωτή. Από όλες τις πιθανές ανακλώμενες δέσμες, μόνο αυτές με προσανατολισμό 45° της πόλωσης επιτρέπονται να περάσουν. Η πόλωση της ανακλώμενης δέσμης περιστρέφεται ακόμη 45° οπότε η ολική περιστροφή θα είναι 90°. Με αυτό το τρόπο η ανακλώμενη δέσμη μπλοκάρεται από τον πολωτή. Για να

μην διαταραχθούν οι κατάλληλες λειτουργίες του απομονωτή, όλες οι επιφάνειες πρέπει να περιβληθούν με υλικό για αποφυγή αντανάκλασεων.

### 3.9.1 Αντανάκλαση

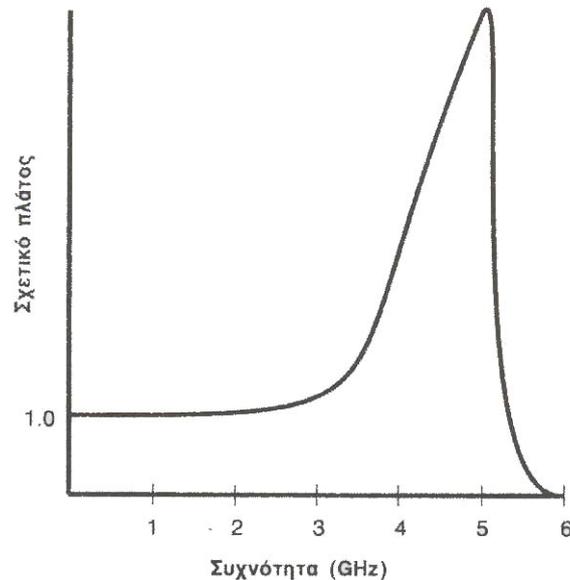
Ποια είναι τα αποτελέσματα των αντανάκλασεων; Το σχήμα 3.29 δείχνει μια καθαρή κυματομορφή laser και το σχήμα 3.31 δείχνει μια κυματομορφή laser με μια ισχυρή αντανάκλαση. Πρέπει αρχικά να εξηγηθεί η κυματομορφή του σχήματος 3.29.



Σχήμα 3.29 Οπτική έξοδος laser χωρίς αντανάκλαση.

Όπως φαίνεται στο σχήμα η ανυψωμένη άκρη συνοδεύεται από μια εξασθενημένη ταλάντωση. Αυτή η πτώση και η διαδοχική ταλάντωση ονομάζεται *αποσβενόμενη ταλάντωση*. Τα περισσότερα laser εμφανίζουν αυτό το φαινόμενο. Μπορεί να γίνει κατανοητό, κοιτάζοντας την απόκριση πλάτους σε συνάρτηση με τη συχνότητα του laser στο σχήμα 3.30.

Το laser, σε αυτή τη περίπτωση, παρουσιάζει ένα συντονισμό (σημείο υψηλής απολαβής) κοντά στα 5GHz. Αυτή θα είναι η πιο σωστή συχνότητα της αποσβενόμενης ταλάντωσης. Η συχνότητα της κορυφής συντονισμού είναι ένας από τους παράγοντες, που ορίζει το μέγιστο ρυθμό δεδομένων που μπορεί να μεταδοθεί από το δεδομένο laser. Όταν η μέγιστη συνιστώσα συχνότητας του ρεύματος των δεδομένων μεταβάλλεται κατά ένα παράγοντα δύο ή τρεις φορές την συχνότητα συντονισμού του laser, τότε η απόδοση μειώνεται απότομα.

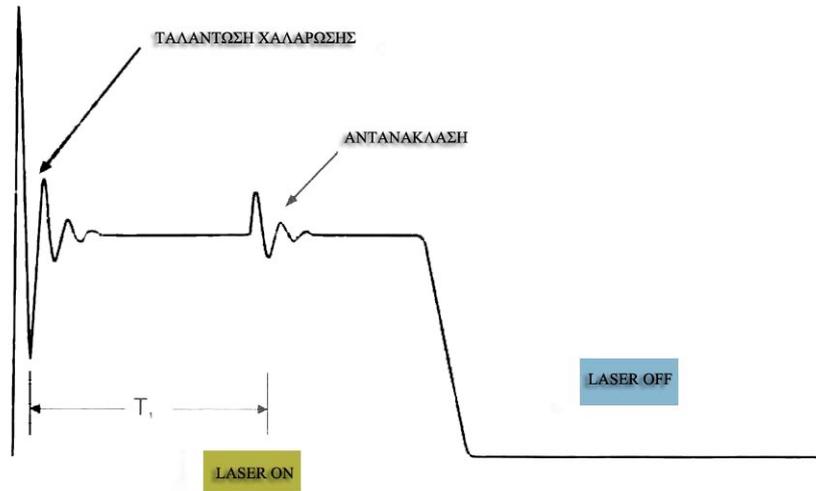


**Σχήμα 3.30** Απόκριση πλάτους σε συνάρτηση με την συχνότητα ενός laser.

Η συχνότητα του συντονισμού και το μέγεθος της πτώσης εξαρτώνται από τις στάθμες οδήγησης που χρησιμοποιούνται στα laser. Η πτώση είναι γενικά πιο δύσκολη όταν το laser κλείνει τελείως και ξανανοίγει. Αυτή η συνθήκη αποφεύγεται στις περισσότερες πρακτικές μεταβίβασης δεδομένων.

Η αντανάκλαση που φαίνεται στο σχήμα 3.31 δείχνει τα ίδια χαρακτηριστικά όπως και η αρχική αποσβενόμενη ταλάντωση. Ο χρόνος T1 μπορεί να μετρηθεί ακριβώς για να καθορίσει την απόσταση στο σημείο αντανάκλασης. Η συχνότητα πρέπει συχνά να μειώνεται αρκετά ώστε να παρακολουθεί τέτοιες αντανακλάσεις. Ένα λάθος είναι ότι συμβαίνουν μόνο κλειστές αντανακλάσεις. Πιο κλειστές αντανακλάσεις είναι συχνά πιο ισχυρές, αλλά στα 1300nm στα 1550nm απώλεια της ίνας είναι τόσο χαμηλή ώστε οι αντανακλάσεις από απόσταση αρκετών χιλιομέτρων να είναι σημαντικές. Ένα άλλο χρήσιμο τέχνασμα είναι να εμφανιστεί σε οθόνη ο βρόχος σέρβομηχανισμού της φωτοδιόδου ώστε να φανούν ταραχές.

Ένα αρχικό στάδιο είναι να τοποθετηθεί το άκρο του σπειροειδή συνδέσμου του laser σε γλυκερίνη. Αυτό θα εξαλείψει σχεδόν όλες τις αντανακλάσεις. Σημειώστε την έξοδο του βρόχου σέρβομηχανισμού εκείνη τη στιγμή. Μετά ενώστε το σπειροειδή σύνδεσμο του laser στο σύστημα. Αν σημειωθούν σημαντικές διαταραχές, υπάρχουν αντανακλάσεις ικανοποιητικού πλάτους για να εμποδίσουν το στάσιμο κύμα στη κοιλότητα του laser.



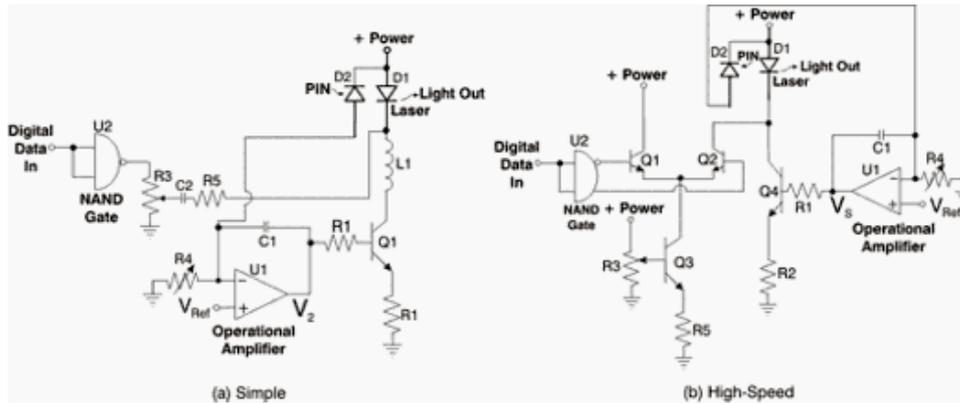
Σχήμα 3.31 Οπτική έξοδος laser με αντανάκλαση.

Είναι μια σχετικά άμεση μέθοδος για να παρακολουθούνται οι αντανακλάσεις του laser. Ένας λιγότερο άμεσος τρόπος για έλεγχο των αντανακλάσεων του laser, είναι να ελεγχθούν στις συχνότητες πού θα συμβούν αντανακλάσεις σε ένα ακριβή χρόνο. Βασικά, η διαδικασία είναι να υπολογιστεί ο κυκλικός χρόνος μετάβασης στις δυναμικές επιφάνειες αντανάκλασης στο σύστημα.

Είναι γενικά ευκολότερο να μετρηθεί το διάστημα μεταξύ των υψηλών σημείων παρεμβολής όταν χρησιμοποιείται αυτή η μέθοδος. Συχνά, ο σπειροειδής σύνδεσμος του laser γίνεται πολύ κοντός, έτσι ώστε η πρώτη αντανάκλαση να συμβαίνει σε μια συχνότητα υψηλότερη από οποιαδήποτε συχνότητα που εκπέμπεται από το σύστημα. Ωστόσο, μεγαλύτερα τμήματα ίνας στο σύστημα θα αποφέρουν μια χαμηλή βασική συχνότητα παρεμβολής και αρμονικές που θα διαταράξουν το φάσμα. Η μόνη πρακτική τεχνική με συστήματα βασισμένα σε laser είναι να σχεδιαστούν για χαμηλές αντανακλάσεις.

### 3.9.2 Επιδράσεις θερμοκρασίας στα LASER

Τα laser μπορούν να αντέξουν σε μεγάλες περιοχές θερμοκρασίας (μέχρι τις βιομηχανικές απαιτήσεις,  $-40^{\circ}\text{C}$  έως  $+85^{\circ}\text{C}$ ). Η θερμοκρασία επηρεάζει το μήκος κύματος της μέγιστης εκπομπής καθώς ακόμη το ρεύμα κατωφλίου και τη κλίση της αποδοτικότητας του laser. Τα περισσότερα laser παρουσιάζουν στο μήκος κύματος της μέγιστης εκπομπής, μια ολίσθηση  $0.3-0.6\text{nm}/^{\circ}\text{C}$  καθώς η θερμοκρασία μεταβάλλεται. Αυτό μπορεί να είναι σημαντικό στα συστήματα πολυπλεξίας, όπου εκεί υπάρχει η πιθανότητα ανεπιθύμητων παρεμβολών μεταξύ των καναλιών αν ολισθαίνουν τα μήκη κύματος του laser. Η οπτική ισχύς εξόδου μπορεί να είναι σχετικά σταθερή σε μια ευρεία περιοχή θερμοκρασίας, για το λόγο ότι ο βρόχος σερβομηχανισμού που σταθεροποιεί την έξοδο βασίζεται στον εσωτερικό οπτικό έλεγχο της φωτοδίοδου.



Σχήμα 3.32 Ψηφιακό κύκλωμα LASER.

Η εσωτερική φωτοδίοδος ελέγχει οπτικά τη πίσω όψη του laser, ενώ η μπροστινή όψη της εξόδου ενώνεται με την οπτική ίνα. Εάν οι εξοδοί μπροστά και πίσω όψης είναι τέλεια συσχετισμένες και ο μηχανικός εξοπλισμός είναι ανεπηρέαστος από τη θερμοκρασία, τότε η οπτική ισχύς εξόδου θα είναι πλήρως σταθερή καθώς η θερμοκρασία μεταβάλλεται. Ωστόσο αν δεν συμβαίνει αυτό, η ισχύς εξόδου επηρεάζεται από τη θερμοκρασία. Το αποτέλεσμα αυτό λέγεται λάθος στην ευθυγράμμιση. Είναι γενικά λιγότερο από μερικά dB's στη περιοχή θερμοκρασίας, αν και η κατεύθυνση και η ποσότητα μεταβάλλονται από μέρος σε μέρος.

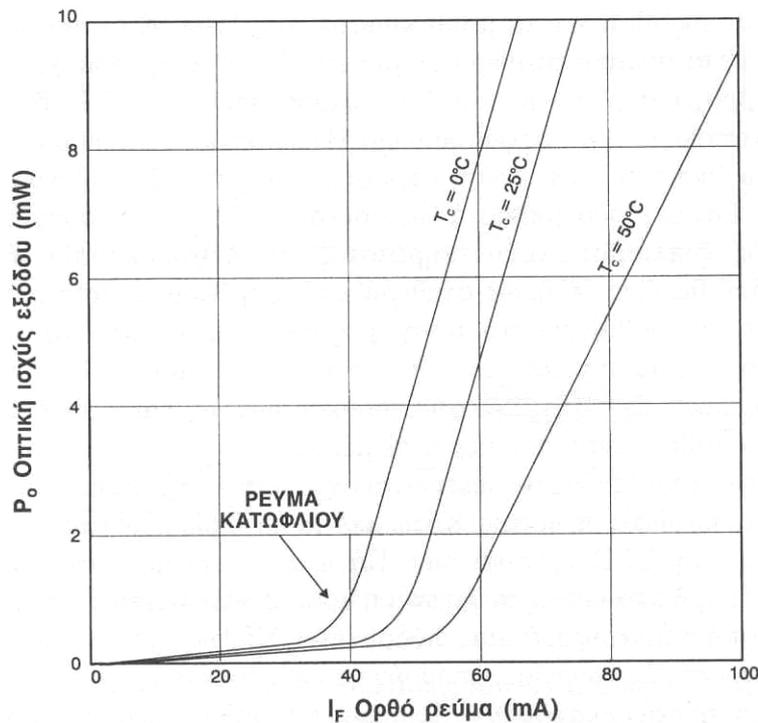
Γενικά, η οπτική έξοδος του laser είναι σχεδόν ανάλογη με το ρεύμα οδήγησης πάνω από το κατώφλι ρεύματος. Κάτω από το κατώφλι ρεύματος η έξοδος είναι από τη δράση της LED της συσκευής. Πάνω από το ρεύμα κατωφλίου η έξοδος αυξάνεται δραματικά καθώς αυξάνεται η απολαβή του laser. Το σχήμα 3.33 δείχνει τη τυπική συμπεριφορά μιας διόδου laser. Καθώς παρουσιάζονται αλλαγές στη θερμοκρασία λειτουργίας, μπορούν να υπάρξουν διάφορες επιδράσεις. Αρχικά αλλάζει το ρεύμα κατωφλίου. Το ρεύμα κατωφλίου είναι πάντα χαμηλότερο σε χαμηλές θερμοκρασίες και αντιστρόφως. Η δεύτερη αλλαγή που μπορεί να είναι σημαντική, είναι η κλίση αποδοτικότητας. Η κλίση αποδοτικότητας είναι ο αριθμός των milliwatts ή microwatts της εξόδου φωτός ανά milliampere του αυξανόμενου οδηγού ρεύματος πάνω από το κατώφλι. Τα περισσότερα laser δείχνουν μια πτώση της κλίσης αποδοτικότητας καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία.

Το σχήμα 3.15 δείχνει ότι η καμπύλη των  $50^{\circ}\text{C}$  δεν είναι τόσο απότομη όπως στις χαμηλές θερμοκρασίες.

### 3.9.3 Ψήκτρες Peltier

Μια δεκαετία πριν, τα περισσότερα laser που χρησιμοποιούνταν στις οπτικές ζεύξεις ήταν ψυχρές συσκευές. Οι ψήκτρες Peltier[4] χρησιμοποιούνταν για να ψύχουν τα laser. Αυτές οι συσκευές είναι

ειδικοί ημιαγωγοί που λειτουργούν σαν μικρές αντλίες θερμότητας, όμοιες σε λειτουργία μ' αυτές που βρίσκονται σε πολλά σπίτια. Κατασκευάζονται από στρώματα p & n στοιχείων φτιαγμένα από ανάμειξη βισμούθιου και τελουρίου ( $\text{BiTe}_2$ ). Οι ψήκτρες Peltier έχουν την ιδιότητα όταν το ρεύμα περνάει μέσω αυτών να αντλούν θερμότητα από το ένα άκρο στο άλλο. Η διαδικασία αυτή είναι πλήρως αναστρέψιμη. Αν κάποιος αντιστρέφει την κατεύθυνση της ροής του ρεύματος δια μέσου των στοιχείων, τότε η κατεύθυνση της μεταφερόμενης θερμότητας επίσης αντιστρέφεται. Μικρές ψήκτρες Peltier χρησιμοποιούνται για να θερμαίνουν ή να ψύχουν τα laser έτσι ώστε να διατηρούνται σε μία σταθερή θερμοκρασία.

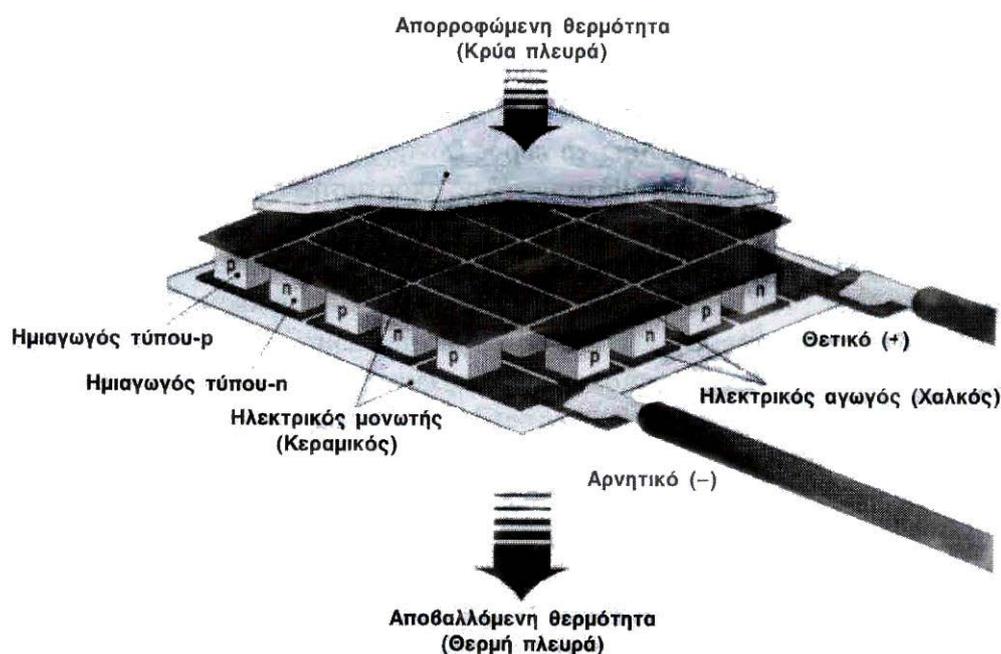


**Σχήμα 3.33** Οπτική ισχύς εξόδου του laser σε συνάρτηση με το ρεύμα ορθής πόλωσης.

Η συσκευή του laser γενικά περιλαμβάνει ένα θερμίστορ έτσι ώστε η θερμοκρασία του laser να μπορεί να μετρηθεί ακριβώς μαζί με την συνηθισμένη πίσω όψη της φωτοδιόδου παρακολούθησης. Τα ψυχόμενα I laser ήταν διαδεδομένα τον πρώτο καιρό, γιατί η μεγάλη διάρκεια σταθερότητας και ζωής μπορούσαν να υλοποιηθούν διατηρώντας τα laser σε ελεγχόμενες θερμοκρασίες. Σήμερα τα περισσότερο αξιόπιστα laser δεν ψύχονται. Τα ψυχόμενα laser είναι τώρα λιγότερο αξιόπιστα από τα μη ψυχόμενα laser εξαιτίας της εύθραυστης φύσης των στοιχείων των ψηκτρών Peltier. Επιπλέον τα ψυχόμενα laser δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν μια μεγάλη περιοχή θερμοκρασίας όπως τα μη ψυχόμενα laser. Αυτό είναι αληθές για δυο λόγους. Πρώτον, ότι μονής βαθμίδας ψήκτρες Peltier, ο πιο συνηθισμένος τύπος που

χρησιμοποιείται με τα laser, μπορεί να διατηρηθεί σε μια θερμοκρασία 40°C. Δεύτερον, τα στοιχεία της ψήκτρας Peltier συνήθως συναρμολογούνται χρησιμοποιώντας καλώς χαμηλού σημείου τήξης, το οποίο ορίζει το τέλος της περιοχής θερμοκρασίας.

Σήμερα τα ψυχόμενα laser χρησιμοποιούνται για δυο βασικούς σκοπούς. Χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με laser πολύ υψηλής ισχύος, μετακινούν θερμότητα από το laser και εγγυώνται τη σταθερότητα του laser.

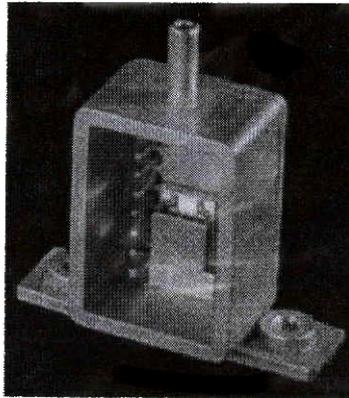


Σχήμα 3.34 Διατομή απλής βαθμίδας, ψήκτρας πολλών στοιχείων Peltier.

Είχε σημειωθεί νωρίτερα ότι το κεντρικό μήκος κύματος ενός laser (ή LED) διαφοροποιείται μεταξύ 0.3-0.6nm/°C. Αυτή η μεταβολή του μήκους κύματος προκαλεί τρία προβλήματα. Πρώτο, μπορεί να επηρεάσει το εύρος ζώνης που μπορεί να επιτευχθεί σε πολύ μεγάλα μήκη ίνας.

Συστήματα μεγάλης απόστασης, συνήθως προσπαθούν να λειτουργούν όσο το δυνατόν πιο κοντά στο μήκος κύματος μηδενικής διασποράς της ίνας. Μια ολίσθηση λίγων nanometers, μπορεί να προκαλέσει μια πτώση του εύρους ζώνης του laser κατά ένα παράγοντα του δέκα ή περισσότερο. Δεύτερο, μπορεί να επηρεάσει την εξασθένιση της ίνας σε μεγάλες αποστάσεις. Αυτό είναι συνήθως μόνο πρόβλημα σε ένα μήκος κύματος στα 1550nm. Τέλος, ολίσθηση του κεντρικού μήκους κύματος του laser μπορεί να προκαλέσει απρόσμενα επίπεδα ανεπιθύμητης παρεμβολής σε συστήματα πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος (WDM), με καταστροφικά αποτελέσματα.

Το σχήμα 3.18 δείχνει ένα λειτουργικό σχέδιο μιας απλής βαθμίδας, πολλών στοιχείων ψήκτρα Peltier. Η θερμότητα που ρέει θα έχει τη κατεύθυνση που φαίνεται μέχρις ότου η ηλεκτρική πολικότητα είναι όπως δείχνεται. Αν η ηλεκτρική πολικότητα αντιστραφεί, τότε θα αντιστραφεί και η κατεύθυνση της ροής της θερμότητας. Το ποσό της θερμότητας που μεταφέρεται από τη μια επιφάνεια στην άλλη, εξαρτάται από το ποσό του ρεύματος που διαρρέει τη ψήκτρα. Τυπικά laser και ανιχνευτής ψηκτρών Peltier απαιτούν +1, -1Amp για 1 έως 2 volt μέγιστο.



**Σχήμα 3.35** Ψήκτρα Peltier πλαισιωμένη σε μια συσκευασία 14 ακίδων.

Εξαιτίας του τρόπου που εργάζονται οι ψήκτρες Peltier, είναι απαραίτητη η καλή θερμική σχεδίαση. Πρέπει να υπάρχει διαθέσιμο επαρκές υλικό απορρόφησης θερμότητας, αλλιώς η ψήκτρα Peltier θα υπερθερμανθεί και θα καταστραφεί. Το σχήμα 3.35 δείχνει μια ψήκτρα Peltier πλαισιωμένη σε μια συσκευασία 14 ακίδων laser.

### 3.10 Ασφάλεια των LASER

Ενώ τα προϊόντα οπτικής ίνας με βάση τα laser είναι σε ευρεία χρήση και δεν παρουσιάζουν κινδύνους στο προσωπικό όταν χρησιμοποιούνται κατάλληλα, ωστόσο όμως υπάρχουν μερικοί βασικοί κανόνες που πρέπει να τηρούνται για να ορίζουν την έκθεση στην ακτινοβολία του laser. Η ακτινοβολία του laser μπορεί να καταστρέψει την όραση κάτω από καθορισμένες συνθήκες. Οι παρακάτω οδηγίες είναι σημαντικές για την ασφάλεια των laser

- **Πάντα** διαβάζετε το ενημερωτικό φυλλάδιο για το προϊόν και την ετικέτα ασφάλειας του laser πριν εφαρμόσετε τάση. Σημειώστε το μήκος κύματος λειτουργίας, την οπτική ισχύ εξόδου και την ασφάλεια ταξινόμησης.

- **Αν** χρησιμοποιούνται προστατευτικά ματογυάλια ή άλλα προστατευτικά ματιών, σιγουρευτείτε ότι η προστασία είναι αποτελεσματική στο μήκος κύματος που εκπέμπεται από τη συσκευή ύστερα από έλεγχο, πριν εφαρμόσετε τάση.
- **Πάντα** συνδέετε την ίνα στην έξοδο της συσκευής **πριν** εφαρμόσετε τάση. Κάτω από καμία συνθήκη δε θα τροφοδοτηθεί η συσκευή, αν η οπτική ίνα στην έξοδο δεν είναι συνδεδεμένη. Αν η συσκευή έχει ένα συνδετήρα εξόδου, τότε ο συνδετήρας που ενώνεται στην ίνα πρέπει να συνδεθεί. Αυτό εξασφαλίζει ότι όλο το φως που είναι περιορισμένο στον οπτικό κυματοδηγό, ουσιαστικά ελαχιστοποιεί κάθε κίνδυνο.
- **Ποτέ** μη κοιτάξετε στο τελικό άκρο μιας ίνας για να δείτε αν έρχεται το φως. Τα περισσότερα μήκη κύματος οπτικού laser (1300nm και 1550nm) είναι αόρατα στο αβοήθητο μάτι και θα προκαλέσουν μόνιμη ζημιά. Μικρότερα μήκη κύματος laser (π.χ. 780 nm) είναι ορατά και πολύ καταστροφικά. Χρησιμοποιείτε πάντα όργανα όπως το όργανο μέτρησης οπτικής ισχύος για να επιβεβαιώνετε την έξοδο φωτός.
- **Ποτέ μα ποτέ** μη κοιτάξετε στο τέλος της ίνας σε μια τροφοδοτούμενη συσκευή με μεγεθυντική συσκευή. Αυτό περιλαμβάνει τα μικροσκόπια, μεγεθυντικούς φακούς και μεγεθυντικά γυαλιά. Θα προκληθεί ένα μόνιμο, αμετάκλητο κάψιμο στον αμφιβληστροειδή χιτώνα του ματιού. Πάντα ελέγξτε δυο φορές ότι η τάση δεν είναι συνδεδεμένη, πριν χρησιμοποιήσετε τέτοιες συσκευές. Αν είναι δυνατόν αποσυνδέστε τη μονάδα από κάθε πηγή τάσης.

**Πίνακας 3.2** Τάξεις ασφαλείας των laser

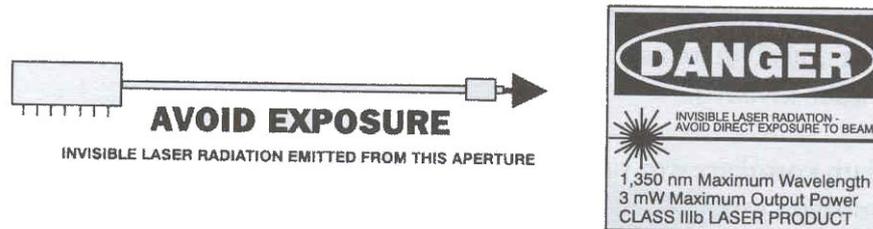
<b>Τάξη</b>	<b>Περιοχή μήκους κύματος</b>	<b>Όρια οπτικής ισχύος</b>
I	180nm έως $10^6$ nm	Αλλάζει με το λ και το χρόνο έκθεσης
IIa	400 nm έως 710nm	$3.9 \times 10^{-6}$ W(3.9microwatts)
II	400 nm έως 710nm	$1.0 \times 10^{-3}$ W(3.9microwatts)
IIIa	400 nm έως 710nm	$5.0 \times 10^{-3}$ W(3.9microwatts)
IIIb	180 nm έως 400nm	Αλλάζει με το λ και το χρόνο έκθεσης
	400 nm έως $10^6$ nm	0.5 Watts

Τάξεις ασφαλείας των laser φαίνονται στον πίνακα 3.2.

Το σχήμα 3.36 δείχνει τυπικές ετικέτες προειδοποίησης laser, που χρησιμοποιούνται στη συσκευασία παραγωγής για αναγνώριση των προϊόντων που βασίζονται στα laser.

### 3.11 Σύγκριση των διόδων LED και LASER

Ο πίνακας 3.3 προσφέρει μια γρήγορη σύγκριση μερικών χαρακτηριστικών των laser και των LED's. Και οι δυο τύποι πηγής φωτός χρησιμοποιούν τα ίδια βασικά υλικά. Το GaALAs χρησιμοποιείται κοινώς για τις συσκευές μικρού μήκους κύματος. Συσκευές μεγάλου μήκους κύματος ενσωματώνουν InGaAsP.



Σχήμα 3.36 Τυπικές ετικέτες προειδοποίησης laser.

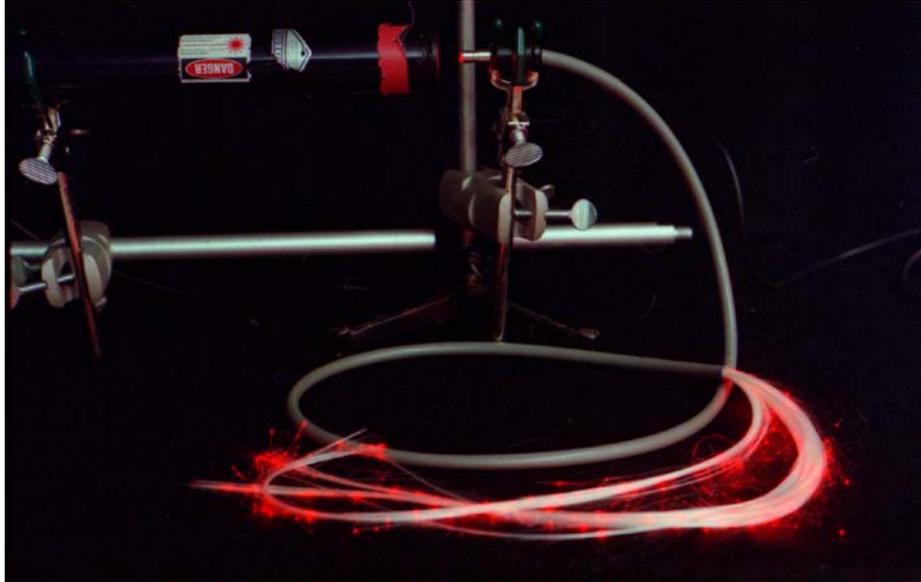
Η γραμμικότητα είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό και για τους δυο τύπους πηγής φωτός σε μερικές εφαρμογές. Η γραμμικότητα αντιπροσωπεύει το βαθμό στον οποίο η οπτική έξοδος είναι ευθέως ανάλογη με το ηλεκτρικό ρεύμα εισόδου. Οι περισσότερες πηγές φωτός δίνουν είτε λίγη, είτε καθόλου προσοχή στη γραμμικότητα, κάνοντας αυτές έτσι χρήσιμες μόνο για ψηφιακές εφαρμογές. Οι αναλογικές εφαρμογές απαιτούν μεγάλη προσοχή στη γραμμικότητα. Η μη γραμμικότητα στις LED's και στα laser προκαλούν αρμονική παραμόρφωση στο αναλογικό σήμα το οποίο μεταδίδεται σε μια αναλογική ζεύξη οπτικών ινών.

Τα LED's είναι γενικά πιο αξιόπιστα από τα laser, αλλά και οι δυο πηγές αλλοιώνονται με το χρόνο. Η αλλοίωση μπορεί να προκαλείται από τη θερμότητα που παράγεται από τη πηγή και από ανόμοιες πυκνότητες ρεύματος. Επιπρόσθετα, οι LED's είναι πιο εύκολες στη χρήση από τα laser. Τα laser είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία. Το κατώφλι εκπομπής φωτός στο laser θα αλλάξει με τη θερμοκρασία.

Πίνακας 3.3 Σύγκριση φωτοδίοδων εκπομπής

Παράμετρος	Φωτοδίοδος(LED)	Δίοδος (LD)
Ισχύς Εξόδου	Γραμμικά ανάλογη με το Ρεύμα Οδήγησης	Ανάλογη με το ρεύμα πάνω από το ρεύμα κατωφλίου
Ρεύμα	Ρεύμα Οδήγησης: 50 έως 100mA Κορυφής	Ρεύμα κατωφλίου: 5 ως 40 mA
Συζευγμένη Ισχύς	Μέτριο	Υψηλό
Εύρος ζώνης	Μέτριο	Υψηλό
Διαθέσιμα Μήκη Κύματος	0.66 ως 1.55 μm	0.78 ως 1.55 μm
Φάσμα εκπομπής	40 nm ως 190 nm FWHM	0.1 nm ως 10 nm FWHM
Κόστος	\$5 ως \$300	\$5 ως \$3000

Για το λόγο αυτό τα laser απαιτούν μια μέθοδο σταθεροποίησης του κατωφλίου, ώστε να φτάσουν στη μέγιστη απόδοση. Συχνά μια φωτοδιόδος χρησιμοποιείται για να ελέγχει οπτικά την έξοδο φωτός στη πίσω όψη του laser. Το ρεύμα της φωτοδιόδου αλλάζει με μεταβολές της εξόδου φωτός και παρουσιάζει ανάδραση, για να ρυθμίζει το οδηγό ρεύμα του laser.



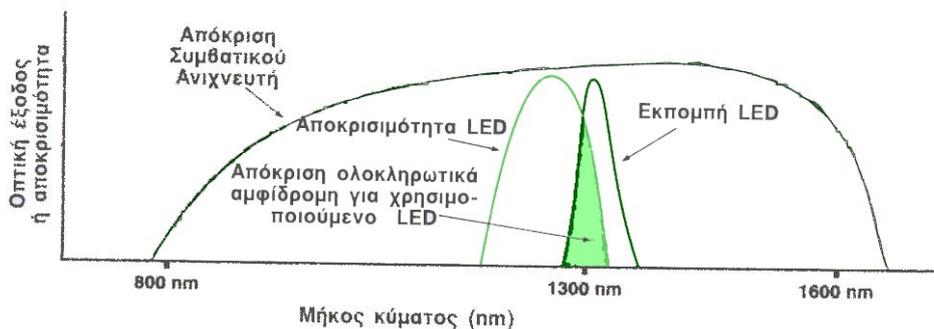
**Σχήμα 3.37** Δοκιμή οπτικής ίνας.

Ένα άλλο ζήτημα στην επιλογή των LED's ή laser είναι η συσκευασία. Η βασική έννοια στη συσκευασία είναι πώς η πηγή φωτός συζευγνύεται με την ίνα. Μια μέθοδος χρησιμοποιεί συσκευή σαν το μικροσκόπιο. Μια μικρή σταγόνα κόλλησης (epoxy) τοποθετείται άμεσα στο τσιπ. Η κυκλική σταγόνα κόλλησης εστιάζει το φως σε ένα σταθερό σημείο. Η ίνα, που συνήθως έχει μικρότερη διάμετρο από τη κυκλική σταγόνα, μπορεί να τοποθετηθεί οπουδήποτε πάνω στη σταγόνα κόλλησης και θα δεχτεί το ίδιο ποσό οπτικής ενέργειας. Αυτό επιτρέπει περισσότερο αποδοτική σύζευξη της ίνας με τη πηγή. Οι σπειροειδείς σύνδεσμοι *rigtails* χρησιμοποιούν ένα μικρό μήκος της ίνας σαν μέρος της οπτικής συσκευής. Η σπειροειδής σύνδεση μπορεί να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα της σύζευξης, φέρνοντας την άκρη της ίνας πιο κοντά στη περιοχή εκπομπής του τσιπ. Το φως παγιδεύεται στην ίνα πριν μπορέσει να διαδοθεί έξω.

Όλες τα LED's και τα laser έχουν την ικανότητα να ενεργούν σαν ανιχνευτές, αλλά λίγα εκτελούν αυτό το καθήκον καλύτερα από τα άλλα. Η βασική παράμετρος που πρέπει να ανιχνευθεί είναι η αποτελεσματική σύζευξη μεταξύ του πομπού φωτός και της ίνας. Αυτή επιτρέπει καλή απόδοση και στους δυο τρόπους. Είναι ακόμη σημαντικό ότι τα LED's έχουν σωστά φασματικά χαρακτηριστικά. Στα διπλής κατεύθυνσης LED's, η LED χρησιμοποιείται περιοδικά σαν πομπός φωτός και σαν ανιχνευτής

φωτός. Σε αυτή τη περίπτωση, η πληροφορία μπορεί να σταλεί σε κάθε κατεύθυνση στην ίνα. Υπάρχουν μερικές πολύπλοκες τεχνικές που συνδυάζουν αυτή την απλή ιδέα με συμπίεση χρόνου και ένα επεξεργασμένο σύγχρονο πρωτόκολλο, που εμφανίζεται για να επιτρέπει την πληροφορία να στέλνεται και στις δυο κατευθύνσεις την ίδια στιγμή. Στη πραγματικότητα, η πληροφορία ταξιδεύει μόνο προς στη μια κατεύθυνση. Η ανταλλαγή πίσω και μπρος είναι τόσο γρήγορη που φαίνεται ότι γίνεται ταυτόχρονα. Στο σχήμα 3.38 φαίνεται η λειτουργία ενός LED διπλής κατεύθυνσης.

Τώρα που συζητήθηκαν τα στοιχεία εκπομπής φωτός, θα πάμε σε στοιχεία στο άλλο άκρο της ίνας, τους ανιχνευτές φωτός.



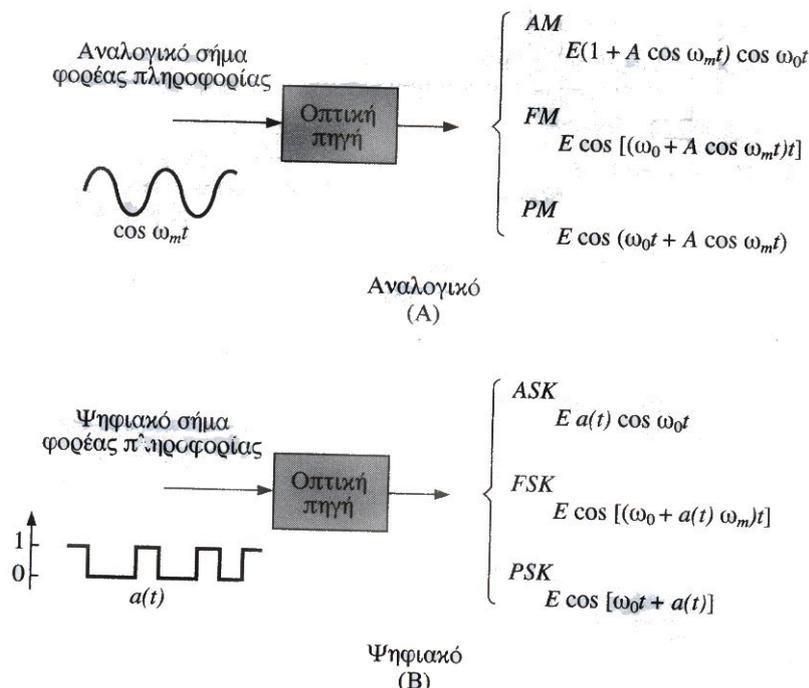
Σχήμα 3.38 Λειτουργία LED διπλής κατεύθυνσης.

### 3.12 Διαμόρφωση

Στο σύντομο αυτό κεφάλαιο εξετάζουμε τους διάφορους τρόπους με τους οποίους θα ήταν δυνατόν, σήματα πληροφορίας, ν' αποτυπωθούν επάνω στην εκπεμπόμενη φωτεινή ισχύ, ή όπως λέμε, να διαμορφώσουν την ισχύ μιας φωτεινής πηγής, είτε πρόκειται για LED είτε για δίοδο laser. Σε μερικές εφαρμογές, η πληροφορία είναι αναλογικής μορφής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.39(α). Στην περίπτωση αυτή μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το ημιτονικό σήμα σαν μια τυπική πηγή πληροφορίας, γνωρίζοντας ότι μια επαλληλία από τέτοιες ημιτονοειδείς συνιστώσες-Fourier μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παραστήσει οποιαδήποτε αναλογική κυματομορφή εισόδου. Στην ψηφιακή περίπτωση, που φαίνεται στο Σχήμα 3.39(β), θα δεχθούμε ότι η ροή της πληροφορίας γίνεται με μια ακολουθία δυαδικών συμβόλων (binary stream) "0" και "1" που είναι στατιστικά ανεξάρτητα μεταξύ τους και ισοπίθανα στην εμφάνιση τους.

Θα διαπιστώσουμε ότι ορισμένοι τρόποι διαμόρφωσης είναι εξαιρετικά απλοί και φθηνοί όπως κυρίως η άμεση-διαμόρφωση ASK (ή "διαμόρφωση έντασης", Intensity modulation-IM), ενώ άλλοι τρόποι

μπορούν ν' αποβούν πολύ περίπλοκοι και ευαίσθητοι στη μη τέλεια προσαρμογή των συστατικών τους στοιχείων.



**Σχήμα 3.39** Βασικοί τρόποι διαμόρφωσης (α) Για αναλογική πηγή πληροφορίας (β) Για ψηφιακή δυαδική πηγή πληροφορίας.

Υπάρχει ένα άλλο σημαντικό θέμα που υπάγεται εντελώς φυσιολογικά στις τεχνικές διαμόρφωσης. Όταν ένα αμιγώς-οπτικό δίκτυο WDM διαβιβάζει δεδομένα σ' ένα άλλο, αν αυτό πρόκειται να γίνει εντελώς οπτικά, τότε ο κόμβος που το επιτυγχάνει πρέπει να είναι μια "πύλη – ανταλλαγής – μήκους - κύματος" (wavelength – swapping gateway ).

### 3.13 Τρόποι Διαμόρφωσης

#### 3.13.1 Ποιες παραμέτρους μπορούμε να διαμορφώσουμε

Μόνο μερικές παράμετροι χαρακτηρίζουν το φως που εκπέμπεται από την πηγή κι' επομένως είναι υποψήφιος να μεταφέρουν πληροφορία. Αυτές είναι το πλάτος ( ή η ισχύς ), η συχνότητα, η φάση, και η πόλωση. Οι μαθηματικές σχέσεις που αφορούν τη διαμόρφωση των τριών πρώτων από τις παραμέτρους αυτές συνοψίζονται στο Σχήμα 3.39.

Για κανάλια αναλογικής πληροφορίας η λέξη κλειδί είναι η "διαμόρφωση"(modulation) και παριστάνεται με το "M" στις συντομογραφίες AM , FM , PM , και PolM (δηλαδή τη διαμόρφωση της πόλωσης). Για

ψηφιακές πηγές διαμόρφωσης έχει γίνει δεκτή η χρήση του "SK", που δηλώνει: "shift keying" ( κλείδωμα μεταλλαγής ), στις συντομογραφίες, ASK, FSK, PSK, και PolSK. Παριστάνουν μια μεταγωγή "πίσω ή εμπρός" μεταξύ τιμών πλάτους, συχνότητας, φάσης και πόλωσης αντίστοιχα. Αν η πηγή δεδομένων είναι δυαδική, προσθέτουμε συχνά και ένα "B", για παράδειγμα BPSK για "δυαδικό κλείδωμα μεταλλαγής φάσης" (binary phase – shift keying).

Υπάρχουν επίσης τύποι διαμόρφωσης που εργάζονται με βάση την διαφορά που υφίσταται μια παράμετρος από τη χρονική στιγμή ενός bit ως το επόμενο. Για παράδειγμα, το *διαφορικό PSK* (DPSK) που εργάζεται με τη φάση και χρησιμοποιεί το "0" για να κωδικοποιήσει την "μη μεταβολή" φάσης μεταξύ δύο διαδοχικών bits και το "1" για να δηλώσει την ύπαρξη μεταβολής 180°.

Παρ' όλο που θα μπορούσαμε κατ' αρχήν, να χρησιμοποιήσουμε συστήματα ψηφιακής διαμόρφωσης φάσης ανώτερης τάξης, (για παράδειγμα *τετραδικό PSK-quaternary PSK*, QPSK), δεν θα τα εξετάσουμε εδώ για προφανείς λόγους έκτασης. Στη βιβλιογραφία, οποιαδήποτε περίπτωση εκτός της δυαδικής, δηλώνεται με την πρόταξη του κατάλληλου γράμματος, και αν δεν υπάρχει τέτοιο γράμμα εξυπακούεται ότι πρόκειται για δυαδική διαμόρφωση. Τελικά όμως, στις οπτικές επικοινωνίες δεν υπάρχει ουσιαστικός λόγος χρησιμοποίησης σηματοδοσίας οποιασδήποτε ανώτερης τάξης εκτός της δυαδικής, όπως υπήρχε στις επικοινωνίες με παραδοσιακό φορέα μετάδοσης. Για παράδειγμα, με τις τηλεφωνικές γραμμές επειδή το εύρος ζώνης είναι περίπου 3500 Hz, τα modems των 2400 bps και πάνω, εργάζονται μόνο με 2400 στοιχεία σηματοδοσίας (bauds) ανά δευτερόλεπτο. Δηλαδή, υπάρχουν 2400 στοιχεία σηματοδοσίας ανά δευτερόλεπτο για όλους αυτούς τους ρυθμούς bit, αλλά κάθε baud μπορεί να αντιπροσωπεύει περισσότερες από δύο τιμές σήματος. Για μετάδοση 2400 *bit-per-second*, χρησιμοποιείται (B)PSK, που χρειάζεται μόνο δύο αντίθετες τιμές σήματος, σε φάση ή σε αντίφαση. Τα modem 4800 bps και 9600 bps χρησιμοποιούν και τα δύο μετάδοση 2400 baud, αλλά με τετραδικές τιμές φάσης (QPSK) ή με 16 τιμές στο χώρο των φάσεων, αντίστοιχα. Μιλάμε τότε για αντίστοιχο πλήθος "bits ανά baud", 1, 2, και 4 για modem αντίστοιχα των 2400, 4800 και 9600 bps. Καθώς αυξάνουμε έτσι το πλήθος των παραστατικών σημείων των συμβόλων του σήματος στο χώρο των φάσεων, πλησιάζοντας τα κοντά το ένα στο άλλο, καταφέρνουμε βέβαια να κερδίσουμε σε εύρος ζώνης, ώστε να μπορούμε να χειριζόμαστε σήματα υψηλότερου ρυθμού με την τηλεφωνική γραμμή, χάνουμε όμως προοδευτικά σε ικανότητα να διακρίνουμε τα σύμβολα αυτά μεταξύ τους-παρουσία θορύβου-και αυξάνει έτσι η πιθανότητα σφάλματος αν δεν αυξήσουμε κατάλληλα την ισχύ. Με τις οπτικές όμως ίνες δεν έχουμε περιορισμό εύρους ζώνης. Έτσι θα δεχόμαστε πάντα ένα bit ανά baud όταν συζητούμε για οπτική διαμόρφωση και λήψη.

Το ASK μερικές φορές αναφέρεται και σαν OOK (on-off keying), όμως ο σωστότερος όρος είναι το ASK γιατί περιέχει και το γεγονός ότι η φωτεινή πηγή συνήθως δεν σβήνει τελείως κατά το bit "0". Μάλιστα το πηλίκο της ισχύος του bit "0", προς την ισχύ του bit "1", λέγεται "λόγος σβέσης"  $r$ , (extinction ratio), και ορίζεται ως

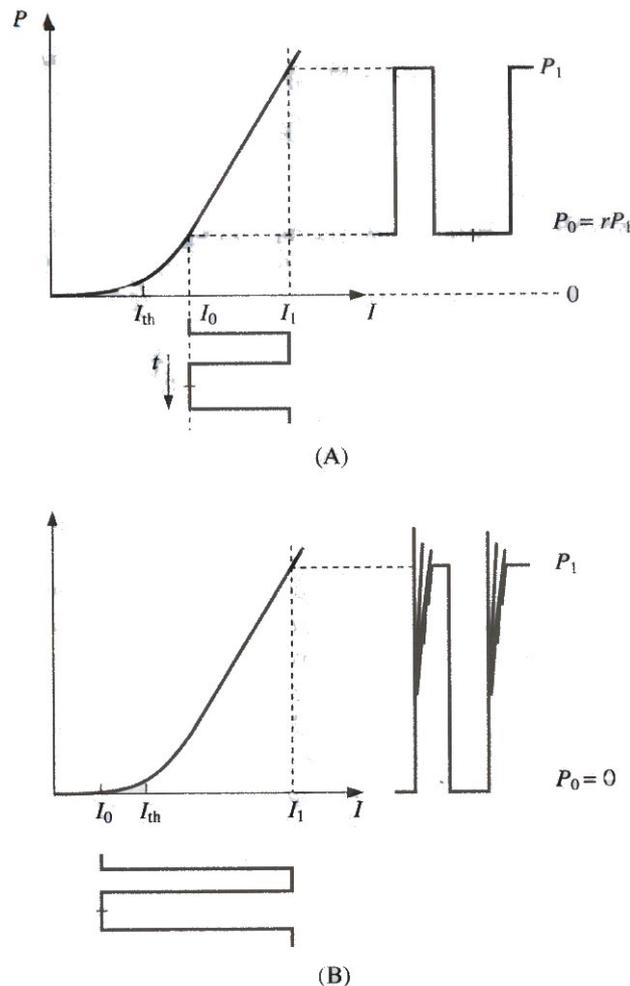
$$r = \frac{P_0}{P_1} \leq 1 \quad (3.3)$$

Το ASK πραγματοποιείται πολύ πιο εύκολα, στα οπτικά συστήματα, παρά οι άλλοι τρόποι διαμόρφωσης, όμως παρουσιάζει στη λήψη μειωμένη ευαισθησία κατά αρκετά dB συγκριτικά με το PSK, PoISK, ή ακόμα και το PSK.

### 3.14 Σύγκριση Μεταξύ "Άμεσης" και "Εξωτερικής" Διαμόρφωσης (Direct versus external)

Όπως ξέρουμε οι δίοδοι laser παρ' όλο που έχουν πολλά σημαντικά προσόντα, δεν αρέσκονται σε βίαιες μεταβολές του ρεύματος έγχυσης τους. Η άμεση διαμόρφωση κάνει ακριβώς αυτό: μεταβάλλει απ' ευθείας το ρεύμα έγχυσης με την δυαδική κυματομορφή. Πως αναφέραμε, μικρές μεταβολές του ρεύματος επιφέρουν διαμόρφωση της οπτικής συχνότητας του laser, με τυπική τιμή 1 nm ανά mA. Αυτό παρέχει έναν απλό και δραστικό τρόπο να επιτύχουμε διαμόρφωση FM ή FSK.

Όμως, διαμορφώνοντας κατά AM ή ASK, έχουμε πολύ μεγαλύτερες μεταβολές ρεύματος, και τότε εμφανίζεται και chirp. Το Σχήμα 3.39(α) δείχνει τι συμβαίνει κατά την επιβολή ενός ορθογώνιου σήματος για ASK στο ρεύμα πόλωσης μιας τυπικής διόδου laser όταν ο λόγος σβέσης γείναι  $r > 0$ . Η περίπτωση για το  $r = 0$  φαίνεται στο Σχήμα 3.39(β), οπότε συγκρίνοντας τις δύο περιπτώσεις, βλέπουμε ότι το αντίτιμο για την αποφυγή chirp και τη διατήρηση της λειτουργίας στο γραμμικό τμήμα της καμπύλης  $P-I$  είναι ο μη μηδενικός λόγος σβέσης  $r$ . Κατά την μελέτη στο επόμενο κεφάλαιο της φωρασιμότητας, όταν εξετάζουμε την επίδραση που έχει μια τιμή του  $r$  μεγαλύτερη του μηδενός, θα δούμε ότι ο λόγος σήμα προς θόρυβος στη λαμβανόμενη ισχύ πολλαπλασιάζεται επί  $(1-r)$ .

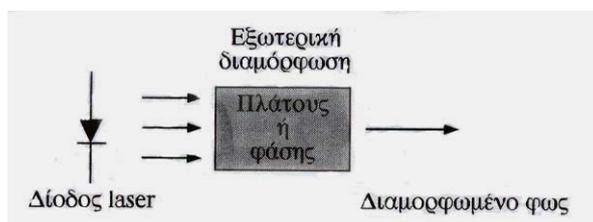


**Σχήμα 3.40** Άμεση διαμόρφωση ASK. (α) Η διαδρομή της δυαδικής κυματομορφής του ρεύματος διαμόρφωσης δεν πρέπει να κατέβει κάτω από  $I_{th}$  και επομένως ο λόγος σβέσης είναι  $r > 0$ . (β) Σε μία απόπειρα μείωσης του  $r$  στο μηδέν, η διαμόρφωση οδηγεί κάτω από το  $I_{th}$  με αποτέλεσμα την εμφάνιση chirp.

Αν προσπαθήσουμε να περιορίσουμε το  $r$ , διακόπτοντας το φως κατά τη διάρκεια του bit "0", όπως δείχνεται στο Σχήμα 3.39(β), τότε αρχίζουν πραγματικά οι δυσκολίες. Η μεγάλη πτώση του ρεύματος που απαιτείται οδηγεί σε σημαντικές αποκλίσεις συχνότητας {αδιαβατικό chirp}. Εκτός όμως απ' αυτό, ας θυμηθούμε ότι αν η φωτεινή ισχύς εξόδου μηδενιστεί για λίγα nsec λόγω του ότι το εγχεόμενο ρεύμα μηδενίστηκε, τότε, μόλις εμφανισθεί το επόμενο "1", η φωτεινή ισχύς εξόδου θα αρχίσει να εμφανίζεται μόνον μετά από την τυχαία καθυστέρηση - αφής (turn-on delay), που μπορεί να είναι, μερικά nsec.

Ακόμα χειρότερο όμως είναι ότι θα επακολουθήσουν ισχυρές ταλαντώσεις αποκατάστασης, πράγμα που θα πάρει πολλά nsec μέχρις ότου σταματήσει. Τα δυο αυτά φαινόμενα συνιστούν το μεταβατικό chirp. Σ' ένα δέκτη άμεσης φάρασης (direct detection, DD) χωρίς φίλτρο πριν από το φωτοφωρατή, θα μπορούσαμε να ανεχθούμε σημαντικό αδιαβατικό και μεταβατικό chirp, ενώ σε ένα σύμφωνο σύστημα ή

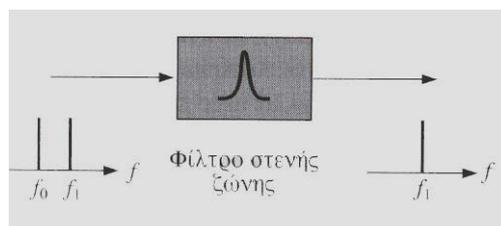
σε ένα δίκτυο διαίρεσης μήκους κύματος που χρησιμοποιεί είτε σύμφωνους είτε ασύμφωνους δέκτες, το γεγονός ότι το laser ενδέχεται να παρουσιάζει chirp σε μια συχνότητα έξω απ' εκείνη της ζώνης διέλευσης του δέκτη, αποτελεί έναν πολύ σημαντικό περιορισμό κατά τη σχεδίαση του συστήματος.



**Σχήμα 3.41** Εξωτερική διαμόρφωση για την αποφυγή επαγωγής chirp και άλλων μεταβατικών φαινομένων του laser.

Αν δεν ελαχιστοποιηθεί το chirp, αφενός χάνεται ενέργεια από το επιθυμητό κανάλι και αφετέρου εμφανίζεται ως ανεπιθύμητη διαφωνία σε γειτονικά κανάλια, κι έτσι το chirp είναι διπλά βλαβερό. Περισσότερο να πούμε ότι τέτοια φαινόμενα πρέπει να αποφευχθούν πάση θυσία στα πραγματικά συστήματα, και μια από τις θυσίες αυτές που την κάνουμε πρόθυμα είναι να αποφύγουμε να σβήνουμε εντελώς το laser.

Μπορούμε να αποφύγουμε εντελώς το chirp και τα μεταβατικά φαινόμενα έναυσης, αν διαχωρίσουμε τελείως τις διαδικασίες γέννησης του φωτός και διαμόρφωσης του. Το laser μπορεί να αφεθεί να δουλέψει συνεχώς (CW), και παρεμβάλλεται ένας εξωτερικός διαμορφωτής μεταξύ του laser και του κόμβου εξόδου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.41. Όσο οι ανακλάσεις από το διαμορφωτή παραμένουν αρκετά ασθενείς, δεν θα αυξήσουν το εύρος γραμμής που εκπέμπεται από το laser πέρα από την επιθυμητή τιμή. Συχνά απαιτείται η χρήση του απομονωτή Faraday.



**Σχήμα 3.42** Διαμόρφωση FSK/ASK.

Ένα άλλο σχήμα λειτουργίας ASK που επιτρέπει στο laser να εργάζεται σε σχεδόν σταθερό επίπεδο ισχύος, είναι το *FSK / ASK*, που φαίνεται στο Σχήμα 3.42. Ο πομπός εκπέμπει ένα σήμα FSK με αρκετά μεγάλη διαδρομή συχνότητας, από την οποία, στο δέκτη ένα οπτικό φίλτρο στενής ζώνης επιτρέπει τη διέλευση μόνον μιας από τις δύο συχνότητες προς το φωτοφωρατή. Λόγω της απλότητας του, καθώς και του ότι ουσιαστικά-αφού κόβει το "0"-μπορεί να επιτύχει μηδενικό  $r$ , το σχήμα αυτό είναι πολύ ελκυστικό για τον πομπό. Στο δέκτη όμως, μειονεκτεί για χρήση του σε συστήματα πολύ πυκνού WDM γιατί χρησιμοποιεί τουλάχιστον διπλάσιο εύρος ζώνης απ' ό,τι θα χρειαζόταν μια εξωτερική διαμόρφωση ASK για τον πομπό.

Μέχρι σήμερα, σχεδόν σε όλα τα σύμφωνα συστήματα απαιτείται εξωτερική διαμόρφωση προκειμένου να διατηρήσουν ένα μικρό εύρος γραμμής εκπομπής. Αυτό γιατί, όπως ένας ραδιοδέκτης, έτσι και ένας οπτικός σύμφωνος δέκτης, πρέπει να βλέπει τη διαμόρφωση ASK, PSK, FSK, ή Po1SK, να επιβάλλεται σε ένα ημιτονικό σήμα, και όχι σε έναν τυχαίο θόρυβο στενού εύρους ζώνης.

### 3.15 Εξωτερική Διαμόρφωση Φάσης και Πλάτους

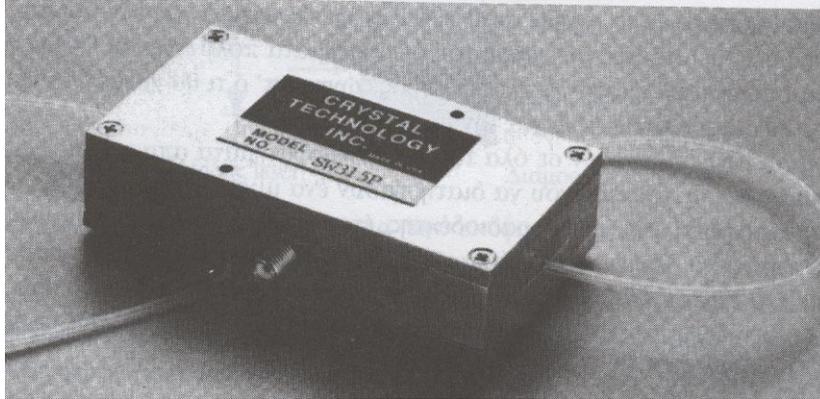
#### 3.15.1 Ο ακουστοοπτικός εκτροπέας

Υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί υποψήφιοι να χρησιμοποιηθούν στην εξωτερική διαμόρφωση. Από τους πρώτους, ο ακουστοοπτικός εκτροπέας φάνηκε να είναι ένας φυσιολογικός υποψήφιος καθώς αποδείχθηκε τόσο επιτυχής στους εκτυπωτές laser (laser printers). Με τη μορφή αυτή του εκτυπωτή, που πρωτοεμφανίστηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1970, μια φωτεινή δέσμη από ένα CW laser αερίου ηλίου-νέου, εκτρεπόταν ακουστοοπτικά σε τρόπο ώστε να περνάει ή όχι από μια σχισμή, ανάλογα με το αν ο εκτυπωτής έπρεπε να γράψει ή όχι. Αυτό γινόταν είτε με τη διαμόρφωση της οδηγού RF βαθμίδας "on-off", ή χρησιμοποιώντας FSK. Έτσι ο λόγος σβέσης ήταν ουσιαστικά μηδέν, πράγμα πολύ σημαντικό για την καλή εκτύπωση. Αυτή η εφαρμογή είναι που προώθησε τον ακουστοοπτικό εκτροπέα σε σημείο να γίνει ένα εμπορευματοποιημένο στοιχείο. Η εμφάνιση των διόδων laser υψηλής ισχύος εκτόπισε τελικά τους ακουστοοπτικούς εκτροπέες από την χρήση τους σ' όλους τους εκτυπωτές laser και στην πορεία επέτρεψε την κατασκευή και διάθεση εκτυπωτών laser με μικρό κόστος στον καταναλωτή.

Ο ακουστοοπτικός εκτροπέας είναι ένας σχετικά καλός υποψήφιος για διαμορφωτής ASK μόνον αν ο ρυθμός bit είναι αρκετά χαμηλός, μικρότερος από 10 Mb/s. Ο ρυθμός αυτός που αποτελεί ένα ταχύ ρυθμό προσπέλασης για έναν εκτυπωτή (δεκάδες nsec), είναι απαγορευτικά αργός για εξωτερικούς διαμορφωτές κόμβων, ακόμα κι αν εργάζονται με ταχύτητες κάτω του Gb/s. Έτσι η ερευνά για ταχείς εξωτερικούς διαμορφωτές στις οπτικές επικοινωνίες οδηγήθηκε προς την ηλεκτροπτική λύση.

### 3.15.2 Διαμορφωτές κβαντικών-φρεάτων

Γνωρίζουμε ότι η καμπύλη της απολαβής μιας διάταξης παρουσιάζει, με το μήκος κύματος, μια πολύ πιο απότομη πτώση προς την πλευρά των μεγάλων μηκών κύματος σε όλα τα laser τύπου κβαντικού περιορισμού, παρά στα "συμπαγή" laser.



**Σχήμα 3.43** Εξωτερικός διαμορφωτής ASK Mach-Zehnder του εμπορίου.

Το φαινόμενο αυτό επιτρέπει τη διαμόρφωση ASK ορισμένων μηκών κύματος με έγχυση ρεύματος σε εξωτερικό διαμορφωτή κβαντικού-φρεάτος. Για να επιτύχουμε μια ευρεία επιλογή μηκών κύματος προς διαμόρφωση, χρειάζεται να διαθέτουμε ενεργές περιοχές διαφορετικής σύστασης.

### 3.15.3 Ηλεκτροοπτικά φαινόμενα πρώτης και δεύτερης-τάξης.

Οι πιο χρήσιμοι εξωτερικοί διαμορφωτές βασίζονται σε μία, ελεγχόμενη από τάση, καθυστέρηση φάσης που εμφανίζουν μερικά υλικά, που μπορεί να είναι ημιαγωγοί, μονωτικοί κρύσταλλοι, ή οργανικά πολυμερή. Το Σχήμα 3.43 δείχνει έναν διαμορφωτή ASK (έντασης) του εμπορίου, που χρησιμοποιεί μονωτικό κρύσταλλο νιοβικού λιθίου.

Στους ημιαγωγούς, η μεταβολή της καθυστέρησης φάσης πραγματοποιείται με την αλλαγή του δείκτη διάθλασης μέσω έγχυσης ρεύματος. Για τους κρυστάλλους ή τα ανισότροπα πολυμερή, χρησιμοποιείται το ηλεκτροοπτικό φαινόμενο, δηλ., η εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από την τάση. Η δομή του διαμορφωτή πραγματοποιείται εν γέννη ως ένας κυματοδηγός λιθογραφημένος μέσα ή επάνω στο υλικό υποδομής. Η λύση του ημιαγωγού, έχει το πλεονέκτημα της δυνατότητας να κατασκευάζουμε τη δίοδο laser και τον διαμορφωτή από το ίδιο υλικό σε μια μονολιθικά ολοκληρωμένη δομή.

Η επίδραση που έχει η εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου έντασης  $E$  στην αλλαγή του δείκτη διάθλασης που βλέπει το προσπίπτον φως μιας καθορισμένης SOP, δίνεται σε πρώτη προσέγγιση από την

$$n = \alpha E + \beta E^2 \quad (3.4)$$

όπου  $\mathbf{E}$  είναι το μέτρο της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου  $\mathbf{E}$ , και  $\alpha$  και  $\beta$  είναι στοιχεία τανυστών που εκφράζουν το γεγονός ότι τα ηλεκτροοπτικά φαινόμενα είναι εντελώς ανισότροπα, εξαρτώμενα κατά κρίσιμο τρόπο από τον προσανατολισμό του εισερχόμενου φωτός σχετικά με τους άξονες του υλικού. Για ορισμένους προσανατολισμούς, ο όρος  $\beta$  ταυτίζεται με το μηδέν, και μιλάμε τότε για το γραμμικό ηλεκτροοπτικό φαινόμενο ή φαινόμενο *Pockel*. Αν πάλι επιλεγεί κατάλληλα το υλικό και ο άξονας ώστε να έχουμε τον όρο  $\alpha$  μηδέν, τότε παρατηρούμε το τετραγωνικό ηλεκτροοπτικό φαινόμενο ή φαινόμενο *Kerr*. Συνήθως χρησιμοποιείται το γραμμικό φαινόμενο *Pockel*, και στην περίπτωση αυτή η διαφορά μεταξύ του δείκτη διάθλασης όταν εφαρμόζεται πεδίο  $\mathbf{E}$  ως προς την τιμή του για  $\mathbf{E} = 0$ , είναι

$$\delta n = \frac{n_0^3}{2} r_{ij} E_j \quad (3.5)$$

όπου  $n_0$  ο δείκτης διάθλασης για  $E = 0$ , και  $r_{ij}$  γραμμικός ηλεκτροοπτικός συντελεστής, δηλ. ένα στοιχείο τανυστή, με  $i$  και  $j$  τους άξονες του κατάλληλου για το ανισότροπο υλικό συστήματος συντεταγμένων.

Απ' αυτήν έχουμε,

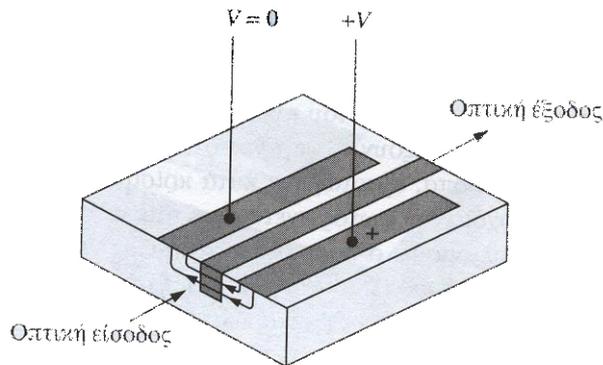
$$\Delta_\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta n_i Z = \frac{\pi Z}{\lambda} n_0^3 r_{ij} E_j \quad (3.6)$$

δηλ., την επιθυμητή γραμμική εξάρτηση της φάσης από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου  $Z$  είναι το μήκος αλληλεπίδρασης.

Σήμερα, οι περισσότεροι εξωτερικοί διαμορφωτές είναι κατασκευασμένοι ως ξεχωριστά στοιχεία επάνω σε νιοβικό λίθιο ( $\text{LiNbO}_3$ ), το οποίο έχει πολύ υψηλό ηλεκτροοπτικό συντελεστή κατά μήκος ορισμένων αξόνων του. Όμως, ένα από τα προβλήματα του  $\text{LiNbO}_3$  είναι ότι πρέπει να αναπτυχθεί ως κρύσταλλος. Εντελώς πρόσφατα, τα πολυμερή έχουν γίνει πιο ελκυστικά ακόμα, καθώς μπορούν να εναποτεθούν σε μεγάλες επιφάνειες με ελάχιστη δαπάνη μέσω ειδικής επίστρωσης (spin coating). Η επιθυμητή ανισοτροπία των πολυμερών "παγώνετε" μέσα στο υλικό με την εφαρμογή μιας τάσης στα άκρα του κατά τη διάρκεια της διαδικασίας στερεοποίησης. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να δημιουργηθεί ένα συνθετικό ανισότροπο υλικό με τις επιθυμητές ιδιότητες, αποτελούμενο από μακρά μόρια κατάλληλα προσανατολισμένα.

### 3.15.4 Εξωτερικοί διαμορφωτές φάσης

Χρησιμοποιώντας την απλή ιδέα που υποδεικνύεται από την Εξίσωση (3.5), μπορεί να κατασκευαστεί ένας εξωτερικός διαμορφωτής φάσης με τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 3.44. Μεταξύ των δυο ηλεκτροδίων εφαρμόζεται η διαμορφούσα τάση που αναπτύσσει την επιθυμητή ένταση ηλεκτρικού πεδίου καθόλο το μήκος  $Z$ .



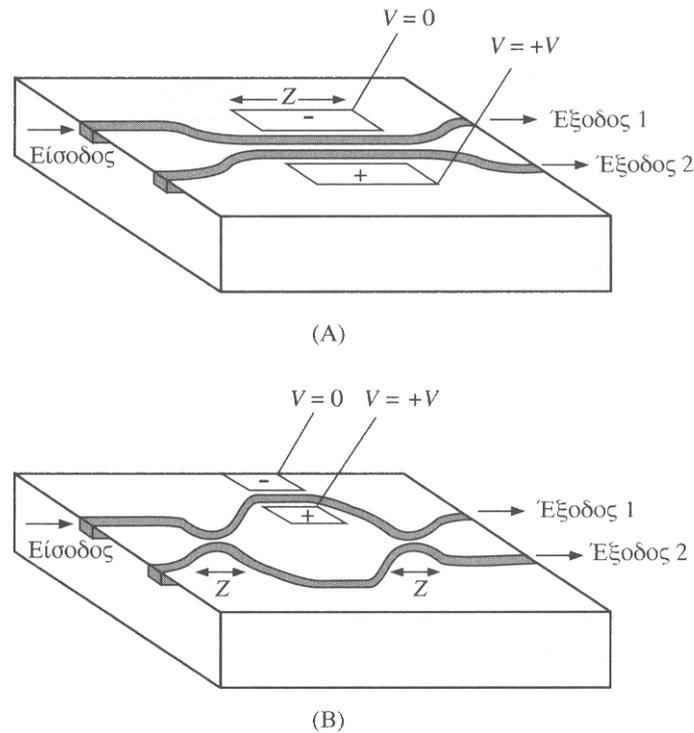
**Σχήμα 3.44** Δομή ενός εξωτερικού διαμορφωτή φάσης που κατασκευάζεται σχηματίζοντας έναν κυματοδηγό τιτανίου επάνω σε ένα κρύσταλλο νιοβικού λιθίου.

### 3.15.5 Εξωτερικοί διαμορφωτές έντασης

Υπάρχουν δυο ευρύτατα διαδεδομένες μορφές εξωτερικών διαμορφωτών έντασης, που φαίνονται στο Σχήμα 3.45(α) και (β).

Ο διαμορφωτής *κατενευθοντικού συζεύκτη* είναι ουσιαστικά ο συντηγμένος δικωνικός συζεύκτης με εκλέπτυνση τού Σχήματος 3.7 πραγματοποιημένος διαφορετικά (αλλά χωρίς εκλέπτυνση) σε νιοβικό λίθιο, με δύο ηλεκτρόδια κατάλληλα τοποθετημένα, όπως στο Σχήμα 3.45(α), σε τρόπο ώστε να προκαλείται μια αλλαγή φάσης εξαρτώμενη από τάση στο τμήμα και των δύο κυματοδηγών που βρίσκεται στην περιοχή σύζευξης. Υπενθυμίζεται ότι το κλάσμα του φωτός εισόδου που αποδίδεται, ως πούμε, στην έξοδο 1, είναι συνάρτηση του ενεργού μήκους  $Z$  αυτής της περιοχής σύζευξης και ότι η συνάρτηση αυτή είναι δύναμη ημίτονου. Δηλαδή, δεδομένης μιας τιμής του  $Z$ , μπορεί να βρεθεί μια τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης που θα αποδίδει όλο το φως στην έξοδο 2, και μια άλλη τιμή τάσης που θα το αποδίδει όλο στην έξοδο 1. Μεταβάλλοντας την τάση διαμόρφωσης από τη μία στην άλλη από τις δύο αυτές τιμές, επιτυγχάνουμε διαμόρφωση ASK.

Ο διαμορφωτής πλάτους *Mach-Zehnder* του Σχήμα 3.45(β) δεν είναι τίποτε άλλο από ένα τμήμα της αλυσίδας MZI. Στην ιδανική περίπτωση, όταν η διαφορά του μήκους διαδρομής μεταξύ των δύο βραχιόνων αντιστοιχεί σε διαφορά φάσης 0 ή ένα ακέραιο πολλαπλάσιο του  $2\pi$ , όλο το φως εμφανίζεται στην έξοδο 1 και τίποτα στην έξοδο 2, αλλά όταν η διαφορά μεταβληθεί κατά  $\pi$ , τότε στην έξοδο 1 έχουμε μηδενική ένταση φωτός και όλη η ένταση πηγαίνει στην έξοδο 2.



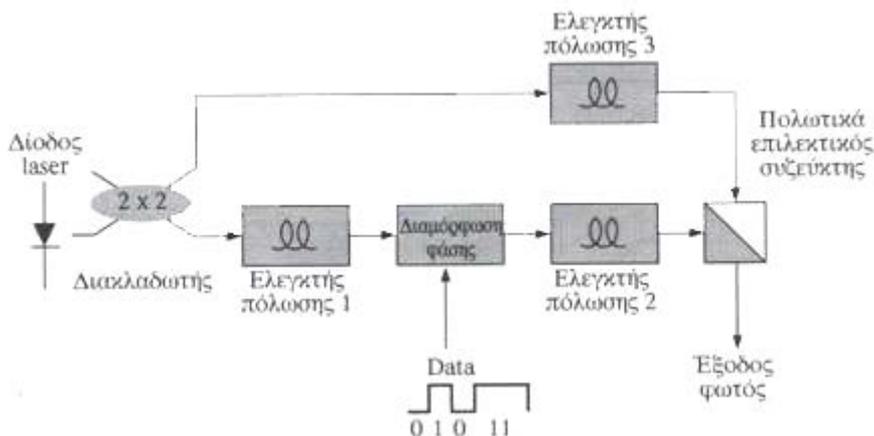
**Σχήμα 3.45** Δύο τύποι εξωτερικών διαμορφωτών ASK σε μορφή ολοκληρωμένης οπτικής. (α) Γεωμετρία "κατευθυντικού συζεύκτη" και (β) γεωμετρία *Mach-Zehnder*.

Η διάταξη του Σχήμα 3.43 είναι ακριβώς ένας εξωτερικός *Mach-Zehnder* διαμορφωτής ASK για  $1.5 \mu\text{m}$ . Απαιτεί την εφαρμογή μιας τάσης 11 Volt, επιτυγχάνει ένα λόγο σβέσης 0.006, και μπορεί να υποστηρίξει ένα εύρος ζώνης μέχρι 3 GHz με απώλειες παρεμβολής περίπου 6 dB. Εν γέννη οι διαμορφωτές έντασης *Mach-Zehnder* τείνουν να έχουν καλύτερο λόγο σβέσης από τους διαμορφωτές κατευθυντικού συζεύκτη γιατί η "αναίρεση φάσης", στην οποία βασίζονται και οι δύο, μπορεί να ελέγχει ακριβέστερα στην πρώτη περίπτωση.

### 3.15.6 Εναισθησία πόλωσης

Οι διατάξεις που μόλις περιγράψαμε βασίζονται στην παραδοχή ότι το προ-σπίπτον φως έχει μια πολύ συγκεκριμένη κατάσταση πόλωσης (SOP), συνήθως επίπεδα-πολωμένο σε ένα καθορισμένο επίπεδο. Επειδή συνήθως η διάταξη βρίσκεται αμέσως μετά από την φωτεινή πηγή, δεν υπάρχει τυχαία μεταβολή

της SOP, ένα πρόβλημα που το έχει συχνά ο δέκτης. Εντούτοις, το φως που μπαίνει στον διαμορφωτή δεν πρέπει να περιέχει ισχυρή συνιστώσα φωτός κατά την ορθογώνια προς την επιθυμητή πόλωση, γιατί το φως αυτό δεν θα διαμορφωθεί. Θα εμφανισθεί όμως στην έξοδο και θα υποβαθμίσει το λόγο σβέσης r.



Σχήμα 3.46 Εξωτερικός διαμορφωτής πόλωσης (PolSK).

### 3.16 Διαμόρφωση Πόλωσης και scramblers

Υπάρχουν πολλοί τρόποι μεταγωγής της πόλωσης μεταξύ δύο ορθογώνιων καταστάσεων. Ένας απ' αυτούς που χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά για οπτική μετάδοση ψηφιακού σήματος [5] φαίνεται στο Σχήμα 3.46. Το αρχικά γραμμικά πολωμένο φως διαιρείται και τελικά τροφοδοτεί τις δύο εισόδους ενός επιλεκτικού ως προς την πόλωση συζεύκτη (στο δεξιό μέρος του σχήματος), ο οποίος έχει την ιδιότητα όταν ο διαμορφωτής φάσης (από τον οποίο μπαίνουν τα δεδομένα) επιβάλλει μία μεταβολή φάσης  $0^\circ$ , να προκύπτει δεξιόστροφη κυκλική πόλωση, λόγω της παρεμβολής του ελεγκτή πόλωσης που στρέφει κατά  $90^\circ$  το επίπεδο της γραμμικής πόλωσης εισόδου του. Κατόπιν, προκειμένου να παραχθεί η ορθογώνια κατάσταση, δηλαδή η αριστερόστροφα κυκλική πόλωση, ο διαμορφωτής φάσης οδηγείται στο να επιβάλλει μεταβολή φάσης  $180^\circ$ . Αν οι διατάξεις αυτές μπορούν να διαμορφώσουν την πόλωση με αρκετά υψηλό ρυθμό, μπορούν, οι ίδιες, να χρησιμοποιηθούν ως "scramblers πόλωσης".

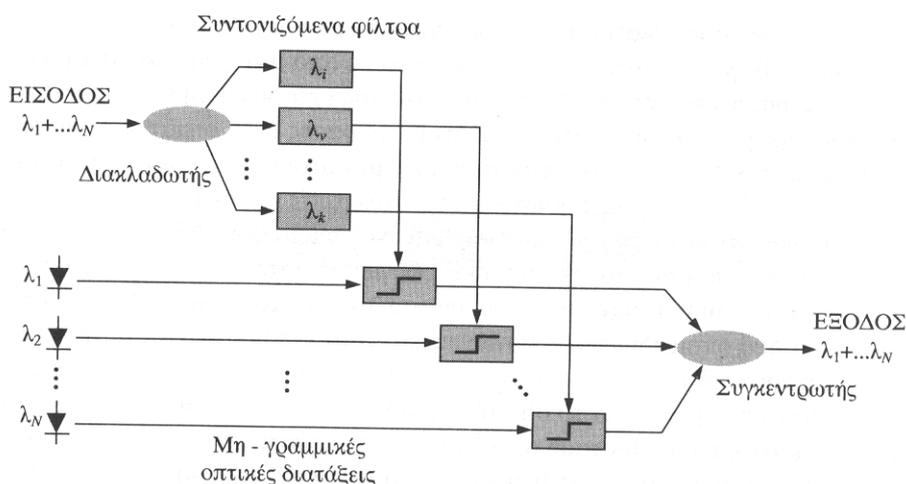
Οι τελευταίες αυτές διατάξεις απλώς "πηγαινοφέρνουν άτακτα" την πόλωση στις δύο ορθογώνιες καταστάσεις περισσότερες από μια φορές κατά τη διάρκεια ενός  $M_i$ , προκειμένου ένας δέκτης ο οποίος έχει διευθετηθεί έτσι ώστε να αποκρίνεται με 100 τις εκατό δυνατότητα φώρασης ενός σήματος σε κάποια καθορισμένη SOP, να μπορεί πάντα να έχει μια μερική έστω δυνατότητα φώρασης σε άλλες, πλην τις προηγούμενης, πολωτικές καταστάσεις. Πράγματι, αν δεχθούμε ότι κατά τη χρονική διάρκεια ενός bit το φως βρίσκεται ίσο χρονικό διάστημα σε κάθε μία από τις δύο ορθογώνιες καταστάσεις, αν θεωρήσουμε τη σφαίρα του Poincare, και θυμηθούμε ότι δύο οποιεσδήποτε ορθογώνιες καταστάσεις

βρίσκονται σε αντίποδα η μία ως προς την άλλη επάνω στη σφαίρα αυτή, τότε είναι φανερό ότι ανεξάρτητα από το πού βρίσκεται το σημείο της SOP του δέκτη, δεν θα μπορεί να βρίσκεται σε χειρότερη απόσταση από 3 dB μακριά από το ένα εκ των δύο σημείων της SOP του σήματος. (Ας θυμηθούμε ότι μια απόσταση  $90^\circ$  επάνω σε μέγιστο -κύκλο στη σφαίρα του Poincare σημαίνει ότι οι δύο αντίστοιχες ακτινοβολίες είναι συσχετισμένες κατά 50%). Για ρυθμούς δεδομένων μέχρι ένα Gb/s που ενδιαφέρουν τα οπτικά δίκτυα, διατάξεις όπως οι διαμορφωτές φάσης νιοβικού λιθίου που περιγράψαμε, έχουν την ικανότητα από άποψη αναγκαίας ταχύτητας, να κάνουν scrambling τουλάχιστον δύο φορές κατά την διάρκεια T του κάθε bit.

Ένας άλλος έξυπνος τρόπος για scrambling της πόλωσης είναι αυτός του Maeda [6]. Μόλις πριν φθάσει σε ένα πολωτικά-ευαίσθητο στοιχείο του δέκτη, το φως διέρχεται μέσα από ένα μικρό τμήμα πολύτροπης ίνας η οποία έχει υποστεί μηχανικά παραμόρφωση (λ.χ. έντονες στρέψεις), σε τρόπο ώστε διεγείρεται ένας μεγάλος αριθμός τρόπων, οι SOP των οποίων αναπτύσσονται διαφορετικά μέσα στο μικρό αυτό τμήμα της ίνας. Όταν το σήμα φθάσει στο δέκτη (μέσα από το τμήμα αυτό πολύτροπης ίνας), ο δέκτης βλέπει ένα μίγμα από τρόπους με διάφορες SOP.

### 3.16.1 Επαναδιαμόρφωση ASK για Αμιγώς-Οπτικές Πύλες (All -Optical Gateways)

Αν και το διαθέσιμο στην ίνα από silica εύρος ζώνης είναι άφθονο, εντούτοις δεν είναι και ατέλειωτο, και καθώς το πλήθος N των κόμβων που υποστηρίζει ένα επιμέρους αμιγώς-οπτικό LAN ή MAN, αυξάνει αργά ή γρήγορα, δεν θα υπάρχουν πια διαθέσιμα αρκετά μήκη κύματος για να χειριστεί ένα σύστημα τον όλο χώρο των διευθύνσεων (address space) των χρηστών του. Για παράδειγμα, ενώ  $N=1000$  θα ήταν ένας επαρκής αριθμός για ένα LAN ή MAN, ένας ρεαλιστικός αντίστοιχος αριθμός για ένα σύνολο από διασυνδεδεμένα τέτοια συστήματα θα ήταν τουλάχιστον 100,000, για παράδειγμα, για το ολικό δίκτυο μιας πολύ μεγάλης εταιρίας ή οργανισμού. Τα δημόσια δίκτυα θα είναι ακόμα μεγαλύτερα. Προκύπτει έτσι η ανάγκη για επαναχρησιμοποίηση μήκους κύματος (wavelength reuse).



**Σχήμα 3.47** Επαναδιαμορφωτής “ανταλλαγής μήκους-κύματος” για χρήση σε αμιγώς οπτικές πύλες μεταξύ δικτύων.

Η ανάγκη αυτή για επαναχρησιμοποίηση είναι εντελώς ανάλογη με το πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε στα παραδοσιακά, μη οπτικά δίκτυα, δηλ. η εξάντληση του χώρου των διευθύνσεων. Αν δεν υπάρχουν αρκετά bits στο "πεδίο διευθύνσεων" (address field) για να μπορούμε να επικοινωνήσουμε με όλους τους "απανταχού" χρήστες, το ίδιο σύνολο θα πρέπει να επαναχρησιμοποιηθεί ταυτόχρονα σε όλα τα υποδίκτυα, και θα πρέπει να υπάρχει μια λειτουργία πύλης μεταξύ τους που θα απεικονίζει μονοσήμαντα μια διεύθυνση σε ένα υποδίκτυο.

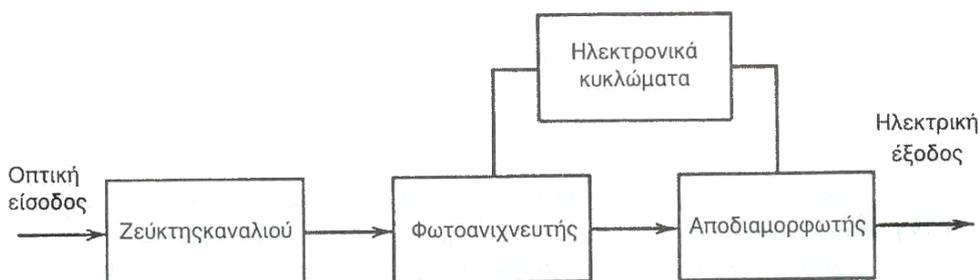
Αυτό, για να γίνει σε ένα οπτικό δίκτυο WDMA, απαιτεί την εξής ικανότητα: η πληροφορία που φθάνει σε μια πύλη με φορέα διαμόρφωσης ένα δεδομένο μήκος κύματος, να μπορεί να επανα-αποτυπωθεί στον οπτικό φορέα ενός άλλου μήκους κύματος όταν προωθείται στο δεύτερο δίκτυο. Αυτό είναι ευκολότατο να γίνει αν ο τρόπος διαμόρφωσης είναι ASK. Το Σχήμα 3.47 δείχνει μια τέτοια λειτουργική διάταξη [6] που αναπτύχθηκε στα Nippon Electric Research Laboratories.

Ας υποθέσουμε ότι η διαμόρφωση ASK που έχει γίνει στο μήκος κύματος  $\lambda_i$ , πρέπει να ξαναγίνει στο μήκος κύματος  $\lambda_j$ , που προκύπτει στην έξοδο. Ένα συντονιζόμενο φίλτρο που δρα στην είσοδο και είναι συντονισμένο στο  $\lambda_i$ , οδηγεί την είσοδο ελέγχου ενός δισταθούς οπτικού στοιχείου το οποίο επιτρέπει ή όχι τη διέλευση φωτός από ένα laser που εκπέμπει μόνιμα (CW) στο  $\lambda_j$ , ανάλογα με το αν η ένταση του φωτός που φθάνει στην είσοδο ελέγχου είναι αντίστοιχα υψηλή ή χαμηλή. Έτσι η δυαδική ακολουθία που διαμορφώνει το σήμα  $\lambda_i$  εισόδου θα επανα-αποτυπωθεί στο μήκος κύματος  $\lambda_j$  εξόδου, όπως επιδιώκουμε. Ας σημειωθεί ότι η διάταξη αυτή χρησιμεύει όχι μόνον ως μεταλλάκτης μήκους κύματος, αλλά και ως αναγεννητής ισχύος.

Μια πειραματική δομή τέτοιας πύλης [6] που κατασκευάστηκε μπορεί να χειρίζεται μέχρις 8 κανάλια μέσα σε μια φασματική περιοχή 6 A, παρέχοντας απολαβή ισχύος κατά την επαναδιαμόρφωση 13 dB, ενώ ο χρόνος μεταγωγής καναλιών είναι περίπου 7 nsec. Η υψηλή αυτή ταχύτητα μεταγωγής επιτεύχθηκε με τη χρήση συντονιζαμενης διόδου laser τριών τμημάτων, πολωμένης κάτω από το κατώφλι, που λειτουργεί ως συντονιζόμενο φίλτρο.

### 3.17 Οπτικοί δέκτες

Ένας οπτικός δέκτης μετατρέπει το λαμβανόμενο οπτικό σήμα στο άκρο της εξόδου της οπτικής ίνας σε ηλεκτρικό σήμα. Το Σχήμα 3.48 δείχνει το λειτουργικό διάγραμμα ενός οπτικού δέκτη. Αυτό αποτελείται από ένα ζευκτη, ένα φωτοανιχνευτή και ένα αποδιαμορφωτή.



Σχήμα 3.48 Εξαρτήματα ενός οπτικού δέκτη.

Ο ζευκτης εστιάζει το λαμβανόμενο οπτικό σήμα πάνω στο φωτοανιχνευτή. Σαν φωτοανιχνευτές χρησιμοποιούνται φωτοδιόδοι ημιαγωγών λόγω της συμβατότητάς τους με το συνολικό σύστημα. Η σχεδίαση του αποδιαμορφωτή εξαρτάται από τον τύπο της διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται από το σύστημα των οπτικών ινών. Η χρήση διαμορφώσεων FSK και PSK, που γενικά είναι κατάλληλες για σύμφωνα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, απαιτεί ετερόδουνη ή ομόδουνη τεχνική αποδιαμόρφωσης. Τέτοιοι σύμφωνοι δέκτες έχουν πολλά εξαρτήματα και είναι σχετικά ακριβοί. Συχνά, το λαμβανόμενο σήμα είναι υπό μορφή οπτικών παλμών που αναπαριστούν το bit "1" ή το bit "0" και μετατρέπονται κατευθείαν σε ένα ηλεκτρικό ρεύμα. Μία τέτοια τεχνική αναφέρεται σαν "διαμόρφωση έντασης με απευθείας φάραση" (IM/DD), σε αντίθεση με τη σύμφωνη φάραση. Η αποδιαμόρφωση γίνεται από ένα κύκλωμα λογικής

επιλογής που αναγνωρίζει τα bit σαν "1" ή σαν "0" ανάλογα με το πλάτος του ηλεκτρικού ρεύματος. Η ακρίβεια του κυκλώματος λογικής επιλογής εξαρτάται από το λόγο σήματος προς θόρυβο SNR, του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται στο φωτοανιχνευτή.

Η απόδοση ενός ψηφιακού οπτικού συστήματος χαρακτηρίζεται από το "ρυθμό εσφαλμένων (λανθασμένων) bit " (bit error rate, BER.). Μολονότι ο BER μπορεί να καθορισθεί σαν ο αριθμός των σφαλμάτων που γίνονται ανά δευτερόλεπτο, ένας τέτοιος ορισμός κάνει τον BER. να εξαρτάται από το ρυθμό μετάδοσης των bit. Είναι συνηθισμένο να ορίζεται ο BER σαν η μέση τιμή της πιθανότητας αναγνώρισης των εσφαλμένων bit. Έτσι ένα BER. ίσο με  $10^{-6}$  αντιστοιχεί σε μία μέση τιμή ενός εσφαλμένου bit σε 1.000.000 bit. Τα περισσότερα συστήματα οπτικών ακτίνων καθορίζουν ένα BER. ίσο με  $10^{-9}$  σαν απαίτηση λειτουργίας. Μερικά απαιτούν BER μικρότερο ακόμη και από  $10^{-14}$ .

Μία σπουδαία παράμετρος που είναι ενδεικτική της λειτουργίας του δέκτη ονομάζεται *ευαισθησία δέκτη*. Αυτή συνήθως καθορίζεται σαν η ελάχιστη μέση λαμβανόμενη οπτική ισχύς για την οποία ο BER. ισούται με  $10^{-9}$ . Η ευαισθησία του δέκτη εξαρτάται από τον SNR, ο οποίος με τη σειρά του εξαρτάται από διάφορες πηγές θορύβου που αλλοιώνουν το λαμβανόμενο σήμα. Ακόμη και για τέλει δέκτη, κάποιος θόρυβος εισάγεται από την ίδια τη διαδικασία της φωτοανίχνευσης. Αυτός ονομάζεται *κβαντικός θόρυβος* ή *θόρυβος βολής* που οφείλει το όνομα του στη σωματιδιακή φύση των ηλεκτρονίων. Οι οπτικοί δέκτες που λειτουργούν στο όριο του θορύβου βολής ονομάζονται "δέκτες με απόδοση περιορισμένη από τον κβαντικό θόρυβο". Κανένας πρακτικός δέκτης δεν λειτουργεί στο όριο του κβαντικού θορύβου, αφού πολλές άλλες πηγές θορύβου μειώνουν τον SNR. σημαντικά κάτω από το όριο του κβαντικού θορύβου. Μερικές από αυτές τις πηγές θορύβου, όπως ο *θερμικός θόρυβος* και ο *θόρυβος του ενισχυτή* είναι εσωτερικές για το δέκτη.

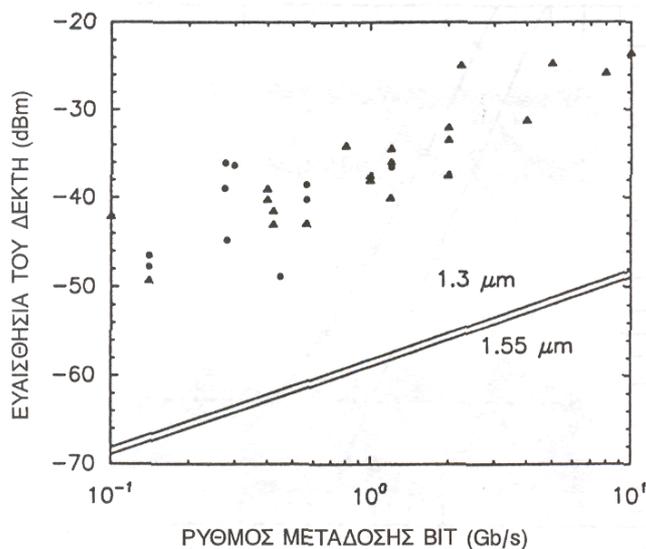
Άλλες δημιουργούνται στον πομπό ή κατά τη διάρκεια της μετάδοσης μέσα στην οπτική ίνα. Για παράδειγμα, το σήμα που εκπέμπεται από τον πομπό έχει εγγενείς διακυμάνσεις έντασης και φάσης, που έχουν την προέλευση τους στη θεμελιώδη διαδικασία της αυθόρμητης εκπομπής. Η χρωματική διασπορά στις οπτικές ίνες μπορεί να προσθέσει επιπλέον θόρυβο με φαινόμενα, όπως ενδοσυμβολική παρεμβολή και θόρυβος από διαχωρισμό τρόπων. Η ευαισθησία του δέκτη καθορίζεται από μία προσθετική επίδραση όλων των δυνατών μηχανισμών θορύβου που μειώνουν τον SNR. στο κύκλωμα απόφασης. Εν γένει, αυτή η ευαισθησία εξαρτάται επίσης από το ρυθμό μετάδοσης bit, αφού η συνεισφορά μερικών πηγών θορύβου (π.χ. ο θόρυβος βολής) αυξάνει ανάλογα με το εύρος ζώνης του σήματος.

### 3.18 Απόδοση Δέκτη

Η απόδοση του δέκτη χαρακτηρίζεται από τη μέτρηση του BER σαν συνάρτηση της μέσης λαμβανόμενης οπτικής ισχύος. Η μέση οπτική ισχύς που αντιστοιχεί σε BER  $10^{-9}$  αποτελεί μέτρο της ευαισθησίας του δέκτη. Το Σχήμα 3.49 παρουσιάζει την ευαισθησία του δέκτη μετρημένη σε διάφορα πειράματα μετάδοσης [7], στέλνοντας μία μεγάλη σειρά ψευδο-τυχαίων bit (τυπικό μήκος ακολουθίας  $2^{15}-1$ ), σε ολόκληρο το μήκος μίας μονότροπης οπτικής ίνας και κατόπιν ανιχνεύοντας την μέσω ενός δέκτη P-ί-n ή APD. Τα πειράματα έγιναν σε μήκος κύματος 1.3 ή 1.55  $\mu\text{m}$  και ο ρυθμός μετάδοσης bit μεταβαλλόταν μεταξύ 100MHz μέχρι 10GHz. Το θεωρητικό κβαντικό όριο σ' αυτά τα δύο μήκη κύματος επίσης παρουσιάζεται στο σχήμα 3.49, χρησιμοποιώντας την Εξίσωση (3.6.1). Μία άμεση σύγκριση θα δείξει ως οι μετρημένες ευαισθησίες του δέκτη είναι χειρότερες από 20 dB ή περισσότερο, σε σύγκριση με το κβαντικό όριο. Το μεγαλύτερο μέρος της υποβάθμισης οφείλεται στον θερμικό θόρυβο, που είναι αναπόφευκτος σε θερμοκρασία δωματίου και γενικά υπερیشχει του θορύβου βολής. Κάποιο μέρος της υποβάθμισης οφείλεται στη διασπορά των ινών, που οδηγεί σε καταστολή ισχύος. Οι πηγές τέτοιου είδους καταστολών σχολιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο. Η υποβάθμιση της ευαισθησίας λόγω της διασποράς εξαρτάται και από τον ρυθμό bit  $B$  και από το μήκος της οπτικής ίνας  $L$  και αυξάνεται με το  $BL$ . Αυτός είναι ο λόγος που η υποβάθμιση της ευαισθησίας από το κβαντικό όριο είναι μεγαλύτερη (25-30 dB) για συστήματα που λειτουργούν σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης bit. Η ευαισθησία του δέκτη στα 10Gb/s είναι τυπικά χειρότερη από -20dBm [8].

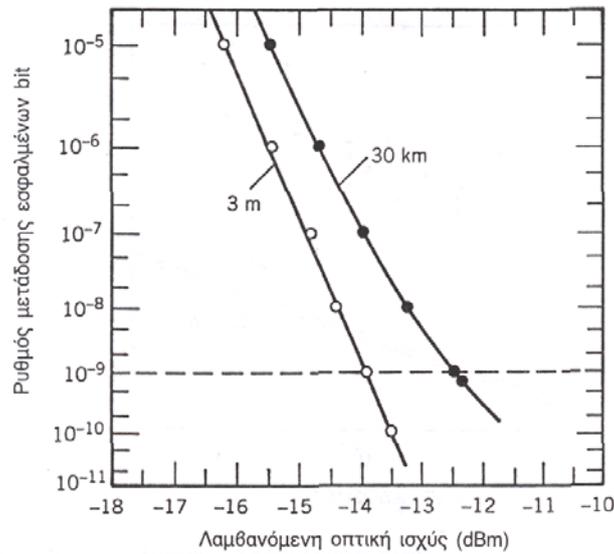
$$\bar{P}_{rec} = N_p h\nu B / 2 = \bar{N}_p h\nu B \quad (3.6.1)$$

Μπορούμε να απομονώσουμε την έκταση της υποβάθμισης της ευαισθησίας, που εμφανίζεται σαν αποτέλεσμα της διάδοσης του σήματος στο εσωτερικό της οπτικής ίνας. Η συνηθισμένη διαδικασία είναι να διεξάγουμε μία επιπλέον ξεχωριστή μέτρηση της ευαισθησίας του δέκτη συνδέοντας τον πομπό κατευθείαν με τον δέκτη, χωρίς ενδιάμεση οπτική ίνα.



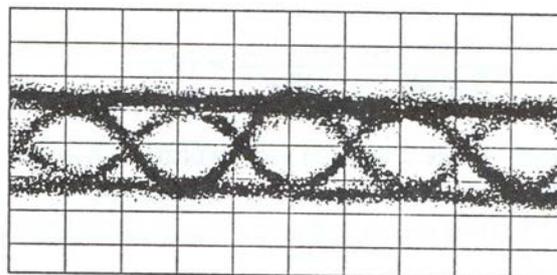
**Σχήμα 3.49** Οι μετρημένες ευαισθησίες δέκτη συναρτήσει του ρυθμού bit για δέκτες p-i-n (κύκλοι) και APD(τρίγωνα) κατά τη διάρκεια πειραμάτων μετάδοσης σε μήκη κύματος 1.3 και 1.55 $\mu\text{m}$ . Επίσης παρουσιάζεται και το κβαντικό όριο της ευαισθησίας του δέκτη, για τη διεξαγωγή συγκρίσεων (συνεχείς γραμμές).

Το σχήμα 3.50 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών των μετρήσεων για ένα πειραματικό σύστημα  $1.31\mu\text{m}$ , στο οποίο το μεταδιδόμενο σήμα διαμορφωνόταν στα 8Gb/s, διαδιδόμενο σε οπτική ίνα μήκους 30km. Η ανίχνευση έγινε με δέκτη APD InGaAs [9]. Όταν το μήκος της οπτικής ίνας μειώθηκε στα 3m (το μήκος των εύκαμπτων αγωγών που σχετίζονται με τον πομπό και τον δέκτη), η ευαισθησία του δέκτη βελτιώνεται κατά 1.5dB, αφού περιορίζεται η υποβάθμιση λόγω της διασποράς στις ίνες. Αν μία τέτοια ρύθμιση γίνει στις πληροφορίες του Σχ. 3.51, βλέπουμε ότι οι δέκτες P-i-n τυπικά λειτουργούν στα 25dB πέρα από το κβαντικό όριο. Η ευαισθησία του δέκτη μπορεί να βελτιωθεί κατά περίπου 5-6dB χρησιμοποιώντας δέκτες APD, που τυπικά λειτουργούν στα 20dB πέρα από το κβαντικό όριο. Όσον αφορά τον μέσο αριθμό φωτονίων προς bit, οι δέκτες APD απαιτούν σχεδόν 1000 φωτόνια/bit σε σύγκριση με το κβαντικό όριο των 10 φωτονίων/bit. Η απόδοση του δέκτη γενικά είναι καλύτερη για τα μικρά μήκη κύματος στην περιοχή των  $0.8-0.9\mu\text{m}$ , όπου μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε APD πυριτίου. Λειτουργούν ικανοποιητικά με περίπου 400 φωτόνια/bit. Ένα πείραμα το 1976, πέτυχε ευαισθησία μόλις 187 φωτονίων/bit [10]. Μπορούμε να βελτιώσουμε την ευαισθησία του δέκτη χρησιμοποιώντας την τεχνική της κωδικοποίησης. Σ' ένα πειραματικό σύστημα  $1.55\mu\text{m}$  [11] παρουσιάστηκε ευαισθησία 180 φωτονίων/bit, μετά από 305km εκπομπής στα 140Mb/s.

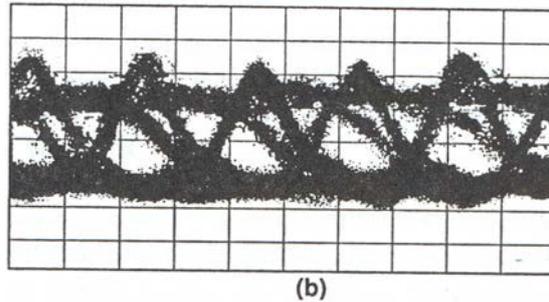


**Σχήμα 3.50** Οι καμπύλες BER για πείραμα μετάδοσης  $1.3\mu\text{m}$  στα  $8\text{Gb/s}$ . Η οριζόντια διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί σε  $BER 10^{-9}$ . Η τομή της με τις καμπύλες BER καθορίζει την ευαισθησία του δέκτη. Η απόδοση του οπτικού δέκτη σε πραγματικά οπτικά συστήματα μπορεί να μεταβάλλεται με τον χρόνο.

Αφού δεν μπορούμε να μετρήσουμε άμεσα τον BER, σ' ένα σύστημα που βρίσκεται σε λειτουργία, χρειαζόμαστε μία εναλλακτική λύση για να ελέγχουμε την απόδοση του συστήματος. Το διάγραμμα ματιού είναι το πιο κατάλληλο για τον συγκεκριμένο σκοπό. Το κλείσιμο του ματιού αποτελεί μέτρο υποβάθμισης της απόδοσης του δέκτη και σχετίζεται με την αντίστοιχη αύξηση του BER. Το Σχήμα 3.51 παρουσιάζει τα διαγράμματα ματιού που καταγράφηκαν σ' ένα εργαστηριακό πείραμα, στο οποίο η έξοδος ενός οπτικού πομπού  $1.55\mu\text{m}$  διαμορφώθηκε άμεσα στα  $2.5\text{Gb/s}$  κι ανιχνεύθηκε χρησιμοποιώντας έναν δέκτη APD. Το μάτι είναι ορθάνοιχτο όταν δεν υπάρχουν καθόλου οπτικές ίνες (επάνω διάγραμμα),



(a)



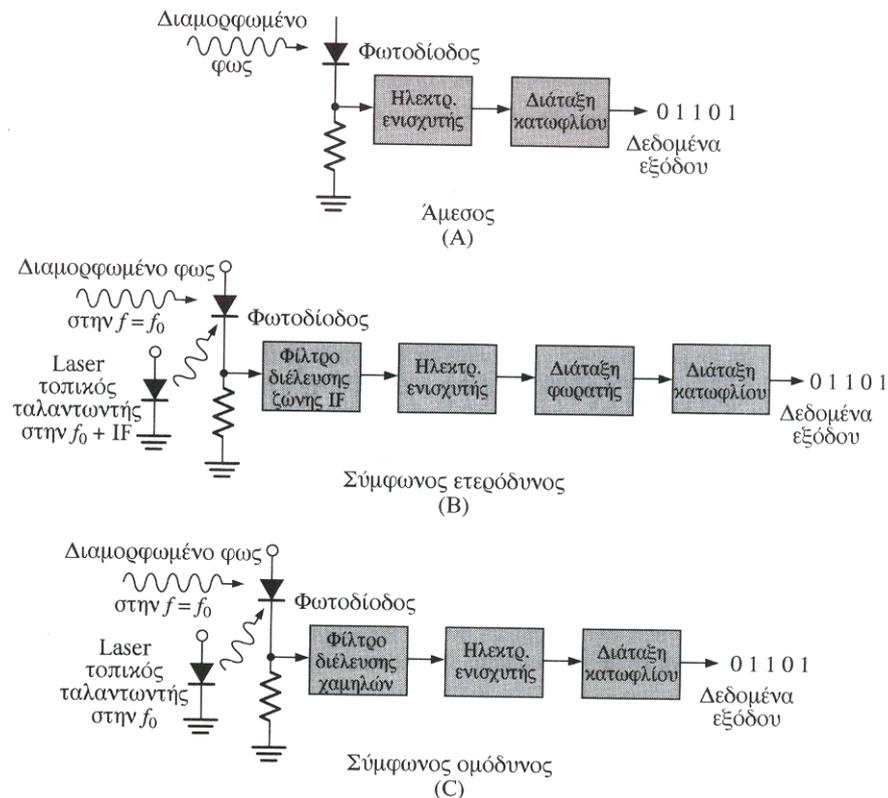
**Σχήμα 3.51** Τα διαγράμματα ματιού στα 0km και στα 120km (κάτω ίχνος) που παρατηρήθηκαν σε πειράματα μετάδοσης στα 2.5Gb/s. 1990 IEEE. Ανατύπωση κατόπιν αδείας.).

αλλά είναι εν μέρει κλειστό όταν το σήμα μεταδίδεται μέσω μίας οπτικής ίνας μήκους 120km (κάτω διάγραμμα). Το κλείσιμο του "ματιού" οφείλεται στη διασπορά της οπτικής ίνας, που οδηγεί σε σημαντική παραμόρφωση των οπτικών παλμών, καθώς αυτοί διαδίδονται μέσω της οπτικής ίνας. Το διάγραμμα του "ματιού", που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.51, δείχνει ότι η απόδοση του δέκτη επηρεάζεται από τη διασπορά της οπτικής ίνας, παρόλο που δεν καταστέλλεται εντελώς από αυτόν, αφού το μάτι δεν είναι εντελώς κλειστό. Η συνεχής παρατήρηση του διαγράμματος του ματιού είναι στα πραγματικά συστήματα μία μέτρηση της απόδοσης του δέκτη.

Η απόδοση των οπτικών δεκτών που λειτουργούν σε μήκος κύματος 1.3-1.6  $\mu\text{m}$  περιορίζεται σημαντικά από τον θερμικό θόρυβο, όπως φαίνεται καθαρά στο Σχήμα 3.49. Η χρήση ενός δέκτη APD βελτιώνει την κατάσταση, αλλά μόνο σε περιορισμένη έκταση, λόγω του παράγοντα πλεονάζοντος θορύβου, που σχετίζεται με την APD InGaAs. Οι περισσότεροι δέκτες λειτουργούν πολύ μακριά από το κβαντικό όριο κατά 20dB ή περισσότερο. Η επίδραση του θερμικού θορύβου μπορεί να μειωθεί σημαντικά χρησιμοποιώντας τεχνικές σύμφωνης-ανίχνευσης, στην οποία το λαμβανόμενο σήμα αναμειγνύεται σύμφωνα με την έξοδο ενός laser στενού εύρους-γραμμής. Η απόδοση του δέκτη μπορεί επίσης να βελτιωθεί αν ενισχύσουμε το οπτικό σήμα πριν αυτό προσπέσει στην φωτοδίοδο.

Σε προηγούμενα κεφάλαια, μελετήσαμε μερικά από τα δομικά τμήματα των οπτικών συστημάτων τις πηγές του φωτός, τους τρόπους διαμόρφωσης του φωτός με δυαδική πληροφορία και τις διάφορες διαδικασίες που αφορούν τις ίνες, τους συζεύκτες, τους διακλαδωτές. Πριν προχωρήσουμε περισσότερο στην κατανόηση της αρχιτεκτονικής του ολικού δικτύου και θεωρήσουμε ειδικές σχεδιάσεις, πρέπει να καταλάβουμε το δέκτη πώς κατορθώνει να διακρίνει με αξιοπιστία μεταξύ του bit "1" και του "0" χρησιμοποιώντας έναν από τους διαθέσιμους τρόπους διαμόρφωσης και μια κατάλληλη δομή δέκτη.

Ανάμεσα στα θέματα που πρέπει να ξεκαθαριστούν είναι η ειδική αξιολόγηση των επιδόσεων του δέκτη, τα βασικά όρια των επιδόσεων αυτών, το ποιο είδος διάταξης φωρατή πρέπει να χρησιμοποιήσει και ποια άλλα στοιχεία εκτός του φωρατή αποτελούν το δέκτη, το κατά πόσο αυτός ο δέκτης πρόκειται να καταγράψει απλά την παρουσία ή την απουσία φωτός (άμεση φώραση) ή αν επιτρέπει τον προσδιορισμό του "1" ή του "0" εκμεταλλευόμενος τη γνώση της οπτικής συχνότητας ή της φάσης (σύμφωνος δέκτης).

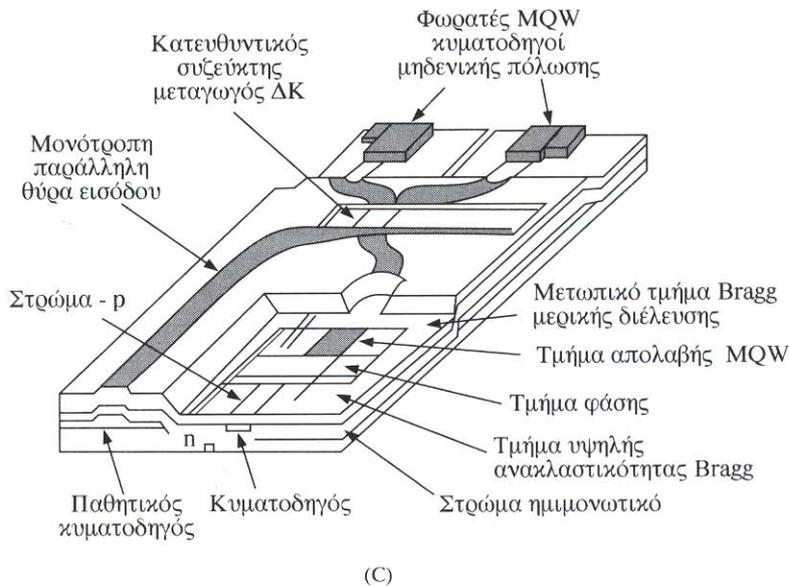
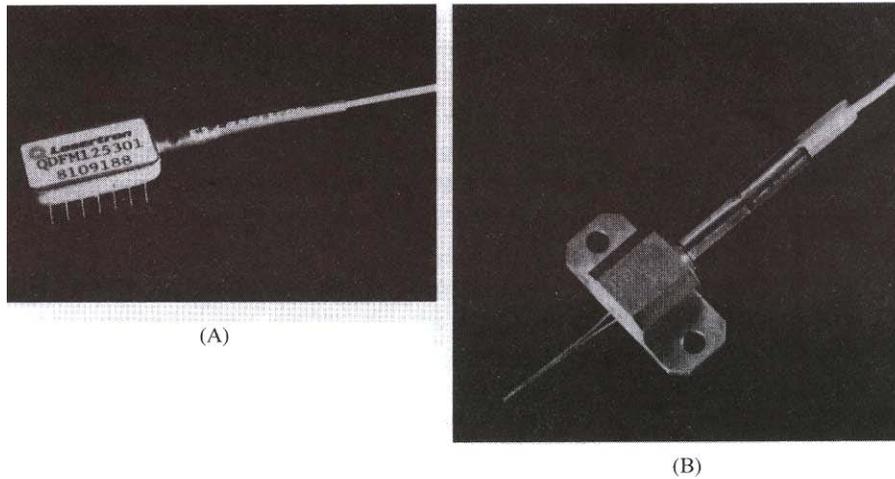


**Σχήμα 3.52** Τρεις βασικοί τύποι δεκτών. (A) Άμεση φώραση με PIN ή φωτοδίοδο χιονοστιβάδας (B) Σύμφωνος ετερόδυνος δέκτης και (C) Σύμφωνος ομόδυνος δέκτης.

Το κεφάλαιο αυτό παίζει έναν βασικό ρόλο. Από το ένα μέρος επιδιώκει να συμπληρώσει τις περισσότερες από τις γνώσεις που χρειάζονται για το σχολιασμό της αρχιτεκτονικής του δικτύου ως συνόλου. Από το άλλο μέρος, κάνει τις αναγκαίες αναδρομές για να ενοποιήσει τους διάφορους παράγοντες που αλληλεπιδρούν στους φωτοδέκτες. Υπάρχουν διάφορες πολύ βοηθητικές εργασίες που αναφέρονται λεπτομερειακά στη θεωρία της οπτικής φώρασης και της αποδιαμόρφωσης, ιδιαίτερα η κλασική μελέτη του 1980 του Yamamoto [12] και διάφορες εκπαιδευτικές ανασκοπήσεις.

3.18.1 Τύποι Δεκτών

Το Σχήματος 3.52 περιγράφει, σε μια στοιχειώδη μορφή, τους τρεις διαφορετικούς τύπους δεκτών. Στον δέκτη άμεσης-φώρασης (direct-detection) του Σχήματος 3.53 (A) ένας φωτοφωρατής χρησιμεύει για να μετατρέπει τη ροή των προσπιπτόντων φωτονίων σε ρεύμα ηλεκτρονίων, το ρεύμα ενισχύεται και γίνεται ο προσδιορισμός του κατά πόσο το ρεύμα αυτό είναι κυρίως πιο πάνω ή πιο κάτω από ένα ορισμένο κατώφλι.



**Σχήμα 3.53** Στοιχεία των δεκτών. (A) Για άμεση φώραση, ένας φωτοφωρατής-προενισχυτής PIN/FET. (B) Για την άμεση φώραση, μια φωτοφωράτρια χιονοστιβάδας συσκευασμένη μαζί με το τροφοδοτικό της υψηλής τάσης. (C) Ένας πειραματικός σύμφωνος δέκτης σε chip.

Η μορφή δέκτη άμεσης-φώρασης, όπως χρησιμοποιείται για σήματα με διαμόρφωση ASK, χαρακτηρίστηκε όχι αδικαιολόγητα, ως "άκομψη, αν όχι εντελώς ευτελής" [13]. Είναι σχεδόν τόσο περίτεχνη, σε ό,τι αφορά την αρχή λειτουργίας της, όσο και το αναβόσβημα του φωτός που χρησιμοποιούσαν στον κλασικό Ρωμαϊκό πολιτισμό για να επικοινωνούν μεταξύ βουνοκορυφών [14]. Το μόνο που κάνει ο δέκτης αυτός είναι να μας λέει "υπάρχει ή δεν υπάρχει φως". Ή, θα μπορούσαμε να πούμε ότι η αρχή λειτουργίας ενός δέκτη άμεσης φώρασης είναι απλούστατα εκείνη των πρώτων-πρώτων στοιχειωδών ράδιο-δεκτών με κρύσταλλο "γαληνίτη".

Κατ' αναλογία, οι δύο μορφές *σύμφωνου δέκτη* (coherent receiver) του Σχήματος 3.52 (B) και (C), έχουν σχεδιαστεί σύμφωνα με τους πρόσφατους υ-περετερόδυνους ράδιο-δέκτες. Μία κατά το δυνατό μονοχρωματική πηγή CW φωτός αποτελεί τον τοπικό ταλαντωτή. Το φως αυτής της πηγής πέφτει, στο φωτοφωρατή μαζί με το κατά πολύ ασθενέστερο αφικνούμενο οπτικό σήμα που φέρει την πληροφορία, και λόγω της μη γραμμικότητας του φωτοφωρατή, αναπτύσσεται ένα ισχυρό διακρότημα σήματος εξόδου στη διαφορά των δύο συχνοτήτων. Αυτή η *ενδιάμεση συχνότητα* (IF: intermediate frequency) έχει επιλεγεί έτσι ώστε να βρίσκεται στο κέντρο της ζώνης ενός σταθερά συντονισμένου *φίλτρου IF*. Η ενίσχυση του ασθενούς σήματος IF γίνεται ηλεκτρικά. Μετά, όταν το σήμα γίνει αρκετά ισχυρό, γίνεται μια κατάλληλη αποδιαμόρφωση και η σύγκριση προς ένα κατώφλι για την τελική απόφαση ανάδειξης των "1" και "0". Αν ο πομπός που χρησιμοποιούμε είναι ASK, προηγείται του κυκλώματος αυτού απόφασης ένας απλός ενεργειακός φωρατής. Αν όμως ο πομπός έχει επιβάλλει διαμόρφωση κατά φάση ή κατά συχνότητα, ο δέκτης είναι κάπως πολυπλοκότερος.

Η διαφορά μεταξύ του ετερόδυνου οπτικού δέκτη του Σχήματος 3.52 (B) και του ομόδυνου τύπου του Σχήματος 3.52 (C) είναι ότι στον τελευταίο η IF είναι ακριβώς μηδέν. Δηλαδή, ότι η οπτική συχνότητα τον αφικνούμενου σήματος φορέα της πληροφορίας και εκείνη του τοπικού ταλαντωτή είναι οι ίδιες. Όπως θα δούμε, αν και αυτή η ταύτιση συχνοτήτων είναι αρκετά δύσκολο να επιτευχθεί, αποδείχθηκε συχνά ότι αξίζει τον κόπο, γιατί τότε απαιτείται μικρότερη λαμβανόμενη ισχύς σήματος για ένα δεδομένο BER (*bit error rate*) από ό, τι με τον ετερόδυνο σύμφωνο δέκτη.

Και οι δύο τύποι σύμφωνων δεκτών απαιτούν μικρότερο λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) για ένα δεδομένο ρυθμό σφαλμάτων bit (BER) από ότι ο δέκτης άμεσης φώρασης. Εντούτοις, είναι ο τελευταίος αυτός τύπος μόνον που έχει πραγματοποιηθεί συστηματικά στα πρακτικά χρησιμοποιούμενα οπτικά συστήματα, λόγω της απλότητας του. Πρόσφατα μάλιστα κέρδισε πρόσθετη εκτίμηση με την εμφάνιση κατάλληλων οπτικών ενισχυτών με αποτέλεσμα όταν αυτοί οι ενισχυτές ενσωματώνονται σ' ένα

σύστημα άμεσης φώρασης, οι επιδόσεις να γίνονται σχεδόν τόσο καλές όσο εκείνες ενός σύμφωνου συστήματος.

### 3.18.2 Τύποι Φωτοφωρατών

Υπάρχουν πολλοί τρόποι για να μετατρέψουμε το προσπίπτον φως σε ρεύμα ή τάση, και η γενική κατηγορία των διατάξεων που το επιτυγχάνει αυτό αναφέρεται σαν *φωτοφωρατές*. Υπάρχουν τα βολτόμετρα, οι φωτοπολλαπλασιαστικές λυχνίες, τα φωτοτρανζίστορ, οι φωτοдиодοι και άλλα. Απ' αυτούς, μόνον η υποκατηγορία *φωτοдиодων* ημιαγωγού αποδείχθηκε να έχει το σωστό συνδυασμό ευαισθησίας, χαμηλού θορύβου, μικρών διαστάσεων, χαμηλού κόστους και υψηλής ταχύτητας απόκρισης, για να χρησιμεύσουν ικανοποιητικά σε ένα σύστημα επικοινωνιών με οπτικές ίνες.

Υπάρχουν τρεις τύποι φωτοдиодων ημιαγωγού, και θα τους εξετάσουμε πιο ύστερα στο κεφάλαιο αυτό με κάποια λεπτομέρεια: διοδοι PN, διοδοι PIN, και φωτοдиодοι χιονοστοιβάδας (APD, avalanche photodiodes). Το P και το N θα δηλώνουν αντίστοιχα "εξωγενή" ημιαγωγό με προσμειξίσεις θετικές ή αρνητικές. Το I θα δηλώνει "ενδογενή" (intrinsic) καθαρό ημιαγωγό. Οι διοδοι PN και PIN δρουν με το να μετατρέπουν ένα σημαντικό ποσοστό των προσπιπτόντων φωτονίων, ένα-προς-ένα, σε ηλεκτρόνια τα οποία ρέουν εν συνεχεία και ενισχύονται από το κύκλωμα του ηλεκτρονικού ενισχυτή, ενώ η APD ενεργεί παράγοντας πολλά ηλεκτρόνια από καθ' ένα από τα προσπίπτοντας φωτόνια, παρέχοντας έτσι μια μορφή εσωτερικής απολαβής. Επειδή το ρεύμα που παράγεται από μια διοδο PIN είναι πολύ ασθενικό κι επομένως πολύ ευάλωτο στο θόρυβο, συνηθίζουμε να ενσωματώνουμε τον ενισχυτή, συχνά κατασκευασμένο με FET, σε μια ενιαία, συσκευασία PIN/FET.

Το Σχήματος 3.53 (A) δείχνει ένα τέτοιο στοιχείο PIN/FET του εμπορίου, και το Σχήματος 3.53 (B) μια φωτοдиодο APD. Στο Σχήματος 3.53 (C) φαίνεται ένας πειραματικός σύμφωνος ετερόδυνος δέκτης ολοκληρωμένος σ' ένα μόνον chip από τα Bell Laboratories [11].

### 3.18.3 Τρόποι αντιμετώπισης του Θερμικού θορύβου

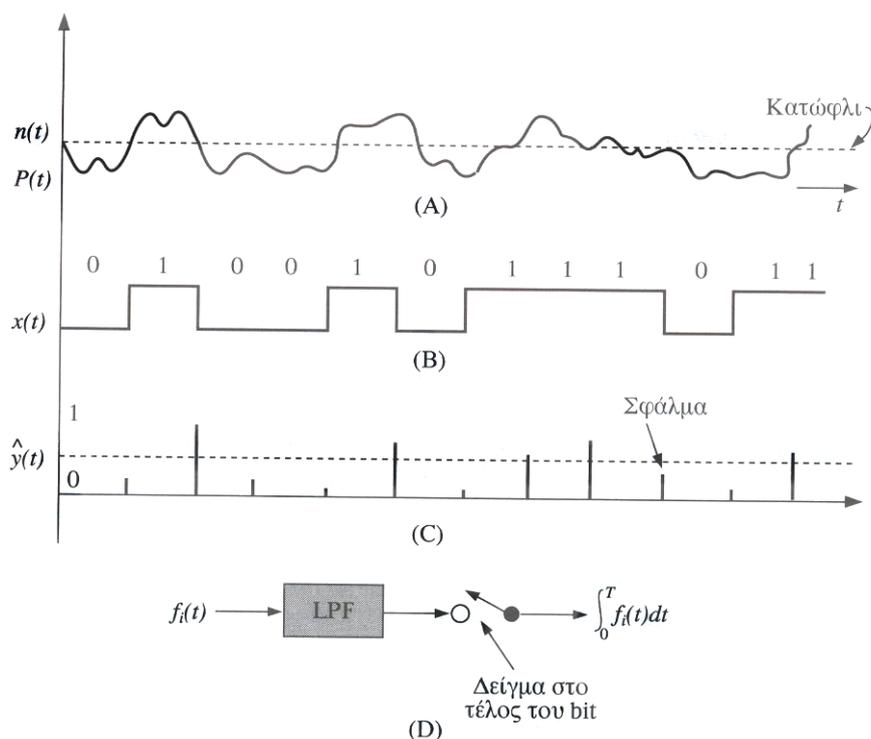
Όπως προκύπτει, κάτω από τις περισσότερες λειτουργικές συνθήκες που συναντάμε, η επικρατέστερη συνιστώσα θορύβου που πρέπει να μας απασχολήσει φαίνεται να είναι ο θερμικός θόρυβος που αναπτύσσεται στην είσοδο του ηλεκτρικού ενισχυτή. Υπάρχουν τρεις τρόποι για να υπερνικήσουμε τους περιορισμούς που επιβάλλει ο θόρυβος αυτός, ενισχύοντας το σήμα πριν εγκαταλείψει τον φωτοφωρατή. Ο πρώτος είναι η χρήση φωτοдиодου APD. Ο δεύτερος είναι να βάλουμε πριν από το φωτοφωρατή έναν οπτικό ενισχυτή (οπτική προενίσχυση). Ο τρίτος είναι να χρησιμοποιήσουμε σύμφωνη φώραση με έναν

τόσο ισχυρό τοπικό-ταλαντωτή ώστε ο θερμικός θόρυβος να είναι πολύ μικρότερος από το χρήσιμο διακρότημα (μίξης) του γινόμενου του τοπικού ταλαντωτή και του σήματος που φθάνει.

#### **3.18.4 Ο ρυθμός σφαλμάτων bit ως βασική παράμετρος**

Το Σχήματος 3.54 (A) δείχνει μια τυπική γραφική παράσταση της οπτικής ισχύος συναρτήσει του χρόνου για ένα σύστημα ASK, ενώ στο (B) φαίνεται η υποθετική μορφή που θα είχαμε αν απουσίαζαν όλες οι αιτίες θορύβου και παραμόρφωσης. Αν μπορούσαμε να 'μαστε βέβαιοι ότι οι τυχαίες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια του bit "1" και του bit "0" είναι ακριβώς ίσες και ότι οι πιθανότητες εκπομπής του "0" και του "1" είναι ίσες, τότε θα βάζαμε το κατώφλι απόφασης για τις μετρήσεις ακριβώς στο μέσο των αποκλίσεων, όπως υποδειχνεται από την εστιγμένη γραμμή. Αν κατά τη χρονική διάρκεια ενός δεδομένου bit η κυματομορφή έδειξε να βρίσκεται κυρίως πάνω από το κατώφλι, θα μπορούσε να δηλωθεί ένα bit "1", αλλιώς ένα "0", όπως φαίνεται στο Σχήματος 3.54 (C).

Είναι σαφές ότι η απρόβλεπτη συμπεριφορά του θορύβου στο σύστημα θα οδηγεί από καιρού σε καιρό αυτή τη διαδικασία απόφασης σε σφάλμα, όπως φαίνεται με βέλος στο Σχήματος 3.54 (C). Στο Σχήματος 3.54 (D) φαίνεται ο δέκτης φίλτρου *ολοκλήρωσης-και-μηδενισμού* που χρησιμοποιεί πληροφορία χρονισμού των bits (bit-clock) για να δειγματολήπτη κάθε bit στο τέλος του, οπότε έχει φθάσει όλη η ενέργεια αυτού του bit. Όπως θα δούμε, αυτή η μορφή δέκτη είναι εκείνη που προτιμούμε γιατί οδηγεί σε σφάλματα ολιγότερο συχνά απ' ότι άλλες,

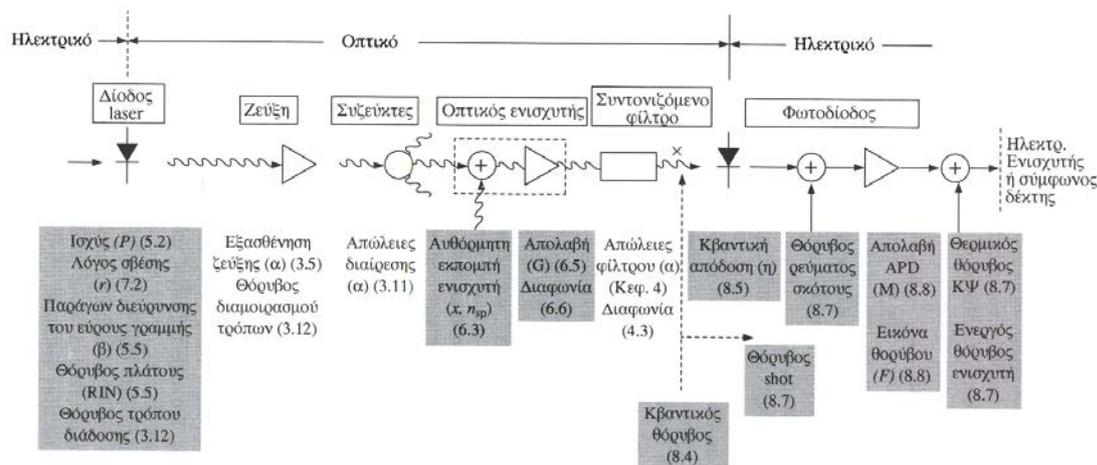


**Σχήμα 3.54** Για να δείξουμε (A) ότι ο οπτικός δέκτης βλέπει ένα μη-καθαρό (ενθόρυβο) σήμα  $n(t)$ , αποτελούμενο από ένα μίγμα θορύβου με το καθαρό σήμα  $x(t)$  που φαίνεται στο (B). Ο δέκτης χρησιμοποιεί μια κυματομορφή  $y(t)$  που προκύπτει από την  $n(t)$ , προκειμένου να προσδιορίσει το κατά πόσο το παρατηρούμενο μίγμα προέρχεται μάλλον από “1” ή μάλλον από “0”, και χρησιμοποιεί για ν’αποφασίσει δείγματα  $\hat{y}(t)$  της  $y(t)$  και ένα κατώφλι (στιγμένη γραμμή). Κάπου-κάπου γίνεται ένα σφάλμα (βλ. βέλος). (D) Το λεγόμενο ιδανικό φίλτρο, με την μορφή ολοκλήρωσης-και -μηδένισης (integrate-and-dump).

Αν δεχθούμε ότι δεν υπάρχει στατιστική συσχέτιση μεταξύ των διαδοχικών bit που στέλνει ο πομπός, και φυσικά καμιά συσχέτιση μεταξύ των κυματο-μορφών θορύβου στις περιόδους των διαδοχικών bit, καθώς και ότι τα “0” και τα “1” είναι ισοπίθανα, τότε οτιδήποτε χρειάζεται να ξέρουμε για να χαρακτηρίσουμε την διαδρομή πομπού-δέκτη, περιέχεται στο *ρυθμό σφαλμάτων bit* (BER: bit error rate), δηλ., στην πιθανότητα που υπάρχει να εκληφθεί το “0” για “1” και το “1” για “0”. Από το BER., μπορεί να συμπεράνει κανείς την πιθανότητα εμφάνισης όλων των ειδών γεγονότων σε πρωτόκολλα ανώτερης τάξης, όπως λ.χ. την πιθανότητα ένα μεγάλο block από bit να περιέχει ένα ή περισσότερα σφάλματα, την πιθανότητα που υπάρχει μία αίτηση σύνδεσης να μην φθάσει ποτέ κατάλληλα στον προορισμό της, ή η διεύθυνση ενός πακέτου να ληφθεί λανθασμένα, κ.ο.κ.

### 3.18.5 Ο ισολογισμός της ζεύξης

Όταν αρχίζουμε να σχεδιάζουμε ένα σύστημα, δεν υπάρχει πιο σημαντικό θέμα από το να λογαριάσουμε όλα τα πράγματα που μπορούν να συμβούν στην ισχύ του σήματος στη διαδρομή του από τη δίοδο laser ή το LED, μέχρι τη φωτοδίοδο κι' επομένως μέχρι το σημείο του κατωφλίου απόφασης, καθώς και τους τρόπους που ο θόρυβος ή άλλες πηγές παραμόρφωσης μπορούν να αλλοιώσουν αυτό το σήμα. Στο άκρο της λήψης υπολογίζουμε τελικά το λαμβανόμενο πηλίκο σήμα-προς-θόρυβος (SNR). Αυτό συνήθως το ορίζουμε ως λόγο της ισχύος του σήματος προς την ισχύ του θορύβου στο σημείο κατωφλίου.



**Σχήμα 3.55** Στοιχεία του ισολογισμού της ζεύξης, κατάλογος των συμβόλων των κατάλληλων παραμέτρων και παραγράφοι του βιβλίου όπου εξετάζονται.

Όταν διερευνούμε το SNR, είναι πολύ σημαντικό να είμαστε προσεκτικοί στην διάκριση μεταξύ ηλεκτρικού SNR και οπτικού SNR. Επειδή, όπως είδαμε, η ισχύς που παρέχεται στην αντίσταση φόρτου της φωτοδίοδου είναι ανάλογη με το τετράγωνο της προσπίπτουσας οπτικής ισχύος, ο ίδιος αριθμός dB του SNR. σημαίνει διαφορετικά πράγματα όταν έχουμε να κάνουμε με οπτικό περιβάλλον απ' ότι με ηλεκτρικό. Ένας ιδανικός φωτοφωρατής χωρίς θόρυβο που δέχεται ένα μίγμα οπτικού σήματος και θορύβου με οπτικό SNR  $D$  dB θα παρέχει στην έξοδο του μίγμα ηλεκτρικού σήματος και θορύβου που θα έχει ηλεκτρικό SNR ίσο με  $2D$  dB. Ανάλογα ένα SNR απωλειών  $D$  dB στο οπτικό επίπεδο θα είναι επιζήμιο  $2D$  dB για τις τελικές επιδόσεις σε BER, δηλ. όσο και ο αριθμός dB των επιπτώσεων στο ηλεκτρικό μέρος του δέκτη.

Προκειμένου να επιτύχουμε ένα δεδομένο επίπεδο ρυθμού σφάλματος bit, προκύπτει ότι το ελάχιστο επιτρεπόμενο SNR στη λήψη θα είναι διαφορετικό για τους διάφορους τύπους διαμόρφωσης και για τους διάφορους τύπους δεκτών [2, 3]. Γι' αυτό, όταν συγκρίνει κανείς διάφορα σχήματα που δέχονται το ίδιο

οπτικό SNR στην είσοδο του δέκτη, θα υπάρχουν διαφορές στο SNR που βρίσκουμε στο σημείο κατωφλίου που παίρνεται η απόφαση.

Η άσκηση αυτή του ισολογισμού ισχύος στη ζεύξη θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί σαν ένας σχεδιασμός των επιπέδων ισχύος στο σύστημα ώστε να βρίσκονται μεταξύ δύο ακρότατων, ένα ανώτατο όριο που επιβάλλεται από λόγους μη γραμμικών φαινομένων ή ασφάλειας του ανθρωπίνου οφθαλμού και ένα κατώτερο όριο που τίθεται από το SNR που απαιτείται από το δέκτη για ένα δεδομένο BER

### 3.18.6 Το πλήθος φωτονίων ανά bit ως μέτρο

Το λαμβανόμενο SNR εξαρτάται εν μέρει από το γινόμενο της λαμβανόμενης ισχύος και της διάρκειας του bit δηλ. από τη λαμβανόμενη ενέργεια ανά bit. Κατά προτίμηση, όταν μιλάμε για τη λαμβανόμενη ενέργεια σήματος (σε joules ή ergs), θα αποδειχθεί πολύ χρήσιμη η χρησιμοποίηση του πλήθους φωτονίων ανά bit. Μεταξύ άλλων, αυτό βοηθά στο να λάβουμε υπόψη δύο πράγματα σε ένα μόνο μέγεθος: την ενέργεια αλλά και το βαθμό στον οποίο το φως έγινε τόσο ασθενές ώστε η διακριτή του φύση με την άφιξη μεμονωμένων φωτονίων (δηλ., ο κβαντικός θόρυβος) να πρέπει να ληφθεί υπόψη. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση του Planck  $\epsilon = hf$  έχουμε τον εξής εύχρηστο τύπο, που είναι άμεσα εφαρμόσιμος για μήκος κύματος 1.5  $\mu\text{m}$ .

$$\text{Ένα milliwatt} = 7.5 \times 10^{15} \text{ φωτόνια ανά δευτερόλεπτο}$$

απ' όπου εύκολα προκύπτει το πλήθος των φωτονίων ανά bit για έναν ορισμένο ρυθμό bit, και μια ορισμένη λαμβανόμενη ισχύ.

## 3.19 Συνιστώσες του Ισολογισμού της Ζεύξης

Το Σχήμα 3.56 παρουσιάζει το συνοπτικό διάγραμμα της πλήρους διαδρομής από το laser ως τον δέκτη, που διακόπτεται σύμφωνα με τα διάφορα στοιχεία που παρεμβαίνουν στον υπολογισμό του ισολογισμού της ζεύξης. Εκείνα που θα παραστεί ανάγκη να σχολιάσουμε στο κεφάλαιο αυτό φαίνονται σε σκιασμένα πλαίσια.

### 3.19.1 Παράμετροι του ισολογισμού - ζεύξης του σήματος

Μεταξύ των μεταβλητών που καθορίζουν την λαμβανόμενη ισχύ σήματος στο σημείο απόφασης (κατώφλι) είναι:

- **Ισχύς εξόδου του laser** η οποία παρέχεται στην πραγματικότητα μέσα στην προσαρτημένη ίνα. Η τιμή του μεγέθους αυτού θα υπαγορευθεί από την επιλογή των διαθέσιμων στοιχείων, ή από τους περιορισμούς ισχύος που θέτουν είτε οι μη γραμμικότητες ή λόγοι ασφαλείας του οφθαλμού
- **Εξασθένηση στην ίνα.**
- **Απώλειες διακλάδωσης:** στους συζεύκτες, συγκεντρωτές και διακλαδωτές, μαζί με τις πρόσθετες απώλειες των στοιχείων αυτών.
- **Πρόσθετες απώλειες** στους συνδετήρες (connectors) και στις συγκολλήσεις (splices).
- **Λόγος σβέσης  $r$**  για το σύστημα ASK. Υπενθυμίζουμε ότι το  $r$  είναι ο λόγος της οπτικής ισχύος για το bit "0" προς εκείνη για το "1".
- **Απολαβή του οπτικού ενισχυτή  $G$ ,** και
- **Η κβαντική απόδοση** με την οποία ο φωτοφωρατής μετατρέπει τα φωτόνια σε ηλεκτρικούς φορείς (εν γένη μικρότερη του 100%).

Στο κεφάλαιο αυτό θα διαπραγματευθούμε ειδικότερα μόνον τις τρεις τελευταίες παραμέτρους, δεχόμενοι ότι η συνδυασμένη επίδραση των άλλων οδηγεί στο να έχουμε στο σημείο εισόδου του δέκτη μια οπτική ισχύ  $P$  για το δυαδικό "1" και  $rP$  για το δυαδικό "0", Το σημείο αυτό δηλώνεται με  $\chi$  στο Σχήμα 3.57.

### 3.19.2 Παράμετροι του ισολογισμού-ζεύξης του θορύβου

Εξετάσαμε διάφορα είδη θορύβων προσθετικών καθώς και πολλαπλασιαστικών. Και ενώ ο προσθετικός θόρυβος παραμένει ακόμα και όταν το σήμα εξαφανίζεται, ο πολλαπλασιαστικός θόρυβος είτε είναι μια συμφυής τυχαιότητα μέσα στο ίδιο το σήμα, οπότε εξαφανίζεται με αυτό, ή παράγεται σε κάποια διάταξη μόνον παρουσία του σήματος. Μεταξύ των πηγών προσθετικού θορύβου που πρέπει να θεωρήσουμε είναι οι εξής:

- **Θόρυβος ρεύματος σκότους** μέσα στη φωτοδίοδο, προκαλούμενος με θερμική διαδικασία,
- **Θερμικός θόρυβος** ή θόρυβος Johnson στο ωμικό μέρος της αντίστασης εισόδου οποιουδήποτε ηλεκτρικού ενισχυτικού κυκλώματος ακολουθεί το φωτοφωρατή,
- **Ενισχυμένη αυθόρμητη εκπομπή (ASE)** που γεννάται σε οποιοδήποτε οπτικό ενισχυτή μεσολαβεί στην οπτική διαδρομή μεταξύ laser και φωτοφωρατή,
- **Θόρυβος ηλεκτρονικού ενισχυτή** που προκύπτει στο εσωτερικό της ενισχυτικής βαθμίδας που ακολουθεί τον φωτοφωρατή, και
- **Διαφωνία** από τα γειτονικά κανάλια ή από διακυμάνσεις της απολαβής σε ενδεχόμενο οπτικό ενισχυτή δίοδου

Οι πηγές πολλαπλασιαστικού θορύβου περιλαμβάνουν:

- **Θόρυβο διαμοιρασμού τρόπων** στην περίπτωση ενός μονοχρωματικού laser που οδηγεί μονότροπη ίνα,
- **Θόρυβο τρόπων διάδοσης**, που εμφανίζεται μόνο σε πολύτροπες ίνες και οφείλεται σε τυχαία κυμαινόμενες διεγέρσεις ενός μικρού αριθμού τρόπων διάδοσης από μια πηγή ανεπαρκούς εύρους ζώνης,
- **Θόρυβο φάσης του laser**, με τη διαδικασία που οδηγεί το laser να μην παρουσιάζει μηδενικό εύρος γραμμής. Πρόκειται για έναν παράγοντα που δεν αφορά μόνον το laser εκπομπής, αλλά, στην περίπτωση σύμφωνου δέκτη, και το laser που χρησιμοποιείται ως τοπικός ταλαντωτής.
- **Θόρυβο πλάτους του laser** (εκφράζεται με την παράμετρο *RIN*: relative intensity noise), που εμφανίζεται στα laser τόσο της εκπομπής όσο και τοπικού ταλαντωτή,
- **Θόρυβο συντελεστή-απολαβής** (Gain-factor noise), που εμφανίζεται στις APD φωτοφωράτριες οι οποίες έχουν μεν το πλεονέκτημα να παρέχουν απολαβή, αλλά παρουσιάζουν και το μειονέκτημα η απολαβή αυτή να διακυμαίνεται τυχαία με το χρόνο.

Τέλος υπάρχουν:

- **Κβαντικός θόρυβος**, που εμφανίζεται όταν το φωτεινό σήμα γίνεται τόσο ασθενές ώστε η κβαντική του φύση, με την άφιξη των διακριτών φωτονίων, γίνεται έκδηλη. Στις σχετικά υψηλότερες στάθμες, οι φωτονικές αφίξεις γίνονται τόσο συχνές ώστε εξομαλύνονται οι διακυμάνσεις. Ο κβαντικός θόρυβος μπορεί να προσομοιωθεί με μια σειρά τυχαία εμφανιζόμενων παλμών του ίδιου πάντα πλάτους.
- **Θόρυβος βολής (Shot)**, δηλ. την κυματομορφή του κβαντικού θορύβου όπως μορφοποιείται μετά από τον περιορισμένου εύρους ζώνης οπτικό δέκτη. Οι δύο όροι, "κβαντικός θόρυβος" και "θόρυβος βολής", συχνά χρησιμοποιούνται εσφαλμένα σε τρόπο ώστε να μην διακρίνονται μεταξύ τους. Επίσης, μερικές φορές ο "θόρυβος βολής" (από σύγχυση) χρησιμοποιείται προκειμένου για οποιαδήποτε συνιστώσα θορύβου είναι τόσο ασθενής ώστε να είναι παρατηρήσιμη η κβαντική φύση του αιτίου της. Στο βιβλίο αυτό^ θα χρησιμοποιούμε τον όρο "θόρυβος βολής" για να δηλώσουμε μόνον τον ενδογενή κβαντικό θόρυβο του ίδιου του οπτικού σήματος, μετά την εξομάλυνση του από την πεπερασμένου εύρους ζώνης απόκριση στοιχείων όπως η φωτοδίοδος και η κυκλωμάτωση που την ακολουθεί.

Από το μακρύ αυτόν κατάλογο των ενδεχόμενων πηγών πολλαπλασιαστικού θορύβου, θα αποφύγουμε να εξετάσουμε εκτενέστερα τις δύο πρώτες, όμως θα ασχοληθούμε με τις πέντε τελευταίες.

Σε όλες τις περιπτώσεις που μας ενδιαφέρουν, οι διάφορες κυματομορφές θορύβου μπορούν να θεωρηθούν στατιστικά ανεξάρτητες και συνήθως (αλλά όχι πάντα) Gaussian. Οσάκις είναι πράγματι ανεξάρτητες, οι ισχύς τους προστίθενται, πράγμα που έχει επιπτώσεις στον σχετικό λόγο SNR, προσθέτοντας στον παρονομαστή του όλες τις συνιστώσες ισχύος θορύβου που συναντώνται μέχρι το σημείο απόφασης.

Καθώς προχωρούμε στο κεφάλαιο αυτό, θα χρησιμοποιούμε διάφορες εκδοχές του συνοπτικού διαγράμματος του Σχήμα 3.56 για να τονίσουμε κάθε φορά το πρόβλημα που χειριζόμαστε. Για παράδειγμα, ο ιδανικός δέκτης καταμέτρησης φωτονίων παραλείπει όλα σχεδόν τα στοιχεία που περιέχει το σχήμα και εστιάζει μόνο στο σήμα που εμφανίζεται στην είσοδο του δέκτη. Για ένα σύστημα πάλι άμεσης-φώρασης, συνήθως δεν αποτελεί πρόβλημα ούτε ο θόρυβος φάσης του laser ούτε ο θόρυβος πλάτους, κι' επομένως δεν θα εμφανίζονται ποτέ στο αντίστοιχο συνοπτικό διάγραμμα βαθμίδων κατά τη διαπραγματέυση. Τα σύμφωνα συστήματα δεν χρησιμοποιούν ποτέ συντονιζόμενα οπτικά φίλτρα και σπάνια χρησιμοποιούν APD, επομένως δεν θα μας απασχολεί κατά την εξέταση τους η οπτική διαφωνία των φίλτρων και οι τυχαίες διακυμάνσεις απολαβής της APD.

### 3.20 Οπτικοί Ενισχυτές

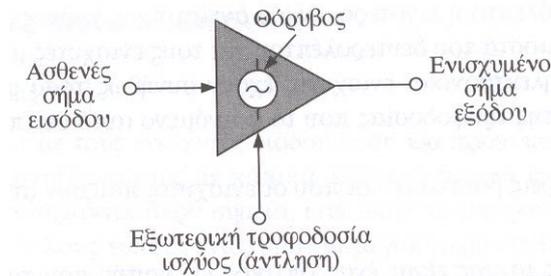
Στο ξεκίνημα της λεγόμενης ηλεκτρονικής εποχής, δεν υπήρχαν τρόποι ενίσχυσης ασθενών ηλεκτρικών σημάτων. Η σχεδίαση οποιασδήποτε μορφής επικοινωνιακής ραδιοζεύξης ήταν ουσιαστικά μια άσκηση σωστής διευθέτησης του *ισολογισμού της ζεύξης*, δηλ. αφορούσε τον λεπτομερή υπολογισμό της κάθε μορφής απωλειών ισχύος που θα υποστεί το προς μετάδοση σήμα κατά την πορεία του προς το δέκτη, είτε περνούσε μέσα από τον αέρα (ραδιοζεύξεις) είτε μέσα από χάλκινους αγωγούς, από κεραίες, από συντονιζόμενες διατάξεις με απώλειες, από δέκτες με θόρυβο κ.λπ. Το 1906 ο Lee Deforest επινόησε την ενισχύτρια τρίοδο λυχνία κενού, που την αποκάλεσε «Audí on», με αποτέλεσμα αμέσως το πρόβλημα του ισολογισμού της ισχύος ν' αρχίσει να χάνει σε σπουδαιότητα. Αργότερα, οσάκις ο σχεδιαστής ενός ψηφιακού συστήματος δεν ήθελε επ' ουδενί λόγω να επιτρέψει στη στάθμη του σήματος πού έφερε την πληροφορία, να πέσει τόσα χαμηλά ώστε ο λόγος σήματος-προς-θόρυβο να γίνει απαγορευτικά μικρός για τη διασφάλιση του επιθυμητού ρυθμού σφαλμάτων, εύρισκε πάντα διαθέσιμους φθηνούς και αποτελεσματικούς ενισχυτές για να ανυψώσουν τη στάθμη του σήματος. Από την άλλη μεριά ένα αναλογικό διηπειρωτικό σύστημα μετάδοσης έχει κυριολεκτικά χιλιάδες διαδοχικές βαθμίδες ηλεκτρονικής ενίσχυσης, ένα γεγονός πού όλοι το δέχονται σήμερα σαν μη ιδιαίτερα αξιοσημείωτο.

Τα τελευταία χρόνια, καθώς έγινε φανερό στους σχεδιαστές των οπτικών συστημάτων ότι είναι επιθυμητό να παραμείνει το σήμα σε οπτική μορφή σε όλο το μήκος της διαδρομής μεταξύ τερματικών κόμβων, υπήρξε μια δραστήρια αναζήτηση για καθαρά οπτικούς ενισχυτές καλής ποιότητας. Εάν η ίνα μεταφέρει μία μόνο ροή bit (bit stream) και εάν ο ρυθμός αυτής της ροής είναι μικρότερος από μερικά gigabit, θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε έναν *επαναλήπτη-αναγεννητή* (regenerative-repeater) που αποτελείται από ένα φωρατή ο οποίος ακολουθείται από ηλεκτρονική ενίσχυση και στη συνέχεια ακολουθεί αναμετάδοση του σήματος σε οπτική μορφή. Όμως, καθώς ο ρυθμός Μι αυξάνεται, τότε η χρήση μιας ίνας για πολλά bit stream πολυπλεγμένα κατά μήκος κύματος, αποδεικνύεται ιδιαίτερα ελκυστική, και η ανάγκη για καθαρά οπτικούς ενισχυτές ευρείας ζώνης, που να ενισχύσουν όλα αυτά τα μήκη κύματος ταυτόχρονα, γίνεται επιτακτική.

Δεδομένου ότι η τεχνολογία των οπτικών ενισχυτών θα προοδεύει όλο και περισσότερο στα χρόνια που έρχονται, φαίνεται να είναι ασφαλής η πρόβλεψη ότι για τους σχεδιαστές των οπτικών συστημάτων, τα προβλήματα που αφορούν τον ισολογισμό της ζεύξης θα αρχίσουν να υποχωρούν, όπως ακριβώς έγινε και στην περίπτωση των ηλεκτρονικών επικοινωνιακών συστημάτων. Γνωρίζουμε ότι μια καθαρά οπτική ενίσχυση μπορεί να προκύψει από οποιαδήποτε δομή που εμφανίζει εξαναγκασμένη εκπομπή, χρησιμοποιώντας κάποιο συνδυασμό από χαμηλές ανακλαστικότητες στα άκρα της ώστε να καταστείλουμε την έναυση, έχοντας παράλληλα εξασφαλίσει ισχυρή άντληση για τη δημιουργία όσο το δυνατόν μεγαλύτερης αναστροφής πληθυσμού των φορέων. Υπάρχουν ουσιαστικά στην πράξη δύο τρόποι: *οι ενισχυτές διόδου laser* (laser- diode amplifiers) και *οι ενισχυτές με ίνα προσμείξεων* (doped-fiber amplifiers). Σήμερα, οι τελευταίοι αυτοί είναι ιδιαίτερα ελκυστικοί λόγω της απλότητας τους τόσο στην κατασκευή όσο και στην εισαγωγή τους στη ζεύξη με ίνα, αλλά και λόγω της ανεξαρτησίας της απολαβής τους από την πόλωση, του μεγάλου εύρους ζώνης τους, και τη σχετική ανεξαρτησία τους από φαινόμενα διαφωνίας. Οι ανταγωνιστές των ενισχυτών με ίνα προσμείξεων, οι ενισχυτές διόδου laser, ήταν μέχρι πρόσφατα στην αφάνεια λόγω της δαπανηρής κατασκευής τους, της ανάγκης ύπαρξης προσαρτημένης ίνας στην είσοδο και την έξοδο (pig tailing), της ευαισθησίας τους στην πόλωση, και της υψηλής στάθμης διαφωνίας.

Εντούτοις, δεν αποκλείεται η προτίμηση αυτή των σχεδιαστών συστήματος στους ενισχυτές με ίνα προσμείξεων ερβίου, να μεταστραφεί. Κι' αυτό πρώτα πρώτα γιατί, μπορούν να κατασκευαστούν διατάξεις laser κβαντικών-φρεάτων με ισχυρή έγχυση που εμφανίζουν μεγάλο εύρος ζώνης απολαβής, έως 240 nm, που καλύπτουν δηλαδή όλο το εύρος της ζώνης χαμηλής εξασθένησης της ίνας στο 1.5 μm, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν επίσης να επιτευχθούν αντίστοιχα εύρη ζώνης στους ενισχυτές διόδου laser. Δεύτερον, οι ενισχυτές με ίνα προσμείξεων ερβίου λειτουργούν μόνο στη ζώνη του 1.5 μm ενώ δεν

υπάρχουν ακόμα αντίστοιχοι ενισχυτές ευρείας ζώνης με ίνα προσμείξεων στο 1.3  $\mu\text{m}$ , δηλ. στη ζώνη μηκών Σχήμα 3.56 κύματος που συχνά προτιμάται στις υψηρρυθμες ζεύξεις μεγάλου μήκους, λόγω της χαμηλής χρωματικής της διασποράς. Οι ενισχυτές διόδου- laser μπορούν να αντιμετωπίσουν την περιοχή αυτή μηκών κύματος το ίδιο εύκολα όπως και την περιοχή στο 1.5  $\mu\text{m}$ .



**Σχήμα 3.56** Βασική λειτουργική αρχή ενός ενισχυτή.

Το Σχήμα 3.56 αντιμετωπίζει έναν βασικό ηλεκτρονικό ή οπτικό ενισχυτή, σαν ένα «μαύρο-κουτί» με τρεις ακροδέκτες. Και στις δύο περιπτώσεις, κάποια ισχύς από μια εξωτερική τροφοδοσία προκαλεί μια διεργασία κατά την οποία ένα ασθενές σήμα εισόδου μετατρέπεται σε ένα ισχυρό σήμα εξόδου. Στο εσωτερικό του ενισχυτή, προστίθεται αναπόφευκτα κάποιος θόρυβος, και ο θόρυβος αυτός παριστάνεται σαν μια προσθετική συνιστώσα στο σήμα εισόδου.

Το εύρος ζώνης των οπτικών ενισχυτών είναι τουλάχιστον τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από αυτό που θα ήταν δυνατό με οποιοδήποτε ηλεκτρονικό ενισχυτή. Όμως, οι οπτικοί ενισχυτές έχουν τουλάχιστον δύο ανεπιθύμητες ιδιότητες. Πρώτον, παρόλο που και οι δύο τύποι ενισχυτών, ο ηλεκτρονικός και ο οπτικός, θα οδηγηθούν τελικά στον κόρο καθώς αυξάνουμε τη στάθμη του σήματος εισόδου, η στάθμη εισόδου στην οποία παρατηρείται το φαινόμενο του *κόρον της απολαβής* (gain saturation) για τους οπτικούς ενισχυτές βρίσκεται συνήθως όχι και τόσο ψηλότερα από το άνω άκρο της περιοχής λειτουργίας τους, ενώ, όπως ξέρουν πολύ καλά όλοι οι ασχολημένοι με ηλεκτρονικούς ενισχυτές υψηλής-πιστότητας (hi-fi), σ' αυτούς η στάθμη εισόδου για την οποία αρχίζει να εμφανίζεται μη-γραμμικότητα λόγω κόρου, βρίσκεται συνήθως πολύ πιο πάνω από το σημείο λειτουργίας.

Η δεύτερη ανεπιθύμητη ιδιότητα, η διαφωνία (crosstalk), είναι συνέπεια της πρώτης. Στους οπτικούς ενισχυτές διόδου laser, επειδή η απολαβή εξαρτάται από τη στάθμη του σήματος, όταν το σημείο λειτουργίας είναι κοντά στον κόρο, ένα σήμα on-off σε ένα μήκος κύματος μπορεί να προξενήσει διακύμανση της απολαβής προς τα πάνω και προς τα κάτω, πράγμα που επηρεάζει το σήμα εξόδου σε άλλα μήκη κύματος. Για ενισχυτές με ίνα προσμείξεων ερβίου, η επίδραση αυτή εξαφανίζεται για bit rates πάνω από 500 bit/s περίπου, η αντίστοιχη τιμή για ενισχυτές διόδου laser ημιαγωγού είναι μερικά

Gb/s. Όπως θα δούμε, αυτό οφείλεται στο ότι ο χρόνος ζωής των φορέων στους ημιαγωγούς είναι ένα νανοδευτερόλεπτο ή λιγότερο, ενώ ο αντίστοιχος χρόνος είναι περισσότερο από δέκα χιλιοστά του δευτερολέπτου για τους ενισχυτές με ίνα προσμείξεων ερβίου. Οι ηλεκτρονικοί ενισχυτές έχουν συνήθως τόσο μεγάλη αδράνεια στις μεταβολές της τροφοδοσίας που το φαινόμενο αυτό δεν παρατηρείται καθόλου.

Υπάρχουν τρεις βασικά ρόλοι που οι ενισχυτές παίζουν στα οπτικά συστήματα.

- Ο **ενισχυτής ισχύος** είναι ένας οπτικός ενισχυτής που τοποθετείται αμέσως μετά από το laser εκπομπής για να υψώνει τη στάθμη της εκπεμπόμενης ισχύος σε μία τιμή μεγαλύτερη από αυτήν που αντιστοιχεί στην ισχύ εξόδου του laser. (Ενισχυτής "ανυψωτής"-booster).
- Ο **ενισχυτής γραμμής** αντικαθιστά τον επαναλήπτη (δηλ. έναν αναλογικό ηλεκτρονικό ενισχυτή) ή τον αναγεννητή (δηλ. έναν ηλεκτρονικό αναμορφωτή της κυματομορφής του σήματος και ενισχυτή) σε ένα ή περισσότερα σημεία ανάμεσα στον πομπό και στο δέκτη.
- Ο **προενισχυτής του δέκτη**. Η χρήση ενός ενισχυτή για τις χαμηλότερες στάθμες του σήματος που λαμβάνεται στους οπτικούς δέκτες, μας επιτρέπει να προσεγγίσουμε τα όρια της "φωρασιμότητας" του δέκτη πολύ περισσότερο απ' ότι θα μπορούσαμε να το επιτύχουμε χρησιμοποιώντας πολύ πιο περίπλοκες μορφές δεκτών. Για παράδειγμα, αν το σύστημα χρησιμοποιεί διαμόρφωση ASK, τότε ο πλέον κατάλληλος δέκτης αποτελείται από ένα σωστά σχεδιασμένο οπτικό προενισχυτή που ακολουθείται από ένα απλό φωτοφωρατή ανίχνευσης της ενεργειακής στάθμης. Η λύση αυτή θεωρητικά απαιτεί μια ελάχιστη στάθμη λαμβανόμενου σήματος για ένα δοσμένο ρυθμό σφαλμάτων, που είναι πρακτικά ίση με αυτήν που θα χρειαζόταν ένας ετερόδυνος σύμφωνος δέκτης, αλλά είναι σημαντικά πιο απλή και πιο φθηνή. Στο κεφάλαιο αυτό, θα εξετάσουμε τα διάφορα είδη οπτικών ενισχυτών που έχουν προτιμηθεί για χρήση στα οπτικά συστήματα. Θα ξεκινήσουμε με τον ενισχυτή διόδου laser. Μετά, θα προχωρήσουμε στους ενισχυτές με ίνα προσμείξεων και θα ολοκληρώσουμε με μια σύντομη διαπραγμάτευση των διαφόρων μορφών ενίσχυσης που, αν και δεν είναι σήμερα ισχυροί ανταγωνιστές για χρήση στα συστήματα, παρουσιάζουν παρ'όλα αυτά ενδιαφέρον που είναι δυνατό να αναζωπυρωθεί καθώς αυτό το ενεργό πεδίο έρευνας θα αναπτύσσεται συνεχώς στα αμέσως επόμενα χρόνια.

Θα ενδιαφερθούμε για αρκετές από τις ιδιότητες κάθε τύπου ενισχυτή: την απολαβή συναρτήσεως του μήκους κύματος, την ισχύ εξόδου, τη στάθμη ισχύος στην οποία εμφανίζεται κόρος της απολαβής, τα

χαρακτηριστικά του θορύβου που εισάγει ο οπτικός ενισχυτής, καθώς και τη συμπεριφορά του ως προς τη διαφωνία όταν εφαρμοστούν στην είσοδο του μερικά on-off σήματα υψηλού ρυθμού.

### 3.21 Ενισχυτές Διόδου laser

Θα ξεκινήσουμε με τους ενισχυτές διόδου laser. Θα προκύψει ότι έχοντας εξετάσει τους ενισχυτές αυτούς με κάποια λεπτομέρεια, θα έχουμε ταυτόχρονα καλύψει και τα σημαντικότερα σημεία, έτσι ώστε να μπορούμε να διαπραγματευθούμε τους άλλους τύπους ενισχυτών με μεγαλύτερη συντομία.

Ένας ενισχυτής διόδου- laser μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα "ασθενικό" laser, που χρησιμοποιεί είτε πολύ χαμηλό ρεύμα έγχυσης είτε χαμηλή ανακλαστικότητα  $R$  στα άκρα ή και τα δύο, έτσι ώστε η διάταξη να λειτουργεί μεν πάνω από το σημείο διαφάνειας (Εξίσωση 3.7) αλλά κάτω από το κατώφλι.

Μπορούμε να διακρίνουμε δύο τύπους ενισχυτών διόδου laser, τους ενισχυτές *Fabry- Perot* και τους ενισχυτές οδεύοντος-κύματος. Στους πρώτους, η  $R$  διατηρείται αρκετά υψηλή ώστε το φως να εκτελεί αρκετές παλινδρομήσεις στο εσωτερικό της κοιλότητας, όπως ακριβώς και στο φίλτρο *Fabry- Perot*. Τυπικές τιμές της ανακλαστικότητας ισχύος  $R$  είναι μέχρι 30 τις εκατό, όπως και για τις διόδους laser. Το αποτέλεσμα είναι ένας ενισχυτής με μια σειρά από στενές ζώνες διέλευσης που έχουν σαν περιβάλλουσα την καμπύλη απολαβής. Στους ενισχυτές οδεύοντος κύματος από το άλλο μέρος, έχει ληφθεί ιδιαίτερη μέριμνα ώστε η ανακλαστικότητα  $R$  των δύο τερματικών άκρων να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη, με τυπικές τιμές  $10^{-5}$  έως  $10^{-4}$ . Εάν η διαμόρφωση αυτή της ανακλαστικότητας γίνει σωστά, και η απολαβή ανά μονάδα μήκους  $g$  είναι αρκετά υψηλή, τότε η διάταξη μπορεί να ενισχύσει σημαντικά ένα προσπίπτον σήμα με μια μόνον απλή διέλευση μέσα από την ενεργό περιοχή. Στην περίπτωση αυτή θα υπάρξουν ελάχιστα, ή και καθόλου, φαινόμενα συντονισμών της κοιλότητας που να είναι ορατά στο φάσμα εξόδου. Είναι φανερό ότι η μορφή του ενισχυτή διόδου laser του τύπου οδεύοντος-κύματος, είναι αυτή που απαιτείται για χρήση στα δίκτυα διαίρεσης μήκους κύματος, (WDM) όπου ζητάμε ακριβώς μεγάλο εύρος ζώνης.

Μπορούμε να υπολογίσουμε τις επιδόσεις του ενισχυτή οδεύοντος-κύματος σαν ειδική περίπτωση από την ανάλυση του ενισχυτή *Fabry- Perot*, εάν θεωρήσουμε την ανακλαστικότητα των άκρων να τείνει προς το μηδέν.

### 3.21.1 Επίδραση της κοιλότητας στο φάσμα απολαβής της διάταξης

Η ανάλυση των ενισχυτών διόδου- laser ξεκινά από το ίδιο σημείο όπως και η ανάλυση των laser, συγκεκριμένα από την Εξίσωση 3.7

$$g(N) = a(N - N_0) \quad (3.7)$$

όπου  $g$  είναι η απολαβή ανά μονάδα μήκους του υλικού,  $N$  είναι η πυκνότητα φορέων ανά μονάδα όγκου,  $N_0$  είναι η πυκνότητα αυτή στο σημείο διαφάνειας (όπου οι απώλειες εξισώνονται με την απολαβή), και  $a = dg/dN$  είναι η διαφορική απολαβή. Γενικά, η  $g$  δεν εξαρτάται μόνον από την οπτική συχνότητα  $f$ , αλλά επίσης και από την πυκνότητα φορέων  $N$ , η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από την ένταση του φωτός  $P$ , παράμετροι που εξαρτώνται από τη θέση  $z$  κατά μήκους της ενεργού περιοχής. Σε ότι ακολουθεί, για λόγους συντομογραφίας στο συμβολισμό, θα γράφουμε συνήθως μόνο εκείνη την εξάρτηση της  $g$  που μας ενδιαφέρει στο αντίστοιχο τμήμα της διαπραγμάτευσης

Εάν  $a$  είναι οι απώλειες ανά μονάδα μήκους, τότε η καθαρή πλεονάζουσα απολαβή ανά μονάδα μήκους σε σχέση με τις απώλειες ανά μονάδα μήκους είναι

$$\Gamma g - a \quad (3.8)$$

όπου ο παράγοντας σύμπτυξης  $\Gamma$  (με τυπική τιμή από 0.3 ως 1.0) παριστάνει το ποσοστό της εγκάρσιας συγκέντρωσης της φωτεινής ροής στο εσωτερικό της ενεργού περιοχής. Μετά μια πρόσθετη διαδρομή  $dz$  μέσα στην ενεργό περιοχή η οπτική ισχύς  $P$  αυξάνεται κατά.

$$dP(z) = (\Gamma g - a)P(z) dz \quad (3.9)$$

από την οποία προκύπτει η ολική αύξηση της οπτικής έντασης μέσα στην ενεργό περιοχή με χρήση της

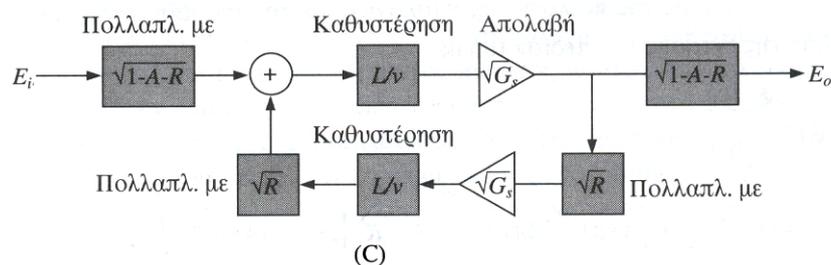
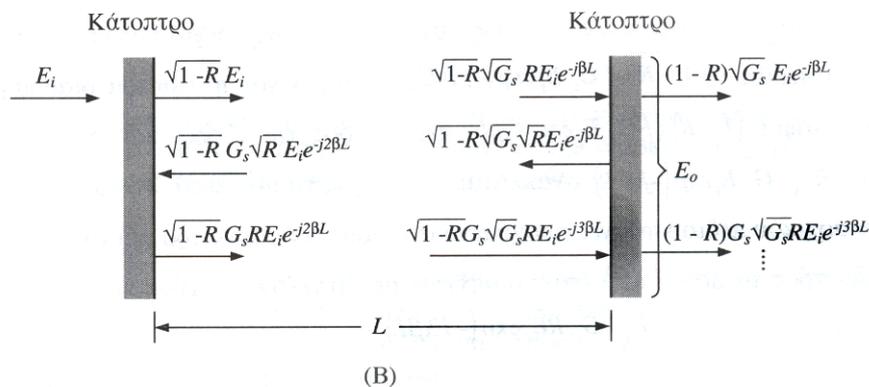
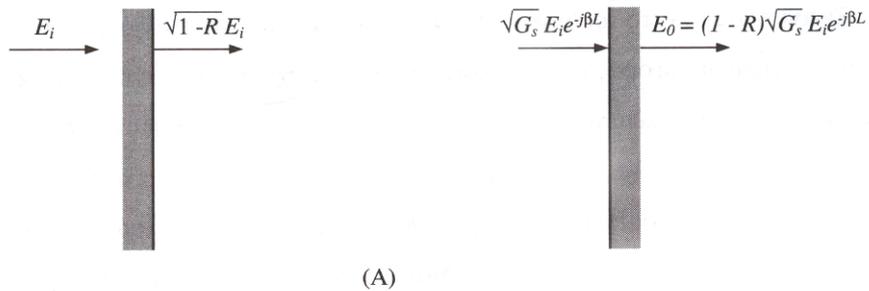
$$\int_{P_{in}}^{P_{out}} \frac{dP(z)}{P(z)} = \int_0^L (\Gamma g - a) dz = (\Gamma g - a)L \quad (3.10)$$

υποθέτοντας τα  $\Gamma$ ,  $g$  και  $a$  ανεξάρτητα του  $z$ .  $L$  είναι το μήκος της κοιλότητας, και  $P_{in} = P(0)$  και  $P_{out} = P(L)$ . Η ολική απολαβή "απλής-διέλευσης"  $G_s$  την οποία

υφίσταται το φως όταν πραγματοποιεί μία μόνο διέλευση στο εσωτερικό της ενεργού περιοχής της διάταξης είναι τότε

$$G_s = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \exp[(\Gamma g - a)L] \quad (3.11)$$

Το Σχήμα 3.57(A) δείχνει έναν ενισχυτή οδεύοντος-κύματος, στον οποίο το φως πραγματοποιεί μία μόνο διέλευση. Στο (B) φαίνονται οι πολλαπλές ανακλάσεις σε ένα ενισχυτή *fabry-Perot*.



**Σχήμα 3.57** Ανάλυση δύο διαφορετικών ειδών ενισχυτών διόδου laser, (A). Ενισχυτής Fabry-Perot, και (B). Ενισχυτής οδεύοντος-κύματος, (C). Ισοδύναμο διάγραμμα βαθμίδων.

Ξεκινώντας από το ισοδύναμο κύκλωμα, μπορούμε να συνάγουμε την ολική συνάρτηση μεταφοράς ισχύος συναρτήσει της συχνότητας, ως εξής: Σε κάθε ανάκλαση, το ανακλώμενο πεδίο είναι  $\sqrt{R}$  φορές το προσπίπτον πεδίο. Στο φίλτρο εισέρχεται φως με ένταση πεδίου  $E_i \sqrt{1-R}$  μετά τη διέλευση μέσα

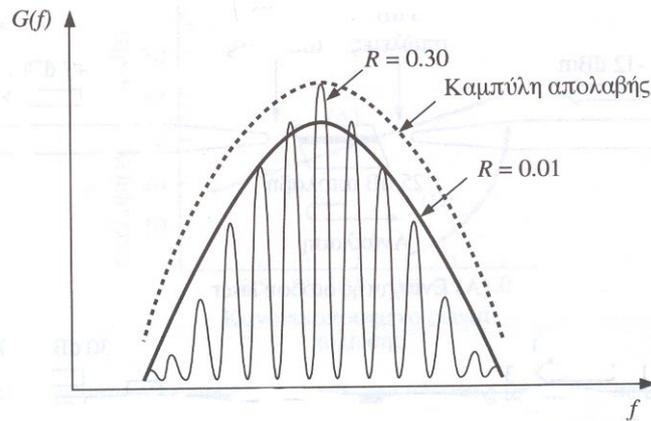
από το πρώτο κάτοπτρο απομένει ένταση  $\sqrt{1-RE_i}$ , ενώ ένα κλάσμα ίσο με  $\sqrt{R}$  ανακλάται προς τα αριστερά από την διάταξη και χάνεται. Το σήμα στη συνέχεια διέρχεται διαμέσου της κοιλότητας, όπου και ανακλάται διαδοχικά από το ένα κάτοπτρο στο άλλο. Το φως αρχικά φθάνει στο δεξιό κάτοπτρο με ένταση πεδίου  $\sqrt{1-R}\sqrt{G_s E_i} \exp(-j\beta L)$ , όπου  $\beta$  είναι η σταθερά διάδοσης. Ένα τμήμα  $(1-R)\sqrt{G_s E_i} \exp(-j\beta L)$  περνά προς την έξοδο, και ένα τμήμα  $\sqrt{1-R}\sqrt{G_s E_i} \exp(-j\beta L)$  ανακλάται πίσω προς τα αριστερά. Το τμήμα αυτό του αρχικού πεδίου φθάνει ενισχυμένο στο αριστερό κάτοπτρο και ανακλάται πίσω προς τα δεξιά, από όπου διαφεύγει με επιπλέον ενίσχυση και τελική ένταση πεδίου  $(1-R)G_s\sqrt{G_s RE_i} \exp(-j3\beta L)$ .

Προσθέτοντας όλες τις διαδοχικές συνεισφορές στην έξοδο  $E_o$  και χρησιμοποιώντας την  $\beta L = 2\pi f\tau$ , όπου  $\tau$  είναι ο χρόνος διάδοσης  $L/v$  προς τη μια διεύθυνση κατά μήκος της κοιλότητας, υπολογίζουμε τη μιγαδική συνάρτηση μεταφοράς της έντασης του πεδίου ίση με

$$\begin{aligned} H(f) &= \frac{E_o(f)}{E_i(f)} \\ &= (1-R)\sqrt{G_s} \exp(-j2\pi f\tau) \sum_{m=0}^{\infty} G_s^m R^m [\exp(-j4\pi m f\tau)] \\ &= \frac{(1-R)\sqrt{G_s} \exp(-j2\pi f\tau)}{1-RG_s \exp(-j4\pi f\tau)} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Η απολαβή ισχύος συναρτήσει της συχνότητας είναι η “συνάρτηση μεταφοράς ισχύος”  $G(f) = |H(f)|^2$

$$G(f) = \frac{G(1-R)^2}{1+G_s^2 R^2 - 2GR \cos 4\pi f\tau} = \frac{G(1-R)^2}{(1-G_s R)^2 + G_s R (2 \sin 2\pi f\tau)^2} \quad (3.13)$$



**Σχήμα 3.58** Τυπικά φάσματα απολαβής  $G(f)$  για (Α) Ενισχυτή οδεύοντος-κύματος ( $R = 0.01$ ), και (Β) Ενισχυτή Fabry-Perot ( $R = 0.30$ ). Έχει γίνει η υπόθεση μιας παραβολικής καμπύλης  $g$  με την συχνότητα.

Το Σχήμα 3.58 υποδεικνύει χονδρικά τη μορφή της  $G(f)$  για μια συγκεκριμένη τιμή της  $G_S$ , και για τιμές της  $R$  κοντά στο μηδέν και στο 0.3, τυπικές τιμές αντίστοιχα για ενισχυτές οδεύοντος-κύματος και για Fabry-Perot. Η συνάρτηση μεταφοράς του ενισχυτή οδεύοντος-κύματος μοιάζει σαν να αναπαράγει ουσιαστικά την καμπύλη απολαβής, ενώ αυτή του ενισχυτή Fabry-Perot εμφανίζει φυσικά πολύ ισχυρές διακυμάνσεις. Από την Εξίσωση 3.13, οι διακυμάνσεις αυτές, οι οποίες είναι ανάλογες με εκείνες ενός παθητικού φίλτρου, χαρακτηρίζονται από ένα "βάθος κυμάτωσης" ή *contrast*, που εκφράζεται από την

$$C = \left( \frac{1 + RG_S}{1 + RG_S} \right)^2 \quad (3.14)$$

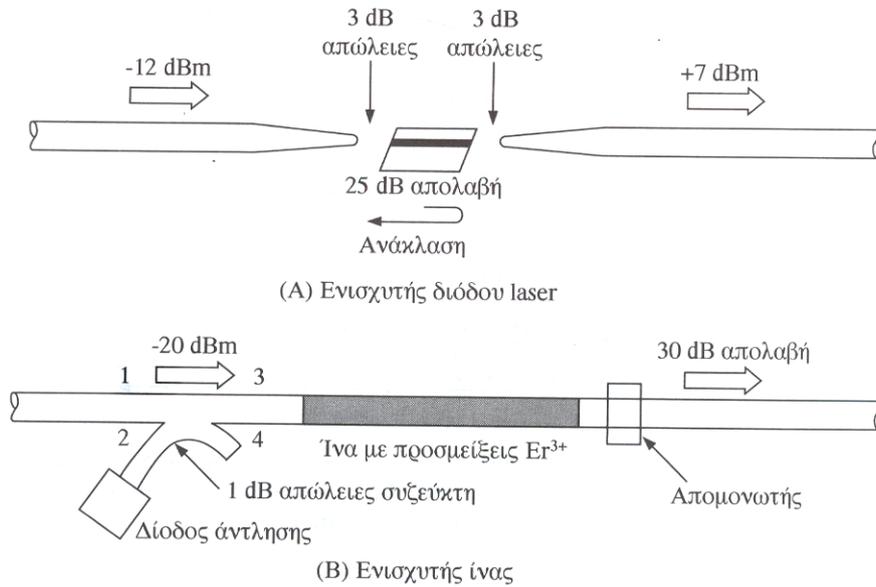
Κατόπιν κοινής αποδοχής, η διαχωριστική γραμμή μεταξύ ενός ενισχυτή οδεύοντος-κύματος και ενός ενισχυτή Fabry-Perot, τοποθετείται στο σημείο εκείνο για το οποίο  $C=2$ , δηλ όπου έχουμε 3 dB κυμάτωσης.

### 3.22 Πρακτικές απόψεις

Από το τελευταίο αποτέλεσμα, δηλ. την Εξίσωση 3.14, γίνεται φανερό ότι για να έχουμε κάποια σημαντική απολαβή από έναν ενισχυτή Laser, κρατώντας ταυτόχρονα την κυμάτωση μικρή, πρέπει με κάποιο τρόπο να επιτύχουμε χαμηλές ανακλαστικότητες στα άκρα. Η χαμηλή ανακλαστικότητα στα άκρα επιτυγχάνεται δύσκολα, και η απόδοση της κατασκευής (yield) τέτοιων τιμών ανακλαστικότητας είναι χαμηλή με τις τεχνικές αντανάκλασης (antireflection coating, AR) όταν επιζητούμε τιμές  $R$  κάτω από  $10^{-3}$ . Για να δώσουμε ένα παραστατικό παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι θέλουμε έναν ενισχυ-

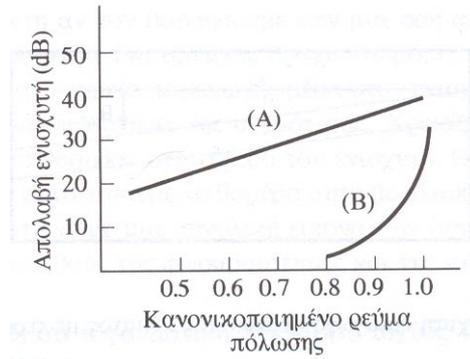
τή απολαβής 25 dB με κυμάτωση  $C$  μόνο 3 dB. Σύμφωνα με την Εξίσωση 3.13 η απολαβή απλής-διέλευσης  $G$ , πρέπει να είναι 25 dB, και σύμφωνα με την Εξίσωση 3.14, η  $R$  πρέπει να είναι το πολύ  $5.7 \times 10^{-4}$ .

Η έκφραση (3.13) δίνει μόνο τις "από τερματική όψη-σε τερματική όψη" επιδόσεις της διάταξης.



**Σχήμα 3.59** Δομή ενός (Α) ενισχυτή διόδου laser ημιαγωγού, και (Β) ενός Ενισχυτή με ίνα προσμίξεων ερβίου. Δίνονται τυπικές τιμές για τις απώλειες σύζευξης από την ίνα στην ακραία όψη της διάταξης όταν χρησιμοποιούμε ίνες με διαμορφωμένο σε φακό το άκρο τους, καθώς και η απολαβή του ενισχυτή απ' άκρου-σ' άκρου, για τυπική μορφή της φασματικής-απολαβής ισχύος  $G(f)$ .

Η ολική απολαβή πρέπει να περιλάβει τις απώλειες που εμφανίζονται κατά τη σύζευξη του laser με την προσαρτημένη ίνα στο κάθε άκρο της ενεργού περιοχής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.58(A). Η δυνατότητα ακριβώς της αποφυγής του κόστους προσαρτησης μιας ίνας στα άκρα, είναι ένας από τους κύριους λόγους που οι διατάξεις με ίνα προσμίξεων έχουν γίνει τόσο δημοφιλείς. Μέχρι σήμερα, έχουν επιτευχθεί "απ' όψη-σε όψη" απολαβές  $G_{max}(f)$  ενισχυτών διόδου laser έως 25 dB, αλλά λόγω των απωλειών σύζευξης του φωτός από την ίνα προς τον ενισχυτή στην πλευρά της εξόδου, η απολαβή από ίνα σε ίνα με δυσκολία διατηρήθηκε σε κάτι παραπάνω από 15 dB ή περίπου τόσο. Το Σχήμα 3.58, που συγκρίνει τη δομή ενός ενισχυτή διόδου- laser και

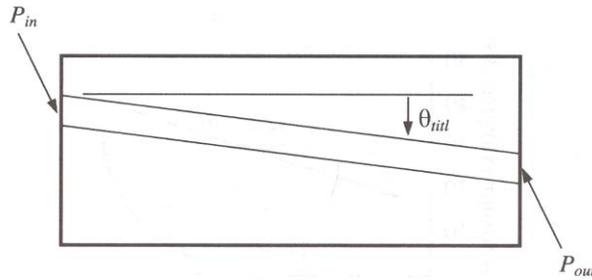


**Σχήμα 3.60** Τυπικές καμπύλες της  $Er^{3+} G_{max}(f)$  δηλ. της μέγιστης απολαβής σε dB, συναρτήσει του κοινωτικοποιημένου ρεύματος άντλησης  $I/I_{th}$  για (Α) Έναν τυπικό ενισχυτή ημιαγωγού οδεύοντος – κύματος, και (Β) Έναν τυπικό ενισχυτή ημιαγωγού Fabry-Perot.

ενός ενισχυτή με ένα προσμείξεων, δίνει επίσης μερικές τυπικές τιμές γι' αυτές τις απώλειες σύζευξης.

Στο Σχήμα 3.60 φαίνεται η από όψη-σε όψη απολαβή  $G_{max}(f)$  συναρτήσει του ρεύματος άντλησης  $I$  για δύο παρόμοιες πειραματικές διατάξεις [1], συγκεκριμένα για έναν ενισχυτή οδεύοντος-κύματος και για έναν ενισχυτή Fabry-Perot. Είναι φανερό ότι, αν ζητήσουμε και οι δύο ενισχυτές να επιτυγχάνουν τις ίδιες περίπου μέγιστες απολαβές, η διάταξη Fabry-Perot είναι σαφώς πολύ πιο ευαίσθητη στις συνθήκες λειτουργίας. Η τελευταία αυτή διάταξη επιτυγχάνει την από όψη-σε όψη υψηλή τιμή της απολαβής της μόνο όταν πολωθεί πολύ κοντά στο κατώφλι, και είναι γι' αυτό πολύ ευαίσθητη σε διακυμάνσεις του ρεύματος πόλωσης, της θερμοκρασίας, και της πολωτικής κατάστασης του οπτικού σήματος, σε αυτήν δε την τελευταία παράμετρο είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη λόγω του υψηλού βαθμού ασυμμετρίας των διαστάσεων της διατομής της ενεργού περιοχής της.

Παρά την πιο ευνοϊκή καμπύλη απολαβής τους συναρτήσει του ρεύματος άντλησης, που φαίνεται στο Σχήμα 3.60, οι ενισχυτές οδεύοντος-κύματος, έχουν κι αυτοί τις λειτουργικές τους δυσκολίες. Επειδή η σταθερή λειτουργία τους και η χαμηλή κυμάτωση της απολαβής τους εξαρτώνται από τη δυνατότητα να διατηρηθεί η ανακλαστικότητα των άκρων R πολύ χαμηλή, είναι πολύ ευπαθείς σε ανακλάσεις από άλλα σημεία του συστήματος. Λ.χ. οι ανακλάσεις από συγκολλήσεις, συνδετήρες φίλτρα κ.λπ. δομικά στοιχεία, είναι ικανές να προκαλέσουν την έναρξη έναυσης στη διάταξη σε ένα μήκος κύματος κοντά στο μέγιστο της απολαβής. Συχνά, απαιτείται η ύπαρξη απομονωτών (isolators) αμέσως μετά τους ενισχυτές οδεύοντος-κύματος, για παράδειγμα ανάμεσα στον προενισχυτή του δέκτη και ένα συντονιζόμενο φίλτρο Fabry-Perot, γιατί η ανακλαστικότητα αυτών των φίλτρων συναρτήσει του μήκους κύματος είναι σχεδόν μονάδα για όλα τα μήκη κύματος εκτός από αυτά που βρίσκονται κοντά στις κορυφές των συντονισμών .



**Σχήμα 3.61** Δομή ενισχυτή ημιαγωγού οδεύοντος-κύματος με τερματικά άκρα υπό γωνία.

Λόγω της δυσκολίας τους και της αβεβαιότητας σε ό,τι αφορά το τελικό αποτέλεσμα των διαδικασιών αντιανακλαστικής επικάλυψης με πολύ χαμηλό  $R$ , συχνά προσφεύγουμε στη λύση των *τερματικών όψεων υπό γωνία* (angled facets), που φαίνεται στο Σχήμα 3.61. Μια ακτίνα φωτός που φθάνει σε ένα από τα άκρα κατά μήκος του άξονα στο εσωτερικό της ενεργού περιοχής θα υποστεί μία μεταβολή κατά γωνία  $2\theta_{\text{tilt}}$  μόλις ανακλαστεί. Η γωνία αυτή είναι έτσι σχεδιασμένη ώστε να είναι μεγαλύτερη από την γωνία εκείνη που θα συντηρούσε εσωτερικές ολικές ανακλάσεις δηλ. τη γωνία  $\theta$ . Εάν η γωνία  $\theta_{\text{tilt}}$  έχει μια τιμή περίπου  $7^\circ$ , προκύπτει από το νόμο του Snell, ότι η γωνία εξόδου θα είναι περίπου  $25^\circ$ , γιατί ο δείκτης διάθλασης του ημιαγωγικού μέσου είναι κατά προσέγγιση 3.5 φορές μεγαλύτερος από αυτόν του αέρα. Στη δομή όμως αυτή είναι προφανείς οι πρακτικές δυσκολίες, και φυσικά η αύξηση του κόστους για την προσάρτηση των ινών στα άκρα υπό τέτοιες γωνίες, όταν η απλή διαδικασία της αξονικής προσαρμογής απαιτεί ήδη έξυπνα τεχνάσματα.

### 3.23 Θόρυβος του Ενισχυτή

Στους ηλεκτρονικούς ενισχυτές, ο θόρυβος προέρχεται από την τυχαία φύση της θερμικής κίνησης των ηλεκτρονίων στην αντίσταση εισόδου ή από τυχαίες διαδικασίες μέσα στον ίδιο τον ενισχυτή, εντελώς ανάλογα με τον θερμικό "θόρυβο βολής" σε μια λυχνία κενού. Στον οπτικό ενισχυτή, η κύρια πηγή θορύβου είναι η *ενισχυμένη αυθόρμητη εκπομπή* (amplified spontaneous emission, ASE). Ο θόρυβος αυθόρμητης εκπομπής παράγεται σε όλα τα σημεία του ενεργού μέσου, αλλά το τμήμα εκείνο του θορύβου αυθόρμητης εκπομπής που κατά κύριο λόγο υποβιβάζει τις επιδόσεις του συστήματος είναι αυτό που παράγεται σε σημεία κοντά στην είσοδο του ενισχυτή, όπου το σήμα είναι ακόμη ασθενές.

Μπορούμε να κατασκευάσουμε ένα μοντέλο του θορύβου αυθόρμητης εκπομπής στον ενισχυτή αν τον θεωρήσουμε σαν μια ροή από τυχαίες αφίξεις, που καθεμιά ισοδυναμεί με ένα απείρως βραχύ παλμό, έτσι ώστε το φάσμα ισχύος του θορύβου στο σημείο παραγωγής μέσα στον ενισχυτή να είναι ομοιό-

μορφα κατανεμημένο συναρτήσει της συχνότητας. Χρειάζεται να γνωρίζουμε το φάσμα ισχύος του θορύβου στην έξοδο του ενισχυτή. Θα μπορέσουμε τότε, να συνδυάσουμε το θόρυβο αυτό με όλους τους άλλους θορύβους, ώστε να αποκτήσουμε μια συνολική εικόνα των δυνατοτήτων φώρασης ενός σήματος, του μεγέθους της φωρασιμότητας και της πιθανότητας σφάλματος των bit.

Έχει δειχτεί ότι η φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου στην έξοδο του ενισχυτή  $N_f$  είναι

$$N(f)df = hf\chi n_{sp} [G(f) - 1]df \quad (3.15)$$

όπου  $G(f)$  είναι η φασματική απολαβή ισχύος της Εξίσωσης 3.13, και  $n_{sp}$  είναι ο παράγοντας αυθόρμητης εκπομπής, όπως και πριν. Η ποσότητα  $n_{sp}$  ονομάζεται επίσης παράγοντας αναστροφή πληθυσμών, και αντιπροσωπεύει το γεγονός ότι όσο λιγότερο πλήρης είναι η αναστροφή πληθυσμών, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η ισχύς του θορύβου αυθόρμητης εκπομπής.

Η ποσότητα  $\chi$  είναι ο *παράγοντας πλεονάζοντος θορύβου* (excess noise factor), που παριστάνει την επίδραση της ασυμμετρίας της ανακλαστικότητας των κάτοπτρων. Στην εξαγωγή της Εξίσωσης 3.13, υποθέσαμε ότι και τα δύο κάτοπτρα είχαν την ίδια ανακλαστικότητα  $R_1 = R_2 = R$ . Λίγα πράγματα θα άλλαζαν την Εξίσωση 3.13 εάν ίσχυε  $R_1 \neq R_2$  εφόσον ίσχυε  $R = \sqrt{R_1 R_2}$ . Ενώ όμως μια ασυμμετρία στην ανακλαστικότητα των κάτοπτρων δεν παίζει ρόλο στον υπολογισμό της ολικής απολαβής, αντίθετα παίζει ρόλο όταν εξετάζουμε το θόρυβο. Κι' αυτό γιατί, όπως αναφέραμε, ο θόρυβος που οφείλεται στην αυθόρμητη εκπομπή, παράγεται μεν σε όλο το μήκος της ενεργού περιοχής, αλλά το τμήμα του που κατά κύριο λόγο υποβιβάζει τις επιδόσεις του συστήματος είναι ο θόρυβος που δημιουργείται κοντά στο πρώτο τερματικό άκρο, πριν ακόμη το σήμα ενισχυθεί. Ο θόρυβος επομένως στην έξοδο θα είναι λιγότερος αν το πρώτο κάτοπτρο επιτρέπει στο φως να διαφεύγει, αφού ένα μέρος από αυτό το φως θα είναι θόρυβος ο οποίος σε αντίθετη περίπτωση θα ανακλάται πίσω στη συντονιζόμενη κοιλότητα στο σημείο ακριβώς που το σήμα είναι πολύ ασθενές. Το φαινόμενο αυτό αντιπροσωπεύεται από την παράμετρο

$$x = \frac{(1 + R_1 G_s)(G_s - 1)}{(1 - R_1) G_s} \quad (3.16)$$

Είναι φανερό ότι για τον ενισχυτή οδεδύοντος κύματος με  $R_1 \approx 0$  και  $G_s \gg 1$ ,  $x = 1$ , ενώ για τον ενισχυτή Farby-Perot, όπου το  $R_1$  μπορεί να είναι διάφορο του μηδενός, το  $x$  μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερο.

### 3.24 Κόρος απολαβής σε ένα Σημείο

Θα εξετάσουμε τώρα πώς φθάνει η απολαβή στον κόρο σε ένα δεδομένο σημείο κατά μήκος της ενεργού περιοχής του ενισχυτή, στην περίπτωση ενός ενισχυτή διόδου-laser που τροφοδοτείται με ρεύμα άντλησης I. Η ίδια ακριβώς συμπεριφορά παρατηρείται και για ένα σημείο μέσα σ' έναν ενισχυτή με ίνα προσμείξεων.

Καθώς αυξάνεται η ισχύς του οπτικού σήματος εισόδου, η απολαβή ανά μονάδα μήκους  $g$  της Εξίσωσης 3.7 αρχίζει τελικά να ελαττώνεται. Αυτό συμβαίνει γιατί στις υψηλές στάθμες της έντασης του φωτός  $P$ , οι διαθέσιμοι φορείς που προέρχονται από το δεδομένο ρεύμα άντλησης I αρχίζουν να εξαντλούνται. Η απολαβή σε οποιαδήποτε θέση  $z$  κατά μήκος της ενεργού περιοχής, εκφράζεται από την

$$g(P, z) = \frac{g_0}{1 + P(z)/P_{sat}} \quad (3.17)$$

όπου  $P$  (από το διάνυσμα Poynting) είναι η φωτεινή ένταση, σε watt ανά μονάδα επιφανείας (να μην συγχέεται με την συνολική ισχύ  $P$ ),  $g_0$  είναι η απολαβή ανά μονάδα μήκους απουσία φωτεινής εισόδου, και  $P_{sat}$  είναι η ένταση κόρον (saturation intensity), που ορίζεται ως η φωτεινή ένταση στην οποία η απολαβή ανά μονάδα μήκους έχει υποβιβαστεί κατά ένα παράγοντα 2.

Μπορούμε να συνάγουμε την Εξίσωση 3.17 και να προσδιορίσουμε τα  $g_0$  και  $P_{sat}$ , από την εξίσωση ρυθμού μεταβολής 3.31 και την Εξίσωση 3.13, ως εξής. Πρώτα-πρώτα, αμελούμε στον υπολογισμό αυτό το φως που παράγεται από αυθόρμητη εκπομπή, διότι, σε οποιαδήποτε συχνότητα, το ποσό του φωτός που φθάνει στην έξοδο από αυτήν την αυθόρμητη πηγή φωτός είναι συνήθως τουλάχιστον δύο τάξεις μεγέθους μικρότερο από αυτό που οφείλεται στο σήμα εισόδου. (Εάν ήταν πολύ μεγαλύτερο, ο ενισχυτής θα πρόσθετε ασυνήθιστα υψηλό θόρυβο).

Σε συνθήκες αποκατεστημένης κατάστασης, έχουμε

$$\frac{P_{in}}{P_{sat}} = \frac{\ln(G_0/G)}{G-1} G = 1 + \frac{P_{sat}}{P_{in}} \ln\left(\frac{G_0}{G}\right) \quad (3.18)$$

Εάν η πυκνότητα φωτονίων  $\Pi(z)$  είναι μηδέν, η αντίστοιχη πυκνότητα φορέων είναι

$$N' = \frac{I\tau_e}{qLwd} \quad (3.19)$$

Από την οποία παίρνουμε, χρησιμοποιώντας την  $g_0$  από την Εξίσωση 3.7

$$g_0 = g(N') = a \left( \frac{I\tau_e}{qLwd} - N_0 \right) \quad (3.20)$$

Τώρα για οποιαδήποτε πυκνότητα φωτονίων  $\Pi(z)$  μεγαλύτερη του μηδενός, με σταθερό ρεύμα  $I$ , θα έχουμε άλλες τιμές του  $N$  και συνεπώς και του  $g$ . Από τις Εξισώσεις 3.7 και 3.18 έχουμε

$$g = a(N - N_0) = \left( \frac{I}{qLwd} - \frac{N}{\tau_e} \right) \frac{n}{\Gamma c \Pi(z)} \quad (3.21)$$

Ενώ από την Εξίσωση 3.7

$$N = \frac{g}{a} + N_0 \quad (3.22)$$

Θέτοντας την ανακλαστικότητα των άκρων  $R$  ίση με μηδέν, η πυκνότητα ισχύος θα είναι στο σημείο  $z$

$$P(z) = \frac{hfc}{n} \Pi(z) \quad (3.23)$$

Συνδυάζοντας τις τέσσερις τελευταίες αυτές εξισώσεις θα έχουμε

$$g = g_0 \left( \frac{hf}{\Gamma \alpha \tau_e P(z)} \right) \left( 1 + \frac{hf}{\Gamma \alpha \tau_e P(z)} \right)^{-1} \quad (3.24)$$

Η οποία είναι η ίδια με την Εξίσωση 3.17, με

$$P_{sat} = \frac{hf}{\Gamma \alpha \tau_e} \quad (3.25)$$

### 3.25 Κόρος Απολαβής της Όλης Διάταξης

#### 3.25.1 Ενισχυτής Fabry-Perot

Στον ενισχυτή Fabry-Perot, στον οποίο το φως πραγματοποιεί πολλές διελεύσεις εμπρός-πίσω μέσα από την ενεργό περιοχή, η ένταση του φωτός είναι λίγο-πολύ ομοιόμορφη σε όλο το μήκος της κοιλότητας, και γι'αυτό είναι επιτρεπτό να θεωρήσουμε για όλο το μήκος μια τιμή μέσου όρου. Είναι δηλαδή αρκετά σωστό το να αντικαταστήσουμε την οπτική ένταση  $P(z)$  σε ένα σημείο με τη μέση τιμή,  $\bar{P} = P_{out} / (1 - R_2)$  όπου  $R_2$  είναι η ανακλαστικότητα ισχύος του κάτοπτρου εξόδου, και  $P_{out}$  είναι η ένταση του πεδίου στην έξοδο. Χρησιμοποιώντας τη μέση τιμή  $\bar{P}$  ως καταλληλότερη τιμή στην Εξίσωση 3.17, και χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 3.11, η ολική απολαβή της διάταξης θα είναι

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \exp \left( \frac{\Gamma g_0}{1 + \bar{P}/P_{sat}} - a \right) L \quad (3.26)$$

Αυτά είναι όλα όσα θα χρειαστεί να ξέρουμε για τους ενισχυτές Fabry-Perot. Για εφαρμογές όμως που αφορούν τα δίκτυα, οι ενισχυτές οδεύοντος-κύματος παρουσιάζουν όπως είπαμε πολύ μεγαλύτερο ενδιαφέρον λόγω του πιο πεπλατυσμένου φάσματος ολικής απολαβής και της μεγαλύτερης ευκολίας στον έλεγχο των σημείων λειτουργίας τους. Για τους ενισχυτές οδεύοντος-κύματος, οι εξισώσεις του ενισχυτή Fabry-Perot εξακολουθούν να ισχύουν μόνον όταν πρέπει να υπολογίσουμε την κυμάτωση του φάσματος.

### 3.25.2 Ενισχυτής οδεύοντος-κύματος

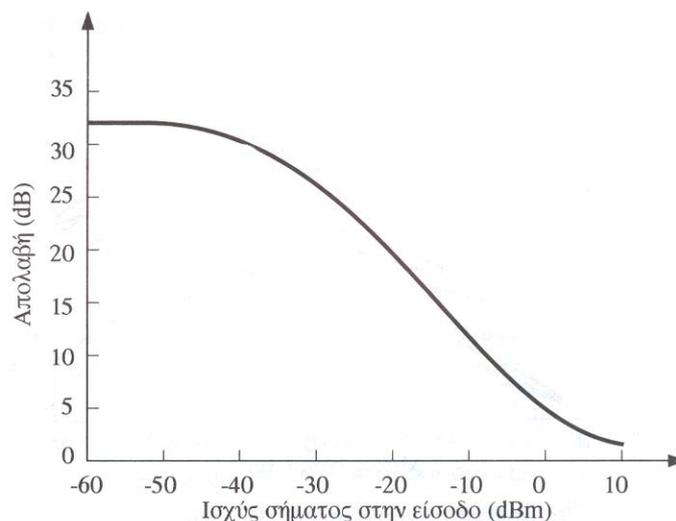
Από δω και στο εξής, θα υποθέτουμε ότι το σύνολο της απολαβής εμφανίζεται κατά την πρώτη διέλευση, και γι' αυτό θα γράφουμε την ολική απολαβή της διάταξης  $G$  αντί για την  $G_s$ . Θα πρέπει επομένως να ολοκληρώσουμε ως προς  $z$  κατά μήκος του συνολικού μήκους της ενεργού-περιοχής  $L$ , αφού η πυκνότητα των φορέων  $N$  σε οποιοδήποτε σημείο  $z$  εξαρτάται από τη στάθμη του σήματος  $P(z)$  σ' εκείνο το σημείο, και η πυκνότητα αυτή μπορεί να είναι διαφορετική από θέση σε θέση. Το πρώτο τμήμα της διαδρομής (μικρά  $z$ ) δεν θα φθάνει προς τον κόρο ταυτόχρονα με το τελευταίο τμήμα (μεγάλα  $z$ ) όπου το φως φθάνει ενισχυμένο κατ' ένταση.

Η ζητούμενη έκφραση για  $G_s = G$  μπορεί να προκύψει υποθέτοντας την ακραία περίπτωση μηδενικής ανακλαστικότητας των κάτοπτρων, και χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 3.9 με  $\Gamma = 1$  και  $\alpha = 0$ , καθώς και την Εξίσωση 3.17

$$\frac{dP(z)}{dz} = g(z)P(z) = \frac{P(z)g_0}{1 + P(z)/P_{sat}} \quad (3.27)$$

από την οποία

$$\int_0^L g_0 dz = \int_{P(0)}^{P(L)} \frac{1 + P(z)/P_{sat}}{P(z)} dP(z) \quad (3.28)$$



**Σχήμα 3.62** Φαινόμενα κόρου απολαβής. Η απολαβή απλής διέλευσης  $G_s$  συναρτήσκει της οπτικής ισχύος εισόδου  $P_{in}$ , υποθέτοντας ισχύ κόρου  $P_{sat} = -6$  dBm, και απολαβή ασθενούς σήματος απλής διέλευσης  $G_o = 32.5$  dB.

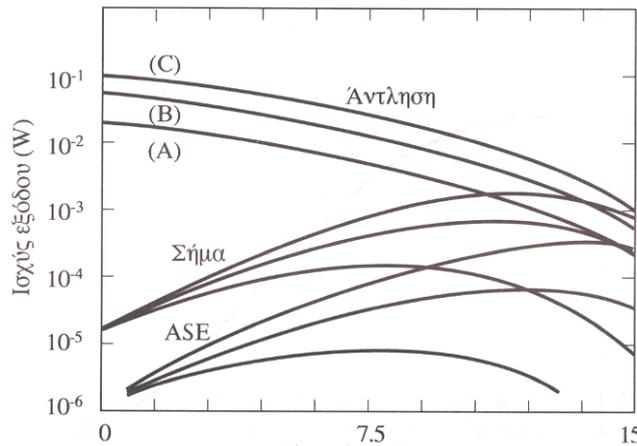
$$g_0 L = \left[ \ln P(z) + \frac{P(z)}{P_{sat}} \right]_{P_{in}}^{P_{out}} \quad (3.29)$$

Ορίζοντας ως απολαβή απλής-διέλευσης απουσία φωτεινής εισόδου την  $G_0 = \exp g_0 L$ , και  $G = P_{out}/P_{in}$ , έχουμε την ακόλουθη υπερβατική εξίσωση για το  $G$ :

$$\frac{P_{in}}{P_{sat}} = \frac{\ln(G_0/G)}{G-1} \quad \text{ή} \quad G = 1 + \frac{P_{sat}}{P_{in}} \ln \left( \frac{G_0}{G} \right) \quad (3.30)$$

Στο Σχήμα 3.62 έχει σχεδιαστεί μια τυπική καμπύλη εξάρτησης της απολαβής  $G$  από την ένταση εισόδου  $P_{in}$ . Φαίνεται ότι, όσο αυξάνεται η ισχύς του σήματος εισόδου  $P_{in}$ , η  $G$  παραμένει για λίγο στην τιμή  $G_0$  ασθενούς σήματος και μετά αρχίζει να μειώνεται καταλήγοντας τελικά στην τιμή  $0 \text{ dB}$ .

Ενώ η εξίσωση αυτή ισχύει για ενισχυτές διόδου-laser ημιαγωγού οδεύοντος-κύματος, η κατάσταση γίνεται πολύ πιο περίπλοκη στην περίπτωση του ενισχυτή οδεύοντος-κύματος με ίνα προσμείξεων. Ο λόγος είναι ότι όταν μεν η άντληση γίνεται με έγχυση ρεύματος κάθετα στον κυματοδηγό η πυκνότητα των εγγεόμενων φορέων κατά μήκος του ενεργού τμήματος του ημιαγωγού μπορεί να θεωρηθεί σταθερή, ενώ σε ένα ενισχυτή με ίνα, όπου η ισχύς οπτικής άντλησης παρέχεται από το ένα άκρο, μαζί με το προς ενίσχυση οπτικό σήμα, η ενέργεια αυτή άντλησης αρχίζει να εξασθενεί κατά τη διάδοση της κατά μήκος του μέσου που προκαλεί την ενίσχυση.



**Σχήμα 3.63** Πειραματικές επιδόσεις ενός ενίσχυτή οδεύοντος-κύματος συναρτήσεως του μήκους της ενεργού περιοχής. Η συγκεκριμένη διάταξη ήταν ένας ενίσχυτής ίνας προσμείξεων ερβίου, και η οπτική ισχύς άντλησης στα 515 nm ήταν (A) 20 mW, (B) 55 mW, (C) 100 mW.

Μια ακριβής ανάλυση είναι πολύ δύσκολη, αλλά μπορούμε να πάρουμε μια πρώτη γενική ιδέα για το τι συμβαίνει, από το Σχήμα 3.63, όπου φαίνεται η ισχύς εξόδου συναρτήσεως του μήκους  $L$  της ίνας με προσμείξεις, και με παράμετρο την ισχύ εισόδου άντλησης. Οι καμπύλες αυτές αφορούν τον ενίσχυτή με ίνα προσμείξεων που θα εξετάσουμε σε λίγο, όπου η ισχύς άντλησης τροφοδοτείται στο ένα άκρο, αντί να εφαρμόζεται ομοιόμορφα καθ' όλο το μήκος της διάταξης. Το πάνω σύνολο καμπυλών δείχνει πώς εξασθενεί η ισχύς άντλησης κατά τη διάδοση της μέσω της διάταξης. Το σύνολο καμπυλών στη μέση, δείχνει την ενίσχυση του σήματος, που γίνεται όμως από ένα συνεχώς μειωμένου παράγοντα απολαβής  $G$ , καθώς η ισχύς άντλησης εξασθενεί. Τελικά, απομένει τόσο λίγη ισχύς άντλησης ώστε η αναστροφή να είναι όλο και λιγότερο πλήρης, και τέλος, για ένα ακόμα μεγαλύτερο μήκος (εδώ, περίπου 15 m), το σήμα ουσιαστικά εμφανίζεται ισχυρά εξασθενημένο, για λόγους που θα συζητηθούν ευθύς αμέσως. Στο μεταξύ, όπως δείχνει η κάτω καμπύλη (ASE), η ενισχυμένη αυθόρμητη εκπομπή μεγαλώνει. Είναι φανερό ότι, για μια δοσμένη ισχύ άντλησης, το βέλτιστο μήκος  $L$  της ενεργού περιοχής ενίσχυσης εξαρτάται από το πόση απολαβή θέλουμε να αποσπάσουμε από την διάταξη και πόσο μεγάλη αύξηση της αυθόρμητης εκπομπής (ASE) ανεχόμαστε.

### 3.25.3 Ο κόρος της απολαβής δεν είναι το ίδιο με την μη γραμμικότητα

Το γεγονός ότι η καμπύλη της απολαβής συναρτήσεως της στάθμης ισχύος της οπτικής εισόδου δεν είναι μια ευθεία γραμμή, αλλά έχει τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 3.62, δεν σημαίνει ότι η διάταξη είναι μη γραμμική με τη συνήθη έννοια. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική γιατί, μια από τις σπουδαιότερες

συνιστώσες θορύβου που θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν στη σχεδίαση του συστήματος είναι ο λεγόμενος θόρυβος "σήμα  $\chi$  αυθόρμητη εκπομπή" του ενισχυτή, (Signal  $\chi$  spontaneous), δηλαδή ο θόρυβος που προκύπτει από το διακρότημα (σωστότερα τη διαμόρφωση) μεταξύ σήματος και ASE. Εδώ όμως ακριβώς πρέπει να ξεκαθαρίσουμε ότι η συνιστώσα αυτή θορύβου "γινόμενου", δεν γεννιέται στον ενισχυτή (λ.χ. ως ενδοδιαμόρφωση) αλλά στη λήψη, όταν φθάνει ταυτόχρονα το σήμα και ο ASE στον φωτοφωρατή, ο οποίος είναι πράγματι μια μη γραμμική διάταξη. (Υπενθυμίζουμε ότι η φωτοδίοδος μετατρέπει milliwatt φωτός σε milliamperes ρεύματος, και γι' αυτό το λόγο είναι πράγματι μιά μη γραμμική διάταξη).

Εάν η απολαβή του ενισχυτή προλάμβανε να μεταβληθεί μέσα σε ένα μικρό κλάσμα της περιόδου του οπτικού σήματος (περίπου  $10^{-15}$  sec), τότε ο ενισχυτής θα μπορούσε να χαρακτηριστεί σαν μη γραμμική διάταξη με τη συνήθη έννοια, όμως αυτή η τόσο γρήγορη μεταβολή είναι αδύνατη. Η χρονική κλίμακα του nanosecond που χρειάζεται για να μεταβληθεί η απολαβή μιας διόδου-laser ημιαγωγού είναι ήδη έξι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την περίοδο του οπτικού σήματος. Πολύ περισσότερο η χρονική κλίμακα των millisecond που είναι ο αντίστοιχος χρόνος για έναν ενισχυτή ίνας προσμείξεων ερβίου, δηλ. κάπου επτά τάξεις μεγέθους ακόμα μεγαλύτερος.

Σε ένα οπτικό δίκτυο στην πράξη, το μόνο πράγμα που θα μπορούσε να το φανταστεί κανείς να μεταβάλλεται με αρκετά αργό ρυθμό ώστε να μπορούν να το παρακολουθούν οι μεταβολές της απολαβής ενός ενισχυτή ίνας προσμείξεων ερβίου, θα ήταν η *ενδοδιαμόρφωση* (intermodulation) μεταξύ των "χρωματικά" απεχόντων καναλιών, εάν η απόσταση αυτή ήταν μερικές εκατοντάδες Hz ή λιγότερο. Για ενισχυτές διόδου-laser ημιαγωγού, η αντίστοιχη τιμή θα είναι ένα ή δύο GHz, ή μικρότερη από 0.1 Å. Και οι δύο αυτές τιμές είναι μικρότερες από την αναμενόμενη απόσταση μεταξύ των καναλιών στα περισσότερα συστήματα διαίρεσης-μήκους κύματος, κι έτσι η ενδοδιαμόρφωση [6] δεν αποτελεί σημαντικό ζήτημα για τους ενισχυτές.

### 3.26 Διαφωνία στους Ενισχυτές Ημιαγωγού

Στην εξίσωση 3.18 που δίνει την πυκνότητα φορέων, και από την οποία υπολογίσαμε την επίδραση του κόρου της απολαβής, είχε γίνει η υπόθεση ότι ο χρονικός ρυθμός μεταβολής της πυκνότητας φορέων ήταν αμελητέος.

Έτσι, τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι σωστά για τις περιπτώσεις εκείνες όπου καμία από τις παραμέτρους δεν εξαρτάται από το χρόνο. Εντούτοις, η αρχική μορφή της "εξίσωσης-ροής" και συγκεκριμένα είναι χρονικά εξαρτώμενη, και για σταθερό ρεύμα άντλησης  $I$ , γίνεται

$$\dot{N}(t) = \frac{I}{qLwd} - \frac{N(t)}{\tau_e} - \frac{\Gamma c}{n} [N(t) - N_0] \Pi(t) \quad (3.31)$$

Ας υποθέσουμε ότι, για  $t=0$  η πυκνότητα φωτονίων  $\Pi(t)$  μειώνεται ξαφνικά μέχρι την τιμή μηδέν. Τότε

$$\dot{N}(t) + \frac{N(t)}{\tau_e} = \frac{I}{qLwd} \quad (3.32)$$

Η τελικά  $P_0 = \frac{2rP_{in}}{1+r}$

$$N(t) = \frac{I\tau_e}{qLwd} [1 - \exp(-t/\tau_e)] \quad (3.33)$$

Έτσι ώστε η πυκνότητα φορέων, και επομένως η απολαβή, μοιάζουν να αποκρίνονται με μία σταθερά χρόνου

$$\Gamma \downarrow = \tau_e \quad (3.34)$$

όταν η ένταση του φωτός μειωθεί σε πολύ μικρές τιμές, συνήθως σαν μια μετάπτωση μεταξύ ενός bit "1" και ενός bit "0". Όταν η μετάπτωση είναι προς την αντίθετη κατεύθυνση, η ένταση του προσπίπτοντος φωτός αυξάνεται πρακτικά από το μηδέν σε μια μεγάλη τιμή, και μια ματιά στην Εξίσωση 3.31 δείχνει ότι η σταθερά χρόνου είναι μικρότερη. Η σταθερά χρόνου δίνεται τώρα από

$$\Gamma \uparrow = \left( \frac{1}{\tau_e} + \frac{\Gamma ac \Pi}{n} \right)^{-1} \quad (3.35)$$

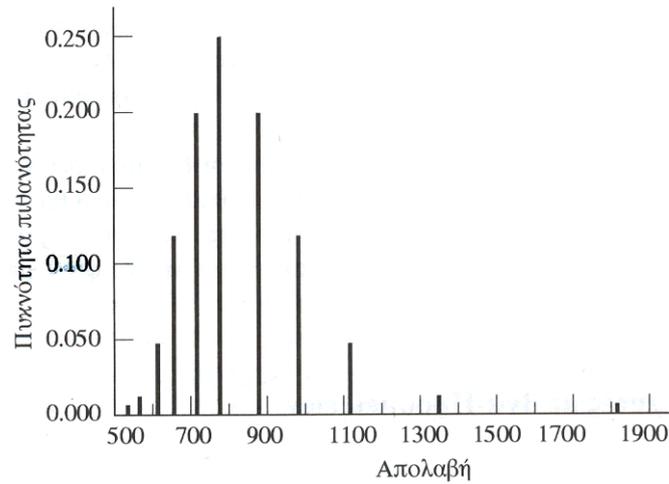
Αυτό σημαίνει ότι εάν η χρονική διάρκεια  $T$  ενός bit είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτές τις σταθερές χρόνου, τότε η απολαβή  $G(f)$  του ενισχυτή θα αυξομειώνεται με την στιγμιαία πυκνότητα ισχύος εισόδου  $P_{in}$  που εκφράζεται με την Εξίσωση 3.30. Εάν η διάρκεια του bit είναι πολύ μικρότερη από  $\tau_e$ , τότε θα πρέπει στην Εξίσωση 3.30, να αντικαταστήσουμε την  $P_{in}$  με τη μέση χρονική της τιμή.

Οι πραγματικές τιμές της  $\tau_e$  όπως είδαμε, διαφέρουν μεταξύ τους κατά επτά περίπου τάξεις μεγέθους προκειμένου για ενισχυτές διόδου-laser ημιαγωγού ή για ενισχυτές με ένα προσμείζων ερβίου. Όπως γνωρίζουμε, ο χρόνος ζωής των φορέων στους ημιαγωγούς είναι ένα nsec ή λιγότερο. Για την μετάπτωση που συμβαίνει στο έρβιο που χρησιμοποιείται στους ενισχυτές με ένα προσμείζων είναι πάνω από δέκα msec. Αφού τα περισσότερα οπτικά δίκτυα θα χρησιμοποιούν ρυθμούς που πιθανότατα θα κυμαίνονται από Mb/s ως ένα περίπου Gb/s ανά κανάλι, η διαφωνία μπορεί να αποτελεί σοβαρό πρόβλημα για τους ενισχυτές διόδου-laser ενώ δεν θα υπάρξει σχεδόν ποτέ πρόβλημα με τους ενισχυτές ίνας προσμείζων ερβίου.

Ας υποθέσουμε ότι ένας αριθμός από  $N$  στατιστικά ανεξάρτητα σήματα με διαμόρφωση on-off (OOK) φθάνει σε έναν ενισχυτή απολαβής  $G$  όπως αυτός που δίνεται από την Εξίσωση 3.30 και το Σχήματος 3.62. Ας υποθέσουμε επίσης τη χειρότερη περίπτωση, όπου τα σήματα θεωρούνται "συγχρονισμένα" κατά bit μεταξύ τους. Η ισχύς εισόδου  $P_{in}$  μπορεί να πάρει  $N+1$  τιμές με διακριτή πιθανότητα ότι  $k$  ακριβώς από αυτά θα στέλνουν το "1", πιθανότητα που δίνεται από την διωνυμική κατανομή

$$Pr ob\{P = kP_1 + (N - k)P_0\} = \frac{N!}{k!(N - k)!2^N} \quad (3.36)$$

όπου  $P_0$  είναι η ισχύς που αντιπροσωπεύει το "0" και  $P_1$  είναι η ισχύς που αντιπροσωπεύει το "1". Εάν ο λόγος σβέσης  $r$  της διαδικασίας διαμόρφωσης on-off είναι



**Σχήμα 3.64** Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της απολαβής του ενισχυτή  $G$  ενός τυπικού ενισχυτή διόδου – laser ο οποίος οδηγείται από πολλά σήματα ταυτόχρονα.

$$r = P_0 / P_1 \quad (3.37)$$

τότε θα έχουμε για τις ισχύς  $P_0$  και  $P_1$  συναρτήσει της μέσης ισχύος ανά κανάλι στην είσοδο του ενισχυτή  $P_{in}$

$$P_{in} = \frac{(P_0 + P_1)}{2} \quad (3.38)$$

$$P_1 = \frac{2P_{in}}{1+r} \quad (3.39)$$

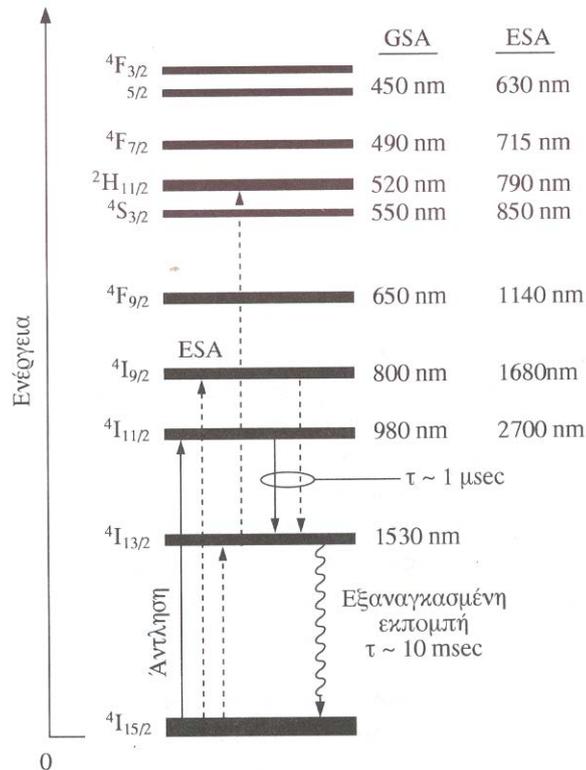
και

$$P_0 = \frac{2rP_{in}}{1+r} \quad (3.40)$$

Το παράδειγμα του Σχήματος 3.64 δείχνει ακριβώς πόσο πολύ και με τι πιθανότητα μπορεί να μεταβάλλεται η απολαβή  $G$  όταν ο κόρος της απολαβής ακολουθεί το bitrate, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των ενισχυτών laser ημιαγωγού. Έχουμε υποθέσει δέκα σήματα, που το καθένα έχει στάθμη ισχύος  $-50$  dBm και μηδενικό λόγο σβέσης  $r$ . Ο ενισχυτής έχει ισχύ κόρου  $P_{sat} = -6$  dBm, όπως στο Σχήματος 3.64. Υπάρχει μία μόνο περίπτωση στην οποία ένας μόνο πομπός στέλνει ένα "0" και μία περίπτωση στην οποία ένας μόνο πομπός στέλνει ένα "1". Τα σημεία αυτά διακρίνονται ελάχιστα στο σχήμα, αφού οι πιθανότητες είναι τόσο μικρές· βρίσκονται όμως σε τιμές απολαβής 550 και 1810. Υπάρχουν πολλές ακόμα περιπτώσεις στις οποίες μερικοί πομποί στέλνουν "0" και μερικοί "1". Η σχετική πιθανότητα για τις διάφορες τιμές που μπορεί να πάρει η απολαβή αποτελεί όπως βλέπουμε την τεταγμένη στο Σχήματος 3.64. Η απολαβή φαίνεται να μεταβάλλεται κατά ένα λόγο πάνω από τρία προς ένα για τις διάφορες αυτές περιπτώσεις. Η μορφή αυτή πολλαπλασιαστικού θορύβου διαταράσσει την ικανότητα του φωρατή να ξεχωρίσει το "0" από το "1".

### 3.27 Ενισχυτές με Ίνα-Προσμείξεων Βασικές αρχές

Γνωρίζουμε ότι τα ηλεκτρόνια των εξωτερικών τροχιών ενός ατόμου μπορούν να ανυψωθούν σε υψηλότερες ενεργειακές στάθμες μέσω άντλησης. Για τα laser αερίου, μιλήσαμε για τις ενεργειακές στάθμες των ατόμων, και για την άντληση που γινόταν με την πρόσπτωση οπτικής ακτινοβολίας κατάλληλου μήκους κύματος κατά-τι μικρότερου από εκείνο της επιθυμητής εξαναγκασμένης εκπομπής. Και στα laser ημιαγωγού, και πάλι τα ηλεκτρόνια των εξωτερικών τροχιών των ατόμων του κρυσταλλικού πλέγματος είναι εκείνα που υψώνονται σε ανώτερες ενεργειακές καταστάσεις μέσω άντλησης (η οποία όμως στην περίπτωση αυτή γίνεται με έγχυση ρεύματος), αλλά εδώ θεωρήθηκε βολικό να εισάγουμε την έννοια ενός πλασματικού "ημι-σωματίου" (quasiparticle) που το ονομάσαμε προς-στιγμή φορέα, και που δεν ήταν άλλο από το ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής, και το οποίο αποτέλεσε τη φυσική οντότητα μέσω της οποίας γίνεται ο ενεργειακός ισολογισμός.



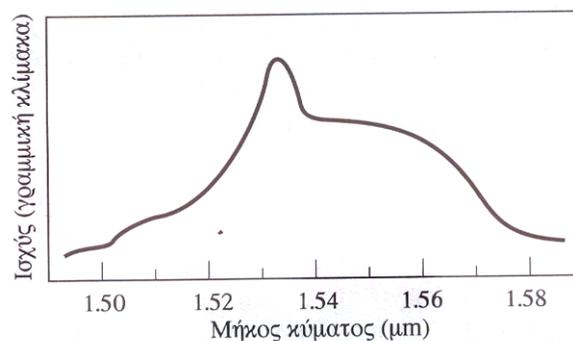
Σχήμα 3.65 Ενεργειακές στάθμες του τριπλά-ιονισμένου ιόντος ερβίου,  $Er^{3+}$ .

Στις ίνες με προσμείξεις, εξακολουθούν και πάλι να είναι τα εξώτερα ηλεκτρόνια εκείνα που οι μεταβολές της ενέργειας τους βρίσκονται στην ουσία όλων των διαδικασιών άντλησης και ακτινοβολίας, αλλά η επιστημονική "διάλεκτος" που διευκολύνει από λειτουργική άποψη τα πράγματα εδώ επικαλείται τα *ιόντα*, ως τις φυσικές οντότητες για τον ενεργειακό ισολογισμό. Θυμόμαστε βέβαια ότι ένα ιόν είναι ένα άτομο που έχει χάσει οριστικά ένα ή περισσότερα από τα εξωτερικά του ηλεκτρόνια. Για παράδειγμα, στους ενισχυτές με ένα προσμείξεων ερβίου, είναι τα ιόντα ερβίου  $Er^{3+}$  που διαθέτουν όλες εκείνες τις ωραίες ιδιότητες που θα σχολιάσουμε ευθύς αμέσως. Το ιόν ερβίου είναι ένα άτομο ερβίου (μιας από τις "σπάνιες γαίες") που έχει χάσει τρία από τα εξώτερα ηλεκτρόνια του.

Στο Σχήμα 3.65 φαίνονται οι ενεργειακές στάθμες ενός τέτοιου ιόντος. Η πρώτη στήλη αριθμών στα δεξιά δείχνει τα μήκη κύματος που αντιστοιχούν στη διαφορά ενέργειας μεταξύ των διαφόρων ενεργειακών σταθμών και της βασικής κατάστασης ηρεμίας. Οι ενεργειακές στάθμες χαρακτηρίζονται με τα αρχικά *GSA* "ground-state absorption" (απορρόφηση από τη βασική κατάσταση). Πρόσπτωση φωτός σε αυτά τα μήκη κύματος μπορεί να προκαλέσει άντληση από τα ιόντα δηλ., ανύψωση της ενεργειακής τους κατάστασης από αυτήν της βασικής στάθμης  ${}^4I_{15/2}$ . Μόλις διεγερθούν τα ιόντα σε στάθμες ανώτερες από

την κατάσταση  ${}^4I_{13/2}$ , πολλά από αυτά θα επιστρέψουν στην κατάσταση αυτή, (δηλ, την  ${}^4I_{13/2}$ ), και θα είναι διαθέσιμα είτε για αυθόρμητη είτε για εξαναγκασμένη εκπομπή φωτός στο επιθυμητό μήκος κύματος 1.5-μm. Η κατάσταση  ${}^4I_{13/2}$  είναι μια *με-τασταθής* (metastable) κατάσταση, που σημαίνει ότι η μετάπτωση απ' αυτή τη στάθμη στη βασική, έχει ένα πολύ μεγάλο χρόνο ζωής σε σχέση με το χρόνο ζωής των καταστάσεων από τις οποίες τα ιόντα αποδιεγέρθηκαν μέχρις αυτή. Το σύνολο των σταθμών στα δεξιά του σχήματος είναι οι στάθμες "απορρόφησης των διεγερμένων καταστάσεων" αν χρησιμοποιήσουμε τη μετασταθή (ή "διεγερμένη", excited) κατάσταση σαν στάθμη αναφοράς (ESA:excited-state adsorption). Θα ασχοληθούμε με τις στάθμες αυτές εξετάζοντας τα επιθυμητά μήκη κύματος άντλησης.

Στην εικόνα αυτή των ενεργειακών σταθμών υπάρχουν μερικά ελκυστικά σημεία από την άποψη των οπτικών επικοινωνιών. **Πρώτα-πρώτα**, η μετάπτωση από τη μετασταθή κατάσταση στη βασική βρίσκεται ακριβώς στο παράθυρο μηκών κύματος χαμηλής εξασθένησης των ιών. **Δεύτερο**, αποδεικνύεται ότι ο αντίστοιχος χρόνος ζωής  $\tau_{21}$  για αυθόρμητη αποδιέγερση στη βασική κατάσταση είναι αξιοσημείωτα μεγάλος, περίπου 11 msec, και κατά πολύ μεγαλύτερος από τον χρόνο των άλλων μεταπτώσεων προς τα κάτω, με αποτέλεσμα να παραμένουν εναποθηκευμένα τεράστια ποσά ενέργειας στα ιόντα ερβίου που έχουν υποστεί αναστροφή πληθυσμού στη στάθμη αυτή. **Τρίτο**, μερικές από τις ανώτερες στάθμες αντιστοιχούν σε μήκη κύματος για τα οποία υπάρχουν εμπορικά διαθέσιμα laser για να γίνει άντληση με αρκετή ισχύ. Από καιρό υπάρχουν laser υψηλής ισχύος από αρσενικούχο γάλλιο ή συστοιχίες laser υψηλής ισχύος, στα 800-850 nm. Επίσης, δίοδοι laser αρσενικούχου γαλλίου μπορούν να κατασκευαστούν ώστε να αποδίδουν υψηλή ισχύ στα 980 nm, με την σκόπιμη δημιουργία μιας μηχανικής έντασης μεταξύ των ημιαγωγικών στρωμάτων χάρις σε προσεκτικά μελετημένη έλλειψη προσαρμογής των πλεγματικών τους σταθερών.



**Σχήμα 3.66** Φάσμα φθορισμού (αυθόρμητης εκπομπής) ιόντων  $Er^{3+}$  σε υποδοχέα αμόρφου πυριτίου με πρόσμιξη αλουμίνιας.

Η λεπτότητα της ενεργειακής στάθμης που γνωρίζουμε για τα μεμονωμένα άτομα καταστρέφεται όταν υπάρχουν και άλλα γειτονικά άτομα (μέσα στην εμβέλεια της κυματοσυνάρτησης του ηλεκτρονίου) και η κάθε στάθμη "απλώνει", διευρύνεται ενεργειακά. Στην περίπτωση της ίνας με προσμείξεις, ο λειτουργικός μηχανισμός που επικρατεί σ' αυτή τη διεύθυνση λέγεται *διάσπαση Stark* (*Stark splitting*), δηλ. η διάσπαση που θα υποστεί κάθε ατομική φασματική γραμμή παρουσία ενός συνεχούς ηλεκτρικού πεδίου. Εάν το υλικό της ίνας με προσμείξεις ήταν ένας κανονικός κρύσταλλος, κάθε γραμμή του Σχήματος 3.65 θα είχε διασπαστεί σ' ένα πεπερασμένο αριθμό μεμονωμένων γειτονικών γραμμών, στην πραγματικότητα όμως το υλικό αυτό είναι άμορφο (τηγμένο γυαλί). Θεωρούμε στο σύνολο (δηλ. σχηματίζοντας ένα μέσο όρο των ενεργειακών καταστάσεων των ιόντων μέσα στο γυαλί) βλέπουμε μια συνεχή εξάπλωση των ενεργειακών σταθμών.

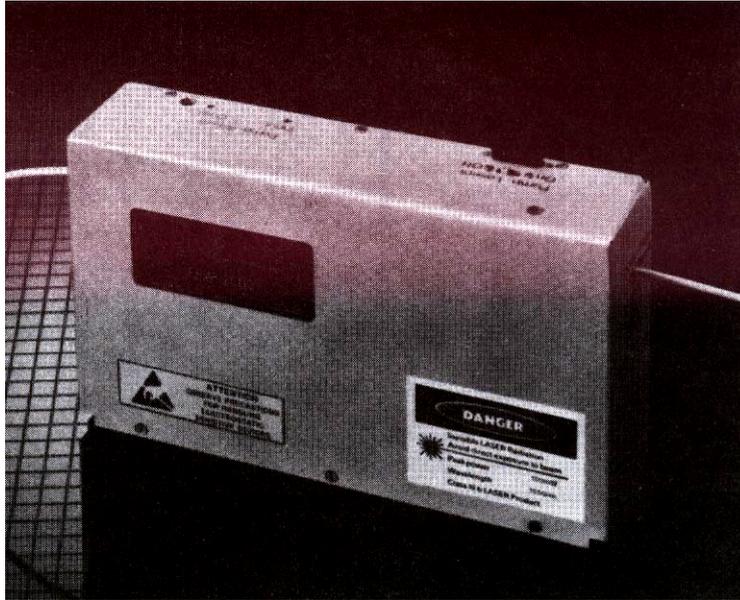
Η εξάπλωση αυτή μπορεί να μεγαλώσει ακόμα αν προσθέσουμε μαζί με το έρβιο στο υλικό υποδοχής, το γυαλί, και άλλες ειδικές προσμείξεις. Επίσης οι συν-προσμείξεις αυτές κάνουν ευχερέστερη την αύξηση της συγκέντρωσης ιόντων ερβίου μέσα στο γυαλί, το οποίο κανονικά ανθίσταται στη διείσδυση τους γιατί τα άτομα ερβίου είναι από φυσική άποψη κατά πολύ μεγαλύτερα σε μέγεθος από τα άτομα πυριτίου και οξυγόνου μέσα στην άμορφη silica. Μερικές απ' αυτές τις συν-προσμείξεις είναι από μόνες τους πολύ πιο "διαλυτές" στο άμορφο διοξείδιο του πυριτίου απ' ότι το έρβιο, και από τη στιγμή που θα εγκατασταθούν στο υλικό δημιουργούν γύρω τους μικρές περιοχές όπου επιτρέπεται η διάλυση περισσότερων ατόμων ερβίου απ' ότι αν δεν υπήρχαν οι προσμείξεις αυτές. Τα άτομα αυτά συν-προσμείξεων που είναι από φυσική άποψη εγγύτερα στα άτομα ερβίου και αναπτύσσουν πεδία διαφορετικής έντασης απ' ότι το υλικό της silica, υποβοηθούν την πιο πέρα διεύρυνση των ενεργειακών γραμμών, αυξάνοντας έτσι την *διάσπαση Stark*.

Μία μεγάλη ποικιλία συνδυασμών προσμείξεων δοκιμάστηκε προκειμένου να αυξηθεί η διαλυτότητα του ερβίου και να διευρυνθεί η ζώνη μεταπτώσεων μεταξύ μετασταθούς και βασικής ενεργειακής κατάστασης ώστε να διαμορφωθεί μια καμπύλη απολαβής με όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος και όσο γίνεται πιο επίπεδη. Μερικοί από τους συνδυασμούς αυτούς υπήρξαν σχετικά επιτυχείς στο να δώσουν ίνα που να είναι εύχρηστη σε ότι αφορά την ευθραυστότητα, την ευκολία συγκόλλησης με την κανονική ίνα μετάδοσης από silica, κ.ο.κ. Η πιο ικανοποιητική λύση αποδείχθηκε η λύση των συν-προσμείξεων αλουμίνας ( $AlO_3$ ) η οποία οδηγεί στο φάσμα του Σχήματος 3.66. Αν δεν ληφθεί υπ' όψη η κορυφή στα 1.532 nm, το συνολικό εύρος ζώνης στα 3 dB είναι περί τα 35 nm. Με χρήση αλουμίνας ως συν-πρόσμειξης μπορούν εύκολα να επιτευχθούν συγκεντρώσεις ερβίου 1000 ppm (parts per million) έχουν όμως φθάσει ακόμα και μέχρι 2500 ppm.

### 3.27.1 Φυσική δομή

Η δομή του ενισχυτή ίνας με προσμείξεις που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.59 (B) αποτελείται από διάφορα τμήματα. Πρώτα-πρώτα υπάρχει ο *διχρωϊκός συζεύκτης*, που είναι ένας συζεύκτης 2x2 σχεδιασμένος έτσι ώστε να περνάει στο τμήμα που βρίσκεται η ίνα με προσμείξεις το μεγαλύτερο μέρος τόσο της ενέργειας που φέρεται στο μήκος κύματος του σήματος όσο και στο μήκος κύματος της οπτικής εισόδου που επιτυγχάνει την άντληση. Πράγματι αν δεν χρησιμοποιηθούν μερικά κατάλληλα τεχνάσματα σχετικά με το μήκος  $Z$  της περιοχής σύζευξης και με τις διαμέτρους των πυρήνων των ινών, τότε εάν θέλαμε το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος του σήματος που μπαίνει στην είσοδο 1 του Σχήματος 3.59 (B) να μεταφερθεί στην έξοδο 3, δηλ. μέσα στην ίνα με προσμείξεις, τότε δυστυχώς το μεγαλύτερο μέρος της οπτικής ισχύος άντλησης της εισόδου 2 θα μεταφερόταν στην άλλη έξοδο του συζεύκτη, στην έξοδο 4. Τα ειδικά τεχνάσματα που αναφέραμε, εκμεταλλεύονται το γεγονός ότι ανάλογα με την τιμή του  $Z$ , η ισχύς στις εξόδους 3 και 4 κυμαίνεται και εξαρτάται και από το μήκος κύματος. Τα τεχνάσματα λοιπόν αυτά μας επιτρέπουν να κατασκευάσουμε ένα διχρωϊκό συζεύκτη που να εξασφαλίζει ότι τόσο η ισχύς άντλησης όσο και η ισχύς του σήματος θα εμφανισθούν στην έξοδο 3, δηλ. στο τμήμα με προσμείξεις, καθώς η καθεμιά από τις ισχύς αυτές φέρεται σε πολύ διαφορετικά μεταξύ τους μήκη κύματος.

Για να επιτύχουμε βέλτιστη απολαβή και ελάχιστο θόρυβο στην έξοδο, το τμήμα με προσμείξεις θα πρέπει να έχει μήκη που κυμαίνονται από μερικά μέτρα σε μερικές δεκάδες μέτρα, όπως φαίνεται στα παραδείγματα του Σχήματος 3.63. Προκειμένου να δημιουργηθεί η μέγιστη δυνατή απολαβή στην ίνα, δεν αρκεί το να σκορπίσουμε την ισχύ άντλησης σε όλο τον πυρήνα, κατασκευάζοντας τον εξ' ολοκλήρου από υλικό με προσμείξεις. Συνήθως επιδιώκουμε τη συγκέντρωση αρκετής πυκνότητας ισχύος άντλησης σε μια περιοχή, δημιουργώντας υλικό με προσμείξεις περί το κέντρο του πυρήνα σε μια διάμετρο μόλις 4  $\mu\text{m}$ , και με υψηλότερο δείκτη διάθλασης από τον υπόλοιπο πυρήνα.

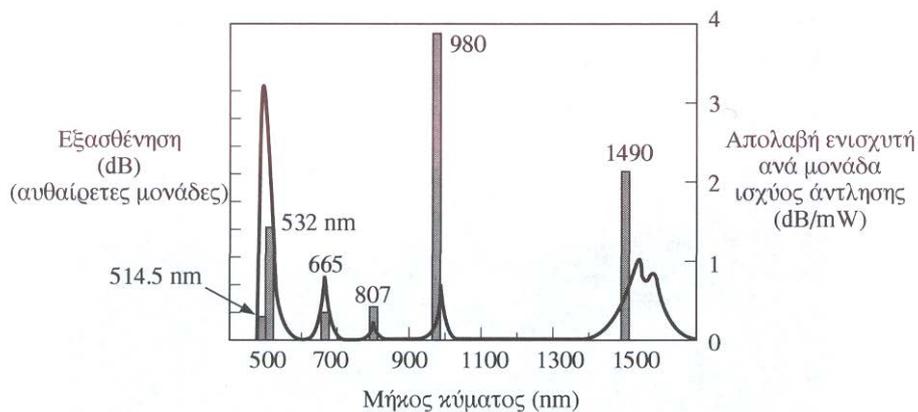


Σχήμα 3.67 Ενισχυτής με ένα προσμείξεων ερβίου του εμπορίου.

Υπάρχουν αρκετά χρήσιμα κριτήρια επιδόσεων για τις διάφορες λειτουργικές παραμέτρους των ενισχυτών με ένα προσμείξεων. Στην [7] δίνεται μια επισκόπηση της κατάστασης της τεχνολογίας σε ό,τι αφορά αυτές τις παραμέτρους. Για την λειτουργία της ενίσχυσης ισχύος λ.χ σημαντική είναι η μέγιστη ισχύς εξόδου, και έχουν επιτευχθεί τιμές μέχρι 500 mW. Για τη λειτουργία ενός ενισχυτή ως ενισχυτή γραμμής ή ως προενισχυτή ενός δέκτη, είναι σημαντικές οι παράμετροι της ολικής απολαβής σε dB και του αυξητικού λόγου της απολαβής μικρού-σήματος  $G_o$  ως προς την ισχύ άντλησης. Έχουν αναφερθεί αντίστοιχα τιμές μέχρι 46 dB για την ολική απολαβή, και 10.2 dB της αύξησης της απολαβής ανά milliwatt αύξησης της ισχύος άντλησης, χρησιμοποιώντας για την άντληση διόδους laser ημιαγωγού.

### 3.27.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Οι δυσκολίες και το κόστος για τον έλεγχο της ανακλαστικότητας των τερματικών όψεων αποφεύγονται με τη γεωμετρία των ενισχυτών με ένα προσμείξεων. Λόγω της αμελητέας ανακλαστικότητας στα άκρα, οι ενισχυτές με ένα προσμείξεων έχουν μικρότερη κυμάτωση τύπου Fabry-Perot στη ζώνη ενίσχυσης αλλά και καλύτερες επιδόσεις σε ό,τι αφορά το θόρυβο, από ό,τι οι ενισχυτές διόδου- laser. Η επίδραση του θορύβου εκφράζεται με τον παράγοντα  $\chi$  στην Εξίσωση 3.15. Όμως, το πλεονέκτημα της μικρότερης κυμάτωσης Fabry-Perot μειώνεται από το γεγονός ότι η καμπύλη απολαβής δεν είναι ομαλή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.66. Για να περιορίσουμε την κορυφή συντονισμού 1532 nm του ερβίου, κατασκευάζουμε μερικές φορές ένα φίλτρο με εγκοπές (notch filter) χρησιμοποιώντας ειδικές γεωμετρίες ινών .



**Σχήμα 3.68** Διάγραμμα παραστατικό των διαφορών ζωνών απορρόφησης (και ακτινοβολίας) του  $Er^{3+}$ . Οι γκριζές ράβδοι δείχνουν τις, καταρχήν, ενδιαφέρουσες περιοχές άντλησης και την απόδοσή τους. Οι πλήρεις καμπύλες δίνουν την σχετική απορρόφηση (συμβολή στην αναστροφή πληθυσμού) και την ικανότητα ενίσχυσης (απολαβή σε dB) ανα μονάδα αντλούμενης ισχύος (σε mW), συναρτήσει του μήκους κύματος.

Οι απώλειες σύζευξης είναι πολύ χαμηλότερες σε έναν ενισχυτή με ίνα προσμείξεων, γιατί το τμήμα αυτό ίνας απλά και μόνο συγκολλάτε σε μια ήδη εγκαταστημένη ίνα, αντί να χρησιμοποιήσουμε συστήματα "φακοποίησης". Επίσης, επειδή η ίνα είναι κυκλικά συμμετρική στη διατομή της, ο ενισχυτής με ίνα δεν επηρεάζεται καθόλου από την πολωτική κατάσταση. Τέλος, επειδή η διαδικασία ενίσχυσης με ίνα προσμείξεων ελέγχεται από τις βασικές διακριτές ατομικές γραμμές μάλλον παρά από συνεχείς ευρύτατες ενεργειακές ζώνες, όπως συμβαίνει στο laser και τους ενισχυτές ημιαγωγού, οι ενισχυτές με ίνα έχουν πολύ μικρότερη ευαισθησία στη θερμοκρασία.

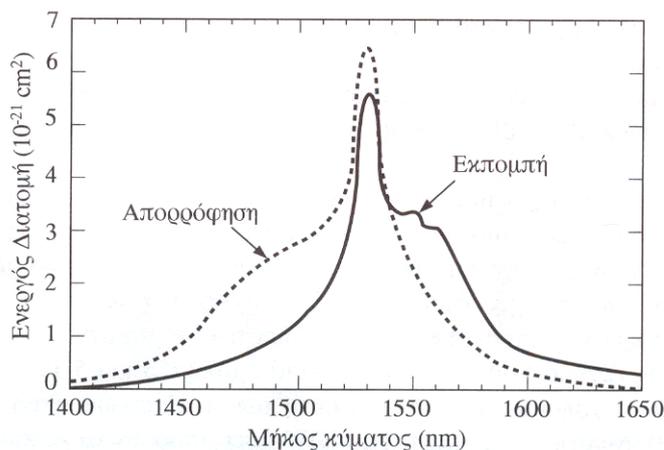
Τα περισσότερα από τα πιο πάνω πλεονεκτήματα ήταν γνωστά από χρόνια, δύο όμως πράγματα καθυστέρησαν σημαντικά τους ενισχυτές με ίνα προσμείξεων από το να υιοθετηθούν σε ευρεία κλίμακα: το γεγονός ότι πρέπει να εφαρμοστεί σε αυτούς οπτική άντληση, και το γεγονός ότι τόσο το διαθέσιμο εύρος ζώνης όσο και η διαθέσιμη συγκέντρωση ερβίου ήταν χαμηλά, μέχρις ότου ανακαλύφθηκε η μέθοδος συν-προσμείξεων με αλουμίνα. Εξάλλου, η εμφάνιση μικρών σε διαστάσεις διόδων laser υψηλής ισχύος για άντληση, στο κατάλληλο μήκος κύματος, σήμαινε ότι μπορούσε πια να κατασκευαστεί ένας ενισχυτής με ίνα χωρίς την ανάγκη πηγών άντλησης μεγάλων φυσικών διαστάσεων και υψηλού κόστους. Στο Σχήμα 3.67 φαίνεται ένας ενισχυτής με ίνα προσμείξεων ερβίου που επιτυγχάνει απολαβή 22 dB σε εύρος ζώνης 35 nm από μια δίοδο laser άντλησης στα 1480 nm.

Το μόνο μειονέκτημα των ενισχυτών με ίνα που απομένει σε σχέση με τους ενισχυτές διόδου- laser αφορά τις φασματικές τους παραμέτρους. Το εύρος ζώνης των 35 nm για την καμπύλη απολαβής μοιάζει να είναι το μέγιστο που μπορεί κανείς να επιτύχει εύκολα. Σε έναν ενισχυτή διόδου- laser, η καμπύλη απολαβής μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιοδήποτε από μια μεγάλη ποικιλία μηκών κύματος και είναι

σχετικά ομαλή. Έχουμε την δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε τη λύση των πολλαπλών-κβαντικών-φρεάτων (MQW) γνωστή από το laser. Τα MQW - laser μπορούν να κατασκευαστούν με τρόπο ώστε να έχουμε καμπύλη απολαβής εύρους άνω των 200 nm. Από την άλλη μεριά, αποδείχθηκε πολύ δύσκολο να κατασκευαστούν ενισχυτές με ίνα προσμείξεων σε μήκος κύματος διαφορετικό από το 1.5 μm, και, όπως είδαμε στο Σχήμα 3.67, η καμπύλη απολαβής δεν έχει μια λεία πεπλατυσμένη κορυφή. Έχουν βέβαια κατασκευαστεί ενισχυτές με ίνα προσμείξεων *πρασεοδυμίου* (άλλου στοιχείου των σπάνιων γαιών) στο παράθυρο των 1.3 μm, αλλά απαιτούνται γυαλιά υποδοχής που είναι πολύ δύσκολο να συγκολληθούν σε ίνες από silica, και οι λοιπές επιδόσεις τους δεν είναι ανάλογες εκείνων του ερβίου.

### 3.27.3 *Επιλογή μηκών κύματος άντλησης*

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.70, το οποίο πρέπει να εξεταστεί σε συνδυασμό και με το Σχήμα 3.67, υπάρχουν αρκετές στάθμες πάνω από τη μετασταθή στάθμη  $^4I_{13/2}$  στις οποίες θα μπορούσαν να διεγερθούν τα ιόντα ερβίου, και στη συνέχεια να αποδιεγερθούν τελικά στη μετασταθή αυτή κατάσταση, δημιουργώντας έτσι την επιθυμητή αναστροφή πληθυσμών. Υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή αυτών των μηκών κύματος άντλησης. Πρώτα-πρώτα, για να κατασκευάσουμε ενισχυτές που θα έχουν πρακτική χρησιμότητα στα πραγματικά οπτικά δίκτυα, θα πρέπει το μήκος κύματος άντλησης να είναι διαθέσιμο από τις υπάρχουσες διόδους laser ημιαγωγού. Στο Σχήμα 3.12 φαίνονται τα όρια στα μήκη κύματος που μπορούν να επιτευχθούν με τους σύνθετους ημιαγωγούς III-V. Βλέπουμε ότι οι περιοχές των μηκών κύματος στα 650,800,980 και 1490 nm, είναι υποψήφιες για λειτουργία των ενισχυτών με ίνα, όμως η περιοχή στα 650 nm μπορεί να αγνοηθεί διότι σ' αυτό το μήκος κύματος δεν υπάρχουν διόδοι laser με αρκετά υψηλή ισχύ. Στο Σχήμα 3.670 φαίνεται με κάθετες γκρίζες ράβδους η απόδοση (efficiency) με την οποία δημιουργείται η αναστροφή πληθυσμού των ιόντων για τα διάφορα μήκη κύματος. Οι καμπύλες (πλήρεις γραμμές) στο ίδιο σχήμα δείχνουν την εξασθένηση λόγω απορρόφησης η οποία είναι κατά προσέγγιση ανάλογη με την ένταση της εξαναγκασμένης εκπομπής (ενισχυτική απολαβή) συναρτήσει του μήκους κύματος. Παρατηρήστε στο Σχήμα 3.65 ότι όταν το σήμα εξασθενεί, εξασθενεί κατά ποσότητες που είναι ολόκληρες τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από αυτές που παρατηρούνται στην εξασθένηση κατά τη διάδοση μέσω μιας ίνας. Καθώς το φως διαδίδεται κατά μήκος της ίνας, είναι η ένταση αυτής της απορρόφησης, (που εμφανίζεται και υπερισχύει μόλις η πηγή της άντλησης δεν έχει πια τη δυνατότητα να δημιουργεί πλήρη αναστροφή), η οποία προκαλεί στο σήμα τόσο ισχυρή εξασθένηση.



**Σχήμα 3.69** Λεπτομερές διάγραμμα της γραμμής του ερβίου στο 1.5  $\mu\text{m}$  σε ένα τυπικό υποδοχέα γυαλιού. Η γραμμή έχει απλωθεί λόγω διάσπασης Stark, και είναι διαφορετική για την απορρόφηση και για την εκπομπή.

Το μήκος κύματος 800 nm δεν προσφέρεται για λειτουργία λόγω της χαμηλής απόδοσης, που εν μέρει οφείλεται στην *απορρόφηση των διεγερμένων-καταστάσεων* (excited-state absorption-ESA· δεν πρέπει να συγχέεται με την ASE-amplified spontaneous emission, ένα ακόμη πρόβλημα στη λειτουργία των ενισχυτών laser που ήδη εξετάσαμε). Η ESA ορίζεται ως η απορρόφηση της ισχύος άντλησης από κάποια ανεπιθύμητη μετάπτωση που συμβαίνει να βρίσκεται ακριβώς ή πολύ κοντά στο κατάλληλο μήκος κύματος. Στην περίπτωση των 800 nm, συμβαίνει ακριβώς η ατυχής συγκυρία ότι σε απόσταση 790 nm από τη μετασταθή κατάσταση υπάρχει μια άλλη μετάπτωση που απορροφά ένα μέρος από την ισχύ άντλησης στα 800 nm, καθώς οι δύο αυτές γραμμές δεν διακρίνονται ουσιαστικά μεταξύ τους, αφού έχουν διευρυνθεί, κυρίως λόγω του φαινομένου *Stark*. Η απορρόφηση αυτή υποδεικνύεται στο δεξιό μέρος του Σχήματος 3.65 με το βέλος που δείχνει προς τα πάνω. Στη δεξιά στήλη τιμών του Σχήματος 3.65 φαίνονται τα πιο επιβλαβή μήκη κύματος ESA, αυτά που μπορούν να απομακρύνουν την ενεργειακή κατάσταση των ιόντων από την ωφέλιμη μετασταθή τιμή της.

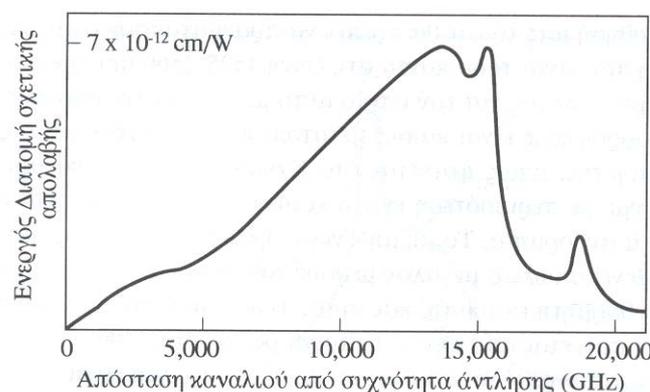
Έτσι, απομένουν τα μήκη κύματος 980 και 1490 nm. Μοιάζει εντελώς αντίθετο στη διαίσθησή μας το ότι θα πρέπει να πραγματοποιήσουμε άντληση στα 1490 nm, τιμή που είναι τόσο κοντά στη ζώνη 1525-1560 nm την οποία πρέπει να ενισχύσουμε. Ο λόγος για τον οποίο αυτό μπορεί να λειτουργήσει είναι ότι το φάσμα απορρόφησης είναι κάπως μετατοπισμένο σε σχέση με το φάσμα αυθόρμητης εκπομπής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.69, ώστε να μπορούμε να τροφοδοτήσουμε με περισσότερη ενέργεια μέσω της άντλησης από αυτήν που ακτινοβολείται αυθόρμητα. Το μη μηδενικό ύψος του φάσματος εκπομπής στα 1490 nm προξενεί απώλεια μεγάλου μέρους του φωτός τόσο σε εξαναγκασμένη όσο και σε αυθόρμητη εκπομπή, και αυτός είναι ένας από τους λόγους που η απόδοση, που φαίνεται από την αντίστοιχη ράβδο

στα 1490 nm στο Σχήμα 3.68, δεν είναι αρκετά μεγάλη. Επίσης, επειδή η αναστροφή είναι πιο ατελής στα 1490 από ότι στα 980 nm, ο θόρυβος στην έξοδο του ενισχυτή (Εξίσωση 3.15) θα είναι μεγαλύτερος διότι ο παράγοντας  $n_{sp}$  είναι μεγαλύτερος. Υπάρχει ένα ακόμη πλεονέκτημα στα 980 nm σχετικά με τα 1490 nm, και αυτό είναι ότι, αφού τα 980 nm βρίσκονται σε τόσο μεγάλη απόσταση από την περιοχή 1525-1560 nm που πρέπει να ενισχύσουμε, η σχεδίαση του διχρωϊκού συζεύκτη θα είναι πολύ ευκολότερη στα 980 nm.

Έτσι, θα έπαινε κανένας να δεχθεί ότι η περιοχή στα 980 nm υπερτερεί, και αυτό θα συνέβαινε πράγματι αν χρησιμοποιήσουμε άντληση σε αυτό το μήκος κύματος στο οποίο, όπως αναφέραμε, έχει επιτευχθεί ισχύς εξόδου 500mW και απόδοση άντλησης 10.2 dB/mW (σε σύγκριση με 0.6, 0.43, και 5.9 dB/mW στα 650, 800, και 1490 nm, αντίστοιχα, που είναι οι καλύτερες πρόσφατα δημοσιευμένες τιμές). Εντούτοις, τα 1490 nm δεν πρέπει να αποκλεισθούν γιατί αποτελούν το μοναδικό μήκος κύματος που είναι υποψήφιο για να στέλνουμε την ισχύ άντλησης στον ενισχυτή κατά μήκος της ίδιας της ίνας από μια απομακρυσμένη πηγή. Η ιδιότητα αυτή συνιστά συχνά μια χρήσιμη επιλογή στην τοπολογική σχεδίαση του συστήματος.

### 3.28 Ενισχυτές Raman και Brillouin

Πολύ πριν γίνει πραγματικότητα η πρακτική χρησιμοποίηση των ινών με προσμείξεις ερβίου σαν βάση για την κατασκευή οπτικών ενισχυτών, είχαν εξεταστεί και υλοποιηθεί άλλες μορφές ενισχυτών με ίνες οι οποίες δεν χρησιμοποιούσαν την οπτική άντληση ηλεκτρονίων των ατόμων σε ψηλότερη ενεργειακή κατάσταση, αλλά αντί γι' αυτό εκμεταλλεύονταν διαδικασίες που συνέβαιναν σε μοριακό επίπεδο. Χρησιμοποιούσαν συγκεκριμένα ένα από τα εξής δύο φυσικά φαινόμενα: την *εξαναγκασμένη σκέδαση Raman* (SRS) ή την *εξαναγκασμένη σκέδαση Brillouin* (SBS).



**Σχήμα 3.70** Απολαβή Raman (ανά μονάδα επιφάνειας διατομής της ίνας, και ανά watt) συναρτήσεως της διαφοράς της συχνότητας άντλησης μείον τη συχνότητα του σήματος.

Και οι δύο βασίζονται στο γεγονός ότι, όταν προσπίπτει φως σε ένα στερεό υλικό, τα μόρια του υλικού αρχίζουν να δονούνται. Στην SRS ένα μέρος της ενέργειας ενός προσπίπτοντος φωτονίου μετατρέπεται σε μηχανικές δονήσεις των μορίων ενώ το υπόλοιπο μεταπίπτει σε ένα άλλο φωτόνιο που ακτινοβολείται εκ νέου (σκεδάζετε) σε μια χαμηλότερη βέβαια ενέργεια, και επομένως με χαμηλότερη συχνότητα. Η μετατοπισμένη αυτή συχνότητα ονομάζεται *συχνότητα Stokes*, και το φως που επανακτινοβολείται ονομάζεται *ακτινοβολία Stokes (Stokes light)*.

Στην SBS, η ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου αποδίδεται εν μέρει στην ακτινοβολία *Stokes* και εν μέρει σε ένα ακουστικό κύμα στο υλικό. Όπως ήδη γνωρίζουμε σχετικά με την ακουστοοπτική περίθλαση Bragg, οποιοδήποτε διαδιδόμενο κύμα έχει μια διπλή συμπεριφορά κύματος σωματιδίου, και η αναπαράσταση υπό μορφή σωματιδίου ενός ακουστικού κύματος είναι το ισοδύναμο *φωνόνιο*. Έτσι, με την SBS, η ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου μοιράζεται ανάμεσα στο φωτόνιο *Stokes* που ακτινοβολείται και στο φωνόνιο που διαδίδεται στο υλικό.

Από εξωτερική άποψη, οι φυσικές εκδηλώσεις των δύο διαδικασιών είναι πολύ διαφορετικές. Η διαδικασία SBS είναι περίπου δύο τάξεις μεγέθους πιο αποδοτική από την διαδικασία SRS. Το διάγραμμα χωρικής κατευθυντικότητας της SRS είναι λίγο-πολύ ισοτροπικό, ενώ αυτό της SBS έχει ένα μηδενισμό στην πρόσθια διεύθυνση. Στην SRS αφού η ίνα από silica είναι ένα άμορφο γυαλί, παρατηρείται μια διεύρυνση των συχνοτήτων των μοριακών δονήσεων και επομένως μια διεύρυνση των συχνοτήτων *Stokes*, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.70. Στο σχήμα αυτό απεικονίζεται ο παράγοντας απολαβής Raman, που αποτελεί τη λειτουργική παράμετρο στη σχεδίαση ενός ενισχυτή Raman με ίνα, συναρτήσει της διαφοράς στη συχνότητα μεταξύ του προσπίπτοντος φωτός, που είναι το 1.0 μm, και του ακτινοβολούμενου φωτός Raman.

Στην SBS, υπάρχει μία μόνο τιμή της ταχύτητας του ήχου στο μέσο (ακόμα και αν αυτό είναι άμορφο υλικό), και γι' αυτό η ενέργεια του φωνονίου είναι κβαντισμένη σε μια στενή ενεργειακή στάθμη. Η συχνότητα του φωτός που επανακτινοβολείται είναι υποβιβασμένη ως προς αυτήν του προσπίπτοντος φωτός, κατά 11 GHz περίπου (για φως στο 1.5 μm), και το φάσμα είναι εξαιρετικά στενό ως προς τη συχνότητα, της τάξης των 20-30 MHz μόνο! Το ποσοστό υποβιβασμού της συχνότητας είναι ανάλογο προς το λόγο της ακουστικής ταχύτητας προς την ταχύτητα του φωτός

$$\frac{\Delta f}{f} = 2n \frac{V}{c} \quad (3.40)$$

όπου  $f$  είναι η συχνότητα άντλησης,  $n$  είναι ο δείκτης διάθλασης,  $V$  είναι η ταχύτητα του ήχου, και  $c$  είναι η ταχύτητα ελεύθερου-χώρου του φωτός.

Μετά από όλα αυτά, είναι φανερό ότι είναι δυνατό να κατασκευαστεί ένας ενισχυτής Raman σύμφωνα με τις αρχές του Σχήματος 3.59 (B) με άντληση από οποιοδήποτε άκρο, ενώ στον ενισχυτή Brillouin, η άντληση και το σήμα πρέπει να διαδίδονται αντίθετα. Φασματικά, ο ενισχυτής Raman θα έχει μια καμπύλη  $G(f)$  που θα μοιάζει με το Σχήμα 3.70, ενώ ο ενισχυτής Brillouin θα έχει φάσμα απολαβής  $G(f)$  εύρους λίγων μόνο MHz, σε μια συχνότητα που απέχει σταθερή απόσταση  $\Delta f$  από τη συχνότητα άντλησης, που δίνεται από την Εξίσωση 3.40.

Τόσο το φαινόμενο SRS όσο και το SBS είναι τόσο ασθενή από την άποψη της απολαβής που παρέχουν ανα Km, συγκριτικά με την εξαναγκασμένη εκπομπή σε έναν ενισχυτή με ίνα προσμείξεων, που οι ενισχυτές Raman και Brillouin θα πρέπει να χρησιμοποιούν πολύ μεγάλα μήκη ινών και πολύ υψηλές ισχείς άντλησης. Τυπικές τιμές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία είναι 10 χιλιόμετρα και 200 milliwatt για ενισχυτή Raman απολαβής 8.5 dB, και 30 χιλιόμετρα και 8 milliwatt για ενισχυτή Brillouin απολαβής 26 dB.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

---

---

1. Baack, Clemens. 1986. *Optical Wideband Transmission System*. Florida: CRC Press, Inc.
2. Kopp, Greg and Laura A. Pagano. 1995. "Polarization Put in Perspective" *Photonics Spectra*. February 1995: 103-107
3. Yeh, Chai. 1990. *Handbook of Fiber Optics: Theory and Applications*. New York: Academic Press, Inc.
4. Palladino, John R. 1990. *Fiber Optics: Communicating By Light*. Piscataway, NJ: Bellcore.
5. T. G. Hodgkinson, R. A. Harmon, and D. W. Smith, "Polarization-insensitive heterodyne detection using polarization scrambling", *Elect. Lrts.*, Vol. 27, no. 1, pp. 10-12, January, 1991.
6. S. Suzuki, M. Nishio, T. Numai, M. Fujiwara, M. Itoh, S. Murata, and N. shimosaka, "A photonic wavelength-division switching system using tunable laser diode filters", *IEEE/OSA Jour. Lightwave Tech.*, vol. 8, no. 5 pp.660-667, 1990
7. D. R. Smith, R. C. Hooper, P. P. Smyth, and D. Wake, *Elektron. Lett.* 18, 453(1982).
8. K. Kitamura, K. Ito, H. Matsuda, T. Kaneko, and Haneda, *Elektron Lett.* 27, 1453 (1991).
9. P. K. Runge, *IEEE Trans. Commun.* 24, 413 (1976)
10. L. Pophillat and A. Levasseur *Elektron Lett.* 27, 535 (1991)
11. C. Y. Kuo, M. L. Kao, J. S. French, R.E. Tench, and T. W. Cline, *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2, 911(1990).
12. Yamamoto, *Receiver performance evaluation of various digital optical modulation-demodulation systems in the 0,5-1,0 wavelength region*, pp 1251-1259, 1980

13. *P. E. Green and Ramaswami, "Direct detection lightwave systems: Why pay more?" IEEE LCS Magazine, vol. 1, no. 6, pp. 36-49, November, 1990.*
14. *J. Wozencraft and I. Jacobs, Principle of Communication Engineering, Wiley, 1965*
15. *J. C. Palais, Fiber Optic Communications, Prentice Hall 1988*
16. *J. Gowar, Optical Communications Systems, Prentice Hall 1984*
17. *<http://physix-iun.tripod.com>*

---

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.**

---

# **ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΠΡΩΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ**

*Σ' αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται αρκετοί τύποι οπτικών δικτύων πρώτης γενιάς. Όλα αυτά χρησιμοποιούν την οπτική ίνα σαν μέσο μετάδοσης, αλλά κάνουν την δρομολόγηση, την επεξεργασία και την μεταγωγή ηλεκτρονικά. Επίσης όλα αυτά τα δίκτυα είναι μονού μήκους κύματος. Θα δούμε την αρχιτεκτονική καθώς και τα φυσικά επίπεδα αυτών των δικτύων. Τα οπτικά δίκτυα πρώτης γενιάς χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα. Θα μελετήσουμε δίκτυα που είναι μέρος των τηλεπικοινωνιακών εγκαταστάσεων. Επίσης θα μελετήσουμε δίκτυα τα οποία χρησιμοποιούνται για να συνδέσουν προσωπικούς υπολογιστές με τα περιφερειακά τους, καθώς και δίκτυα περιοχής ή μητροπολιτικά δίκτυα.*

---

## 4.1 SONET / SDH

Το SONET (Synchronous Optical Network) είναι προς το παρόν το καθιερωμένο πρότυπο μετάδοσης και πολυπλεξίας σημάτων υψηλής ταχύτητας που χρησιμοποιείται στο δίκτυο κορμού στην Βόρειο Αμερική. Ένα στενά συσχετιζόμενο πρότυπο με αυτό, το SDH (Synchronous Digital Hierarchy), έχει υιοθετηθεί από Ευρώπη και Ιαπωνία.

**Πίνακας 4.1** Ποσοστό μετάδοσης για PDH.

Level	North America	Europe	Japan Mb/s
0	0.064 Mb/s	0.064 Mb/s	0.064 Mb/s
1	1.544 Mb/s	2.048 Mb/s	1.544 Mb/s
2	6.312 Mb/s	8.448 Mb/s	6.312 Mb/s
3	44.736 Mb/s	34.368 Mb/s	32.064 Mb/s
4	139.264 Mb/s	139.264 Mb/s	99.728 Mb/s

Για να καταλάβουμε τους παράγοντες που συνετέλεσαν στην εξέλιξη και την δημιουργία των προτύπων για το SONET και το SDH, πρέπει να κοιτάξουμε στο παρελθόν και να κατανοήσουμε το πώς γινόταν η πολυπλεξία στα δημόσια δίκτυα. Πριν από το SONET και το SDH, η υπάρχουσα δομή βασιζόταν στο PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy), γύρω στα μέσα του '60. (Η αναφορά αυτή γίνεται από τους διαχειριστές στη Βόρειο Αμερική)[1]. Εκείνο τον καιρό η μεγαλύτερη προσοχή εστιαζόταν στην πολυπλεξία κυκλωμάτων ψηφιακής φωνής. Ένα κύκλωμα αναλογικής φωνής με εύρος ζώνης 4kHz, μπορούσε να δειγματοληφθεί στα 8kHz και να γίνει η κβαντοποίηση με 8 bits ανά δείγμα, πράγμα που οδηγούσε σε έναν ρυθμό μετάδοσης 64kb/s για ένα κύκλωμα ψηφιακής φωνής. Αυτό έγινε το ευρέως αποδεκτό πρότυπο. Υψηλότερες ταχύτητες δεδομένων χαρακτηριζόταν σαν πολλαπλάσια αυτής της βασικής των 64kb/s. Διαφορετικά όμως πρότυπα προέκυψαν σε διαφορετικά μέρη του κόσμου γι' αυτές τις υψηλότερες ταχύτητες, καθώς μπορούμε να δούμε και στον πίνακα 4.1. Στην Βόρειο Αμερική, το 64kb/s σήμα ονομάζεται DS0 (Digital Signal 0), το 1.544kb/s DS1 κ.ο.κ. Στην Ευρώπη αυτή η ιεραρχία έχει ονομασίες E1, E2, E3 κ.ο.κ. Αυτοί οι ρυθμοί δεδομένων έχουν επικρατήσει σήμερα σε πολλά δίκτυα κορμού και συνήθως προσφέρονται σαν μισθωμένες γραμμές από τους παροχής στους πελάτες, πιο συχνά για τη διακίνηση φωνής και όχι δεδομένων.

Το PDH έπασχε από αρκετά προβλήματα, πράγμα που οδήγησε τους παροχής να ψάξουν για νέα πρότυπα γύρω από την μετάδοση και την πολυπλεξία, γύρω στα τέλη της δεκαετίας του '80.

1. Πολυπλεξία : Στο PDH είναι πολύ δύσκολο να ξεχωρίσεις μια ροή χαμηλής ταχύτητας, ας πούμε 2Mb/s, από μια υψηλής ταχύτητας, ας πούμε 140Mb/s, χωρίς σημαντική επεξεργασία του σήματος υψηλής ταχύτητας. Να σημειώσουμε ότι οι ρυθμοί μετάδοσης (bit rate) στην πλαισιόχρονη ιεραρχία (plesiochronous hierarchy) δεν είναι ακέραια πολλαπλάσια του βασικού ρυθμού των 64kb/s. Για παράδειγμα ένα DS1 σήμα είναι σχεδιασμένο για να μεταφέρει  $24 * 64\text{kb/s}$  σήματα, αλλά ο ρυθμός δεδομένων του (1.544Mb/s) είναι ελαφρώς υψηλότερος από τα  $24 * 64\text{kb/s}$ . Αυτό συμβαίνει γιατί τα ρολόγια για χαμηλότερους ρυθμούς δεδομένων δεν είναι απολύτως συγχρονισμένα και μπορεί να χρειαστούν παραπάνω bits στο πολυπλεγμένο σήμα για να τακτοποιηθούν οι καθυστερήσεις μεταξύ των διαφορετικών ρολογιών. Αυτό κάνει την πολυπλεξία και την αποπολυπλεξία στο PDH μια διαδικασία αρκετά πολύπλοκη. Το SONET/SDH, έχει από την άλλη πολύ καλύτερες μεθόδους πολυπλεξίας, πράγμα που κάνει εύκολο τον διαχωρισμό ροών χαμηλής ταχύτητας από ροές υψηλής ταχύτητας. Όλα τα ρολόγια στο δίκτυο είναι απολύτως συγχρονισμένα με ένα “master clock” και σαν συνέπεια οι ρυθμοί μετάδοσης στο SONET/SDH είναι ακέραια πολλαπλάσια του βασικού των 64kb/s. Αυτό κάνει τον σχεδιασμό των πολυπλεκτών και αποπολυπλεκτών στο SONET πολύ πιο εύκολο απ’ ότι των αντίστοιχων στο PDH.

2. Διαχείριση : Τα πρότυπα SONET και SDH παρέχουν εκτενείς διαχειριστικές πληροφορίες για την παρακολούθηση της ποιότητας της πληροφορίας, σε αντίθεση με το PDH.

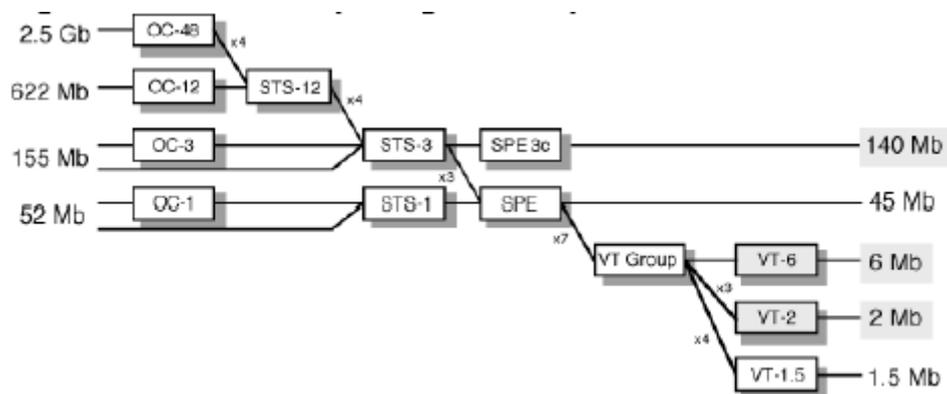
3. Εσωτερική λειτουργία : Παρόλο που το PDH καθόρισε μεθόδους πολυπλεξίας, δεν καθόρισε ένα συγκεκριμένο format για την εκπομπή. Έτσι οι παροχείς χρησιμοποιούν διαφορετική κωδικοποίηση στις γραμμές, οπτικές επαφές κ.τ.λ., πράγμα που έκανε πολύ δύσκολη τη διασύνδεση του εξοπλισμού μιας επιχείρησης με τον εξοπλισμό μιας άλλης. Το SONET και SDH απέφυγαν το πρόβλημα αυτό καθορίζοντας πρότυπες οπτικές επαφές που διευκολύνουν την συνεργασία του εξοπλισμού μεταξύ διαφορετικών επιχειρήσεων. Δυστυχώς, υπάρχουν ακόμα προβλήματα στο SONET και SDH, λειτουργίες που δεν έχουν καθιερωθεί, όπως το κανάλι δεδομένων επικοινωνίας που χρησιμοποιείται για λόγους διαχείρισης του δικτύου, πράγμα που κάνει δύσκολη την εγκατάσταση εξοπλισμού στο δίκτυο από διαφορετικούς παροχής.

4. Δικτύωση : Υπάρχουν πρότυπα στο SONET/SDH που καθορίζουν συγκεκριμένες τοπολογίες και συγκεκριμένα σχέδια οπτικής προστασίας σ’ αυτές τις τοπολογίες, για την παροχή υπηρεσιών υψηλής ποιότητας. Σαν αποτέλεσμα, ο χρόνος ανάνηψης από κάποιο σφάλμα σε ένα SONET/SDH δίκτυο είναι πολύ μικρότερος – λιγότερο από 60ms – από τον χρόνο ανάνηψης σε ένα PDH, που κυμαίνεται από λίγα δευτερόλεπτα έως και λεπτά.

## 4.2 Πολυπλεξία

Ένα πολυπλέκτης PDH απλά οδηγεί τα bits από τα χαμηλότερης ταχύτητας κανάλια σε ένα υψηλής ταχύτητας «συγκεντρωτικό» κανάλι. Όπως είπαμε προηγουμένως, τα ρολόγια στα κανάλια χαμηλής ταχύτητας μπορεί να μην είναι συγχρονισμένα, έτσι ο σχεδιασμός πολυπλέκτη και αποπολυπλέκτη στα PDH δίκτυα είναι μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία.

Στα SONET και SDH δίκτυα γίνεται μια πιο έξυπνη διαδικασία πολυπλεξίας, που μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί και στα σημερινά ευρείας κλίμακας ολοκληρωμένα κυκλώματα (VLSI), όπως μπορούμε να δούμε και στο σχήμα 4.2. Παρόλο που τα SONET και SDH είναι βασικά όμοια, οι όροι που χρησιμοποιούνται στο καθένα είναι διαφορετικοί και θα χρησιμοποιήσουμε το παράδειγμα του SONET σε ότι ακολουθεί. Μιας χαμηλής ταχύτητας ροή δεδομένων στο PDH ταξινομείται μέσα σε ένα SPE (Synchronous Payload Envelope) ή Synchronous Container σε ένα SDH. Μια ομάδα από αρχικά bytes ονομαζόμενα overhead τοποθετούνται στο SPE. Το path overhead παραμένει απaráλλακτο έως να φτάσει τα SPE στον προορισμό του και τα δεδομένα PDH να αποσπαστούν από αυτό. Αυτή η κεφαλίδα μας επιτρέπει να καταγράφουμε την ροή PDH από άκρο σ' άκρο και να μετράμε σημαντικές παραμέτρους όπως το bit error rate – κάτι πολύ δύσκολο σε ένα σύστημα PDH. Το SPE μαζί με την κεφαλίδα του καλείται virtual tributary (VT) στο SONET και virtual container (VC) στο SDH. Ο όρος virtual (εικονικό) χρησιμοποιείται γιατί η κεφαλίδα και το SPE μπορεί να τοποθετηθούν σε διάφορα σημεία μέσα σε ένα frame. Ένα frame διαρκεί 125μs. Αυτός ο χρόνος αναλογεί σε δειγματοληψία 8kHz σε ένα κανάλι φωνής.

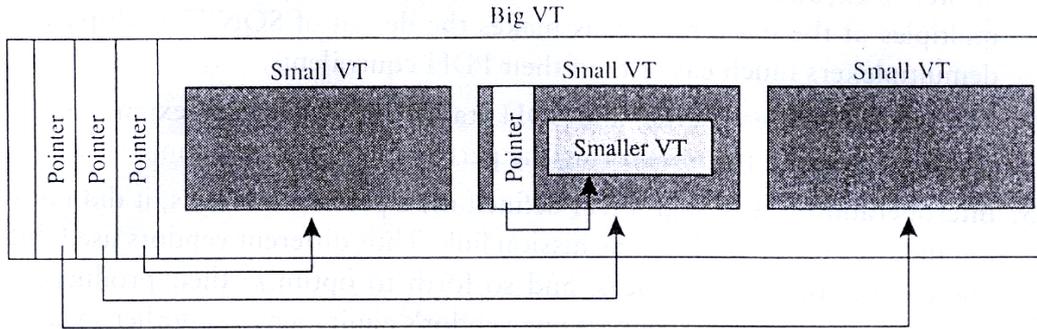


Σχήμα 4.1 Η Ιεραρχία στη πολυπλεξία SONET.

Πολλά μικρά VT μπορούν να πολυπλεχθούν σε ένα μεγαλύτερο VT. Αυτή η ιεραρχική δομή πολυπλεξίας μπορεί να φανεί στο σχήμα 4.2. Κάθε VT αποτελείται από την κεφαλίδα ακολουθούμενη από το περιεχόμενο. Η κεφαλίδα περιλαμβάνει έναν δείκτη για κάθε μικρότερο VT που είναι πολυπλεγμένο στο μεγαλύτερο VT στο περιεχόμενό του. Ένα μικρό VT μπορεί επίσης να περιέχει έναν αριθμό μικρότερων VT, με δείκτες για καθένα από αυτά. Αυτή η δομή κάνει ιδιαίτερα εύκολο να διαχωριστεί μιας χαμηλής ταχύτητας ροή από μια υψηλής ταχύτητας.

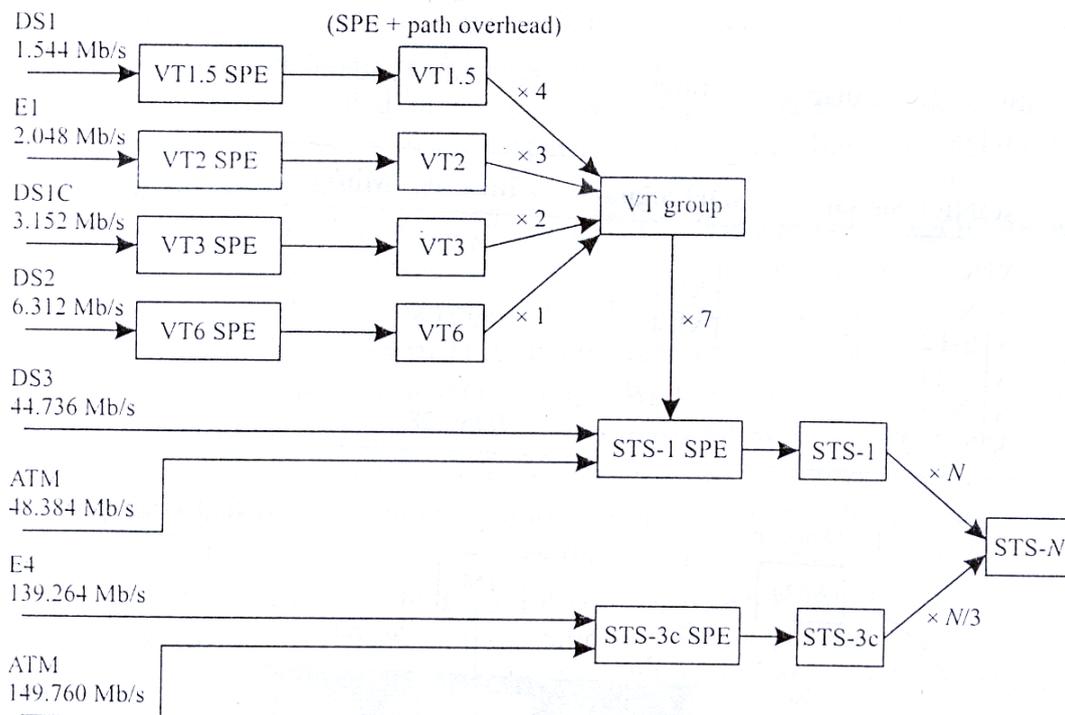
Τα VT και VC σύμφωνα με τα πρότυπα, έχουν καθοριστεί να κουβαλάνε μια μεγάλη ποικιλία φορτίων. Στο σχήμα 4.3 μπορούμε να δούμε το σχεδιάγραμμα για το PDH καθώς και για ένα ATM (Asynchronous Transfer Mode) δίκτυο. Κάθε VT είναι έτσι σχεδιασμένο ώστε να έχει επαρκές εύρος για την μεταφορά του φορτίου του. Στο SONET τα VT έχουν καθοριστεί σε τέσσερα μεγέθη : VT1.5 , VT2 , VT3 και VT6. Αυτά τα VT είναι σχεδιασμένα για μεταφορές 1.5 , 2 , 3 και 6Mb/s. Εφτά τέτοια VT groups παρεμβάλλονται από ένα byte για να δημιουργήσουν το βασικό SONET SPE. Για το SONET, ο βασικός ρυθμός μετάδοσης είναι τα 51.84Mb/s, ονομαζόμενος ως STS – 1 (synchronous transport signal level 1). Μεγαλύτερης ταχύτητας σήματα (STS – N) δημιουργούνται παρεμβάλλοντας τα bytes από N STS – 1, των οποίων τα πλαίσια στοιχίζονται. Μερικές φορές είναι απαραίτητο να δημιουργήσουμε υψηλότερης ταχύτητας σήματα, όχι σε SONET αλλά για παράδειγμα σε ένα ATM με 150Mb/s, μέσα σε SPE. Γι' αυτό το σκοπό, ένα STS – Nc σήμα με «κλειδωμένο» φορτίο έχει επίσης καθοριστεί σαν πρότυπο. Το κλειδωμένο φορτίο υποδηλώνει ότι αυτό το σήμα δεν μπορεί να αποπολυπλεχθεί σε χαμηλότερης ταχύτητας ροές. Για παράδειγμα ένα σήμα σε ATM με 150Mb/s έχει καθοριστεί (σταμπαριστεί) με ένα STS – 3c σήμα. Τα STS – Nc έχουν καθοριστεί σαν πρότυπα για μια μεγάλη ποικιλία σημάτων, συμπεριλαμβανομένων και δικτύων ATM και FDDI (Fiber Distributed Data Interface).

Οι προς το παρόν χρησιμοποιούμενοι ρυθμοί για SONET και SDH, παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2. Εδώ να σημειώσουμε ότι το σήμα STS είναι ένα ηλεκτρικό σήμα και σε πολλές περιπτώσεις (ιδιαίτερα στις υψηλές ταχύτητες) μπορεί να μην ανιχνευτεί από έναν εξοπλισμό για SONET. Η διασύνδεση με τον εξοπλισμό είναι οπτική και έτσι είναι αναγκαία μια «κομματιασμένη» οπτική μορφή του σήματος STS. Το κομματιασμένο (scrambling) γίνεται για την αποφυγή κενών της τάξεως 0s και 1s στην ροή δεδομένων. Η οπτική επαφή που ανιχνεύει το STS – 3 ονομάζεται OC – 3 (optical carrier – 3) και παρόμοιες οπτικές επαφές έχουν καθοριστεί οι OC – 12, OC – 48 και OC – 192 για STS – 12, STS – 48 και STS – 192 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.2 Η ιεραρχική δομή που χρησιμοποιείται στα SONET και SDH.

Για το SDH, ο βασικός ρυθμός μετάδοσης είναι 155Mb/s και ονομάζεται STM – 1 (synchronous transport module – 1). Υψηλότερης ταχύτητας σήματα ορίζονται ανάλογα με το SONET, όπως μπορούμε να δούμε και στον πίνακα 4.2.

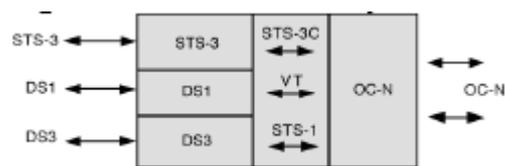


Σχήμα 4.3 Η χαρτογράφηση των PDH ροής χαμηλής ταχύτητας σε εικονικά tributaries.

### 4.3 Συστατικά του SONET/SDH

Το σχήμα 4.6 δείχνει διάφορους τύπους εξοπλισμού για SONET[2] εγκατεστημένους σε δίκτυο. Το SONET εγκαθίσταται σε τρεις τύπους δικτύων : σε δίκτυο δακτυλίου, σε γραμμικές εγκαταστάσεις και

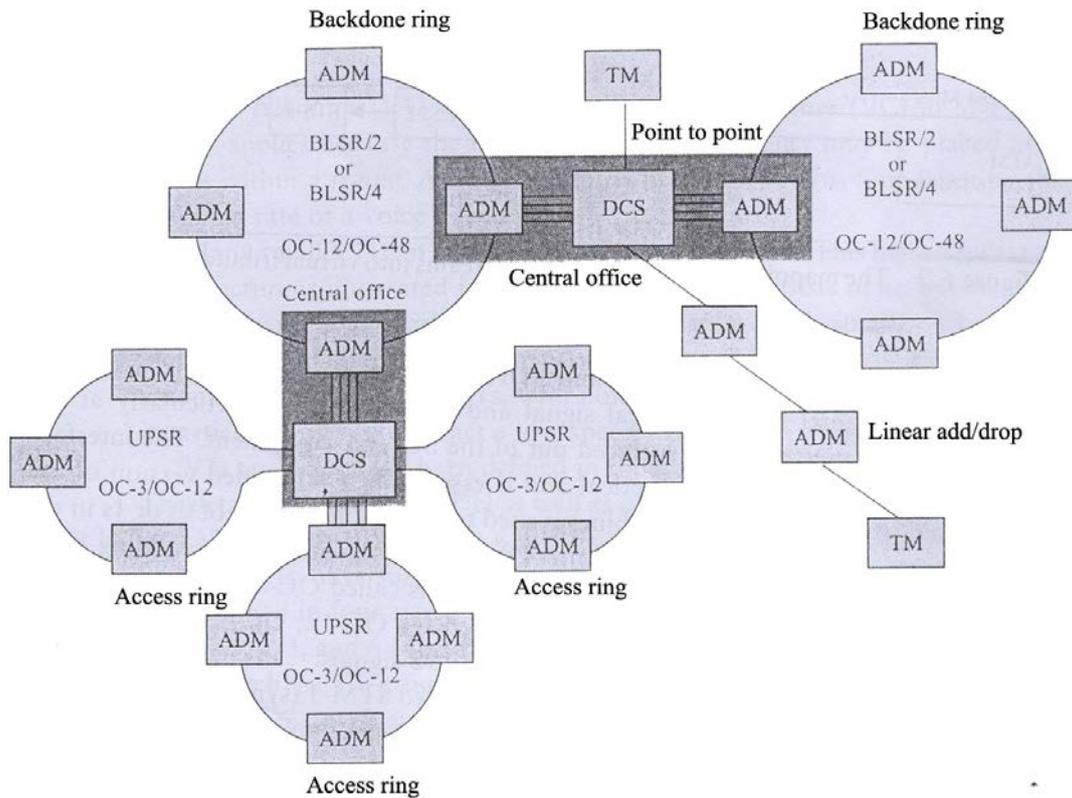
σε συνδέσεις σημείο προς σημείο. Οι πρώτες εγκαταστάσεις ήταν της μορφής σημείο προς σημείο και αυτή η τοπολογία χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα για πολλές εφαρμογές. Σ' αυτή την περίπτωση οι κόμβοι και τα τερματικά τη σύνδεσης ονομάζονται TMs (terminal multiplexers). Τα TMs πολλές φορές αναφέρονται και σαν LTE (line terminating equipment). Σε πολλές περιπτώσεις, είναι αναγκαίο να ξεχωρίσουμε μια ή περισσότερες χαμηλής ταχύτητας ροές από μια υψηλής ταχύτητας, αλλά και αντίθετα να ενσωματώσουμε μια ή περισσότερες χαμηλής ταχύτητας, σε μια υψηλής ταχύτητας ροή. Αυτή η λειτουργία πραγματοποιείται από ένα ADM (add / drop multiplexer). Για παράδειγμα ένα OC – 48 ADM μπορεί να ξεχωρίσει και φορτώσει ροές OC – 12 ή OC – 3 από/σε μια ροή OC – 48. Παρομοίως ένα OC – 3 ADM, μπορεί να ξεχωρίσει ροή DS3 από ροή OC – 3 και ανάποδα. Τα ADM χρησιμοποιούνται ευρέως στη δομή του SONET. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη μέση μιας σημείο προς σημείο σύνδεσης, ανάμεσα από τα TMs, για να ολοκληρώσουν μια γραμμική διαμόρφωση.



**Σχήμα 4.4** Τερματικός πολυπλέκτης.

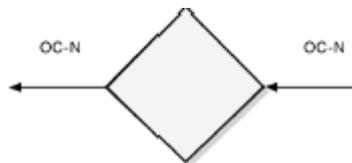
Μια προστεθείς λειτουργία που έχει γίνει σημαντικός παράγων στη διαμόρφωση των SONET είναι αυτή της δυνατότητας παροχής υπηρεσιών ακόμη και σε περιπτώσεις σφαλμάτων, όπως κόψιμο της ίνας ή βλάβης στον εξοπλισμό. Η πιο κοινή τοπολογία χρησιμοποιούμενη γι' αυτόν τον σκοπό είναι ο δακτύλιος. Οι δακτύλιοι προσφέρουν σε υψηλό βαθμό εγγύηση για την παροχή υπηρεσιών σε περίπτωση βλάβης, ενώ έχουν αρκετά απλή τοπολογία. Οι δακτύλιοι κατασκευάζονται και χρησιμοποιούν ADM τα οποία εκτός από τη λειτουργία πολυπλεξίας και αποπολυπλεξίας, συμβάλλουν στον μηχανισμό προστασίας από βλάβες. Συνήθως, ο εξοπλισμός SONET μπορεί να ρυθμιστεί να δουλεύει και στις τρεις περιπτώσεις : ADM σε δακτύλιο, γραμμικά με ADM ή σαν τερματικός πολυπλέκτης.

Οι δακτύλιοι χρησιμοποιούνται στα μέρη πρόσβασης του δικτύου καθώς και στο δίκτυο κορμού για τη διασύνδεση των κεντρικών γραφείων. Σήμερα οι περισσότεροι δακτύλιοι πρόσβασης τρέχουν με OC – 3 και OC – 12 ταχύτητες, ενώ οι δακτύλιοι κορμού με OC – 12, OC – 48 και OC – 192. Προφανώς αυτές οι ταχύτητες δακτυλίων θα αυξηθούν στο μέλλον. Δύο τύποι αρχιτεκτονικής δακτυλίου χρησιμοποιούνται : η UPSR (unidirectional path – switched rings) και η BLSR (bidirectional line – switched rings).



**Σχήμα 4.5** Στοιχεία της δομής ενός SONET. Παρουσιάζονται πολλαπλές διαφορετικές διατάξεις SONET, συμπεριλαμβανομένου και του point-to-point, της γραμμικής προσθήκης/πτώσης και διαμορφώσεις δακτυλιδιού. Το σχήμα επίσης εξηγεί τον ρόλο ενός DCS στην διάταξη του SONET, στην διασύνδεση ροής χαμηλής ταχύτητας, στη διασύνδεση πολλαπλών δακτυλίων και να εξυπηρετεί σαν κόμβος στα δακτύλια από μόνο του.

Η BLSR μπορεί να χρησιμοποιεί δύο (BLSR/2) ή τέσσερις (BLSR/4) ίνες. Σε γενικές γραμμές η UPSR χρησιμοποιείται στα σημεία πρόσβασης του δικτύου για τη διασύνδεση κόμβων σε ένα hub που βρίσκεται στα κεντρικά γραφεία, ενώ η BLSR χρησιμοποιείται για τη διασύνδεση πολλών κεντρικών γραφείων.



**Σχήμα 4.6** Επαναλήπτης.

Άλλο ένα σημαντικό συστατικό στη δομή του SONET είναι το DCS (digital cross connect). Ένα DCS χρησιμοποιείται για να διευθύνει όλες τις εγκαταστάσεις εκπομπής στα κεντρικά γραφεία. Πριν από τη χρήση του DCS, τα ατομικά DS1 και DS3 οδηγούνταν σε ένα patch panel και η δουλειά γινόταν χειροκίνητα. Παρόλο που αυτό λειτουργούσε ικανοποιητικότερα για έναν μικρό αριθμό ροών σημάτων,

δεν θα μπορούσε να δουλέψει το ίδιο καλά και σήμερα που στα κεντρικά γραφεία οι ροές είναι πλέον χιλιάδες. Ένα DCS αυτοματοποιεί την διαδικασία αυτή και αντικαθιστά τα patch panels πλέκοντας (cross connecting) αυτές τις ατομικές ροές, υπό τον έλεγχο κάποιου λογισμικού. Επίσης παρακολουθεί την καλή λειτουργία του δικτύου και μπορεί να αποκτήσει τη δυνατότητα πολυπλεξίας. Τα DCS αρχικά επεξεργάζονταν μόνο PDH ροές, αλλά στη συνέχεια προσαρμόστηκαν και για SONET. Μπορούν να χειριστούν έναν μεγάλο αριθμό θυρών, για παράδειγμα μέχρι και 2048 DS3 θύρες. Τα σημερινά DCS έχουν τη δυνατότητα να δρομολογούν αυτόνομες ροές σε DS1 και DS3 επίπεδα. Η ροή στο DCS με ταχύτητα DS1 ονομάζεται «wideband» και με DS3 ταχύτητα «broadband». Σήμερα τα DCS έχουν OC – 3 και OC – 12 θύρες, αλλά αναμφίβολα σύντομα θα έχουν και πολύ πιο γρήγορες. Τα DCS χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση δακτυλίων SONET. Έχουν επίσης αναπτυχθεί για να ενσωματώνουν και τις λειτουργίες των ADMs. Έτσι τα DCS μπορούν να συνδεθούν με ADM για να παρέχουν συνδεσιμότητα μεταξύ των δακτυλίων, καθώς και να είναι μέρη των δακτυλίων και τα ίδια.

**Πίνακας 4.2** Ρυθμός μετάδοσης για SONET/SDH

<b>SONET Signal</b>	<b>SDH Signal</b>	<b>Bit Rate (Mb/s)</b>
STS-1		51.84
STS-3	STM-1	155.52
STS-12	STM-4	622.08
STS-24		1244.16
STS-48	STM-16	2488.32
STS-198	STM-64	9953.28

«Grooming» είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει το πώς διαφορετικές ροές δρομολογούνται και ‘πακετάρονται’ μαζί σε μιας υψηλότερης ταχύτητας ροή. Το επίπεδο SONET συνήθως κάνει το grooming σε υψηλότερες ταχύτητες, από OC – 3 και πάνω, μερικές φορές συμπεριλαμβάνοντας και της χαμηλότερης ταχύτητας ροές DS1. Χαμηλότερου επιπέδου grooming σε DS1 και DS3 γίνεται κατ’ εξοχήν από τα DCS.

#### **4.4 Το φυσικό επίπεδο του SONET/SDH**

Μια ποικιλία συνδέσεων του φυσικού επιπέδου έχουν καθοριστεί για το SONET/SDH[3], ανάλογα με τον ρυθμό δεδομένων και τις αποστάσεις, καθώς μπορούμε να δούμε και στον πίνακα 4.3. Η ποικιλία αυτή περιλαμβάνει από LEDs και MLM (multilongitudinal mode) lasers στα 1310nm και πολύτροπες ίνες για μικρές αποστάσεις, έως και SLM (single-longitudinal mode) lasers στα 1550nm με μονότροπες

ίνες για μεγαλύτερες αποστάσεις και ταχύτητες. Το φυσικό επίπεδο επίσης χρησιμοποιεί το scrambling για το οποίο έγινε λόγος προηγουμένως. Τα συστήματα έχουν κατηγοριοποιηθεί ως εξής : SR (short reach), IR (intermediate reach) ή LR (long reach). Τα SR συστήματα έχουν απώλεια λιγότερη των 7dB, τα IR έχουν απώλεια λιγότερη των 12dB και τα LR έχουν απώλεια μεταξύ 10 και 28dB με OC – 3 ρυθμούς και μεταξύ 10 και 24dB με OC – 12 και OC – 48 ρυθμούς δεδομένων.

**Πίνακας 4.3** Διαφορετική φυσική διάταξη SONET

<b>Ρυθμός Μετάδοσης Δυαδικών Ψηφίων</b>	<b>Απώλεια</b>	<b>Μήκος Κύματος (nm)</b>	<b>Τύπος Ίνας</b>	<b>Πομπός</b>
OC-3	SR	1310	MMF	LED
			SMF	LED/MLM
	IR	1310	SMF	MLM
OC-12	LR	1310/1550	SMF	MLM/SLM
			SMF	MLM/SLM
	SR	1310	SMF	LED/MLM
			SMF	MLM
			SMF	SLM
LR	1310	SMF	MLM/SLM	
		SMF	SLM	
OC-48	SR	1310	SMF	MLM
	IR/LR	1310/1550	SMF	SLM

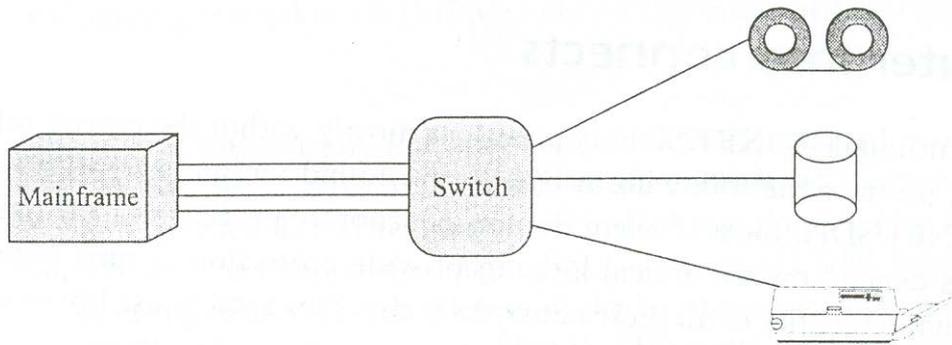
Όλα αυτά καθορίζονται σε όρους απώλειας παρά απόστασης, γιατί η απώλεια περιλαμβάνει και την εξασθένηση της ίνας αλλά και άλλες απώλειες λόγω συνδετήρων, κολλημάτων κ.τ.λ. Μπορούμε να πάρουμε κάτι ανάλογο για την απόσταση υποθέτοντας απώλειες 0.25dB/km στα 1550nm και 0.5dB/km στα 1310nm. Έτσι, ένα OC – 48 LR σύστημα ποικίλει σε αποστάσεις μεταξύ 20 και 48 χιλιόμετρα στα 1310nm και μεταξύ 40 και 96 χιλιομέτρων στα 1550nm. Αυτά τα πρότυπα καθιερώθηκαν πριν κάνουν την εμφάνισή τους οι οπτικοί ενισχυτές. Με τους οπτικούς ενισχυτές, μπορούμε να δούμε συστήματα LR που να μην χρησιμοποιούν επανεκπομπή στις προαναφερόμενες αποστάσεις, αλλά σε πολύ μεγαλύτερες. Συνήθως αυτά τα συστήματα αναφέρονται και σαν ULR systems (ultra long reach systems).

#### 4.5 Διασύνδεση υπολογιστών

Παρόλο που το SONET/SDH έχει επικρατήσει στη δομή των δικτύων των φορέων σήμερα, τα περισσότερα από τα παρακάτω δίκτυα μπορούν να βρεθούν στις ενδοεταιρικές εγκαταστάσεις. Αντιθέτως με το SONET/SDH, τα περισσότερα από αυτά δεν ενσωματώνουν μηχανισμούς προστασίας και έτσι η

προστασία από σφάλματα εξαρτάται από το οπτικό επίπεδο. Τα κοινά χαρακτηριστικά όλων αυτών των δικτύων είναι ότι ως επί το πλείστον χρησιμοποιούν φθηνά οπτικά συστατικά και λειτουργούν σε μέτριες ταχύτητες.

Τα τρία δίκτυα που περιγράφονται παρακάτω χρησιμοποιούνται πρωταρχικά για τη διασύνδεση υπολογιστών με άλλους υπολογιστές ή με τα περιφερειακά τους όπως δίσκους, κασέτες, εκτυπωτές κ.α. Το τέταρτο, το FDDI, είναι ένα δίκτυο μητροπολιτικό.



**Σχήμα 4.7** Η αρχιτεκτονική ESCON.

Τα χαρακτηριστικά αυτών των δικτύων συνοψίζονται στον πίνακα 4.4. Μαζί με το FDDI, θα περιγράψουμε και δυο άλλες τεχνολογίες δικτύου. Το ATM και το IP.

**Πίνακας 4.4** Διαφορετικά δίκτυα πρώτης γενιάς που χρησιμοποιούν δίκτυο επιχείρησης σε έναν μεγάλο οργανισμό

Network	Topology	Baud (Mbaud)	Rate	Transmitter
ESCON	Mesh	200	LED/MMF	MLM/SMF
			LED/MMF	MLM/SMF
FDDI	Ring	125	LED/MMF	MLM/SMF
			LED/MMF	MLM/SMF
HIPPI(serialized)	Mesh	1.200	MLM/SMF	
Fiber Channel	Mesh	1.062.5	MLM/SMF	
		531.25		
		265.625		

## 4.6 ESCON

Το ESCON (Enterprise Serial Connection) δημιουργήθηκε από την IBM για να αντικαταστήσει τις βαριές, χαμηλής ταχύτητας, περιορισμένες σε αριθμό, φτιαγμένες από χαλκό συνδέσεις εισόδου / εξόδου στα mainframes. Χρησιμοποιείται ευρέως σε εγκαταστάσεις μεγάλων mainframes. Η συνολική αρχιτεκτονική ενός ESCON φαίνεται στο σχήμα 4.7. Ένα mainframe μπορεί να έχει εκατοντάδες κανάλια εισόδου / εξόδου ESCON. Αυτά τα κανάλια μπορούν να συνδέονται με άλλα mainframes ή περιφερειακές συσκευές. Η αρχιτεκτονική ESCON περιλαμβάνει ένα ηλεκτρονικό switch ονομαζόμενο “ESCON director”, το οποίο επιτρέπει την διασύνδεση συσκευών με έναν ευέλικτο τρόπο.

Σε παλαιότερες εγκαταστάσεις, το συνολικό δίκτυο βρισκόταν μέσα σ’ ένα κτίριο ή campus, αλλά με τον καιρό και καθώς οι ανάγκες αυξάνουν, αυτό αναπτύσσεται πλέον σε μεγαλύτερες περιοχές (μητροπολιτικά) για μια πληθώρα λόγων.

Ο ρυθμός δεδομένων ανά κανάλι ESCON είναι 200Mb/s. Χρησιμοποιούνται δίοδοι LED στα 1.3μm με πολύτροπες οπτικές ίνες αν το μήκος της σύνδεσης είναι λιγότερο από 3 χιλιόμετρα. Για μεγαλύτερες αποστάσεις, έως και 20 χιλιόμετρα, χρησιμοποιούνται MLM lasers στα 1.3 μm πάνω σε μονότροπη οπτική ίνα.

## 4.7 Fiber Channel

Το Fiber Channel έχει αναπτυχθεί τελευταία σαν πρότυπο και χρησιμοποιείται για την ίδια γκάμα εφαρμογών με τον ESCON. Το συγκεκριμένο, επιτρέπει ρυθμού δεδομένων του ωφέλιμου φορτίου (χρήσιμα δεδομένα) της τάξης των 200, 400 ή 800Mb/s. Ο τελευταίος ρυθμός δεδομένων αναμένεται να είναι και ο επικρατέστερος. Στον υψηλότερο ρυθμό δεδομένων, χρησιμοποιούνται MLM lasers στα 1.3 μm πάνω σε μονότροπη οπτική ίνα, ακόμα και για μικρές αποστάσεις. Το Fiber Channel μόλις έχει αρχίσει να εγκαθίσταται σε επιχειρήσεις. Όπως και στο ESCON, η αρχιτεκτονική Fiber Channel περιλαμβάνει θύρες εισόδου / εξόδου για υπολογιστές και περιφερειακά, καθώς και ένα ηλεκτρονικό switch.

Το Fiber Channel χρησιμοποιεί την ίδια κωδικοποίηση με το ESCON. Αυτό μαζί με κάποιες ακόμα κεφαλίδες στα πακέτα, σημαίνει ότι οι πραγματικοί ρυθμοί μετάδοσης πάνω στην οπτική ίνα που ανταποκρίνονται στο ωφέλιμο φορτίο των 200, 400 και 800Mb/s είναι 265.625, 531.25 και 1062.5Mb/s.

Οι ρυθμοί που παίρνουμε μετά την γραμμική κωδικοποίηση συνήθως αναφέρονται σαν ρυθμοί «baud». Έτσι λέμε πως ο ρυθμός μετάδοσης είναι 1062.5Mbaud και όχι 1062.5Mb/s.

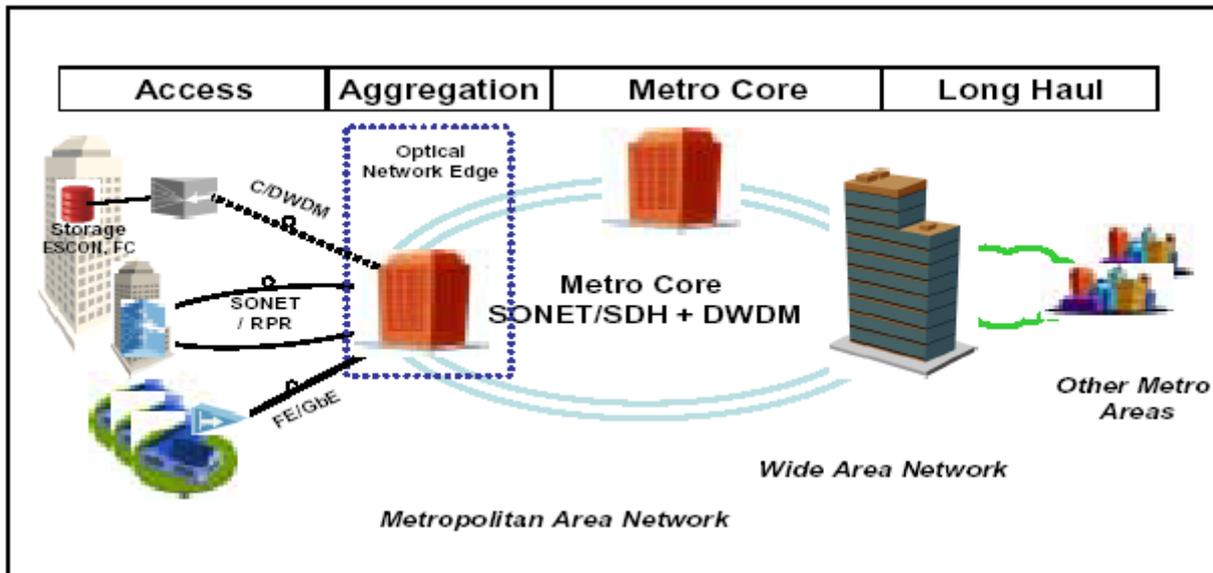
## 4.8 HIPPI

Το HIPPI (high performance parallel interface) είναι ένα πρότυπο παράλληλης ηλεκτρικής εισόδου / εξόδου σύνδεσης στα 800Mb/s. Λόγω της *λοξής κίνησης ρολογιών*, η μέγιστη απόσταση περιορίζεται στα 25 μέτρα. Για μεγαλύτερες αποστάσεις, το HIPPI γίνεται σειριακό και μεταδίδεται πάνω σε μονότροπη οπτική ίνα. Ένα νέο πρότυπο ονομαζόμενο «Serial HIPPI», το οποίο περιλαμβάνει οπτική σύνδεση στα 1.2Gbaud, έχει καθοριστεί πρόσφατα γι' αυτό το σκοπό. Το HIPPI, προηγείται χρονικώς του Fiber Channel και έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές εγκαταστάσεις supercomputer. Όπως το ESCON και το Fiber Channel, το δίκτυο HIPPI περιέχει χρήστες και περιφερειακά συνδεδεμένα μέσω HIPPI switches και σε πολλές περιπτώσεις σειριακές συνδέσεις οπτικών ινών.

## 4.9 Μητροπολιτικά δίκτυα

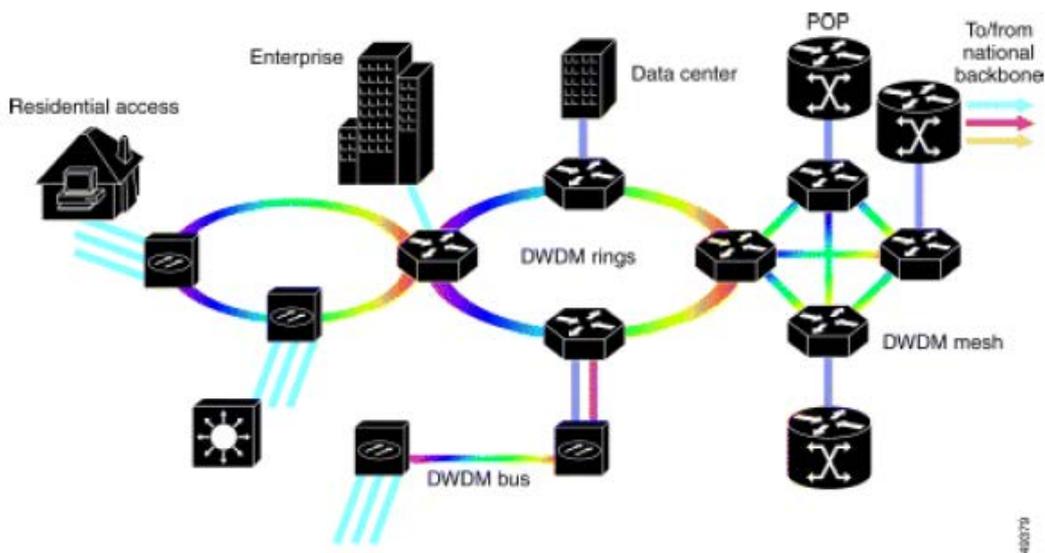
### 4.9.1 FDDI

Το FDDI (fiber distributed data interface) είναι ένα πρότυπο για μητροπολιτικά δίκτυα, που λειτουργεί στα 100Mb/s πάνω σε πολύτροπες ή μονότροπες οπτικές ίνες. Συνήθως χρησιμοποιεί τοπολογία δύο οπτικών δακτυλίων, όπως το SONET BLSR/2s και υιοθετεί παρόμοιους μηχανισμούς προστασίας. Είναι μια προέκταση μεγαλύτερης ταχύτητας και οπτικής ίνας, του γνωστού και ευρέως χρησιμοποιούμενου προτύπου δικτύου περιοχής token ring. Το μέγιστο μήκος μεταξύ δυο σταθμών σε έναν δακτύλιο FDDI περιορίζεται στα 2 χιλιόμετρα όταν χρησιμοποιείται πολύτροπη ίνα. Το πρότυπο FDDI σχεδιάστηκε με γνώμονα το μικρό κόστος, κι έτσι τα χαρακτηριστικά του είναι φτιαγμένα για χρησιμοποίηση LED πομπών στα 1.3μm πάνω σε πολύτροπη οπτική ίνα και χρήση δεκτών διόδων pin. Παρ' όλα αυτά, τα laser και οι μονότροπες ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν, πράγμα που μπορεί να αυξήσει την απόσταση μεταξύ δυο σταθμών μέχρι και 40 χιλιόμετρα. Η μέση ελάχιστη δύναμη εξόδου που έχει καθοριστεί για τους πομπούς είναι -20dBm και η μέση ελάχιστη εισόδου του δέκτη είναι -31dBm, έτσι ώστε μια απώλεια των 11dB είναι επιτρεπτή. Εφόσον τον μήκος της σύνδεσης δεν είναι πάνω από 2 χιλιόμετρα, οι απώλειες αραίωσης (attenuation loss), δεν είναι πάνω από 5dB (ακόμα και στα 2.5dB/km) έτσι ώστε το περιθώριο για περαιτέρω απώλειες να μεγαλώνει. Απώλειες οφειλόμενες σε συνδετήρες, ενώσεις, κολλήματα της οπτικής ίνας και άλλα παρόμοια.



Σχήμα 4.8 Ένα μητροπολιτικό δίκτυο.

Το FDDI χρησιμοποιεί γραμμική κωδικοποίηση για να αποφύγει long runs από 0 και 1 και να πετύχει ως ένα βαθμό ισορροπία DC. (Ισορροπία DC είναι η όσο το δυνατόν εξίσωση του πλήθους των 0 και 1 στην ακολουθία εκπομπής). Έτσι, ο πραγματικός ρυθμός μετάδοσης στην οπτική ίνα είναι 125Mbaud. Αντιθέτως με την (8,10) γραμμική κωδικοποίηση που χρησιμοποιείται στο Fiber Channel, η (4,5) γραμμική κωδικοποίηση του FDDI δεν πετυχαίνει απόλυτη ισορροπία DC – υπάρχουν σειρές δεδομένων εισόδου που μπορεί να προκαλέσουν χειρότερη κατάσταση DC ανισορροπίας της τάξης του 10%. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα απώλειες ενέργειας τάξεως 1dB, που πρέπει να υπολογιστεί στον αρχικό σχεδιασμό της σύνδεσης.



Σχήμα 4.9 Μητροπολιτικό οπτικό δίκτυο επόμενης γενιάς.

#### 4.9.2 ATM

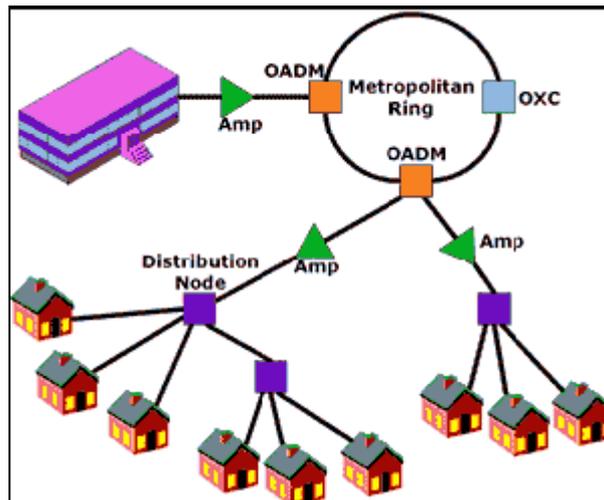
Τα δίκτυα φωνής και τα δίκτυα δεδομένων έχουν παραδοσιακά διαχωριστεί, παρόλο που σχεδόν ολόκληρο το τηλεφωνικό δίκτυο είναι ψηφιακό. Το ATM (Asynchronous Transfer Mode)[3] είναι ένα πρότυπο δικτύου που αναπτύχθηκε με πολλούς στόχους, ένας εκ των οποίων ήταν η ολοκλήρωση των δικτύων φωνής και δεδομένων. Ένα ATM δίκτυο χρησιμοποιεί πακέτα ή αλλιώς “cells” με το προκαθορισμένο μέγεθος των 53 bytes. Αυτό το μέγεθος πακέτου είναι κάτι το ενδιάμεσο μεταξύ των συγκρουόμενων απαιτήσεων στις εφαρμογές δεδομένων και φωνής. Ένα μικρό μέγεθος πακέτου είναι καλύτερο για την φωνή, εφόσον τα πακέτα πρέπει να παραδίδονται μόνο με μικρή καθυστέρηση. Ένα μεγάλο πακέτο είναι καλύτερο για δεδομένα, εφόσον ότι κεφαλίδες στα μεγάλα πακέτα είναι μικρότερες. Από τα 53 bytes σε ένα πακέτο ATM, τουλάχιστον 5 bytes αποτελούν την κεφαλίδα, η οποία είναι απαραίτητη για τη μεταφορά πληροφοριών όπως τον προορισμό του πακέτου. Τα ATM δίκτυα συνδέουν όλο το κενό από τα LAN μέχρι τα MAN και τα WAN (wide area networks). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στις τρεις περιπτώσεις.

Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα του ATM, είναι η ικανότητά του να προσφέρει εγγυήσεις για την ποιότητα της υπηρεσίας (QoS), τέτοιες όπως το εύρος ζώνης και η καθυστέρηση, σε εφαρμογές που μπορεί να χρησιμοποιούν στατική πολυπλεξία των πακέτων για να κάνουν δυνατή τη χρήση του εύρους ζώνης της σύνδεσης. Το ATM το καταφέρνει αυτό χρησιμοποιώντας μια πρώτη (priori) πληροφορία σχετικά με τα χαρακτηριστικά της σύνδεσης (ας πούμε ένα εικονικό κύκλωμα), για το ανώτατο και μέσο εύρος ζώνης που απαιτείται από αυτή. Το ATM χρησιμοποιεί έλεγχο αδειών (admission control) για να μπορεί μπλοκάρει νέες συνδέσεις, αν αυτό κριθεί απαραίτητο για την εξασφάλιση της απαιτούμενης ποιότητας υπηρεσίας για την εκάστοτε εφαρμογή.

Ένα άλλο πλεονέκτημα του ATM είναι ότι επιτρέπει τη δρομολόγηση ακόμα και σε επίπεδο τοπικού δικτύου, αντίθετα με άλλες τεχνολογίες όπως Ethernet, token ring και FDDI που χρησιμοποιούν ένα κοινό μέσο, όπως μια αρτηρία ή έναν δακτύλιο. Αυτό του επιτρέπει να παρέχει εγγυήσεις για την ποιότητα υπηρεσίας πιο εύκολα απ’ ότι τις άλλες τεχνολογίες. Το προκαθορισμένο μέγεθος πακέτων που χρησιμοποιεί το ATM, είναι μεγάλο πλεονέκτημα για την εξέλιξη χαμηλού κόστους και μεγάλης ταχύτητας δρομολόγησης.

Διάφορα χαμηλού ή φυσικού επιπέδου πρότυπα έχουν καθοριστεί για το ATM. Αυτά ποικίλουν από 25.6Mb/s πάνω σε χάλκινο καλώδιο συνεστραμμένων ζευγών έως και 622,08Mb/s πάνω σε μονότροπη οπτική ίνα. Ανάμεσα σε όλες τις οπτικές επαφές, υπάρχει μια στα 100Mb/s της οποίας τα χαρακτηριστικά

όπως η ενέργεια εκπομπής, η μέγιστη επιτρεπόμενη εξασθένιση και η κωδικοποίηση είναι παρόμοια με αυτά του FDDI, τα οποία έχουμε περιγράψει. Έχει επίσης καθοριστεί μια οπτική σύνδεση στα 155.52Mb/s που λειτουργεί σε αποστάσεις έως και δυο χιλιόμετρα χρησιμοποιώντας LED πάνω σε πολύτροπη οπτική ίνα, στα 1300nm. Χρησιμοποιώντας τα καθορισμένα ελάχιστα εκπομπής και λήψης της δύναμης του σήματος, η απώλεια για αυτή τη σύνδεση θα είναι της τάξεως των 9dB. Η κωδικοποίηση που χρησιμοποιείται σε αυτή την περίπτωση είναι η (8,10), όπως στην περίπτωση του προτύπου Fiber channel.



Σχήμα 4.10 Ένα μητροπολιτικό δίκτυο με OADM.

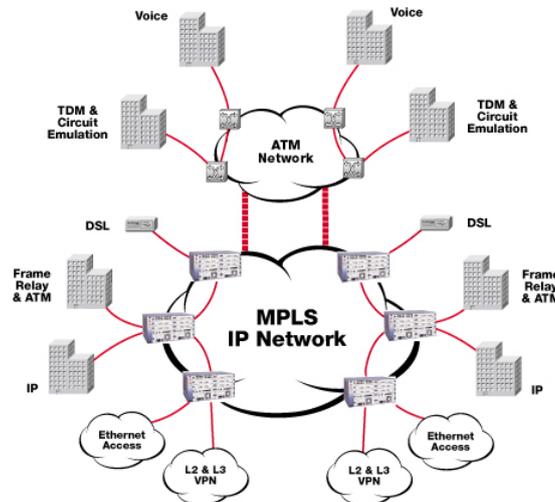
Αυτές οι δυο συνδέσεις ονομάζονται “private user network interfaces” στην ορολογία του ATM, εφόσον φτιάχτηκαν για τη διασύνδεση χρηστών ATM και switches σε δίκτυα που ανήκουν και διευθύνονται από ιδιωτικές επιχειρήσεις. Ένα αριθμός από “public user network interfaces”, δηλαδή συνδέσεις για τους χρήστες ATM και τα switches με το δημόσιο δίκτυο ή δίκτυο κορμού, έχουν επίσης καθοριστεί. Σ’ αυτές τις πιο πρόσφατες συνδέσεις, το ATM χρησιμοποιεί ή SONET/SDH στο αμέσως κατώτερο επίπεδο. Αυτές οι συνδέσεις έχουν καθοριστεί σαν τα πρότυπα του PDH και SONET/SDH με ρυθμούς δεδομένων που φαίνονται στους πίνακες 4.1 και 4.2. Ανάμεσα σ’ αυτά είναι η 44.736Mb/s DS3 σύνδεση, η 155.52Mb/s STS – 3c και η 622.08Mb/s STS – 12c. Στην ορολογία του προτύπου ATM, το επίπεδο κάτω του ATM ονομάζεται φυσικό (physical) επίπεδο, έτσι ώστε αυτές οι διεπαφές στο PDH και SONET/SDH ονομάζονται physical layer interfaces. Απ’ την άλλη μεριά, στην κλασική διαστρωμάτωση των δικτύων, το PDH και το SONET/SDH φαίνονται σαν “data link” επίπεδο όταν το ATM χαρακτηρίζεται σαν επίπεδο δικτύου.

Η επέκταση του ATM αποδεικνύεται να είναι πιο αργή από αυτή που αναμενόταν για αρκετούς λόγους. Ένας λόγος είναι ότι το επικρατέστερο IP (internet protocol), συνεχίζει να είναι επαρκές για πολλές εφαρμογές και επίσης αρχίζει να εξελίσσεται για να προσφέρει τις ίδιες λειτουργίες με το ATM. Ένας

άλλος λόγος είναι η σχετικά αργή εξέλιξη των προτύπων. Στον τομέα των LAN, τα ATM αντιμετωπίζει τον ανταγωνισμό από άλλα αναπτυσσόμενα πρότυπα, όπως το Ethernet στα 100Mb/s και 1Gb/s.

### 4.9.3 IP

Το IP (internet protocol) είναι μακράν η πιο διαδεδομένη τεχνολογία που χρησιμοποιείται για ευρυζωνικά δίκτυα στις μέρες μας. Υπάρχουν πιθανότατα πολύ λίγοι αναγνώστες αυτής της εργασίας που δεν έχουν χρησιμοποιήσει το internet για αποστολή email ή ανάγνωση ιστοσελίδων. Το IP είναι η τεχνολογία δικτύου, ή πρωτόκολλο, που σχεδιάστηκε να λειτουργεί πάνω σε μεγάλη ποικιλία κατώτερων επιπέδων, ή αλλιώς data link layers όπως ονομάζονται στην κλασική ορολογία διαστρωμάτωσης των δικτύων. Αυτός είναι ένας από τους σημαντικότερους λόγους για την μεγάλη εξάπλωσή του. Μερικά παραδοσιακά επίπεδα data link πάνω στα οποία λειτουργεί το IP, είναι αυτά που σχετίζονται με δημοφιλή τοπικής περιοχής δίκτυα, όπως το Ethernet και το token ring. Τι IP επίσης λειτουργεί σε μητροπολιτικά δίκτυα όπως το FDDI. Το IP μπορεί να χρησιμοποιεί πολύ διαδεδομένα πρωτόκολλα επιπέδου data link – για παράδειγμα το HDLC (high level data link control) – όταν χρησιμοποιείται σε μισθωμένες γραμμές από παροχής.

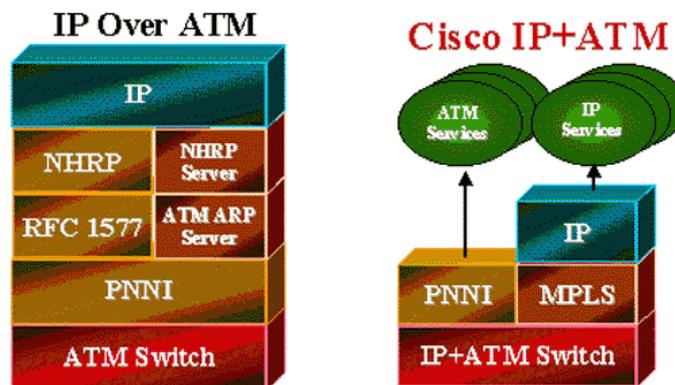


Σχήμα 4.11 Ethernet πάνω από Atm.

Συγκρινόμενο με το ATM, το παραδοσιακό IP προσφέρει υπηρεσία απλών datagram's στα ανώτερα επίπεδα – δεν υπάρχει αντίληψη της σύνδεσης. Επίσης δεν παρέχει καθόλου ποιότητα υπηρεσίας (QoS) όπως το ATM. Παρ' όλα αυτά ως τώρα το ATM δεν κατάφερε να αντικαταστήσει το IP ούτε ως ένα μέτριο βαθμό. Στην πραγματικότητα τα πρότυπα ATM καθορίζουν διασυνδέσεις, έτσι ώστε το IP να μπορεί να λειτουργεί χρησιμοποιώντας το ATM σαν άμεσο κατώτερο επίπεδο. Από τη στιγμή που το IP

δημιουργήθηκε για διακίνηση δεδομένων, δεν σχεδιάστηκε έχοντας υπόψη εφαρμογές φωνής. Μια συνέπεια αυτού είναι ότι το IP χρησιμοποιεί πακέτα μεταβλητού μεγέθους, αντίθετα με το ATM. Όταν τα πακέτα IP μεταδίδονται πάνω σ' ένα ATM δίκτυο, Αυτά ενώνονται σε ένα προκαθορισμένου μεγέθους ATM πακέτα ή cells στο τέλος εκπομπής και ξανά σπάνε σε IP πακέτα κατά το τέλος της λήψης.

Ένα από τα πιο γνωστά υψηλού επιπέδου (μεταφοράς) πρωτόκολλα που χρησιμοποιεί στην κορυφή το IP, είναι το TCP (transmission control protocol). Γι' αυτό το λόγο αυτά τα δίκτυα συνήθως αναφέρονται σαν TCP/IP δίκτυα.



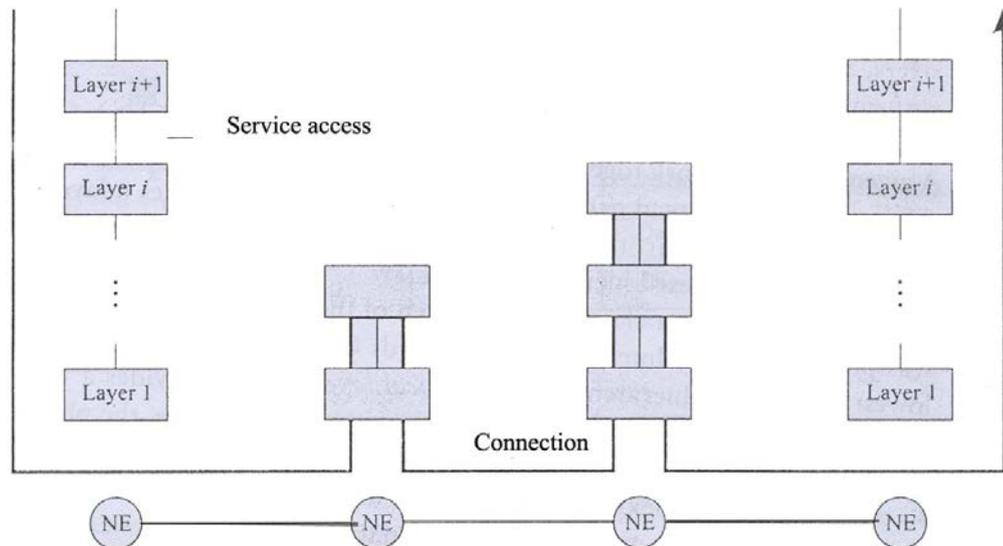
Σχήμα 4.12 Επίπεδα δικτύου.

Με την τεράστια κίνηση που παρατηρείται σήμερα λόγω των υπηρεσιών Internet, οι χρήστες αλλά και οι διαχειριστές δικτύου νιώθουν την ανάγκη για παροχή εγγυήσεων γύρω από το QoS. Αυτό έχει ξεκινήσει μια μεγάλη προσπάθεια γύρω από τα πρότυπα IP, για την παροχή εγγυήσεων του QoS στο IP. Πρωτόκολλα σαν το RSVP (resource reservation protocol) έχουν εξελιχθεί για αυτόν τον σκοπό. Φυσικά, μια πιο απλή εναλλακτική είναι η χρησιμοποίηση του ίδιου πρωτοκόλλου αλλά η αύξηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης και της ταχύτητας επεξεργασίας των δρομολογητών για να συμβαδίσουν με το εύρος αυτό. Αυτό ίσως γίνει ευκολότερα λόγω της ταχύτατα αυξανόμενης τεχνολογίας και της πτώσης των τιμών. Το αποτέλεσμα που θα έχει κάτι τέτοιο στα ATM θα είναι ενδιαφέρον να το παρακολουθήσουμε!

#### 4.10 Αρχιτεκτονική επιπέδων

Τα δίκτυα είναι πολύπλοκα σύνολα με μεγάλη ποικιλία διαφορετικών λειτουργιών που εκτελούνται από διαφορετικά συστατικά του δικτύου, με εξοπλισμό από διαφορετικούς παροχής και όλα αυτά εδώ να συνεργάζονται άψογα μαζί. Ένα συστατικό του δικτύου, μια συσκευή για παράδειγμα, ονομάζεται NE (network element). Για παράδειγμα οι κόμβοι, οι ενισχυτές, οι επαναλήπτες είναι όλα NEs. Με σκοπό να απλοποιήσουμε την εικόνα μας για το δίκτυο, είναι επιθυμητό να διαχωρίσουμε τις λειτουργίες αυτού σε

διάφορα επίπεδα, καθώς φαίνεται και στο σχήμα 4.13. Κάθε επίπεδο εκτελεί συγκεκριμένες λειτουργίες και παρέχει συγκεκριμένες υπηρεσίες στο αμέσως ανώτερό του. Ανάλογα, κάθε επίπεδο περιμένει από το κατώτερό του να του παραδώσει συγκεκριμένες υπηρεσίες. Η υπηρεσία μεταξύ δυο διαδοχικών επιπέδων ονομάζεται SAP (service access point) και μπορούν να υπάρχουν αρκετά SAPs μεταξύ δυο επιπέδων που να ανταποκρίνονται σε διαφορετικούς τύπους παρεχόμενων υπηρεσιών.



**Σχήμα 4.13** Ιεραρχικό επίπεδο ενός δικτύου.

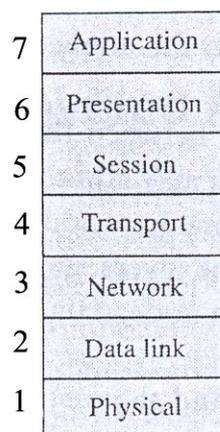
Στις περισσότερες περιπτώσεις, το δίκτυο παρέχει συνδέσεις στον χρήστη. Μια σύνδεση εγκαθίσταται ανάμεσα σ' ένα κόμβο έναρξης και σ' ένα κόμβο τέλους. Η εγκατάσταση, το κλείσιμο και η διαχείριση μιας σύνδεσης είναι δουλειά ενός διαφορετικού κομματιού του δικτύου που ελέγχει και διευθύνει (δεν φαίνεται στο σχήμα 4.13) και το οποίο μπορεί να ελέγχει κάθε επίπεδο στο δίκτυο. Υπάρχουν επίσης παραδείγματα που το δίκτυο παρέχει ασυνδεδεσμένη υπηρεσία στον χρήστη. Αυτές οι υπηρεσίες είναι κατάλληλες για την εκπομπή μικρών μηνυμάτων σ' όλο το δίκτυο, χωρίς να χρειάζεται η εγκατάσταση και το κλείσιμο μιας σύνδεσης για αυτό το λόγο.

Μέσα σ' έναν κόμβο, τα δεδομένα που ανήκουν στη σύνδεση ρέουν μεταξύ των διαφορετικών επιπέδων. Κάθε επίπεδο πολυπλέκει έναν αριθμό υψηλότερου επιπέδου συνδέσεων και μπορεί να προσθέσει μερικές επιπλέον κεφαλίδες στα δεδομένα που προέρχονται από το υψηλότερο επίπεδο. Κάθε ενδιάμεσος κόμβος και συστατικό του δικτύου κατά μήκος της διαδρομής μιας σύνδεσης ενσωματώνει ένα σετ επιπέδων, αρχίζοντας από το χαμηλότερο και φτάνοντας ως ένα συγκεκριμένο επίπεδο στην ιεραρχία. Μέσα στον κόμβο τα δεδομένα ρέουν μεταξύ των επιπέδων.

Είναι σημαντικό να καθορίσουμε τις λειτουργίες κάθε επιπέδου και τις διεπαφές μεταξύ αυτών. Αυτό είναι απαραίτητο γιατί επιτρέπει στους παροχές να κατασκευάσουν μεγάλη ποικιλία υλικού και λογισμικού που πραγματοποιούν λειτουργίες ορισμένων αλλά όχι όλων των επιπέδων και να παρέχουν τις απαραίτητες διεπαφές για επικοινωνία με άλλα προϊόντα που πραγματοποιούν τις λειτουργίες διαφορετικών επιπέδων.

Εδώ να αναφέρουμε ότι υπάρχουν αρκετά πιθανά πρότυπα για την υλοποίηση του κάθε επιπέδου. Ένα δεδομένο επίπεδο μπορεί να λειτουργεί μαζί με μια πληθώρα κατώτερων και ανώτερων επιπέδων. Καθένας από τους διαφορετικούς τύπους οπτικού δικτύου που θα μελετήσουμε, αποτελεί ένα επίπεδο. Κάθε επίπεδο από μόνο του, ανάλογα, μπορεί να διαχωριστεί σε αρκετά άλλα.

Στο σχήμα 4.14 μπορούμε να δούμε την σειρά των διαφορετικών επιπέδων σε ένα δίκτυο, η οποία έχει προταθεί από τον Διεθνή Οργανισμό Προτύπων (ISO)[4] στις αρχές του 1980. Το χαμηλότερο επίπεδο στην ιεραρχία είναι το φυσικό (physical) επίπεδο, το οποίο προσφέρει έναν «διάδρομο» με συγκεκριμένο εύρος ζώνης, στο επίπεδο πάνω από αυτό. Στην περίπτωση μας το φυσικό επίπεδο είναι η οπτική ίνα, σε διάφορους τύπους βέβαια (μονότροπη, πολύτροπη κ.α.). Το αμέσως ανώτερο επίπεδο είναι το *data link*, το οποίο είναι υπεύθυνο για το σπάσιμο των δεδομένων που έρχονται από το φυσικό σε frames, την πολυπλεξία και αποπολυπλεξία τους. Το επίπεδο *data link* μπορεί αλλά μπορεί και να μην περιλαμβάνει ορισμένες τεχνικές για να αντιμετωπίζει κάποια σφάλματα στη σύνδεση. Το ίδιο επίπεδο περιλαμβάνει και το λεγόμενο MAC (Media Access Control), το οποίο συντονίζει τις εκπομπές σε διάφορους κόμβους όταν όλοι μοιράζονται το ίδιο εύρος ζώνης, όπως συμβαίνει σε πολλά τοπικά δίκτυα, για παράδειγμα Ethernets ή Token Rings.

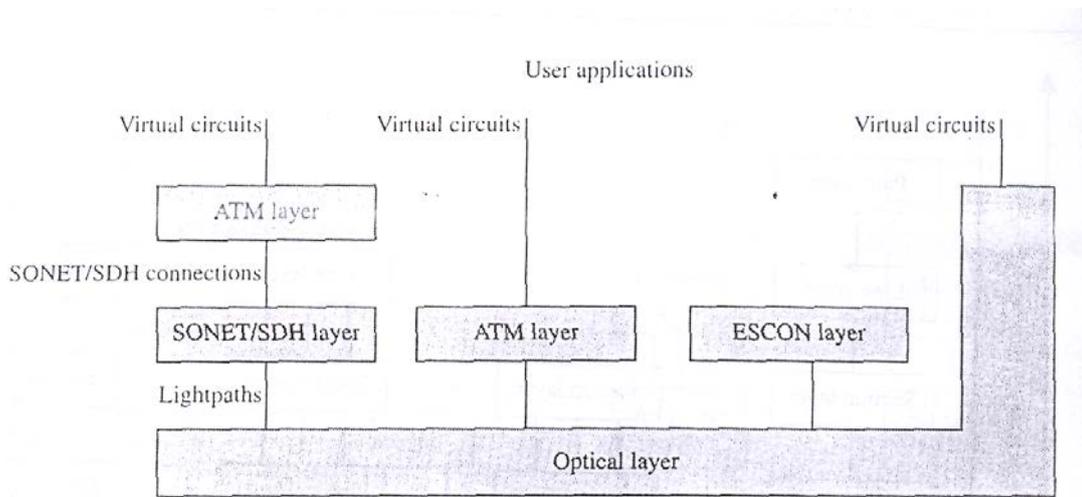


**Σχήμα 4.14** Η κλασική επίπεδη ιεραρχία.

Πάνω από το data link είναι το επίπεδο δικτύου (Network layer). Το επίπεδο αυτό συνήθως προσφέρει εικονικά κυκλώματα ή datagram υπηρεσίες στο αμέσως ανώτερό του. Ένα εικονικό κύκλωμα (VC) είναι μια σύνδεση από άκρο σ' άκρο, με συγκεκριμένες παραμέτρους για QoS που σχετίζονται με αυτή, τέτοιες όπως το εύρος ζώνης και ο ρυθμός σφαλμάτων. Τα δεδομένα που εκπέμπονται από την πηγή πάνω σ' ένα VC παραδίδονται με μια σειρά στον προορισμό τους. Τα datagram από την άλλη, είναι μικρά μηνύματα που μεταφέρονται από άκρο σ' άκρο, αλλά χωρίς την έννοια της σύνδεσης. Το επίπεδο δικτύου κάνει τη λειτουργία της δρομολόγησης ενός μηνύματος από άκρο σ' άκρο, από την πηγή έως τον τελικό προορισμό του. Το επίπεδο μεταφοράς (transport), πάνω από το επίπεδο δικτύου, είναι υπεύθυνο για τη διασφάλιση παράδοσης του μηνύματος με την κατάλληλη σειρά και χωρίς σφάλματα. Πάνω από αυτό υπάρχουν κι άλλα επίπεδα, όπως το session, το presentation και το application, αλλά η ανάλυσή τους δεν θα μας απασχολήσει επί του παρόντος.

Αυτή η κλασική όψη των επιπέδων για τα δίκτυα, χρειάζεται να εμπλουτιστεί για να μπορέσει να αντεπεξέλθει στα δίκτυα και τα πρωτόκολλα που έχουν καθιερωθεί στις μέρες μας. Πολλά από της πρώτης και δεύτερης γενιάς οπτικά δίκτυα προσφέρουν λειτουργίες που μπορεί να θεωρηθούν ότι παρέχονται από τα επίπεδα physical και data link. Παρ' όλα αυτά όμως, πολλά από αυτά περιέχουν αρκετά υποεπίπεδα τα οποία ανταποκρίνονται σε λειτουργίες των επιπέδων data link και network, με την κλασική άποψη των επιπέδων. Μια πιο ρεαλιστική άποψη του μοντέλου επιπέδων για τα σημερινά δίκτυα θα περιλάμβανε πολλαπλούς σωρούς πρωτοκόλλων, βρισκόμενοι ο ένας πάνω στον άλλον. Για να δώσουμε ένα πιο κατανοητό παράδειγμα γι' αυτό, φανταστείτε ένα ATM πάνω σε ένα SONET δίκτυο. Σ' αυτή την περίπτωση, το ATM δίκτυο μεταχειρίζεται το SONET σαν να είναι το link επίπεδό του. Τα ATM switches στο δίκτυο έχουν κάρτες SONET που τα συνδέουν με το δίκτυο SONET. Από την άποψη του ATM, το SONET χρησιμοποιείται για να του παρέχει σημείο προς σημείο σύνδεση στα switches. Παρ' όλα αυτά, να σημειώσουμε ότι το SONET διαθέτει ξεχωριστά και από μόνο του τα επίπεδα link, physical και network.

Ακόμη ένα παράδειγμα αυτής της «μείξης» των επιπέδων, είναι ένα IP πάνω σε ATM δίκτυο. Ξανά η ιστορία είναι παρόμοια με την παραπάνω περίπτωση, του ATM πάνω σε SONET. Ο στόχος των παροχέων είναι να φτιάξουν μια δομή δικτύου ATM και να έχουν IP πακέτα που μετατρέπονται σε ATM cells στην περιφέρεια του δικτύου τους. Και πάλι το IP δίκτυο χειρίζεται το ATM σαν να είναι το link επίπεδό του.



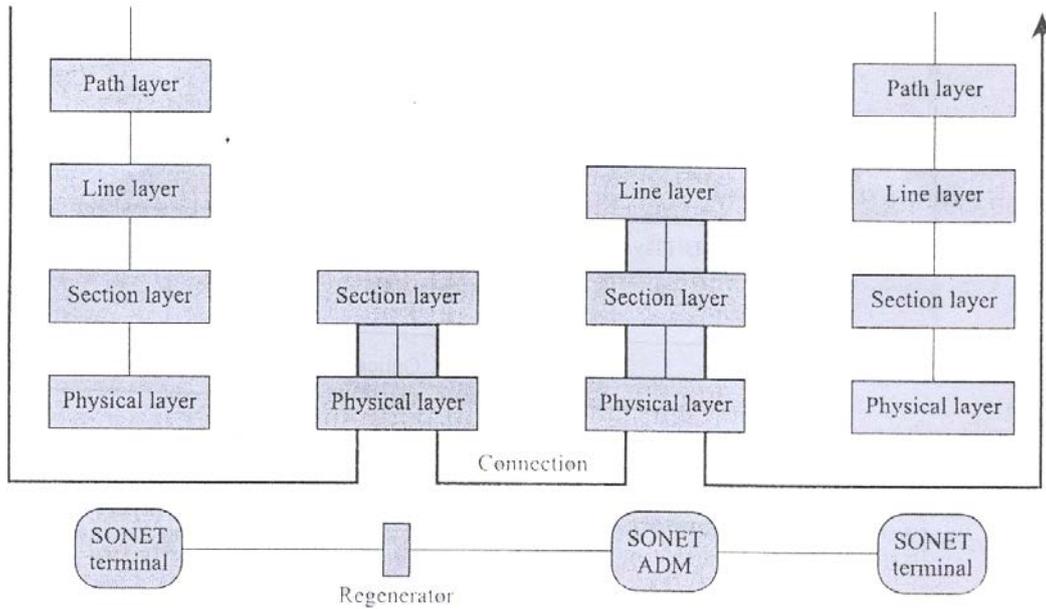
**Σχήμα 4.15** Μία επίπεδη προβολή ενός δικτύου που συνιστάται από ένα οπτικό δίκτυο δεύτερης γενιάς που υποστηρίζει μια ποικιλία οπτικών δικτύων πρώτης γενιάς.

Πιο πολύπλοκες δομές επιπέδων είναι επίσης πιθανές. Για παράδειγμα το σχέδιο 6.9 δείχνει την άποψη επιπέδων ενός IP πάνω σε ATM, πάνω σε SONET. Το IP χρησιμοποιεί το ATM σαν το link επίπεδό του και το ATM χρησιμοποιεί το SONET επίσης σαν το link επίπεδό του.

Η εμφάνιση όμως των οπτικών δικτύων δεύτερης γενιάς εισάγει ένα ακόμα επίπεδο στην ιεραρχία πρωτοκόλλων – το ονομαζόμενο οπτικό (optical) επίπεδο. Αυτό το δεύτερης γενιάς οπτικό επίπεδο παρέχει light paths σε μια ποικιλία πρώτης γενιάς οπτικά επίπεδα[5], όπως μπορούμε να δούμε και στο σχήμα 4.15. Παραδείγματα επιπέδων που βρίσκονται πάνω από ένα δεύτερης γενιάς οπτικού δικτύου επίπεδο, περιλαμβάνουν όλα τα πρώτης γενιάς δίκτυα που μελετήσαμε προηγουμένως στο κεφάλαιο αυτό. Καθώς τα δεύτερης γενιάς οπτικά δίκτυα εξελίσσονται, μπορεί να παρέχουν και άλλες υπηρεσίες εκτός από light paths, όπως εικονικά κυκλώματα packet switched ή υπηρεσίες datagram. Αυτές οι υπηρεσίες μπορεί να διασυνδέονται κατευθείαν με εφαρμογές του χρήστη, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.15.

#### 4.10.1 SONET/SDH επίπεδα

Το επίπεδο SONET αποτελείται από τέσσερα υποεπίπεδα, όπως μπορούμε να δούμε και στο σχήμα 4.16. Το path επίπεδο είναι υπεύθυνο για end – to – end συνδέσεις μεταξύ κόμβων και χρειάζεται μόνο στον τερματισμό μιας SONET σύνδεσης. Είναι υπεύθυνο για την παρακολούθηση και τον εντοπισμό της κατάστασης μια σύνδεσης. Κάθε σύνδεση διασταυρώνει ένα σετ συνδέσεων και ενδιάμεσων κόμβων στο δίκτυο. Το επίπεδο path μπορούμε να φανταστούμε ότι είναι παρόμοιο με το επίπεδο δικτύου (network) στην κλασική ιεραρχία πρωτοκόλλων του σχήματος 4.17.



**Σχήμα 4.16** Επίπεδα SONET/SDH. Πολλαπλές συνδέσεις επιπέδων διαδρομής ενώνονται με την γραμμή επιπέδου, που είναι παρών σε κάθε τερματικό SONET.

Το επίπεδο line πολυπλέκει έναν αριθμό συνδέσεων του επιπέδου path σε μια μόνο σύνδεση μεταξύ δυο κόμβων. Μ' αυτόν τον τρόπο το επίπεδο line είναι παρόν σε κάθε ενδιάμεσο κόμβο σε ένα δρομολόγιο μιας σύνδεσης SONET. Το επίπεδο line είναι επίσης υπεύθυνο για την αναδρομολόγηση μιας πληροφορίας, σε περίπτωση που υπάρξει κάποιο σφάλμα σε μια γραμμή, για την διατήρηση της υπηρεσίας. Κάθε σύνδεση αποτελείται από έναν αριθμό "sections" που ανταποκρίνεται σε κομμάτια της σύνδεσης μεταξύ των επαναληπτών σήματος (regenerators). Το επίπεδο section είναι παρόν σε κάθε επαναλήπτη στο δίκτυο. Τα επίπεδα line και section, μπορούμε να τα παρομοιάσουμε με το data link επίπεδο στην κλασική ιεραρχία πρωτοκόλλων του σχήματος 4.14. Τελευταία, το επίπεδο physical είναι υπεύθυνο για την εκπομπή των bits πάνω στην ίνα.

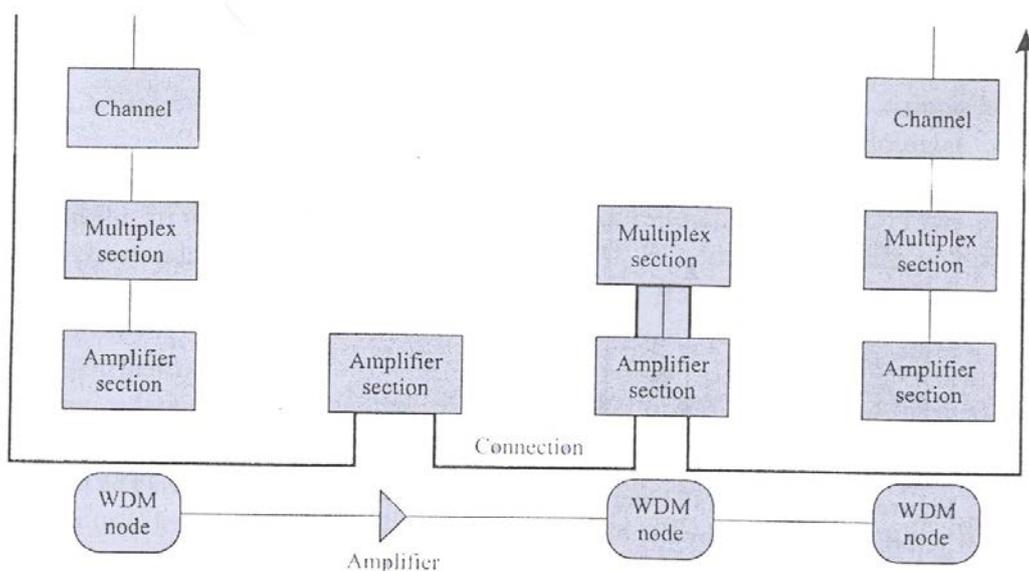
#### 4.11 Επίπεδα οπτικών δικτύων δεύτερης γενιάς

Πριν μελετήσουμε τους διαφορετικούς τύπους αρχιτεκτονικής των οπτικών δικτύων δεύτερης γενιάς, ας δούμε κάποια πράγματα για την ιεραρχία των επιπέδων τους. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 4.15. Στα οπτικά δίκτυα πρώτης γενιάς, το φυσικό επίπεδο ήταν απαραίτητα μια σημείο προς σημείο οπτική σύνδεση και παρείχε μια πλήρη μήκους κύματος αξία του εύρους ζώνης, στο αμέσως παραπάνω επίπεδο. Στα οπτικά

δίκτυα δεύτερης γενιάς, το φυσικό επίπεδο εμπεριέχει πιο εξελιγμένους μηχανισμούς που μπορούν να παρέχουν κυμαινόμενο εύρος ζώνης μεταξύ δυο κόμβων.

Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) έχει καθορίσει ένα καινούριο επίπεδο με την ονομασία οπτικό (optical). Αυτός ο ορισμός είναι καταλληλότερος για να περιγράψει WDM δίκτυα. Το οπτικό επίπεδο προσφέρει light paths στο αμέσως υψηλότερο. Ένα light path είναι μια από άκρο σ' άκρο σύνδεση που έχει εγκατασταθεί σε ένα οπτικό δίκτυο και χρησιμοποιεί ένα μήκος κύματος για κάθε σύνδεση σ' ένα μονοπάτι μεταξύ της πηγής και του τελικού προορισμού. Ένα light path προσφέρει πλήρη μήκους κύματος αξία του εύρους ζώνης στο ανώτερο επίπεδο.

Ανάλογα με το επίπεδο SONET, το οπτικό επίπεδο αποτελείται από τρία υποεπίπεδα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.17. Στην κορυφή είναι το επίπεδο light path, επίσης ονομαζόμενο και οπτικό κανάλι (OC) από το ITU. Αυτό το επίπεδο φροντίζει για την από άκρο σ' άκρο δρομολόγηση των light path. Κάθε light path διασταυρώνει έναν αριθμό συνδέσεων στο δίκτυο και κάθε μια από αυτές τις συνδέσεις κουβαλά πολλαπλά μήκη κύματος. Το επίπεδο “optical multiplex section” (OMS) χρησιμοποιεί για να συστήσει μια point to point σύνδεση κατά μήκος της διαδρομής ενός light path. Κάθε OMS με την σειρά του αποτελείται από αρκετά τμήματα συνδέσεων και κάθε τμήμα είναι μερίδιο της σύνδεσης μεταξύ δυο σταδίων οπτικών ενισχυτών. Κάθε τμήμα σύνδεσης ανήκει στο επίπεδο “optical amplifier section” (OAS). Μ' αυτό σαν αρχή, μόλις η διεπαφές μεταξύ διαφορετικών επιπέδων έχουν καθοριστεί, είναι δυνατόν πλέον για τους παροχές να δώσουν πρωτυποποιημένο εξοπλισμό που κυμαίνεται από απλούς οπτικούς ενισχυτές για WDM συνδέσεις, μέχρι και ολόκληρα WDM δίκτυα.



**Σχήμα 4.17** Το οπτικό επίπεδο, το οποίο συνιστάται από κανάλια, πολύπλοκα μέρη και υποεπίπεδο ενισχυτή. Η παχιά γραμμή αποδεικνύει μία οπτική επίπεδη σύνδεση.

Ο προηγούμενος ορισμός ενός οπτικού επιπέδου δεν περιλαμβάνει οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς που μπορούν να παρέχουν πιο εξελιγμένες υπηρεσίες δρομολόγησης πακέτου, όπως τα εικονικά κυκλώματα και τα datagram's. Για παράδειγμα τα ευρυζωνικά και τα δίκτυα επιλογής που θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο, προσφέρουν τέτοιες υπηρεσίες και δεν μπορούν να περιγραφούν πλήρως χρησιμοποιώντας μια τέτοια προσέγγιση για τα επίπεδα. Στην περίπτωση κάποιου ευρυζωνικού δικτύου ή δικτύου άμεσης πρόσβασης, η δρομολόγηση πακέτου γίνεται από το επίπεδο MAC (Media Access Control).

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

---

---

1. *American National Standards Institute, X3T9.3. High performance parallel interface, Nov. 1989. Rev. 6.9.*
2. *Bellcore. SONET transport systems: Common generic criteria, 1995.*
3. *A. F. Benner. Fiber Channel. McGraw-Hill, New York, 1996.*
4. *D. Bertsekas and R. G. Gallager. Data Networks. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1992.*
5. *F. E. Ross. FDDI-a tutorial. IEEE Communications Magazine, 24(5):10-17, May 1986.*
6. *<http://www.iec.org>*
7. *<http://uranus.ee.auth.gr>*

---

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.

---

---

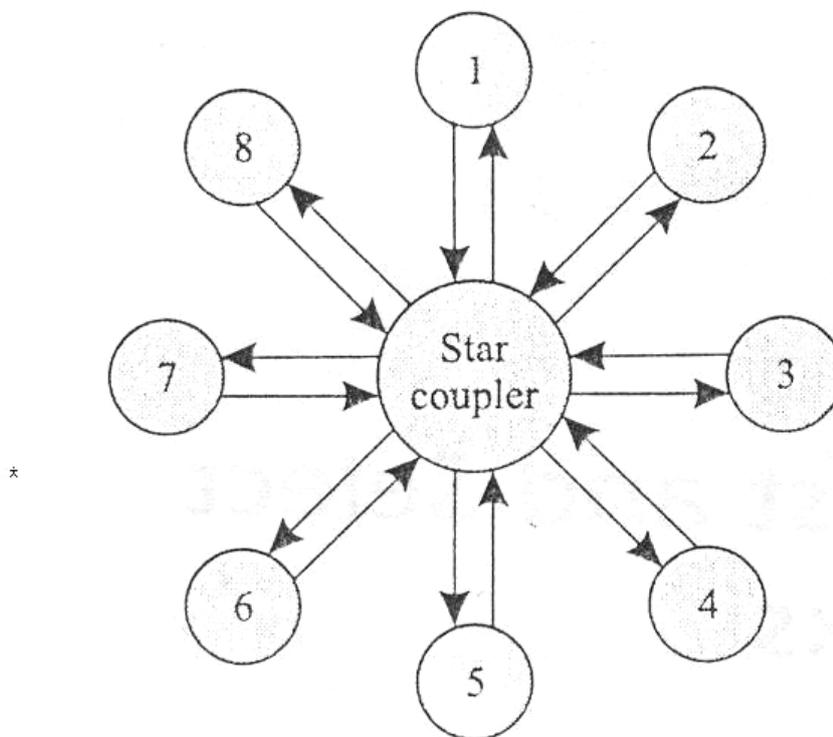
# ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΑ ΚΑΙ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΔΙΚΤΥΑ

Με αυτό το κεφάλαιο, ξεκινάει η μελέτη των οπτικών δικτύων δεύτερης γενιάς. Ο θεμελιώδης σκοπός οποιουδήποτε δικτύου επικοινωνίας είναι η παροχή σύνδεσης μεταξύ συνδεδεμένων κόμβων που επιθυμούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους. Γενικά υπάρχουν δύο είδη αρχιτεκτονικής δικτύων επικοινωνίας (οπτική ή όχι), που βασίζονται στον τρόπο που παρέχεται η σύνδεση. Στα δίκτυα που βασίζονται σε αρχιτεκτονική εκπομπής, η συνδεσιμότητα παρέχεται σχεδόν με έναν επουσιώδη τρόπο: το δίκτυο στέλνει το σήμα που λήφθηκε από τον κόμβο, σε όλους τους κόμβους. Κατά αυτό τον τρόπο δεν παρέχεται λειτουργία δρομολόγησης από το δίκτυο. Σήμερα τα περισσότερα τοπικά δίκτυα ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία, για παράδειγμα τα δίκτυα Ethernet, τα δίκτυα token ring, και τα δίκτυα FDDI. Ο διαφορετικός τρόπος αρχιτεκτονικής είναι αυτός που επιλεκτικά μεταδίδει τα σήματα που ελήφθησαν από έναν κόμβο που αποτελεί μέρος του δικτύου βασισμένη σε πληροφορίες που ελήφθησαν από τον κόμβο της πηγής. Τα περισσότερα δίκτυα ευρείας περιοχής ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία και αποτελούνται από κόμβους διασύνδεσης point-to-point. Τα σήματα δρομολογούνται με ένα υποσύνολο αυτών των συνδέσεων επιλεγμένα να περιλαμβάνουν τους επιδιωκόμενους κόμβους αποδοχής. Τα WDM οπτικά δίκτυα λέγονται δίκτυα κυματομορφικής δρομολόγησης.

---

## 5.1 Τοπολογία των Δικτύων Εκπομπής

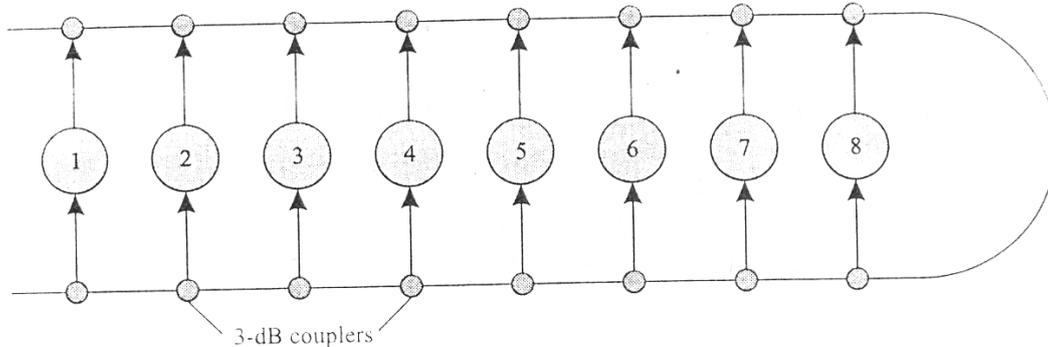
Οι δύο πιο δημοφιλείς τοπολογίες για τα επιλεγμένα και εκπομπής δίκτυα είναι τοπολογία 'star' και τοπολογία 'bus'. Παραδείγματα αυτών φαίνονται στο σχήμα 5.1 και στο 5.2, αντίστοιχα. Αμφότερα και τα δύο είδη τοπολογίας χρησιμοποιούν οπτικούς συζευκτήρες. Ο συζευκτήρας star στο σχήμα 5.1 κατασκευάζεται από 2x2 συζευκτήρες ή από μονό συσκευές οπτικής διασύνδεσης. Ένας συζευκτήρας 8x8 τοπολογίας star, που κατασκευάζεται από 2x2 συζευκτήρες φαίνεται στο σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.1 Δίκτυο που χρησιμοποιεί μετάδοση τοπολογίας αστέρα.

Στην τοπολογία bus που φαίνεται στο σχήμα 5.2, ο κόμβος μεταδίδει στην τοπολογία bus μέσω ενός συζευκτήρα και λαμβάνει μέσω της τοπολογίας bus από έναν άλλο συζευκτήρα. Στον συζευκτήρα μετάδοσης, μόνο μια θύρα εξόδου χρησιμοποιείται, ενώ στον συζευκτήρα λήψης χρησιμοποιείται μόνο μία θύρα εισόδου, οι υπολειπόμενες θύρες δεν φαίνονται στο σχήμα. Οι δύο τοπολογίες διαφέρουν στο νούμερο και στον τρόπο που χρησιμοποιούνται οι συζευκτήρες. Ένα δίκτυο bus με  $n$  κόμβους χρησιμοποιεί  $2n - 2$  2x2 συζευκτήρες. Σε αντίθεση, ένα δίκτυο star με  $n$  κόμβους χρησιμοποιεί έναν μοναδικό  $n \times n$  συζευκτήρα, ο οποίος μπορεί να κατασκευαστεί από  $n/2 \log_2 n$  2x2 συζευκτήρες (

υποθέτοντας ότι ο  $n$  είναι μια δύναμη του 2). Παρόλαυτα, καθώς το κάθε σήμα περνά μέσω ενός μέσου όρου  $n$  συζευκτών στην περίπτωση του bus ( $2n-1$  στην χειρότερη περίπτωση), περνά μέσω μόνο των  $\log_2 n$  των συζευκτών στην περίπτωση του star. Αυτός ο παράγοντας παίζει σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της προϋπολογισμένης επίδοσης της ζεύξης αυτών των τοπολογιών.



Σχήμα 5.2 Δίκτυο που χρησιμοποιεί τοπολογία bus

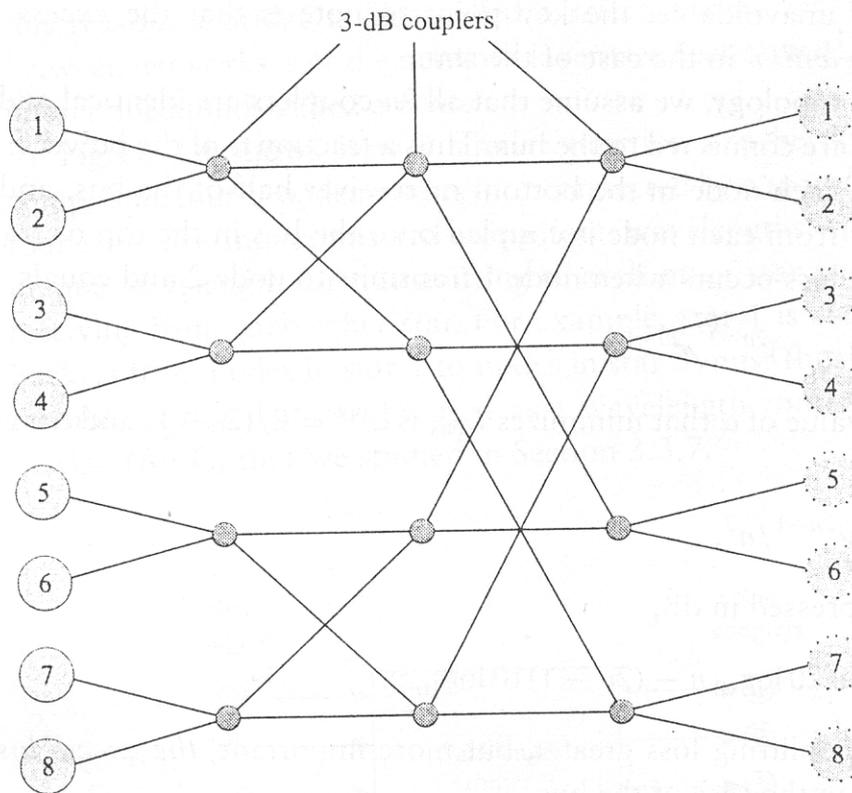
Η έξοδος των ηλεκτρικών πεδίων ενός  $2 \times 2$  κατευθυντήριου συζευκτήρα μπορεί να γραφεί σε όρους της εισόδου ηλεκτρικών πεδίων ακόλουθα:

$$\begin{pmatrix} E_{o1}(f) \\ E_{o2}(f) \end{pmatrix} = e^{-i\beta l} \begin{pmatrix} \cos(kl) & i \sin(kl) \\ i \sin(kl) & \cos(kl) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{i1}(f) \\ E_{i2}(f) \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

Όπου το  $k$  είναι ο συντελεστής σύζευξης,  $l$  είναι το μήκος της σύζευξης και  $\beta$  η σταθερά διάδοσης. Αυτή η εξίσωση υποθέτει ότι οι συζευκτήρες είναι ιδανικοί και δεν έχουν απώλειες ισχύς. Εάν υποθέσουμε ότι ένα κλάσμα  $\gamma$  του της ισχύς κάθε εισόδου χάνεται και ο όρος  $a = \sin^2(kl)$ , η εξίσωση μπορεί να γραφτεί με όρους οπτικής ισχύς:

$$\begin{pmatrix} P_{o1}(f) \\ P_{o2}(f) \end{pmatrix} = (1-\gamma) \begin{pmatrix} 1-a & a \\ a & 1-a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{i1}(f) \\ P_{i2}(f) \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

Το αποτέλεσμα είναι η απώλεια ενός κλάσματος  $\gamma$  της ισχύς από κάθε είσοδο, και από την υπολειπόμενη ένα κλάσμα  $1-a$  από την ισχύ της εισόδου 1 (απόκριση 2) εμφανίζεται στην έξοδο 1 (απόκριση 1) και ένα κλάσμα  $a$  στην έξοδο 2 (απόκριση 1). Το  $a$  ονομάζεται το ποσοστό απώλειας διαίρεσης και το  $\gamma$  το ποσοστό απώλειας υπέρβασης.



**Σχήμα 5.3** Η εσωτερική δομή ενός σύνδεσμου αστέρα.

Στην περίπτωση του star, θέτουμε το  $\alpha=1/2$  έτσι ώστε όλες οι εξόδους να λαμβάνουν το ίδιο κλάσμα της ισχύος από κάθε είσοδο. Από το σχήμα 7.3, η κάθε έξοδος λαμβάνει ένα κλάσμα  $(\gamma/2)^{\log_2 n}$  της ισχύος που μεταδίδεται από κάθε είσοδο. Με άλλα λόγια, η απώλεια σε dB μεταξύ ενός ζεύγους της εισόδου και τις εξόδου, θεωρώντας αμελητέα την απώλεια μετάδοσης, είναι:

$$L_{star} = 10 \log_{10} n - (\log_2 n) 10 \log_{10} \gamma \quad (5.3)$$

Κατά την κατανομή της ισχύος από κάθε είσοδο σε  $n$  εξόδους, η απώλεια διαχωρισμού  $10 \log_{10} n$  είναι αναπόφευκτη, το κύριο σημείο είναι ότι η απώλεια υπέρβασης αυξάνεται λογαριθμικά με το  $n$  στην περίπτωση του star.

Για την τοπολογία bus, υποθέτουμε ότι οι  $2n$  συζευκτικές είναι πανομοιότυποι και ότι η είσοδος 1 και η έξοδος 1 είναι συνδεδεμένες με το bus[1]. Έτσι ένα κλάσμα  $\alpha$  της ισχύος από το bus διπλασιάζεται μέσα σε κάθε κόμβο στο κάτω μέρος ή στον δέκτη ήμισυ bus, και ένα κλάσμα  $\alpha$  της ισχύος από τον κάθε κόμβο

διπλασιάζεται στο πάνω μέρος του bus ή στον πομπό ήμισυ του bus. Η περίπτωση που έχουμε την μέγιστη απώλεια συμβαίνει όταν ο κόμβος 1 μεταδίδει στον κόμβο 2 και ισοδύναμα:

$$L_{bus} = a^2(1-a)^{2n-3}\gamma^{2n-1} \quad (5.4)$$

Η βέλτιστη τιμή του  $a$  που ελαχιστοποιεί το  $L_{bus}$  είναι  $a^{opt}=2/(2n-1)$  και το αντίστοιχο  $L_{bus}$  είναι:

$$L_{bus}^{opt} \approx e^{-2}\gamma^{2n-1}/n^2, \quad (5.5)$$

για μεγάλα  $n$ . Εκφρασμένη σε dB,

$$L_{bus}^{opt} \approx 8,7 + 20\log_{10} n - (2n-1)10\log_{10} \gamma \quad (5.6)$$

Δεν είναι μόνο μεγαλύτερη η απώλεια διαχωρισμού, αλλά πιο σημαντική, η απώλεια υπέρβασης αυξάνεται γραμμικά με το  $n$  στην περίπτωση του bus.

Η προηγούμενη ανάλυση εφαρμόζεται στην περίπτωση όπου οι ενισχυτές δεν χρησιμοποιούνται στο δίκτυο. Η κατάσταση είναι πολυπλοκότερη όταν οι ενισχυτές χρησιμοποιούνται και πρέπει να λάβουμε υπόψιν προσεχτικά το θέμα του κορεσμού κέρδους, ειδικότερα στην περίπτωση των WDM (ή πολυκάναλων) δικτύων. Το συμπέρασμα είναι ότι η τοπολογία star είναι η καλύτερη επιλογή για πολλά από τα είδη των δικτύων που εξετάστηκαν. Υπάρχουν μερικές περιπτώσεις που η τοπολογία bus είναι καλύτερη από την τοπολογία star αλλά ακόμα και εδώ η διαφορά δεν είναι μεγάλη.

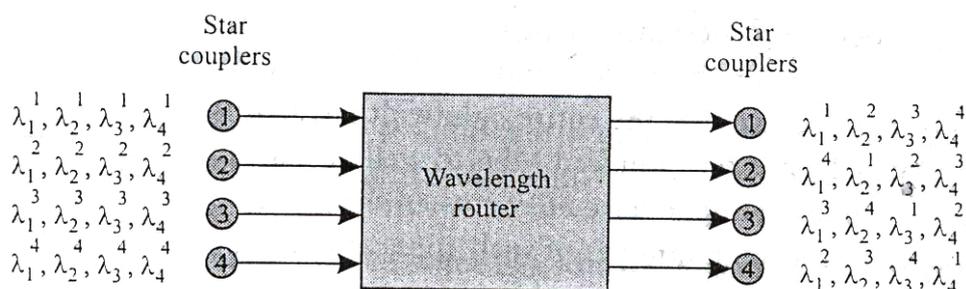
## 5.2 Διασυνδεδεμένοι αστέρες (Interconnected Stars)

Σε πολλές περιπτώσεις είναι ανέφικτο να έχεις έναν μονό αστέρα εκπομπής για ολόκληρο το δίκτυο. Αυτό μπορεί να συμβαίνει λόγω των αριθμών των κόμβων, και έτσι η απώλεια διαχωρισμού, γίνεται μεγαλύτερη ή γιατί οι κόμβοι είναι γεωγραφικά κοντά. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ένα νούμερο των αστεριών εκπομπής μπορούν να διασυνδεθούν με ένα κατάλληλο τρόπο. Για να παρακινηθεί αυτή η διασύνδεση, ας δούμε πώς το ίδιο πρόβλημα αντιμετωπίζεται στα ηλεκτρονικά τοπικά δίκτυα.

Τα τοπικά δίκτυα του σήμερα, όπως τα Ethernets, διασυνδέονται με γέφυρες. Αφού το διασυνδεδεμένο δίκτυο ονομάζεται Ethernet, χρησιμοποιούμε τον όρο τμήμα Ethernet για κάθε ένα από τα δίκτυα που είναι διασυνδεδεμένα με αυτόν τον τρόπο. Το διασυνδεδεμένο δίκτυο δεν είναι πλέον ένα μονό μέσο

εκπομπής. Οι μεταδόσεις μεταξύ του κάθε τμήματος Ethernet πέμπουν μόνο σε αυτό το τμήμα. Η γέφυρα επιλεκτικά μεταδίδει πακέτα από άλλα τμήματα που προορίζονται για συγκεκριμένα τμήματα, για αυτόν τον λόγο, μια γέφυρα ονομάζεται και επιλεκτικός αναμεταδότης. Όταν η διασύνδεση ανάμεσα τα δίκτυα βρίσκεται στο επίπεδο του δικτύου, το αντικείμενο που συντελεί σε αυτήν την διασύνδεση ονομάζεται δρομολογητής.

Στο σχήμα 5.4 παρουσιάζεται πως μια παρόμοια λειτουργία μπορεί να ολοκληρωθεί σε ένα δίκτυο συμπεριλαμβάνοντας τέσσερα αστέρια εκπομπής διασυνδεδεμένα με έναν δρομολογητή μήκους κύματος. Σε αυτό το σχήμα, τέσσερις αστέρες διασυνδέονται χρησιμοποιώντας τέσσερα μήκη κύματος  $\lambda_1, \dots, \lambda_4$ . Κάθε αστέρας χρησιμοποιεί ένα μοναδικό μήκος κύματος για την λήψη από κάθε άλλο αστέρα. Για παράδειγμα, ο αστέρας 1 είναι συνδεδεμένος με τον αστέρα 3 χρησιμοποιώντας μήκος κύματος  $\lambda_3$ . Τα πακέτα από τους κόμβους στον αστέρα 1 πρέπει να μεταδοθούν στους κόμβους του αστέρα 2 με μήκος κύματος  $\lambda_3$ . Μία πιθανή συσκευή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δρομολογητής μήκους κύματος είναι η arrayed waveguide grating (AWG).



**Σχήμα 5.4** Τέσσερα αστέρια εκπομπής διασυνδεδεμένο από έναν router μήκους κύματος.

Κάθε αστέρι εκπομπής μπορεί να επαναχρησιμοποιήσει το ίδιο σύνολο μηκών κύματος για την επικοινωνία στο εσωτερικό του αστέρα, με την προϋπόθεση ότι αυτό το σύνολο είναι διαφορετικό από αυτό που χρησιμοποιείται στην ενδοεπικοινωνία του αστέρα. Το AON σύστημα δοκιμών δικτύου είναι ένα παράδειγμα[2], δικτύου που χρησιμοποιεί την αρχιτεκτονική αστέρων εκπομπής που διασυνδέονται με έναν δρομολογητή μήκους κύματος.

### 5.3 Πρωτόκολλα Ελέγχου Πρόσβασης Μέσων (MAC)

Σε ένα επιλεγμένο και εκπομπής δίκτυο, οποιοδήποτε σήμα που μεταδίδεται από τον κόμβο αποτελεί εκπομπή σε όλους τους κόμβους. Επίσης κάθε κόμβος πρέπει να επιλέξει το επιθυμητό σήμα για την

υποδοχή από το σύνολο των σημάτων που μεταδίδονται ταυτόχρονα. Θα δούμε τώρα τα προβλήματα του «πότε να εκπέμψουμε» και «τι να επιλέξουμε». Υποθέτουμε ότι κάθε κόμβος έχει ένα ζεύγος ινών- ένα για μετάδοση και ένα για υποδοχή- συνδέοντας το με το δίκτυο και ότι το δίκτυο εκπέμπει κάθε σήμα που δέχεται από έναν κόμβο σε όλους τους κόμβους (συμπεριλαμβανομένου και του κόμβου μετάδοσης). Επίσης υποθέτουμε ότι κάθε σήμα μεταφέρεται με ένα από τα  $W$  μήκη κύματος, οι ειδικές τιμές των οποίων έχουν γίνει αποδεχτές από όλους τους κόμβους του δικτύου. Εάν δύο κόμβοι μεταδίδουν ταυτόχρονα με το ίδιο μήκος κύματος, λόγω της φύσης της εκπομπής του δικτύου, τα σήματα συγκρούονται και έτσι ή και τα δύο θα χαθούν ή θα φθαρούν. Ή αν αναλογιστούμε την περίπτωση όπου δύο κόμβοι μεταδίδουν ταυτόχρονα με διαφορετικά μήκη κύματος και αυτές οι μεταδόσεις και αυτές οι μεταδόσεις κατευθύνονται στον ίδιο κόμβο. Εάν ο κόμβος λήψης έχει έναν μονό συντονισμό αποδέκτη, μπορεί να συντονιστεί σε μία από τις δύο μεταδόσεις. Σε αυτήν την περίπτωση λέμε ότι αυτές οι δύο μεταδόσεις είναι *ανταγωνιστικές*. Για να αποφύγουμε τον ανταγωνισμό και να μειώσουμε τις συγκρούσεις, επιβάλλεται να έχουμε τοποθετήσει τους κόμβους του δικτύου ανα συντεταγμένες. Ένας μηχανισμός που παρέχει αυτές τις συντεταγμένες ονομάζεται *πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης μέσω (MAC)*.

Τα πρωτόκολλα MAC σχεδιάζονται ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής, την ικανότητα του υλικού στους κόμβους και το επίπεδο της απόδοσης που απαιτείται. Μερικές εφαρμογές μπορεί να απαιτούν να είναι διαθέσιμη ολόκληρη η εκπομπή σε ένα μήκος κύματος, το οποίο μπορεί να κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες Mb/s μέχρι πάνω από Gb/s. Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να προετοιμάσουμε ένα κύκλωμα ανάμεσα στον κόμβο της πηγής και τον κόμβο του προορισμού της εφαρμογής. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών, περιλαμβάνουν διασυνδέσεις υψηλής ταχύτητας μεταξύ υπερυπολογιστών και μεταξύ υπερυπολογιστών και τερματικά υψηλής ανάλυσης γραφικών οπτικής αναπαράστασης. Και πολύ υψηλής ποιότητας βίντεο όπως αυτό που απαιτείται στην παραγωγή των κινηματογραφικών ταινιών ή των ιατρικών εφαρμογών. Το δίκτυο Rainbow-I [JRS93] που θα συζητηθεί παρακάτω σχεδιάστηκε για αυτές τις εφαρμογές. Άλλες εφαρμογές δεν χρειάζονται ολόκληρο το εύρος ζώνης ενός μήκους κύματος. Έτσι το εύρος ζώνης που είναι διαθέσιμο σε ένα μήκος κύματος μπορεί να διαμοιραστεί μεταξύ αρκετές συσκευές με τον ίδιο κόμβο πηγής και προορισμού. Υποθέτουμε ότι αυτός ο διαμοιρασμός πραγματοποιείται με την χρήση κάποιου τύπου διαμοιρασμού του χρόνου με πολυπλεξία και κάθε κανάλι διαμοιράζεται σε μία χρονοθυρίδα.

Οι ικανότητες του υλικού σε έναν μονό κόμβο μπορούν να διακυμαίνονται από πολλαπλούς συντονισμούς μεταδότες και πολλαπλούς συντονισμούς δέκτες να έχουν ένα μονό μεταδότη και ένα μονό δέκτη, ο ένας εκ των οποίων μπορεί να είναι σταθερά συντονισμένος ενώ ο άλλος συντονισμός. Με

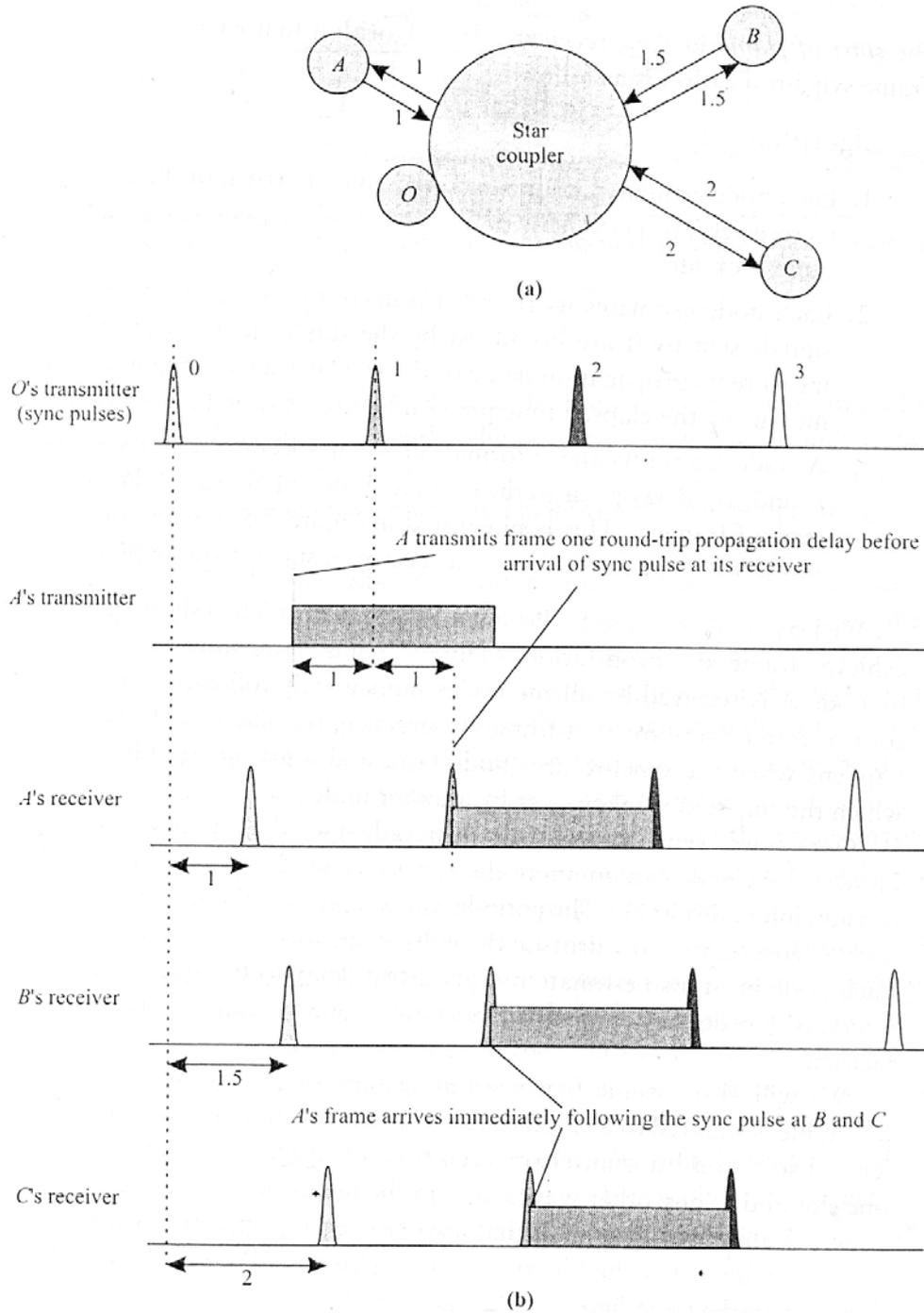
την σημερινή τεχνολογία των οπτικών ινών ένας συντονισμός μεταδότη ή δέκτης είναι πολύ περισσότερο ακριβώς από τον σταθερά συντονισμένο μέρος. Αυτό έδωσε κίνητρα στον σχεδιασμό των πρωτόκολλων που λειτουργούν με κάποια μέρη σταθερά συντονισμένα. Τα πακέτα που υποστηρίζουν μεταγωγή απαιτούν τον μεταδότη ή τον δέκτη να συντονίζεται ανάμεσα σε χρονοθυρίδες σε ένα μικρό κλάσμα της διάρκειας της ίδιας της χρονοθυρίδας. Αυτό δεν είναι αρκετά εύκολο να επιτευχθεί με τα σημερινά συστατικά μέρη, ένας από τους λόγους που ατά τα δίκτυα δεν είναι ακόμα υλοποιήσιμα.

Το επίπεδο της απόδοσης μετράται με την καθυστέρηση των πακέτων και τον συνολικό όγκο του έργου του δικτύου. Σε οποιοδήποτε δίκτυο εκπομπής, μερικά από τα μεταδιδόμενα δεδομένα χάνονται μέσω συγκρούσεων και ανταγωνισμών. Ο συνολικός όγκος του έργου ενός δικτύου είναι το κλάσμα του χωρητικότητας μετάδοσης του δικτύου που μεταφέρει χρήσιμα δεδομένα, δεδομένα δηλαδή που παραδίδονται στον επιδιωκόμενο προορισμό. Υπάρχει ένας συγκερασμός μεταξύ της απόδοσης του πρωτόκολλου και της πολυπλοκότητας της εφαρμογής, συμπεριλαμβανομένης της ικανότητας το υλικού που πρέπει να παρέχετε σε κάθε κόμβο. Θα μελετήσουμε τον σχεδιασμό και την απόδοση των πρωτοκόλλων που σχεδιάστηκαν για ένα εύρος της ικανότητας του υλικού.

Όλα τα πακέτα υποστήριξης μεταγωγής που θα περιγράψουμε χρησιμοποιούν ένα διαφορετικό κανάλι, ονομαζόμενο κανάλι ελέγχου, για την αποστολή πληροφοριών περί των πακέτων που μεταδίδονται στα κανάλια δεδομένων. Το κανάλι ελέγχου μπορεί να περιγραφεί ως ένα κανάλι που κατέχει ένα χωριστό μήκος κύματος, αν και σε πολλές περιπτώσεις τα κανάλια ελέγχου μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να μοιράζονται τα ίδια μήκη κύματος με τα κανάλια δεδομένων σε πολυπλεξία χρόνου.

### 5.3.1 Συγχρονισμός

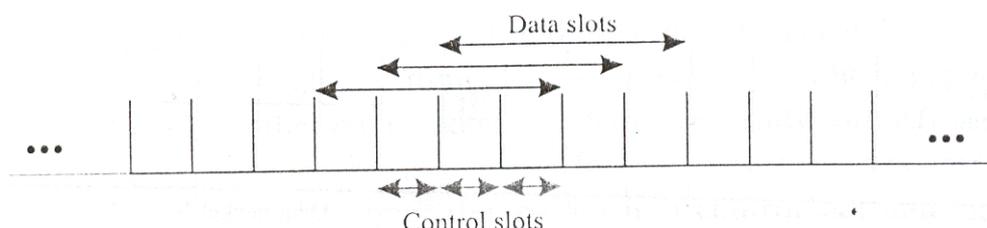
Υποθέτουμε ότι το δίκτυο έχει τοπολογία αστέρα. Σε οποιοδήποτε πρακτικό δίκτυο η καθυστέρηση μετάδοσης από κάθε κόμβο στον αστέρα θα είναι διαφορετική. Υποδηλώνουμε την μέγιστη καθυστέρηση μετάδοσης που επιτρέπεται από το σύστημα μεταξύ οποιοδήποτε ζεύγους κόμβων ως  $d_{prop}$ . Αυτή η τιμή προσδιορίζει τη μέγιστη επιτρεπόμενη γεωγραφική υπέρβαση του δικτύου. Για παράδειγμα, όταν  $d_{prop}=1$  ms τότε η μέγιστη επιτρεπόμενη γεωγραφική υπέρβαση είναι γύρω στα 200 km. Στα περισσότερα πρωτόκολλα που θα μελετήσουμε θεωρούμε την τιμή του  $d_{prop}$  γνωστή σε όλους τους κόμβους.



Σχήμα 5.5 Επίτευξη πλαισίου/θυρίδας συγχρονισμού σε ένα δίκτυο.

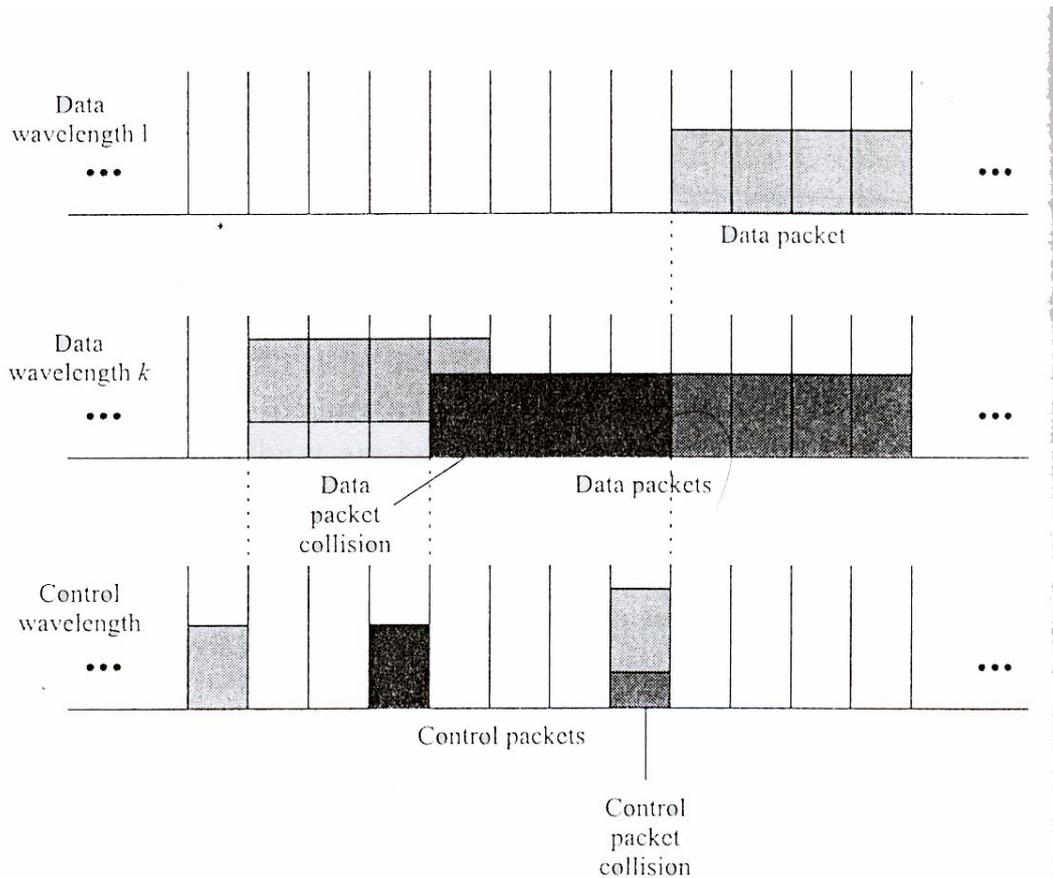
### 5.3.2 DT-WDMA

Ανάμεσα στα πρωτόκολλα MAC[3] που σχεδιάστηκαν ειδικά για πολυμήκη κύματος οπτικά δίκτυα, το DT-WDMA είναι το πιο ισχυρό και έχει συμβάλει στην ανάπτυξη της έρευνας για την βελτίωση των MAC πρωτοκόλλων.



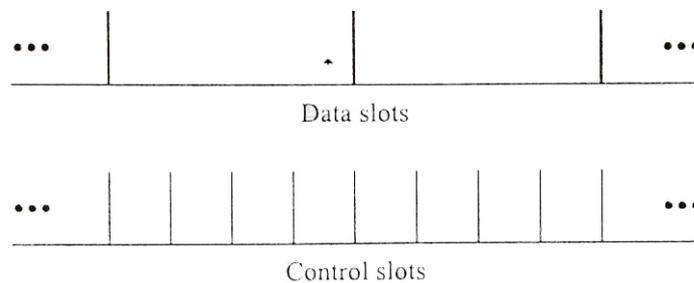
**Σχήμα 5.6** Θυρίδες ελέγχου και θυρίδες δεδομένων για τα πρωτόκολλα Slotted Aloha/ Slotted Aloha.

Το πρωτόκολλο MAC υποθέτει ότι ο αριθμός των κόμβων  $n$  ισούται με τον αριθμό των μηκών κύματος  $W$  που χρησιμοποιούνται για την μετάδοση των δεδομένων. Επιπρόσθετα, υπάρχει ένα  $(W+1)$ st μήκος κύματος ελέγχου. Το πρωτόκολλο απαιτεί κάθε κόμβος να είναι εφοδιασμένος με πομπό σταθερού συντονισμού δεδομένων, συντονισμένο σε ένα μοναδικό μήκος κύματος σε κάθε κόμβο και έναν συντονισμό δέκτη. Μπορούμε να υποθέσουμε ότι ο κόμβος  $x_i$ ,  $i= 0,1,\dots,n-1$  έχει μήκος κύματος  $\lambda_i$  για την μετάδοση δεδομένων. Επίσης, κάθε κόμβος πρέπει να έχει πομπό ελέγχου σταθερού συντονισμού και δέκτη ελέγχου σταθερού συντονισμού, οι οποίοι λειτουργούν στο μήκος κύματος ελέγχου.



**Σχήμα 5.7** Η λειτουργία του πρωτοκόλλου Slotted Aloha/ Slotted Aloha.

Στα κανάλια δεδομένων όπως και στα κανάλια ελέγχου, ο χρόνος διαμοιράζεται σε θυρίδες, αλλά το μέγεθος των θυρίδων δεδομένων είναι  $n$  ή  $W$  φορές των θυρίδων ελέγχου. Όμως οι θυρίδες δεδομένων δεν επικαλύπτουν σε χρόνο και εάν υποθέσουμε ότι οι θυρίδες ελέγχου είναι  $\dots, [-1,0), [0,1), [1,2), \dots$ , οι θυρίδες δεδομένων μπορούν να θεωρηθούν  $\dots, [-n,0), [0, n), [n,2n), \dots$ . Έτσι μπορούμε να συσχετίσουμε τις  $n$  θυρίδες ελέγχου  $[kn, k n+1), [kn+1, kn+2), \dots, [2kn-1, 2kn)$  με τις θυρίδες δεδομένων  $[kn, 2kn)$ . Αυτό παρουσιάζεται στο σχήμα 5.8.

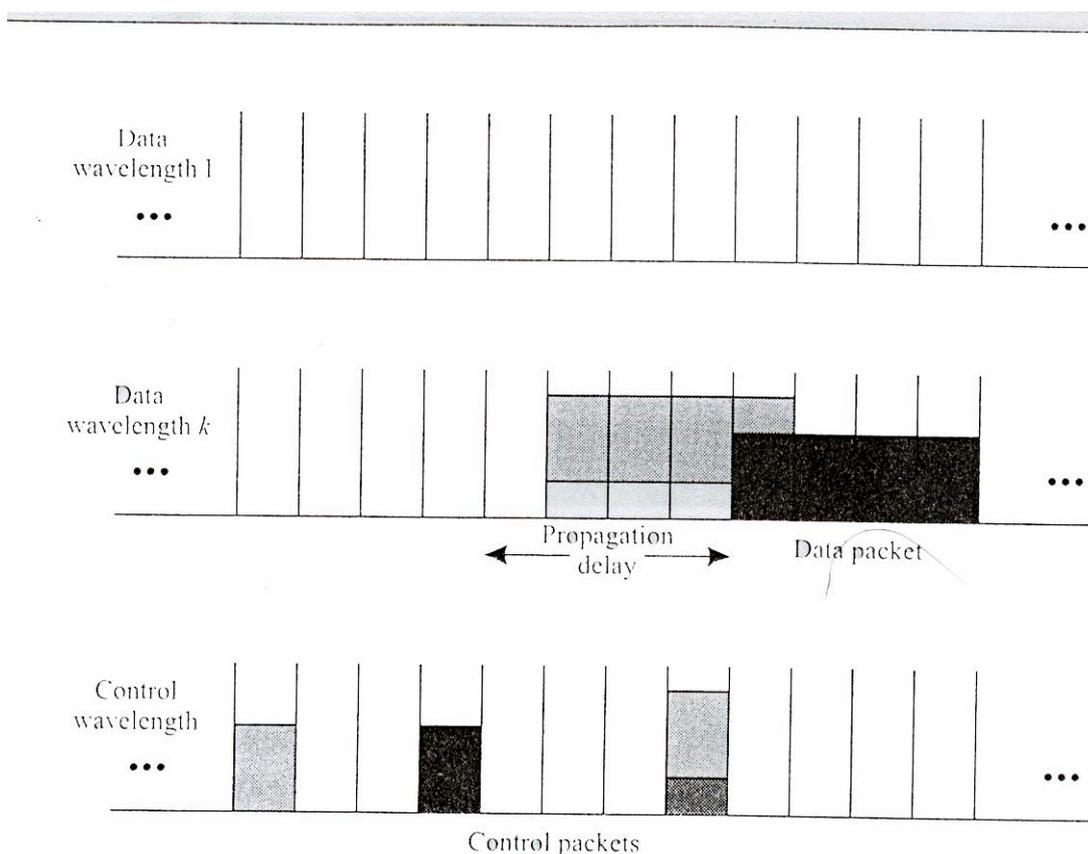


**Σχήμα 5.8** Οι θυρίδες ελέγχου και οι θυρίδες δεδομένων για το πρωτόκολλο DT-WDMA.

Σε κάθε θυρίδα δεδομένων, μία από τις  $n$  θυρίδες ελέγχου εκχωρείται σε κάθε κόμβο στο δίκτυο και ένας κόμβος μεταδίδει τα πακέτα ελέγχου μόνο στις θυρίδες ελέγχου που είναι εκχωρημένος. Μπορούμε και

πάλι να υποθέσουμε ότι οι θυρίδες ελέγχου  $kn+i$  είναι εκχωρημένες στον κόμβο  $i$ . Το πρωτόκολλο λειτουργεί ακολούθως.

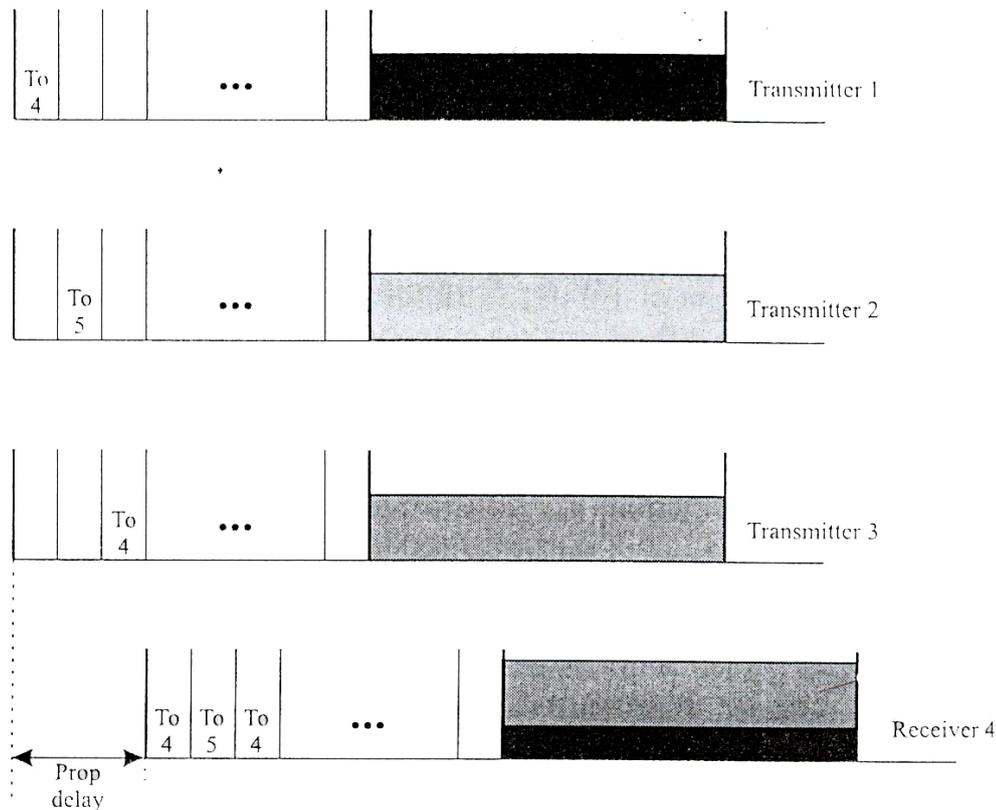
Το πακέτο ελέγχου αποστέλλεται σε μήκος κύματος ελέγχου ( $W+1$ ) και το πακέτο δεδομένων στο μήκος κύματος που αποδόθηκε στον μεταδότη σταθερού συντονισμού του κόμβου  $i$ , δηλαδή μήκος κύματος  $\lambda_i$ . Το πακέτο ελέγχου μεταφέρει την ταυτότητα του προτιθέμενου κόμβου παραλαβής/λήψης, ας πούμε τον  $x_j$  και η υποδοχή ελέγχου στην οποία αυτό το πακέτο μεταδίδεται, αναγνωρίζει το μήκος κύματος στο οποίο το πακέτο δεδομένων μεταδίδεται, ας πούμε  $\lambda_i$ . Κάθε κόμβος επιβλέπει συνεχώς το κανάλι ελέγχου. Έτσι ο κόμβος  $x_j$  θα λάβει το πακέτο ελέγχου που έχει σταλεί από τον κόμβο  $x_i$  στο διάστημα  $[d_{prop+i}, d_{prop+i+1})$  και θα γνωρίζει την επόμενη υποδοχή δεδομένων, ένα πακέτο δεδομένων προορισμένο για αυτό έχει μεταδοθεί σε μήκη κύματος  $\lambda_i$  και αυτό πρέπει να ληφθεί στο διάστημα  $[d_{prop+n}, d_{prop+2n})$ . Ο κόμβος  $x_j$  μετά συντονίζει τον παραλήπτη δεδομένων σε μήκη κύματος  $\lambda_i$  σε χρόνο  $d_{prop+n}$  και λαμβάνει το πακέτο δεδομένων.



**Σχήμα 5.9** Η λειτουργία του τροποποιημένου πρωτόκολλου Slotted Aloha/ Slotted Aloha.

Να σημειώσουμε ότι αφού ο κάθε κόμβος μεταδίδει τα πακέτα δεδομένων του σε ένα διαφορετικό μήκος κύματος, τα πακέτα δεδομένων δεν συγκρούονται ποτέ. Παρόλα αυτά όμως, δυο ή περισσότεροι κόμβοι

μπορεί να μεταδώσουν πακέτα δεδομένων προορισμένα για τον ίδιο παραλήπτη ταυτόχρονα και ο παραλήπτης θα είναι ικανός να λάβει μόνο ένα από αυτά τα πακέτα δεδομένων.



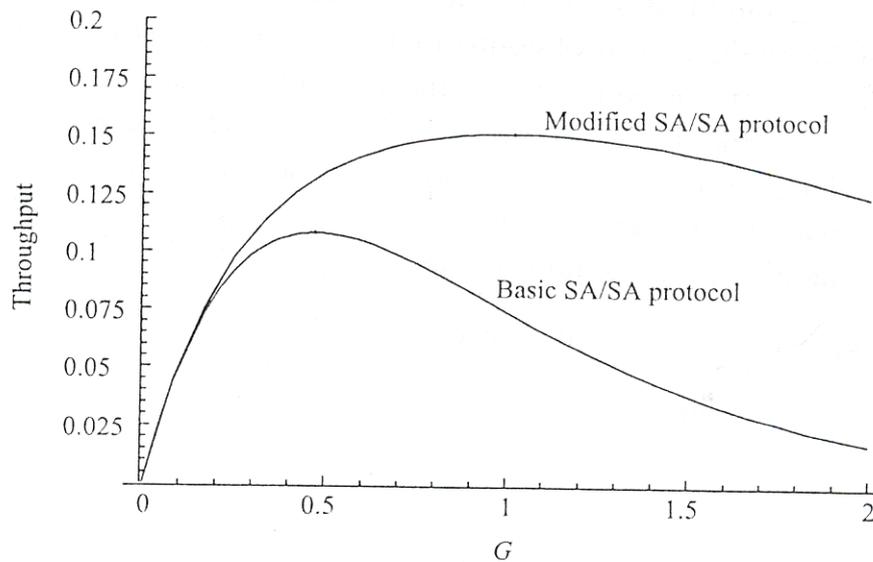
**Σχήμα 5.10** Η λειτουργία του πρωτόκολλου DT-WDMA.

Αφού όλοι οι κόμβοι επιβλέπουν το κανάλι ελέγχου, οι κόμβοι μετάδοσης που σχετίστηκαν με αυτόν τον «αγώνα» των πακέτων δεδομένων θα γίνουν γνωστές αυτού στον ίδιο χρόνο με τον κόμβο παραλήπτη. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται από ένα κόμβο παραλήπτη για την διάλυση αυτού του «αγώνα» - καθορίζει το πακέτο δεδομένων που θα ληφθεί ανάμεσα στα «αγωνιζόμενα» πακέτα – είναι γνωστός σε όλους τους κόμβους. Έτσι οι κόμβοι μετάδοσης που έχασαν τον «αγώνα» - των οποίων τα πακέτα δεν είχαν επιλεγεί από τον κόμβο παραλήπτη – μπορούν να μεταδώσουν τα πακέτα δεδομένων ξανά.

### Ανάλυση του throughput

Κάνουμε ξανά την ανεξάρτητη υπόθεση η οποία έχει ως εξής: σε οποιαδήποτε υποδοχή και για κάθε κόμβο, η πιθανότητα ότι ο κόμβος έχει ένα πακέτο για μεταφορά είναι  $p$ , ανεξάρτητη από όλες τις άλλες υποδοχές και όλους τους άλλους κόμβους. Κάνουμε επίσης την υπόθεση της ενιαίας κίνησης: κάθε

πακέτο δεδομένων είναι το ίδιο πιθανό να προορίζεται για οποιοδήποτε από τους  $n-1$  κόμβους εκτός από αυτόν που μεταδίδει, ανεξάρτητα από όλα τα άλλα πακέτα δεδομένων.



**Σχήμα 5.11** Διεκπεραιωτικότητες των βασικών και τροποποιημένων πρωτοκόλλων SA/SA έναντι του  $G$  για  $L=$  και  $W= 16$ .

Υπενθυμίζουμε ότι το throughput ανά κανάλι δεδομένων είναι ο αναμενόμενος αριθμός των πακέτων δεδομένων που μεταφέρθηκαν από ένα κανάλι δεδομένων σε ένα αυθαίρετο σημείο στον χρόνο (epoch=εποχή) που θα ληφθεί επιτυχώς. Από την στιγμή που οι υποδοχές δεν επικαλύπτω overlap=εξέχω, το throughput ανά κανάλι δεδομένων είναι επίσης ο αναμενόμενος αριθμός πακέτων δεδομένων που λαμβάνονται επιτυχώς σε μια αυθαίρετη υποδοχή δεδομένων, σε ένα αυθαίρετο κανάλι δεδομένων. Ισοδύναμα, μπορούμε επίσης να υπολογίσουμε το throughput ως ο αναμενόμενος αριθμός πακέτων δεδομένων που έχουν ληφθεί επιτυχώς σε μια αυθαίρετη υποδοχή δεδομένων από έναν αυθαίρετο παραλήπτη. Οπότε ας θεωρήσουμε ένα αυθαίρετο παραλήπτη, ας πούμε τον παραλήπτη χωρίς απώλεια της γενικότητας και μια τυχαία υποδοχή δεδομένων, ας πούμε  $[n,2n]$ . Ένα πακέτο δεδομένων θα ληφθεί επιτυχώς αν το λιγότερο ένα πακέτο δεδομένων προορισμένο για τον παραλήπτη 1 μεταδόθηκε στην υποδοχή δεδομένων  $[n,2n]$ . Ένα πακέτο δεδομένων προορισμένο για τον παραλήπτη μεταδόθηκε σε μια υποδοχή δεδομένων  $[v,2v]$  από ένα μεταδότη  $i$ ,  $i=2, \dots, n$  με πιθανότητα  $p/(n-1)$ . Έτσι κανένα τέτοιο πακέτο δεν μεταδόθηκε με πιθανότητα  $1-p/(n-1)$ . Αφού η μετάδοση των πακέτων δεδομένων και η επιλογή των προορισμών τους είναι ανεξάρτητες σε κάθε κόμβο, η πιθανότητα ότι κανένα πακέτο

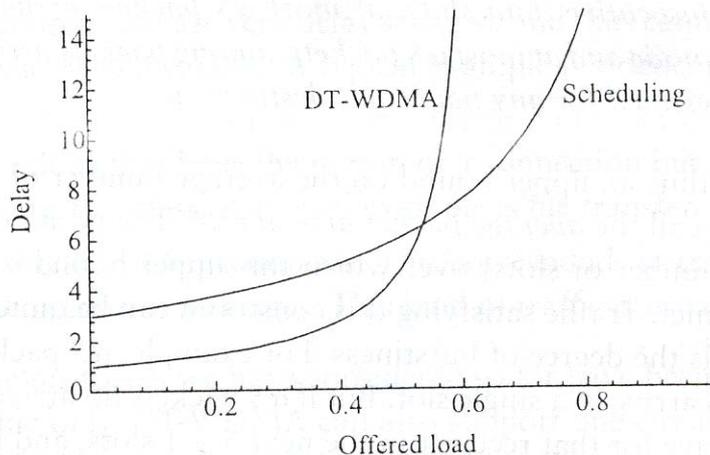
δεδομένων δεν προορίζεται για τον παραλήπτη 1 μεταδόθηκε στην υποδοχή δεδομένων  $[n, 2n)$  είναι  $(1 - p/(n-1))^{n-1}$  και το throughput του πρωτοκόλλου είναι:

$$1 - (1 - p/(n-1))^{n-1} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 1 - e^{-p} \quad (5.7)$$

Αν κάθε κόμβος έχει ένα πακέτο δεδομένων για μετάδοση σε κάθε υποδοχή (όλοι οι κόμβοι είναι σε κατάσταση κορεσμού)  $p=1$  και το throughput του πρωτοκόλλου DT-WDMA είναι  $1 - e^{-1} = 0.632$ . Στην πράξη, όταν οι συσχετίσεις μεταξύ των πακέτων δεδομένων σε διαφορετικές υποδοχές λαμβάνονται υπόψη, το throughput του πρωτοκόλλου έχει εκτιμηθεί κάπου κοντά στο 0.6 για μεγάλα  $n$ , χρησιμοποιώντας προσομοιώσεις. Ας σημειώσουμε εδώ ότι αυτές οι τιμές throughput είναι πολύ υψηλότερες από ότι θα μπορούσαμε να αποκτήσουμε με το πρωτόκολλο SA/SA ακόμα και με την μορφοποίηση του wait-and-see[4].

### 5.3.3 Προγραμματίζοντας τα πρωτόκολλα

Το πρωτόκολλο DT-WDMA έχει επίσης την ιδιότητα tell-and-go όπως το βασικό πρωτόκολλο SA/SA. Και εδώ, αν επιθυμούμε να αποποιηθούμε αυτής της ιδιότητας, μπορούμε να επιτύχουμε ένα υψηλότερο throughput. Πολλά πρωτόκολλα το κάνουν αυτό. Όλα κάνουν τις ίδιες υποθέσεις με το DT-WDMA στο υλικό που είναι διαθέσιμο σε κάθε κόμβο όπως ένας μεταδότης με σταθερό συντονισμό και συντονισμό παραλήπτη για δεδομένα σε σχέση με ένα μεταδότη ελέγχου και έναν παραλήπτη ελέγχου που λειτουργούν σε ένα κοινό μήκος κύματος ελέγχου. Οι κατασκευές των υποδοχών ελέγχου είναι επίσης ίδιες όπως στο DT-WDMA. Η βασική ιδέα πίσω από το προγραμματισμό πρωτοκόλλων διασαφηνίζεται από τα ακόλουθα:



**Σχήμα 5.12** Καθυστέρηση έναντι προσφερόμενου φορτίου για το DT-WDMA και καθορισμένα πρωτόκολλα.

Ένας κόμβος στέλνει ένα πακέτο ελέγχου στην υποδοχή ελέγχου του μόλις έχει ένα νέο πακέτο διαθέσιμο για μετάδοση ανακοινώνοντας τον κόμβο προορισμού για αυτό το πακέτο αλλά δεν στέλνει το πακέτο δεδομένων αμέσως. Αντίθετα, περιμένει για χρόνο  $d_{prop}$  έτσι ώστε να μάθει ποιοι άλλοι κόμβοι έχουν πακέτα να μεταδώσουν στον ίδιο κόμβο προορισμού. Έχοντας αυτήν την γνώση και συλλειτουργώντας, όλοι οι κόμβοι που έχουν πακέτα να μεταδώσουν στον ίδιο κόμβο προορισμού, προγραμματίζουν τις μεταδόσεις τους σε διαφορετικές υποδοχές δεδομένων έτσι ώστε να μην αγωνίζονται ποτέ μεταξύ τους. Το πρωτόκολλο μπορεί να περιγραφεί πιο λεπτομερώς ως εξής: Πρώτα κάνουμε ακριβή την γνώση του frame. Το frame είναι μια ομάδα από (ένα ή περισσότερα) διαδοχικές υποδοχές στα κανάλια δεδομένων και ελέγχου. Στην περίπτωση του DT-WDMA, ένα frame αποτελείται από μονή υποδοχή δεδομένων στο κανάλι δεδομένων και  $n$  υποδοχές ελέγχου στο κανάλι ελέγχου. Το frame  $k$  αποτελείται από την υποδοχή δεδομένων  $[kn, (k+1)n)$  και τις υποδοχές ελέγχου  $[kn, kn+1), [kn+1, kn+2), \dots, [kn+n-1, kn+n)$ . Υποθέτουμε ότι σε κάθε frame, ένας κόμβος έχει το πολύ ένα νέο πακέτο που φτάνει. Ένας κόμβος μεταδίδει την διεύθυνση προορισμού του νέου πακέτου, αν υπάρχει, στην υποδοχή ελέγχου του στο επόμενο frame, ας πούμε  $k$ . Υποθέτουμε επίσης ότι το  $d_{prop}$  είναι ένα πολλαπλάσιο του  $n$  και έστω  $d = d_{prop}/n$ . Τότε, όλοι οι κόμβοι θα λάβουν το frame  $k$  όταν μεταδίδουν το frame  $k+d$ . Όταν ένας κόμβος ολοκληρώνει την λήψη ενός frame, μαθαίνει τους προορισμούς όλων των πακέτων δεδομένων που έχουν φτάσει στους αντίστοιχους κόμβους μετάδοσης πριν την μετάδοση αυτού του frame. Αυτή η πληροφορία μπορεί εύκολα να αναπαρασταθεί με την μορφή ενός backlog πίνακα,  $B(k) = (b_{ij}(k))_{i,j=1}^n$ , όπου  $b_{ij}(k)$  είναι ο αριθμός των πακέτων δεδομένων στον κόμβο  $i$  που προορίζονται για τον κόμβο  $j$  ακριβώς πριν την μετάδοση του frame  $k$ . Όλοι οι κόμβοι χρησιμοποιούν ένα κοινό matching algorithm στον πίνακα  $B(k)$  για να καθορίσουν το πακέτο δεδομένων που ο καθένας από αυτούς πρέπει να μεταδώσει, αν υπάρχει, στο frame  $k+d+1$ . Ένας matching algorithm στον πίνακα  $B(k)$  διαλέγει ένα σύνολο πακέτων από αυτά που παρουσιάστηκαν στον  $B(k)$  έτσι ώστε να μην υπάρχουν 2 πακέτα στο σύνολο, που να έχουν τον ίδιο κόμβο προέλευσης ή προορισμού. Πιο συγκεκριμένα, ένας τέτοιος αλγόριθμος βρίσκει ένα πίνακα  $M = (M_{ij})_{i,j=1}^n$  έτσι ώστε  $m_{ij} = 1$  μόνο αν  $b_{i,j} \geq 1$  και κάθε γραμμή και στήλη του  $M$  περιέχει το πολύ μόνο 1 ( $m_{ij} = 1, m_{ij'} = 0, i' \neq i, m_{i'j} = 0, j' \neq j$ ). Έτσι οι ταυτόχρονες μεταδόσεις του συνόλου των πακέτων που επιλέχθηκαν από αυτόν τον αλγόριθμο, καταλήγει σε καθόλου ανταγωνισμό. Συνοψίζοντας, σε κάθε τέτοιο πρωτόκολλο, σε κάθε frame  $k$ , κάθε κόμβος εκτελεί τα παρακάτω τέσσερα βήματα:

1. (μεταδότης ελέγχου) μετάδοση ενός πακέτου ελέγχου που disseminate(διαδίδει) την διεύθυνση προορισμού μιας άφιξης νέου πακέτου, αν υπάρχει, κατά την διάρκεια της μετάδοσης ενός frame  $k-1$ .

2. (παραλήπτης ελέγχου) λήψη των πακέτων που μεταδόθηκαν στο frame  $k-d$ , υπολογισμός του πίνακα  $B(k-d)$  και ένας συνδυασμός/ταίριασμα σε αυτόν τον πίνακα για τον καθορισμό του πακέτου δεδομένων, αν υπάρχει, που πρέπει να μεταδοθεί στο επόμενο  $(k+1)$  frame.
3. (μεταδότης δεδομένων) μετάδοση του πακέτου δεδομένων, αν υπάρχει που καθορίζεται τρέχοντας τον matching algorithm στον πίνακα  $B(k-d-1)$ .
4. (παραλήπτης δεδομένων) λήψη δεδομένων που προορίζονταν για αυτόν τον κόμβο, αν υπάρχει και μεταδόθηκε στο  $(k-d)$  frame.

Χρησιμοποιώντας αυτά τα πρωτόκολλα, κάθε πακέτο υποφέρει από καθυστέρηση πρόσβασης  $d$  frames το λιγότερο αλλά αυτό μάς δίνει την δυνατότητα να αυξήσουμε το μέγιστο throughput πέρα από την τιμή  $(1-e^{-1})$  που επιτεύχθηκε από το DT-WDMA (για μεγάλο  $n$ ). Πόσο όμως; Αυτό εξαρτάται από την πολυπλοκότητα του matching algorithm που χρησιμοποιούμε.

Ας θυμηθούμε ότι δοθέντος ενός συνόλου πακέτων με συγκεκριμένες προελεύσεις και προορισμούς, το matching είναι ένα υποσύνολο πακέτων έτσι ώστε να μην υπάρχουν δυο πακέτα στο υποσύνολο που να έχουν τον ίδιο κόμβο προέλευσης και προορισμού. Υπάρχουν πολλά πιθανά matching αλλά μόνο δυο τύποι μάς ενδιαφέρουν στις ακόλουθες συζητήσεις. Ένα maximum matching είναι ένα matching μέγιστου μεγέθους (μετρούμενο σε αριθμό πακέτων)[5]. Ένα maximal matching είναι ένα matching που δεν μπορεί να μεγαλώσει άλλο, που σημαίνει ότι όλα τα πακέτα που δεν περιλαμβάνονται στο matching έχουν είτε κοινή προέλευση είτε κοινή προορισμό με ένα από τα πακέτα που περιλαμβάνονται στο matching. Όπως αναμενόταν, η εύρεση ενός μέγιστου matching είναι πολύ πιο δύσκολη υπόθεση από την εύρεση ενός maximal matching.

Αν ένας αλγόριθμος προγραμματισμού υπολογίζει ένα maximum matching σε κάθε υποδοχή, μπορεί να επιτύχει ένα μέγιστο throughput της τάξεως του 1. Διάφοροι ερευνητές έδειξαν, παρόλα αυτά ότι, η απώλεια στο throughput είναι αρκετά μικρή όταν χρησιμοποιούνται λιγότερο πολύπλοκοι matching algorithms όπως το maximal matching.

### **Ανάλυση Throughput**

Για να υπολογίσουμε το throughput του προγραμματισμένου πρωτοκόλλου DT-WDMA χρησιμοποιώντας ένα maximum matching σε κάθε υποδοχή, κάνουμε τις ίδιες 2 υποθέσεις που κάνουμε μέχρι τώρα: (1) η υπόθεση ανεξαρτησίας, η οποία ορίζει ότι κάθε υποδοχή και για κάθε κόμβο, η πιθανότητα ότι ο κόμβος έχει ένα πακέτο για μετάδοση είναι  $p$ , ανεξάρτητα από όλες τις άλλες υποδοχές και όλους τους άλλους κόμβους και (2) η υπόθεση ενιαίας κίνησης, η οποία ορίζει ότι κάθε πακέτο

δεδομένων έχει την ίδια πιθανότητα να προορισθεί για οποιονδήποτε από τους  $n-1$  κόμβους εκτός από αυτόν που μεταδίδει, ανεξάρτητα από όλα τα άλλα πακέτα δεδομένων. Κάτω από αυτές τις υποθέσεις, μπορεί ναδειχθεί ότι όλα τα πακέτα μεταδίδονται επιτυχώς, με την προϋπόθεση ότι  $p < 1$ . δηλαδή το throughput αυτού του πρωτοκόλλου – ο αναμενόμενος αριθμός πακέτων που μεταδόθηκαν επιτυχώς σε τυχαία υποδοχή δεδομένων- είναι απλά  $p$ . Αν η υπόθεση ενιαίας κίνησης είναι relaxed αλλά αντίθετα υποθέσουμε ότι ένα πακέτο που φτάνει στον μεταδότη  $i$  προορισμένο για τον παραλήπτη  $j$  με πιθανότητα

$p_{ij}$  και  $p_{ji}$  ικανοποιεί τα εξής  $\sum_i p_{ij} = \sum_j p_{ji} = 1$ , τότε μπορούμε ακόμα να μεταδώσουμε όλα τα πακέτα

επιτυχώς, με την προϋπόθεση ότι χρησιμοποιούμε έναν κατάλληλο μέγιστο matching algorithm όπου μεταφέρει παλαιότερα πακέτα κατ'επιλογή.

Μπορούμε να αποκτήσουμε μια διαισθητική κατανόηση όλων αυτών των αποτελεσμάτων όπως ακολουθεί. Το άθροισμα όλων των εισαγωγών στον backlog πίνακα  $B(k)$  είναι ο αριθμός των πακέτων που περιμένουν στο σύστημα πριν την μετάδοση του frame  $k$ . Αν κάθε στοιχείο που εισάγουμε στον  $B(k)$  είναι μη μηδενικό – έτσι ώστε να έχουμε backlogged πακέτα σε κάθε μεταδότη για κάθε παραλήπτη – μπορούμε να μεταδώσουμε  $n$  πακέτα σε κάθε frame, κατά μέσο όρο. Αυτό δείχνει ότι αν όλα τα backlogs δομούνται με τον ίδιο ρυθμό, μπορούν να “catch-up” χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε maximum matching. Αυτή είναι η περίπτωση της ενιαίας κίνησης. Παρόλα αυτά, όταν η κίνηση δεν είναι ενιαία, κάποια backlogs δομούνται πιο γρήγορα. Έτσι δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα αυθαίρετο maximum matching, αλλά ένας maximum matching algorithm που μεταδίδει πακέτα κατά το δοκούν.

### **Καθυστέρηση εναντίον throughput**

Σκεπτόμενοι την απόδοση διαφόρων πρωτοκόλλων MAC, έχουμε συζητήσει μόνο το throughput αυτών των πρωτοκόλλων αν και έχουμε αναφερθεί αρκετές φορές στο trade-off μεταξύ καθυστέρησης, συγκεκριμένα καθυστέρηση πρόσβασης και throughput. Έτσι οι αλγόριθμοι προγραμματισμού για τους οποίους μιλήσαμε νωρίτερα επιτυγχάνουν ένα throughput κοντά στο 1 συγκρινόμενο με την τιμή 0.632 για το throughput που επιτεύχθηκε από το DT-WDMA, αλλά το τίμημα είναι η μεγάλη καθυστέρηση. Η ανάλυση της καθυστέρησης για την απόδοση των πρωτοκόλλων MAC είναι αξιοσημείωτα πιο περίπλοκη, αλλά ποιοτικά η καθυστέρηση απόδοσης του DT-WDMA και των πρωτοκόλλων προγραμματισμού είναι όπως φαίνονται στο σχήμα 5.12. Εδώ σχεδιάζουμε την καθυστέρηση σε μονάδες χρόνου διάδοσης μιας κατεύθυνσης ανάμεσα στους κόμβους στο δίκτυο. Η ελάχιστη καθυστέρηση που ανέχεται ένα πακέτο από την στιγμή της μετάδοσης μέχρι την στιγμή που λαμβάνεται από τον προορισμό είναι έτσι μια μονάδα. Το προσφερόμενο φόρτωμα ιάνει η μέση τιμή των πακέτων που φτάνουν ανά υποδοχή δεδομένων ανά μήκος κύματος. Για χαμηλά loads, το πρωτόκολλο DT-WDMA φτάνει αυτήν την καθυστέρηση μιας και τα πακέτα σπάνια αναμεταδίδονται λόγω contentions. Όσο το προσφερόμενο

load πλησιάζει την τιμή 0.632 του throughput, η καθυστέρηση μεγαλώνει σημαντικά μιας και ένας μεγαλύτερος αριθμός πακέτων θα πρέπει τώρα να επαναμεταδοθεί λόγω των contentions του παραλήπτη. Στην περίπτωση προγραμματισμού πρωτοκόλλων, η ελάχιστη καθυστέρηση είναι 3 μονάδες από την στιγμή που παίρνει χρόνο διάδοσης ενός round-trip για την συλλογή των πληροφοριών προγραμματισμού πριν το πακέτο μεταδοθεί. Παρόλα αυτά, το προσφερόμενο load αυξάνει κοντά και πέρα από το throughput του DT-WDMA, οι καθυστερήσεις στο πρωτόκολλο προγραμματισμού γίνεται μικρότερη από αυτή στο DT-WDMA.

### 5.3.4 Προγραμματίζοντας την ντετερμινιστική κίνηση

Μέχρι τώρα, έχουμε υποθέσει ένα στοχαστικό μοντέλο για την κίνηση: το άνοιγμα (υποδοχή) έχει ένα πακέτο με πιθανότητα  $p$  και ούτω καθεξής. ένα σύνολο από πρωτόκολλα με διάφορες ενδιαφέρουσες ιδιότητες έχουν τεθεί σε εφαρμογή για την περίπτωση όπου η κίνηση που εισάγεται ικανοποιεί το ακόλουθο ντετερμινιστικό μοντέλο, το οποίο καλείται επίσης και ως  $(a,S)$  περιορισμός.

Σε κάθε σύνολο  $S$  διαδοχικών υποδοχών πληροφορίας (data slots) φτάνουν το πολύ  $aS$  πακέτα για μετάδοση σε κάθε κόμβο και το πολύ  $aS$  πακέτα, ανάμεσα στα πακέτα που φτάνουν σε όλους τους  $n$  κόμβους, προορίζονται για οποιοδήποτε συγκεκριμένο προορισμό.

Η παράμετρος  $a$  είναι έτσι ένα άνω φράγμα της μέσης τιμής του αριθμού των πακέτων ανά υποδοχή ανά κόμβο, το οποίο καλούμε ως μέσο ρυθμό άφιξης πακέτων. Η παράμετρος  $S$  αντιπροσωπεύει το χρονικό διάστημα (αριθμός υποδοχών) πάνω στο οποίο αυτό το άνω φράγμα  $a$  του μέσου ρυθμού άφιξης συναντάται. Η κίνηση που ικανοποιεί αυτό τον περιορισμό μπορεί να είναι αρκετά εκρηκτική και η παράμετρος  $S$  ελέγχει τον βαθμό αυτής της εκρηκτικότητας. Για παράδειγμα,  $aS$  πακέτα προορισμένα για μόνο ένα παραλήπτη μπορούν να φτάσουν σε μια μόνο υποδοχή, Αλλά αν τα  $aS$  πακέτα όντως φτάσουν με αυτό τον τρόπο, κανένα πακέτο δεν πρέπει να φτάσει για αυτόν τον παραλήπτη στις επόμενες  $S-1$  υποδοχές και κανένα πακέτο δεν θα πρέπει να έχει φτάσει για αυτόν τον παραλήπτη στις προηγούμενες  $S-1$  υποδοχές. Έτσι μπορούμε να ερμηνεύσουμε την παράμετρο  $S$  όσον αφορά τον έλεγχο της εκρηκτικότητας της κίνησης: όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του  $S$ , τόσο μεγαλύτερη είναι η επιτρεπόμενη εκρηκτικότητα. Η παράμετρος  $a$  ελέγχει το μέσο ρυθμό άφιξης των πακέτων. Και οι δύο παράμετροι θεωρούνται ότι είναι γνωστοί σε όλους τους κόμβους.

Το βασικό πλεονέκτημα αυτών των πρωτοκόλλων είναι ότι παρέχουν εγγυήσεις για την καθυστέρηση δεδομένου ότι η κίνηση ικανοποιεί ένα  $(a,S)$  περιορισμό. Τόσο η μέγιστη όσο και η μέση καθυστέρηση

πρόσβασης μπορούν να φραγούν για συγκεκριμένες σειρές τιμών του  $a$ . Παράλληλα με την καθυστέρηση, μια άλλη θεώρηση στην υλοποίηση του προγραμματισμού του πρωτοκόλλου είναι η αποθήκευση που απαιτείται ώστε τα πακέτα να περιμένουν για μετάδοση. Θυμόμαστε ότι οι εισαγωγές στον Backlog πίνακα  $B(k)$  αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των πακέτων που περιμένουν για μετάδοση σε κάθε κόμβο για κάθε κόμβο προορισμού στο δίκτυο, ακριβώς πριν την μετάδοση του πλαισίου  $k$ . Το άθροισμα όλων των εισαγωγών στην γραμμή  $i$  του backlog πίνακα είναι ο αριθμός των πακέτων που αναμένουν για μετάδοση στον κόμβο  $i$  για όλους τους προορισμούς. Έτσι ένα μέτρο για την μέτρηση της αποθήκευσης που απαιτείται είναι το μέγιστο άθροισμα γραμμής του πίνακα. Αυτή η ποσότητα καλείται ως backlog. Μια άλλη χρήσιμη ιδιότητα αυτών των προγραμματισμένων πρωτοκόλλων είναι οι το μέγιστο backlog πάνω σε όλα τα πλαίσια φράσσεται.

### 5.3.5 Scalability και τάξεις κίνησης

Ένα σημαντικό μειονέκτημα όλων των πρωτοκόλλων που έχουμε εξετάσει είναι ότι η πληροφορία ελέγχου εκπέμπεται σε όλους τους κόμβους. Αυτό καταλήγει σε ένα αχρειαστο υπολογιστικό φόρτο επειδή κάθε κόμβος έχει να επεξεργαστεί όλα τα πακέτα ελέγχου. Αυτό μπορεί να αποτελεί ένα σοβαρό μπουτλιάρισμα σε ένα μεγάλο δίκτυο (όταν το  $n$  είναι μεγάλο). Με άλλα λόγια, αυτά τα πρωτόκολλα δεν έχουν κλίμακα από υπολογιστική άποψη με το μέγεθος του δικτύου.

Ένα άλλο μειονέκτημα σχετίζεται με την αντίληψη των τάξεων κίνησης. Μπορούμε να σκεφτόμαστε το δίκτυο να υποστηρίζει τρεις διαφορετικές τάξεις κίνησης:

- τάξη 1: Σύνδεση προσανατολισμένη με εγγυώμενο bandwidth. Η κίνηση από εφαρμογές που είναι ευαίσθητες στην καθυστέρηση και έτσι δεν μπορούν να ανεχτούν αναμεταδόσεις θα ανήκουν σε αυτή την κλάση. Ένα κλασικό παράδειγμα είναι το videoconferencing.
- τάξη 2: Η σύνδεση προσανατολίζεται δίχως εγγυήσεις για το bandwidth. Η κίνηση από εφαρμογές που έχουν γνώση της σύνδεσης αλλά δεν είναι ευαίσθητες στην καθυστέρηση θα ανήκουν σε αυτή την τάξη. Ένα κλασικό παράδειγμά είναι η μεταφορά αρχείων.
- τάξη 3: Χωρίς σύνδεση. Αυτό ανταποκρίνεται στην κίνηση από εφαρμογές όπως το email ή τα μηνύματα ελέγχου. Αυτού του είδους η κίνηση συνήθως καλείται ως datagram (αυτοδύναμο πακέτο) κίνηση.

Όλα τα πρωτόκολλα που έχουμε δει μέχρι τώρα έχουν σχεδιασθεί για να υποστηρίζουν μόνο datagram κίνηση. Το DT-WDMA μπορεί επίσης να υποστηρίξει μια σύνδεση εναλλασσόμενου κυκλώματος ανά κόμβο αλλά όχι πολλαπλές συνδέσεις. Σε ένα δίκτυο υπολογιστών, ένας κόμβος συνήθως έχει ένα αριθμό από συνδέσεις που έχει εγκατασταθεί με άλλους κόμβους αλλά αυτό μπορεί να μην είναι συνεχώς ενεργό και κατά συνέπεια ίσως να μην απαιτεί αποκλειστικό bandwidth. Συνήθως αποδεικνυόταν αληθινό στα περισσότερα σημερινά δίκτυα πώς το δίκτυο που υπάρχει από κάτω underlying network ή οι MAC layers υποστήριζαν μόνο υπηρεσίες χωρίς σύνδεση και η γνώμη/ένδειξη για σύνδεση επιβαλλόταν στο στρώμα (layer) μεταφοράς. Είναι ώρα να επανεξετάσουμε αυτό το θέμα σε σχέση με την δικτύωση υψηλών ταχυτήτων. Με τις τοπολογίες εκπομπής που θεωρούμε, το στρώμα (layer) δικτύου απουσιάζει(αφού δεν υπάρχει λειτουργία δρομολόγησης). Έτσι το ζήτημα του στρώματος μεταφοράς θα ήταν αρκετά απλοποιημένο αν το στρώμα MAC παρείχε κάποια υποστήριξη για την προσανατολισμένη κίνηση σύνδεσης.

Η υπολογιστική scalability επιτυγχάνεται έχοντας  $n$  κανάλια ελέγχου για ένα δίκτυο  $n$  κόμβων και σχεδιάζοντας κατάλληλα το πρωτόκολλο έτσι ώστε κάθε κόμβος να κοιτάζει στα πακέτα σε ένα μόνο κανάλι ελέγχου. Υπάρχουν  $n$  κανάλια δεδομένων, ένα για κάθε κόμβο στο δίκτυο, όπως στο DT-WDMA. Αν τα  $n$  κανάλια ελέγχου υλοποιούνται σε ξεχωριστά μήκη κύματος, το πρωτόκολλο απαιτεί  $2n$  μήκη κύματος για ένα δίκτυο  $n$  κόμβων. Τα  $n$  κανάλια ελέγχου μπορούν επίσης να πολυπλεχθούν στον χρόνο (time multiplexed) με τα  $n$  κανάλια δεδομένων έτσι ώστε μόνο  $n$  μήκη κύματος να είναι αναγκαία. Αυτό θα οδηγούσε σε μια μείωση στην χρήση των καναλιών δεδομένων.

## 5.4 Testbeds

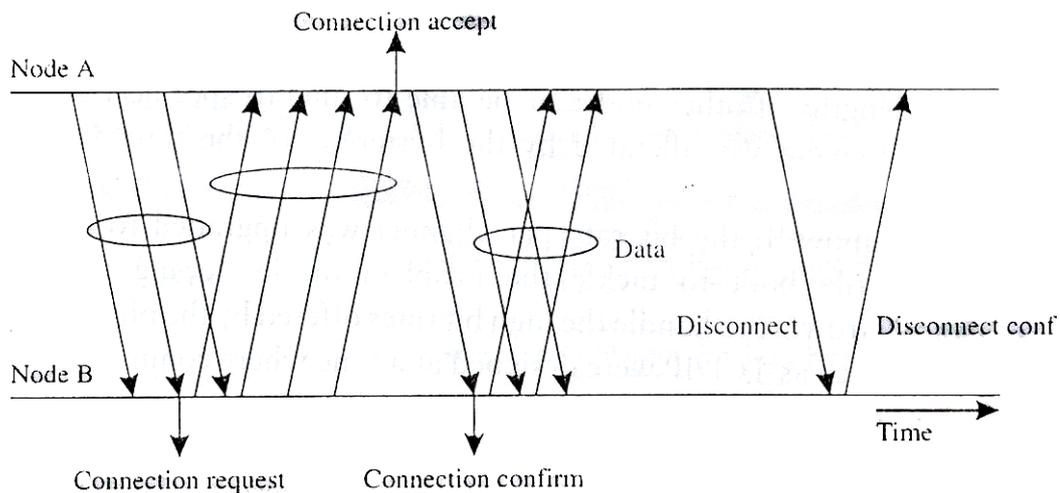
Ένας αριθμός από testbeds εκπομπής και επιλογής έχουν αναπτυχθεί από διάφορα ερευνητικά εργαστήρια. Αρχικά αυτά δείχνουν εναλλαγή κυκλώματος (circuit switching) και όχι εναλλαγή πακέτων, λόγω της παρούσας κατάστασης στον τεχνολογικό τομέα. Μια σύντομη περιγραφή κάποιων από τα πιο σημαντικά ακολουθεί.

**Πίνακας 5.1** Μία σύνοψη του συστήματος δοκιμών δικτύου εκπομπής και επιλογής.

Σύστημα Δοκιμών	Τοπολογία	Αριθμοί Των Μηκών Κύματος	Κενό Μηκών Κύματος	Ρυθμός Μετάδοσης Δυαδικών Ψηφίων
Lambdanet	Αστέρα	18 (18)	2 nm	1.5 Gb/s
NTT	Αστέρα	100 (100)	10 GHz	622 Mb/s
Rainbow-I	Αστέρα	12 (32)	1 nm	300 Mb/s
Rainbow-II	Αστέρα	4 (32)	1 nm	1 Gb/s
STARNET-I	Αστέρα	2 (80)	10 GHz (στα Gb/s)	1.25/2.5 Gb/s
BBC	Διασυνδεδεμένος Αστέρας	-(16)	4 nm	2.5 Gb/s

#### 5.4.1 Lambda net

Η Lambda net της Bell core ήταν από τις πρώτες επιδείξεις δικτύων εκπομπής και επιλογής. Κάθε κόμβος χρησιμοποιούσε ένα σταθερά συντονισμένο (fixed-tuned) μεταδότη/πομπό. Από την πλευρά του παραλήπτη, κάθε κόμβος χρησιμοποιούσε ένα grating (δικτυωτό) αποπολυπλέκτη για να διαχωρίσει τα μήκη κύματος και μια σειρά από παραλήπτες, ένα για κάθε μήκος κύματος. Πειράματα δείξαν μετάδοση 18 μηκών κύματος χωριζόμενα με απόσταση των 2nm, το καθένα στα 1.5 Gb/s πάνω από 57 km.

**Σχήμα 5.13** Το πρωτόκολλο εγκατάστασης σύνδεσης που χρησιμοποιείται στο Rainbow-I.

### 5.4.2 To testbed της NTT

Το πείραμα της NTT χρησιμοποίησε 100 μήκη κύματος με απόσταση των 10GHz, με το καθένα να μεταφέρει δεδομένα στα 622 Mb-s. Μόνο ένας παραλήπτης χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα. Αποτελούνταν από ένα συγχρονισμό φίλτρο Mach-Zehnder φτιαγμένο με χρήση σιλικόνης με ένα οπτικό προενισχυτή. Το φίλτρο συντονίζεται αλλάζοντας την θερμοκρασία.

### 5.4.3 Rainbow

Τα δίκτυα Rainbow-I και Rainbow-II της IBM σχεδιάστηκαν για να υποστηρίξουν 32 μήκη κύματος, απόστασης του ενός nm, σε μια διάταξη αστεριού. Κάθε κόμβος μεταδίδει χρησιμοποιώντας ένα σταθερά συντονισμένο (fixed-tuned) μεταδότη σε ένα μοναδικό μήκος κύματος και χρησιμοποιεί φίλτρο Fabry-Perot πιεζοσυντονισμένης (piezo-tuned) ίνας για να επιλέξει το επιθυμητό κανάλι. Το φίλτρο συντονίζεται μεταξύ μηκών κύματος στα 25 ms. Ένας κόμβος στο δίκτυο Rainbow-I αποτελείται από ένα PC με μια κάρτα προσαρμογέα (adaptor) της Rainbow που περιέχει το laser και τον παραλήπτη, μαζί με το συντονισμένο φίλτρο, καθώς επίσης υλικό για την υλοποίηση πρωτοκόλλου εγκατάστασης σύνδεσης. Ένα τέτοιο πρωτόκολλο υλοποιήθηκε στο testbed, το οποίο αρχικά αποτελείτο από 7 τέτοιους κόμβους. Αφού έχει πραγματοποιηθεί η εγκατάσταση της σύνδεσης, εσωτερικά δεδομένα μπορούν να μεταδοθούν με ρυθμούς άνω των 300 Mb/s σε κάθε μήκος κύματος.

Το πρωτόκολλο εγκατάστασης σύνδεσης που χρησιμοποιήθηκε στο Rainbow-I είναι ένα απλό πρωτόκολλο polling(σταθμοσκόπησης) που λειτουργεί ως εξής: Υποθέστε ότι επιθυμούμε να εγκαταστήσουμε μια πλήρως αμφίδρομη (full duplex) σύνδεση μεταξύ των κόμβων A και B. Θεωρούμε ότι ο κόμβος A μεταδίδει ένα μήνυμα με αίτημα σύνδεσης πάνω στο προσδιορισμένο μήκος κύματος  $\lambda_A$  για συγκεκριμένη χρονική διάρκεια  $\tau_r$ . Αν ο A δεν λάβει κανένα μήνυμα από τον B μέσα σε αυτή την περίοδο, η εγκατάσταση σύνδεσης ακυρώνεται. Παράλληλα ο κόμβος A κλειδώνει το φίλτρο του στο  $\lambda_B$  και στέλνει πίσω ένα μήνυμα επιβεβαίωσης σύνδεσης. Σε αυτό το σημείο, η σύνδεση εγκαθίστανται και ο A να ξεκινήσει την μετάδοση δεδομένων στον B. Από την στιγμή που ο B πάρει το μήνυμα επιβεβαίωσης της σύνδεσης, μπορεί να ξεκινήσει την μετάδοση δεδομένων στον A.

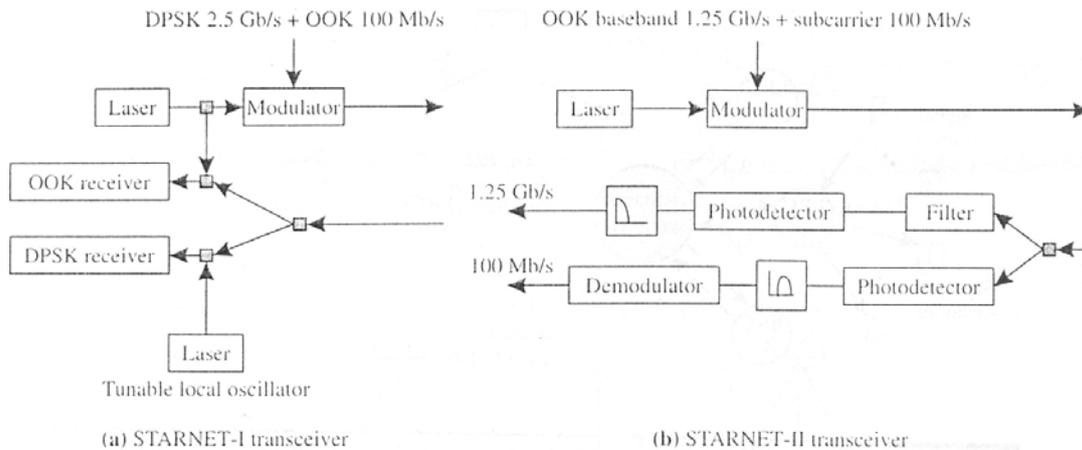
Ένα από τα πλεονεκτήματα αυτού του πρωτοκόλλου είναι ότι δεν απαιτεί οι κόμβοι να γνωρίζουν τα μήκη κύματος των άλλων κόμβων ή να είναι ικανοί να συντονιστούν σε συγκεκριμένα μήκη κύματος απευθείας. Αυτή η απαίτηση υπαγορεύθηκε από την υστέρηση του συγχρονισμού φίλτρου που χρησιμοποιήθηκε στο testbed.

Στο Rainbow-II, ο ρυθμός των bit ανα κανάλι προβιβάστηκε σε 1Gb/s. Το Rainbow-II αρχικά δημιουργήθηκε για να αποκρούσει το πρόβλημα της ανάπτυξης κατάλληλου υψηλού στρώματος software/hardware για να χειριστεί τους υψηλούς ρυθμούς bit που προσφέρονται από το φυσικό στρώματος. Πρωτόκολλα μεταφοράς όπως τα TCP/IP σχεδιάστηκαν σε μια περίοδο όπου τα bandwidths των επικοινωνιών ήταν χαμηλά, οι συνδέσεις επιρρεπείς στα σφάλματα και η ταχύτητα επεξεργασίας πρωτοκόλλων δεν αποτελούσε περιορισμό. Η κατάσταση σήμερα είναι ακριβώς η αντίθετη: τα bandwidths είναι υψηλά, οι συνδέσεις είναι σχετικά χωρίς λάθη και η επεξεργασία πρωτοκόλλου έχει γίνει ένα σημαντικό bottleneck όσο χρειάζονται όλο και περισσότερα πακέτα που πρέπει να επεξεργασθούν κάθε δευτερόλεπτο. Το αποτέλεσμα είναι ακόμα και αν οι συνδέσεις λειτουργούν σε ρυθμούς gigabit/second, μια εφαρμογή χρήστη μπορεί να δει μόνο μερικά megabits/second που οφείλονται στα bottlenecks της επεξεργασίας στα πρωτόκολλα υψηλού στρώματος. Μια άλλη συνέπεια είναι ότι ο host υπολογιστής μπορεί να ξοδέψει τους περισσότερους επεξεργαστικούς κύκλους σε επεξεργασία πρωτοκόλλου και δεν θα είναι ικανό να τρέξει άλλες χρήσιμες εφαρμογές. Μια λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι να βελτιώσουμε συγκεκριμένα πρωτόκολλα και μια άλλη λύση είναι να απόφορτώσουμε (off-load) την εργασία επεξεργασίας πρωτοκόλλου από τον host υπολογιστή πάνω σε κατάλληλες πλατφόρμες υλικού. Στο Rainbow-II, επιλέχθηκε η δεύτερη προσέγγιση και τα throughputs των μερικών εκατοντάδων megabits/second των εφαρμογών πραγματοποιούν.

#### 5.4.4 Starnet

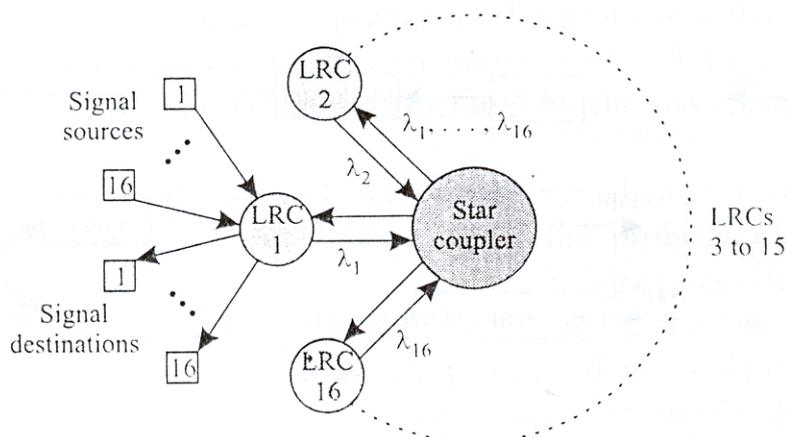
Η αρχιτεκτονική του Starnet είναι παρόμοια με αυτή του Rainbow. Το μοναδικό χαρακτηριστικό εδώ είναι ότι ο κάθε κόμβος μεταδίδει δεδομένα σε δυο κανάλια χρησιμοποιώντας ένα μονό laser σε ένα μοναδικό μήκος κύματος. Ένα κανάλι τρέχει στα 2.5 Gb/s και το άλλο στα 100 Mb/s. Το κανάλι υψηλής ταχύτητας χρησιμοποιείται για να εγκαθιδρύσει συνδέσεις εναλλασσόμενου δικτύου με τους άλλους κόμβους όπως στο Rainbow[6]. Το κανάλι χαμηλής ταχύτητας χρησιμοποιείται διαφορετικά. Ο κόμβος  $i$  έχει έναν παραλήπτη που παραλαμβάνει το χαμηλής ταχύτητας κανάλι από τον κόμβο  $(i-1) \bmod N$ , όπου τον  $N$  είναι ο αριθμός των κόμβων. Έτσι τα κανάλια χαμηλής ταχύτητας χρησιμοποιούνται για να εγκαθιδρύσουν έναν λογικό δίκτυο δακτυλίου στα 100 Mb/s. Δυο μορφές μεταδοτών και παραληπτών χρησιμοποιήθηκαν. Σε μια πιο πρόσφατη έκδοση με το όνομα STARNET-I, τα δεδομένα των 2.5Gb/s διαμορφώθηκαν (modulated) στην φάση και τα δεδομένα των 100 Mb/s διαμορφώθηκαν στο amplitude χρησιμοποιώντας εξωτερικό διαμορφωτή. Ο παραλήπτης χρησιμοποίησε συνεπή εντοπισμό. Ο παραλήπτης υψηλής ταχύτητας χρησιμοποίησε ένα θερμικά συντονισμένο laser, όσο ο τοπικός

ταλαντωτής να επιλέξει το επιθυμητό κανάλι. Ο παραλήπτης χαμηλής ταχύτητας χρησιμοποίησε ένα μικρό κλάσμα της δύναμης από τον μεταδότη όπως ο τοπικός ταλαντωτής.



**Σχήμα 5.14** Συνδυασμένος συντονισμός δύο καναλιών που χρησιμοποιούν ένα μονό laser σε STARNET. Οι δέκτες ανταπόκρισης φαίνονται επίσης.

Στην πρόσφατη έκδοση, με το όνομα STARNET-II, το κανάλι υψηλής ταχύτητας ήταν στα 1.25 Gb/s. Αυτά τα δεδομένα διαμορφώθηκαν baseband και τα δεδομένα των 100 Mb/s στέλνονταν σε ένα υποφορέα κανάλι χρησιμοποιώντας έναν εξωτερικό διαμορφωτή. Στον παραλήπτη, ένα φίλτρο low-pass (χαμιλοπερατό) χρησιμοποιήθηκε για να αποσπάσει τα δεδομένα baseband, και ένα φίλτρο band-pass (Φίλτρο διέλευσης ζώνης) χρησιμοποιήθηκε για να αποσπάσει τα πολυπλεγμένα δεδομένα του υποφορέα.

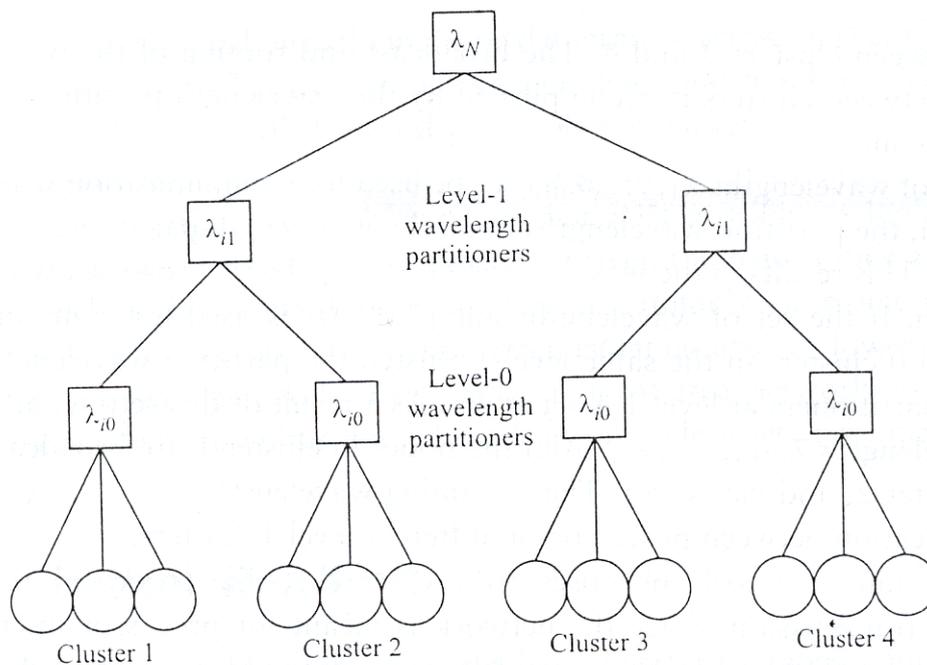


**Σχήμα 5.15** Η τοπολογία του συστήματος δοκιμών δικτύου του στούντιο της τηλεόρασης του BBC.

### 5.4.5 Lightning

Το testbed Lightning βρίσκεται υπό ανάπτυξη με συνεργασία των State University of New York at Buffalo, University of Maryland(College Park and Baltimore County), Laboratory for Physical Sciences(College Park), the Centre for Computing Sciences (Bowie) και του David Sarnoff Research Centre (Princeton). Είναι ένα ιεραρχικό δίκτυο WDM αρχικά προορισμένο για τη διασύνδεση του επεξεργαστή. Το δίκτυο μπορεί να έχει μια αυθαίρετη δομή δέντρου. Οι επεξεργαστές είναι τοποθετημένοι στα φύλλα του δέντρου και οι εσωτερικοί κόμβοι αντιπροσωπεύουν τους διαχωριστές μηκών κύματος(wavelength partitioners). Αυτές οι συσκευές παρέχουν την δυνατότητα δρομολόγησης μηκών κύματος μέσα στο δίκτυο και αυξάνουν επαναχρήση του μήκους κύματος- όπως κάνει ο δρομολογητής μήκους κύματος στην περίπτωση διασυνδεδεμένων αστεριών.

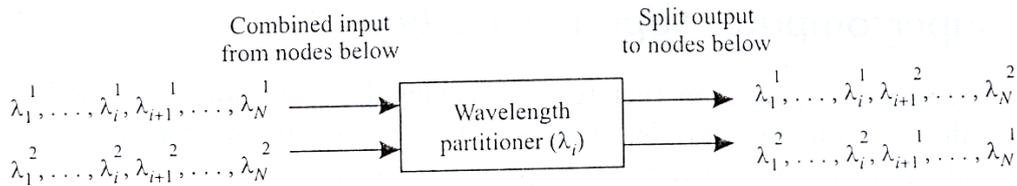
Πριν πούμε για την αρχιτεκτονική του testbed, βοηθάει να κατανοήσουμε την λειτουργία των διαχωριστές μηκών κύματος.



**Σχήμα 5.16** Η ιεραρχική δομή δέντρου του συστήματος δοκιμής Lightning. Οι επεξεργαστές παρουσιάζονται από τα φύλλα του δέντρου και τα διαχωρισμένα μήκη κύματος από εσωτερικούς κόμβους. Κάθε διασύνδεση που συνδέει ένα ζεύγος κόμβων παρουσιάζεται από ένα ζεύγος ινών, ένα για κάθε κατεύθυνση μετάθεσης.

Ο διαχωριστής μήκους κύματος είναι ένας διπλής εισόδου-εξόδου δρομολογητής που έχει ένα μήκος κύματος του τμήματος (partition) σχετιζόμενου με αυτό. Στο δενδρικό δίκτυο Lightning, οι εισαγωγές από τους κόμβους που βρίσκονται κάτω από ένα διαχωριστή μήκους κύματος συνδυάζονται και

συνδέονται στην είσοδο 1. Η εισαγωγή από τον κόμβο από πάνω θεωρείται ως είσοδος 2. Παρόμοια, η έξοδος 1 διαχωρίζεται και κατανέμεται στους από κάτω κόμβους του δέντρου και η έξοδος 2 αποστέλλεται στον κόμβο από πάνω. Υποθέτουμε ότι τα εισαγόμενα μήκη κύματος σε κάθε εισαγωγή είναι  $\lambda_1, \dots, \lambda_N$  και το μήκος κύματος του τομέα είναι  $\lambda_i$  μετά τα μήκη κύματος  $\lambda_1, \dots, \lambda_i$  δρομολογούνται από την είσοδο 1 στην έξοδο 1 και από την είσοδο 2 στην έξοδο 2. Τα μήκη κύματος  $\lambda_{i+1}, \dots, \lambda_N$  δρομολογούνται από την είσοδο 1 στην έξοδο 2 και από την είσοδο 2 στην έξοδο 1.



**Σχήμα 5.17** Ο διαχωριστής μήκους κύματος που χρησιμοποιείται στο σύστημα δοκιμής Lightning.

Η δεντρική δομή του δικτύου προσδιορίζει την ιεραρχική ομαδοποίηση των επεξεργαστών. Στο παράδειγμα της εικόνας 5.16 υπάρχουν 4 συστάδες επεξεργαστών στο χαμηλότερο επίπεδο (ας πούμε στο επίπεδο 0) οι οποίες ονομάζονται «συστάδα 1», «συστάδα 2», κλπ. Ένα σύνολο από μήκη κύματος χρησιμοποιούνται για αυτόν τον σκοπό και στις τέσσερις συστάδες. Οι συστάδες 1 και 2 στο επίπεδο 0 ομαδοποιούνται σε μια μοναδική συστάδα στο επίπεδο 1, παρομοίως οι συστάδες 3 και 4. Ένα σύνολο από μήκη κύματος (διαχωρισμένα από εκείνα που χρησιμοποιήθηκαν στις συστάδες του επιπέδου 0) χρησιμοποιούνται για επικοινωνία μέσα σε μια συστάδα επιπέδου 1, για παράδειγμα, ανάμεσα στις συστάδες 1 και 2 με εκπομπή. Το ίδιο σύνολο από μήκη κύματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε όλες τις άλλες συστάδες του επιπέδου 1, για παράδειγμα, μεταξύ των συστάδων 3 και 4. Η εκπομπή και η δρομολόγηση των μηκών κύματος μέσα και ανάμεσα στις συστάδες επιτυγχάνεται από τους διαχωριστές μηκών κύματος όπως θα εξηγήσουμε ακολούθως.

Αν το σύνολο των μηκών κύματος  $\lambda_1, \dots, \lambda_{i_0}$  είναι να χρησιμοποιηθεί για επικοινωνία μέσα σε κάθε συστάδα επιπέδου 0, τα μήκη κύματος του τομέα από όλα τα μήκη κύματος των τομέων στο επίπεδο 0 είναι ρυθμισμένα στο  $\lambda_{i_0}$ . Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα μήκη κύματος  $\lambda_1, \dots, \lambda_{i_0}$  να εκπέμπονται μέσα σε κάθε συστάδα επιπέδου 0. Αν το σύνολο των  $\lambda_{i_0+1}, \dots, \lambda_{i_1}$  χρησιμοποιείται για επικοινωνία μεταξύ συστάδων επιπέδου 0 στην ίδια συστάδα επιπέδου 1 είναι ρυθμισμένο στο  $\lambda_{i_1}$ . Σαν αποτέλεσμα αυτής της ρύθμισης όλα τα πακέτα που έχουν σταλεί σε μήκη κύματος  $\lambda_{i_0+1}, \dots, \lambda_{i_1}$  από τους κόμβους στην συστάδα

1 εκπέμπονται στους κόμβους στην συστάδα 2 και το αντίστροφο. Τα υπόλοιπα μήκη κύματος  $\lambda_{i1}, \dots, \lambda_N$  χρησιμοποιούνται για επικοινωνία μεταξύ επεξεργαστών σε διαφορετικές συστάδες επιπέδου 1.

Το δίκτυο Lightning προτείνει την χρήση ενός πρωτόκολλο προγραμματισμού για την απόκτηση μιας μετάδοσης χωρίς συγκρούσεις/επιπλοκές. Από την στιγμή που το δίκτυο προορίζεται για την διασύνδεση του επεξεργαστή, οι χρόνοι διάδοσης και κατ' επέκταση οι καθυστερήσεις πρόσβασης, είναι αμελητέες. Τα κανάλια ελέγχου δεν είναι σε ξεχωριστό μήκος κύματος αλλά πολυπλέκονται στα διαστήματα του χρόνου με τα κανάλια δεδομένων. Επιπλέον, τα δεδομένα ελέγχου προτείνεται να εκπέμπονται σε όλα τα μήκη κύματος χρησιμοποιώντας διατεταγμένο μεταδότη. Έτσι όλα τα κανάλια χρησιμοποιούνται για έλεγχο μετάδοσης πακέτων για κάποιο χρονικό διάστημα. Σε αυτό το testbed θα χρειαστούν γρήγορα συντονίσιμοι παραλήπτες/αποδέκτες.

### **5.5 Super Computer Super net testbed**

Το SST αναπτύχθηκε από κοινού από το University of California και το Jet Propulsion Laboratory and Aerospace Corporation. Η βασική εφαρμογή είναι στην διασύνδεση υπερυπολογιστών γεωγραφικά απομακρυσμένων μεταξύ τους. Ένα θεμελιώδες δίκτυο WDM εκπομπής χρησιμοποιώντας έναν star coupler (συνδετήρας αστέρα) επιτρέπει συνδέσεις εναλλασσόμενου δικτύου χρησιμοποιώντας το bandwidth ενός πλήρους μήκους κύματος που θα εγκατασταθεί κατ' απαίτηση (on demand), όπως περίπου στο Rainbow-I, δίκτυο το οποίο περιγράφηκε νωρίτερα. Αυτές οι συνδέσεις εναλλασσόμενου κυκλώματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εγκατάσταση μιας πολυβηματικής (multihop) εικονικής τοπολογίας πάνω στην οποία η εναλλαγή πακέτων μπορεί να υλοποιηθεί ηλεκτρονικά.

---

---

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

---

---

1. *M. Chen and T-S . Yum. A Conflict-Free protocol for optical WDMA networks. Proceedings of IEEE Glombecom, pages 1276-1281, 1991.*
2. *W. E. Hall et al., The Rainbow-II gigabit optical network. IEEE JSAC/JLT special Issue on Optical Networks, 14(6):814-823, June 1996.*
3. *K. J. Hood et al. Optical distribution system for television studio application. IEEE/OSA Journal on Lightwave Techology, 680-689 May /June 1993 .*
4. *A. S. Joshi. Media access control protocol for broadcast all-optical networks. Technical report, Indian Institute of Science, Bangalore, Jan 1997.*
5. *R. Ramaswami. Multi-Wavelength lightwave networks for computer communication. IEEE Communications Magazine, 78-88, Feb 1993.*
6. *T. Weller and B. Hajek. Scheduling non-uniform traffic in a packet switching system with small propagation delay. Proceedings of IEEE Infocom, 1994.*
7. *<http://www.analysis.co.uk>*
8. *<http://www.optical-networks.com>*
9. *<http://http://btlabs1.labs.bt.com/profsoclaccess/>*
10. *<http://www.techteam.gr>*

---

---

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.**

---

---

# **ΔΙΚΤΥΑ ΑΜΕΣΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ**

*Σε προηγούμενα κεφάλαια μελετήσαμε τη χρήση των οπτικών δικτύων για ενδοεπιχειρησιακές και τοπικές εφαρμογές, καθώς επίσης και για μητροπολιτικά δίκτυα. Οι τηλεφωνικές και οι επιχειρήσεις καλωδιακών εγκαταστάσεων δίνουν μεγάλη έμφαση στην εξέλιξη δικτύων που θα τους επιτρέψουν να παρέχουν μια μεγάλη ποικιλία υπηρεσιών σε σπίτια και επιχειρήσεις. Η τελευταία λέξη ενός τέτοιου είδους δικτύου που “τρέχει” από την εγκατάσταση του παροχέα έως το σπίτι ή την επιχείρηση, ονομάζεται δίκτυο άμεσης πρόσβασης.*

---

## 6.1 Εισαγωγή

Στις μέρες μας, τα σπίτια έχουν συνήθως δύο τύπους τέτοιων υπηρεσιών : την κλασική τηλεφωνία ( POTS-plain old telephony service) από το τηλεφωνικό δίκτυο και την καλωδιακή τηλεόραση. Στις επιχειρήσεις είναι ήδη σύνηθες φαινόμενο η παροχή υψηλής ταχύτητας και χωρητικότητας συνδέσεων, συμπεριλαμβανομένων και των SONET/SDH. Πρώιμες προσπάθειες στην εξέλιξη υψηλής χωρητικότητας συνδέσεων σε δίκτυα άμεσης πρόσβασης , εστιάστηκαν στην προσπάθεια δημιουργίας δικτύων που θα ενσωμάτωναν διάφορες μορφές video, για εφαρμογές όπως video in demand και υψηλής ευκρίνειας εικόνα. Παρ' όλα αυτά, το εύρος υπηρεσιών που θα απαιτήσουν οι καταναλωτές στο μέλλον, δεν μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια. Η σημερινή λίστα υπηρεσιών περιλαμβάνει πρόσβαση στο διαδίκτυο, τηλεφωνική επικοινωνία, μάθηση εξ' αποστάσεως και άλλα είδη πρόσβασης με υψηλές ταχύτητες καθώς και εφαρμογές video όπως τηλεσυνεδριάσεις. Ο όρος full service υποδεικνύει μια ποικιλία υπηρεσιών που αναμένονται από τα δίκτυα άμεσης πρόσβασης στο μέλλον. Ένα παράδειγμα των διαφορετικών αυτών υπηρεσιών και των χαρακτηριστικών τους, δίνονται στο πίνακα 6.1. Και οι τηλεφωνικές αλλά και οι εταιρίες καλωδίου, τείνουν να γίνουν παροχής ολοκληρωμένων υπηρεσιών (full service).

**Πίνακας 6.1** Διαφορετικά είδη εξυπηρέτησης που πρέπει να υποστηρίζεται από κάποια υπηρεσία παροχής internet.

Service	Type	Downstream Bandwidth	Upstream Bandwidth
Telephony	Switched	4KHz	
ISDN	Switched	144kb/s	
Broadcast video	Broadcast	Analog or 6 Mb/s	
Interactive video	Switched	6 Mb/s	
Internet access	Switched	A few Mb/s	
Videoconferencing	Switched	6 Mb/s	
Business services	Switched	1.5-622 Mb/s	

Σε ευρύ επίπεδο, αυτές οι υπηρεσίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση 3 κύρια κριτήρια. Το πρώτο είναι οι απαιτήσεις σε εύρος συχνοτήτων, που μπορεί να κυμαίνεται από λίγα kHz για την απλή τηλεφωνία, έως και αρκετά MHz για ροή video. Το δεύτερο είναι αν υπάρχει απαίτηση για συμμετρική επικοινωνία (δυσ δρόμων), για παράδειγμα το video-conference, ή ασύμμετρη, για παράδειγμα η καλωδιακή τηλεόραση. Σήμερα η επικοινωνία τείνει να είναι κυρίως ασύμμετρη, με μεγαλύτερο απαιτούμενο εύρος συχνοτήτων από τον παροχέα προς τον χρήστη (downstream) παρά από τον χρήστη προς τον παροχέα (upstream). Το τελευταίο κριτήριο είναι το αν η υπηρεσία είναι καθολική κι έτσι κάθε χρήστης παίρνει την ίδια πληροφορία, ή αν υπάρχει δρομολόγηση κι έτσι κάθε χρήστης παίρνει διαφορετική πληροφορία.

## 6.2 Αρχιτεκτονική δικτύου

Ας δούμε τώρα την αρχιτεκτονική που πρέπει να έχουν τα δίκτυα πρόσβασης, για να παρέχουν τις υπηρεσίες που περιγράψαμε. Σε γενικές γραμμές, ένα δίκτυο άμεσης πρόσβασης αποτελείται από ένα hub, απομακρυσμένους κόμβους (RNs) και τις μονάδες διεπαφής του δικτύου (N/Us). Στην περίπτωση μιας τηλεφωνικής εταιρίας, το hub είναι τα κεντρικά γραφεία (CO) και στην περίπτωση μιας καλωδιακής, είναι τα ονομαζόμενα head end. Κάθε hub εξυπηρετεί αρκετά σπίτια μέσω των NIUs. Ένα NIU μπορεί να βρίσκεται στο σπίτι ή με τη σειρά του να εξυπηρετεί κι αυτό έναν αριθμό σπιτιών. Το hub μπορεί να είναι και το ίδιο μέρος ενός μεγαλύτερου δικτύου, αλλά για λόγους διευκόλυνσης το θεωρούμε σαν πηγή δεδομένων προς τα NIUs καθώς και σαν “νιπτήρα” δεδομένων από τα NIUs. Σε πολλές περιπτώσεις απ’ το να πηγαίνουν καλώδια από το hub σε κάθε NIU, χρησιμοποιείται μια διαφορετική ιεραρχία μεταξύ τους. Κάθε hub μπορεί να είναι συνδεδεμένο με αρκετά RNs τοποθετημένα στο δίκτυο και αυτά με τη σειρά τους να συνδέονται με αρκετά NIUs. Το δίκτυο μεταξύ των hub και των RN και NIUs ονομάζεται δίκτυο διανομής (distribution).

Είδαμε ότι οι υπηρεσίες μπορούν να είναι καθολικές ή δρομολογούμενες. Με τον ίδιο τρόπο, το δίκτυο διανομής μπορεί να χρησιμοποιεί δρομολόγηση ή όχι. Διαφορετικοί συνδυασμοί των δυο είναι εφικτοί. Για παράδειγμα μια καθολική υπηρεσία μπορεί να υποστηρίζεται από καθολικό ή από δίκτυο δρομολόγησης και μια υπηρεσία που απαιτεί δρομολόγηση, μπορεί να υποστηρίζεται επίσης από το ίδιο. Σ ένα δίκτυο καθολικής εκπομπής, ένα RN εκπέμπει δεδομένα που λαμβάνει από το δίκτυο τροφοδότησης, σε όλα τα NIUs. Σ’ ένα δίκτυο που δρομολογεί τα δεδομένα, το RN επεξεργάζεται τα δεδομένα που δέχεται και στέλνει διαφορετικές ροές δεδομένων σε διαφορετικά NIUs. Το τηλεφωνικό δίκτυο που θα μελετήσουμε στη συνέχεια, είναι δίκτυο που δρομολογεί τα δεδομένα, ενώ η καλωδιακή τηλεόραση είναι δίκτυο καθολικής εκπομπής. Τα δίκτυα καθολικής εκπομπής είναι συνήθως φθηνότερα από αυτά με δυνατότητα δρομολόγησης, είναι τα πλέον κατάλληλα για την παροχή καθολικών υπηρεσιών και έχουν το πλεονέκτημα ότι όλα τα NIUs που χρησιμοποιούν είναι παρόμοια, πράγμα που τα κάνει πιο εύκολα στην εγκατάστασή τους. Τα δίκτυα με δυνατότητα δρομολόγησης, όπως λέει και το όνομά τους, είναι κατάλληλα για την παράδοση μη καθολικών υπηρεσιών και παρέχουν μεγαλύτερη ασφάλεια. Για παράδειγμα δεν μπορεί ένας πελάτης να «διαβάσει» τα δεδομένα ενός άλλου και είναι ακόμα πιο δύσκολο να αλλοιώσει τα δεδομένα ολόκληρου του δικτύου. Εσφαλμένη τοποθέτηση είναι γενικότερα πιο εύκολα να γίνει σε δίκτυα με δυνατότητα δρομολόγησης παρά σε καθολικής εκπομπής.

Στα δεύτερα, η «εξυπνάδα» βρίσκεται στα NIUs, ενώ αντιθέτως στα δίκτυα δρομολόγησης είναι μέσα στο δίκτυο. Έτσι σ' αυτά, τα NIUs μπορούν να είναι πιο απλά απ' ό τι στα δίκτυα καθολικής εκπομπής.

Ένας άλλος τρόπος κατηγοριοποίησης των δικτύων άμεσης πρόσβασης, βασίζεται στον τύπο του δικτύου τροφοδότησης που διαθέτουν. Ένα σενάριο λέει ότι το δίκτυο τροφοδότησης μπορεί να δίνει σε κάθε NIU το δικό του προσωπικό εύρος ζώνης. Σ' ένα άλλο σενάριο, το δίκτυο τροφοδότησης μπορεί να έχει το δικό του συνολικό εύρος ζώνης, το οποίο μοιράζεται για όλα τα NIUs. Σ' αυτή την περίπτωση, κάθε NIU θα μπορούσε θεωρητικά να χρησιμοποιήσει όλο το εύρος ζώνης για κάποια μικρά χρονικά διαστήματα. Γι' αυτό το λόγο απαιτείται κάποιο είδος ελέγχου, για να συντονίζει την πρόσβαση των NIUs στο συνολικό εύρος ζώνης. Αν η κυκλοφορία από ή προς ένα NIU είναι πολύ μεγάλη, τότε είναι πιο καλά να διαμοιραστεί το εύρος ζώνης σε πολλά NIUs, παρά να έχει κάθε ένα το δικό του δεδομένο. Απ' την άλλη μεριά όμως, με συγκεκριμένο εύρος σε κάθε NIU, μπορούμε να εγγυηθούμε και συγκεκριμένο QoS, πράγμα που είναι πολύ δύσκολο να το κάνουμε με το διαμοιραζόμενο εύρος ζώνης. Ένα ακόμα μειονέκτημα της προσέγγισης διαμοιραζόμενου εύρους, είναι ότι τα οπτικά/ηλεκτρονικά με τα οποία είναι εφοδιασμένα τα NIU, πρέπει να έχουν την δυνατότητα να δουλεύουν στο συνολικό εύρος ζώνης του δικτύου.

Ο πίνακας 6.2 κατηγοριοποιεί τους διάφορους τύπους δικτύων άμεσης πρόσβασης που θα μελετήσουμε σε αυτό το κεφάλαιο, σύμφωνα με το αν το δίκτυο διανομής τους έχει τη δυνατότητα δρομολόγησης ή όχι και αν χρησιμοποιούν δεδομένο ή διαμοιραζόμενο εύρος ζώνης για τα NIUs στο δίκτυο τροφοδότησής τους. Για παράδειγμα το τηλεφωνικό δίκτυο έχει τη δυνατότητα δρομολόγησης και τα NIUs που χρησιμοποιεί έχουν το δεδομένο εύρος ζώνης των 4kHz. Το καλωδιακό δίκτυο είναι καθολικής εκπομπής με όλα τα NIUs να μοιράζονται το συνολικό εύρος συχνοτήτων του καλωδίου. Ένα παθητικό οπτικό δίκτυο τύπου αστέρα WDM καθολικής δρομολόγησης (WPON), με δεδομένο εύρος για κάθε NIU, είναι ένα παράδειγμα δικτύου καθολικών υπηρεσιών αλλά με δεδομένο εύρος συχνοτήτων σε κάθε NIU.

### 6.3 Τα σημερινά δίκτυα άμεσης πρόσβασης

Σήμερα δύο είδη δικτύων άμεσης πρόσβασης φθάνουν στα σπίτια μας : το τηλεφωνικό δίκτυο και το καλωδιακό (π.χ. καλωδιακή τηλεόραση). Το τηλεφωνικό τρέχει πάνω σε χάλκινα καλώδια συνεστραμμένων ζευγών. Αποτελείται από σημείο προς σημείο χάλκινα ζεύγη ενώσεων μεταξύ του

τηλεπικοινωνιακού κεντρικού γραφείου και των σπιτιών συνδρομητών. Τα δύο καλώδια σε ένα ζευγάρι είναι συνεστραμμένα για να μειωθούν οι παρεμβολές μεταξύ των, γι' αυτό και το όνομα «συνεστραμμένων ζευγών». Αυτή η εγκατάσταση σχεδιάστηκε για να προσφέρει 4kHz εύρος ζώνης για κάθε σπίτι. Τα σύρματα από τα σπίτια συγκεντρώνονται με έναν ιεραρχικό τρόπο. Το τηλεφωνικό δίκτυο είναι ένα δίκτυο με δυνατότητα δρομολόγησης, που παρέχει δεδομένο εύρος ζώνης για κάθε χρήστη.

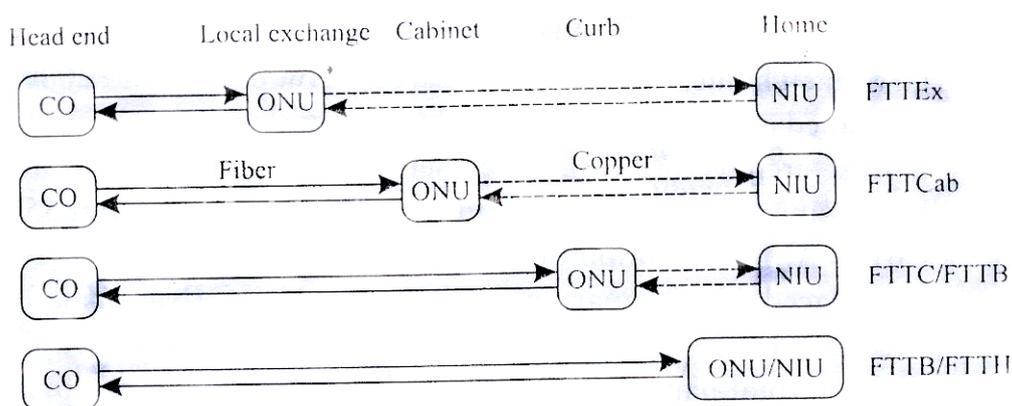
Ένα τυπικό καλωδιακό δίκτυο, αποτελείται από οπτικές ίνες μεταξύ των κεντρικών γραφείων της εταιρείας (παροχέας) και των απομακρυσμένων κόμβων (RN). Συνήθως, στα κανάλια από τα κεντρικά γραφεία γίνεται καθολική εκπομπή προς τους απομακρυσμένους κόμβους χρησιμοποιώντας πολυπλεξία SCM (sub carrier multiplexing) πάνω σ' ένα γραμμικό laser. Από τον απομακρυσμένο κόμβο, ομοαξονικά καλώδια φθάνουν μέχρι το κάθε σπίτι. Ένας απομακρυσμένος κόμβος εξυπηρετεί μεταξύ 500 και 2000 σπιτιών. Τέτοιο είδος δικτύου ονομάζεται HFC (hybrid fiber coax) δίκτυο. Ολόκληρη η αρχιτεκτονική του σήμερα, είναι αρχιτεκτονική δικτύου καθολικής εκπομπής. Το ίδιο σετ σημάτων από τα κεντρικά γραφεία παραδίδεται σε όλα τα σπίτια. Το εύρος ζώνης του καλωδίου είναι μεταξύ 50 και 550MHz και μεταφέρει τηλεοπτικό σήμα AM-VSB (amplitude modulated vestigial sideband) σε κανάλια των 6MHz, σύμφωνα με το Αμερικανικό πρότυπο NTSC (National Television System Committee). Το καλωδιακό δίκτυο είναι καθολικής εκπομπής και όλοι οι χρήστες μοιράζονται ένα κοινό συνολικό εύρος ζώνης. Ορισμένες εταιρείες κατασκευής τέτοιου είδους δικτύων φτιάχνουν ακόμα και modems συμβατά με την υποδομή του δικτύου τους, για γρήγορη πρόσβαση στο διαδίκτυο. Αυτά τα modems προσφέρουν ταχύτητες κατεβάσματος (downstream) που φθάνουν συνολικά τα 30Mb/s, ταχύτητα η οποία μοιράζεται στους χρήστες.

Συμπερασματικά μπορούμε να δούμε ότι το τηλεφωνικό με το καλωδιακό δίκτυο έχουν πολύ σημαντικές διαφορές μεταξύ τους. Το τηλεφωνικό προσφέρει πολύ μικρό εύρος ζώνης για κάθε σπίτι αλλά περιλαμβάνει ανεπτυγμένο εξοπλισμό δρομολόγησης και λειτουργίες και συστήματα διεύθυνσης. Το καλωδιακό δίκτυο, από την άλλη, προσφέρει μεγάλο εύρος ζώνης για κάθε σπίτι, αλλά δεν έχει τη δυνατότητα δρομολόγησης. Γίνεται καθολική εκπομπή των δεδομένων και οι λειτουργίες διεύθυνσής του είναι πολύ πιο απλές.

## 6.4 Μελλοντικά δίκτυα άμεσης πρόσβασης

Αρκετές προσεγγίσεις έχουν προταθεί για την αναβάθμιση της δομής των δικτύων άμεσης πρόσβασης για να υποστηρίξουν τις συνεχώς αυξανόμενες σε απαιτήσεις εφαρμογές που προκύπτουν. Το ISDN

(Integrated Services Digital Network) σήμερα προσφέρει 128kb/s πάνω στην υπάρχουσα δομή των καλωδίων συνεστραμμένων ζευγών και είναι διαθέσιμο σε πάρα πολλές πόλεις. Το ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Loop) είναι μια ακόμη τεχνική που δουλεύει κι αυτή πάνω στην υπάρχουσα δομή, αλλά παρέχει σαφώς μεγαλύτερο εύρος ζώνης σε σχέση με το ISDN. Το ADSL χρησιμοποιεί περίπλοκη διαμόρφωση και τεχνικές κωδικοποίησης για δυνατότητα μερικών Mb/s πάνω στα καλώδια συνεστραμμένων ζευγών, που όμως είναι αρκετά για την μετάδοση ακόμα και συμπιεσμένου video. Αυτό απαιτεί την ύπαρξη ενός ADSL modem και στο σπίτι αλλά και στα κεντρικά γραφεία. (CO). Παρ' όλα αυτά το ADSL έχει αρκετούς περιορισμούς. Το πραγματικό εύρος ζώνης είναι αντιστρόφως ανάλογο με την απόσταση μεταξύ σπιτιού και κεντρικών γραφείων και με την σημερινή τεχνολογία μπορούμε να πετύχουμε μόνο μερικά Mb/s (σχεδόν 9Mb/s αναλόγως την απόσταση και τις συνθήκες της γραμμής) με αυτή την υποδομή. Το υπάρχον τηλεφωνικό δίκτυο των καλωδίων συνεστραμμένων ζευγών περιλαμβάνει αρκετά φίλτρα των 4kHz που πρέπει να αναιρεθούν. Το εύρος ζώνης επιστροφής (upstream), περιορίζεται δραματικά στην τάξη μερικών εκατοντάδων kb/s (800kb/s ανάλογα την απόσταση και την κατάσταση της γραμμής). Έχουν προταθεί διάφορες παραλλαγές του ADSL. Όπως το συμβατικό τηλεφωνικό δίκτυο, το ISDN και ADSL μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σαν δίκτυα με δυνατότητα δρομολόγησης, με δεδομένο εύρος ζώνης για κάθε NIU.



Σχήμα 6.1 Διαφορετικά είδη από οπτικά δίκτυα προσπέλασης.

Μια άλλη προσέγγιση αρκετά δημοφιλής σήμερα, είναι η χρήση δορυφόρων. Το απ' ευθείας δορυφορικό σύστημα, χρησιμοποιεί έναν γεωσύγχρονο δορυφόρο για την καθολική εκπομπή μερικών εκατοντάδων καναλιών σε διάφορα σπίτια. Ένας δορυφόρος μπορεί να παρέχει μεγαλύτερο εύρος ζώνης από ένα επίγειο ομοαξονικό καλωδιακό σύστημα. Παρ' όλα αυτά, το μεγαλύτερο πρόβλημα είναι ότι αντιθέτως με τα επίγεια συστήματα, στο δορυφόρο η χωρική επαναχρησιμοποίηση του εύρους είναι αρκετά περιορισμένη, εφόσον ένας και μόνο δορυφόρος έχει μια πολύ μεγάλη επιφάνεια γης στην οποία

εκπέμπει τα κανάλια. Επίσης δεν υπάρχει τρόπος για την κυκλοφορία επιστροφής (upstream). Η ασύρματη πρόσβαση, είναι ακόμα μια βιώσιμη επιλογή. Παρ' όλο που υποφέρει από περιορισμένο εύρος ζώνης και ακτίνα, μπορεί να εγκατασταθεί αστραπιαία και επιτρέπει στους παροχής χωρίς μια υπάρχουσα δομή, να μπαίνουν δυναμικά στην αγορά. Ανάμεσα στις παραλλαγές είναι το MMDS (multichannel multipoint distribution service), που είναι ένα επίγειο με οπτική επαφή σύστημα με 336MHz κανάλια σε ζώνη 2 – 3GHz και το LMDS (local multipoint distribution service), το οποίο λειτουργεί και χωρίς οπτική επαφή σε ζώνη 28GHz με εύρος ζώνης στα 1.3GHz και είναι κατάλληλο για πιο μικρές εγκαταστάσεις, μέσα στα όρια μιας πόλης.

Οι δυο κύριες αρχιτεκτονικές όμως που μελετιούνται και εφαρμόζονται περισσότερο σήμερα, είναι οι επονομαζόμενες HFC (hybrid fiber coax) και το FTTC (fiber to the curb). Το HFC είναι ακόμα αρχιτεκτονική καθολικής εκπομπής, αντιθέτως με το FTTC που διαθέτει και τεχνικές δρομολόγησης της πληροφορίας.

## 6.5 HFC

Παρόλο που χρησιμοποιούμε τον όρο HFC (Hybrid Fiber Coax) για να περιγράψουμε την υπάρχουσα καλωδιακή δομή, το HFC είναι επίσης και ο όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την αναβαθμισμένη μορφή αυτής της δομής. Ένας καλύτερος όρος για να το περιγράψουμε είναι το CMFCB (sub carrier modulated fiber coax bus). Όπως και στο υπάρχον καλωδιακό δίκτυο, το κατέβασμα δεδομένων είναι καθολικό από τα κεντρικά γραφεία στους απομακρυσμένους κόμβους (οπτικά), με τη χρήση ενός οπτικού παθητικού συζεύκτη (coupler). Από τον απομακρυσμένο κόμβο αρκετά δέντρα ομοαξονικών καλωδίων φεύγουν προς τα NIUs. Ένα NIU μπορεί να εξυπηρετεί ένα ή περισσότερα σπίτια. Η λειτουργία του είναι να ξεχωρίζει τα σήματα σε τηλεφωνικά και σήματα video και να στέλνει τα τηλεφωνικά στα καλώδια συνεστραμμένων ζευγών και τα video στα ομοαξονικά και από 'κει σε κάθε σπίτι που εξυπηρετεί. Κάθε ομοαξονικό «πόδι» εξυπηρετεί περίπου 100 με 500 σπίτια. Λογικά η αρχιτεκτονική είναι τύπου bus καθολικής εκπομπής, παρόλο που παρουσιάζεται σαν συνδυασμός οπτικών αστερών και ομοαξονικών δέντρων. Τα σήματα video, μπορούν να στέλνονται σαν αναλογικά AM – VSB που είναι συμβατά με τον υπάρχοντα εξοπλισμό μέσα στα σπίτια. Ψηφιακό video καθώς και τηλεφωνία και υπηρεσίες δεδομένων, μπορούν επίσης να μεταφερθούν με την ίδια υποδομή. Επιπλέον, τα κανάλια για επιστροφή (upstream), μπορούν να λειτουργούν στη ζώνη των 5 – 40MHz, η οποία δεν χρησιμοποιείται στα κανάλια κατεβάσματος (downstream).

Φανερά λοιπόν, το HFC είναι η φυσική εξέλιξη για τους παροχής καλωδιακών υπηρεσιών. Διατηρεί την συμβατότητα με τον υπάρχοντα αναλογικό εξοπλισμό και είναι μια αρκετά ικανή προσέγγιση για να παρέχει καθολικές υπηρεσίες. Απ' την άλλη μεριά, έχει τα μειονεκτήματα ενός ομοαξονικού συστήματος, όπως μειωμένο εύρος για την επιστροφή (upstream), αξιοπιστία και ενεργειακές ανάγκες για την τροφοδότηση των ενισχυτών στη διαδρομή.

## 6.6 FTTC

Σε αντίθεση με το HFC, στο FTTC τα δεδομένα μεταδίδονται ψηφιακά πάνω σε οπτική ίνα από έναν καταναμητή (hub) σε απομακρυσμένους τερματικούς κόμβους, τα λεγόμενα ONUs. Η προσδοκία είναι να φτάσει η οπτική ίνα όσο το δυνατόν πιο κοντά στο σπίτι. Αναλόγως με το πόσο κοντά φτάνει σε κάθε περίπτωση, χρησιμοποιούνται διαφορετικοί όροι για την περιγραφή της αρχιτεκτονικής (βλέπε σχήμα 6.1). Στην πιο αισιόδοξη περίπτωση η οπτική ίνα φτάνει έως το σπίτι, αρχιτεκτονική που ονομάζεται FTTH (fiber to the home) και τα ONUs παίζουν τον ρόλο των NIUs. Για την περίπτωση που τα ONUs εξυπηρετούν μερικά σπίτια, περίπου 8 με 64, αυτό μπορεί να χαρακτηριστεί σαν FTTC ή FTTB (fiber to the building). Σ' αυτή την περίπτωση, Υπάρχει ένα πρόσθετο δίκτυο διανομής από τα ONUs στα NIUs. Σε πολλές αρχιτεκτονικές ο απομακρυσμένος κόμβος (RN) μπορεί να είναι μια απλή παθητική συσκευή, όπως ένας οπτικός συζεύκτης τύπου αστέρα και μπορεί ορισμένες φορές να βρίσκεται μέσα στα κεντρικά γραφεία και όχι έξω από αυτά.

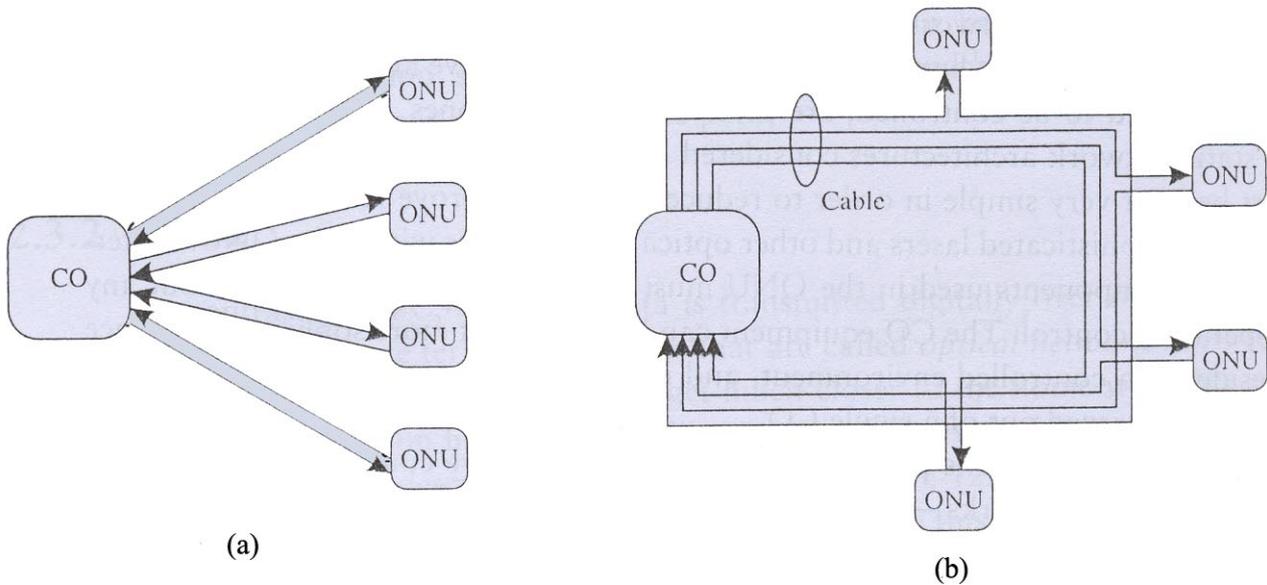
Παρόλο που πολλές εναλλακτικές αρχιτεκτονικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το FTTC, ο όρος FTTC συνήθως χρησιμοποιείται για να περιγράψει την εκδοχή όπου τα σήματα εκπέμπονται καθολικά από τα κεντρικά γραφεία στα ONUs και τα ONUs μοιράζονται ένα κοινό συνολικό εύρος ζώνης με πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου, χρησιμοποιώντας είτε συμβατικές τεχνικές TDM ή στατικές μεθόδους πολυπλεξίας όπως το ATM. Στο FTTC, το δίκτυο τροφοδότησης είναι το κομμάτι του δικτύου μεταξύ των κεντρικών γραφείων και των ONUs και το δίκτυο διανομής είναι μεταξύ των ONUs και των NIUs. Μ' αυτή τη δομή το FTTC είναι δίκτυο με δυνατότητα δρομολόγησης και διαμοιραζόμενο εύρος ζώνης. Πρακτικά, είναι αρκετά δαπανηρό σήμερα να μεταδώσεις σήματα αναλογικού video πάνω σε μια εξ' ολοκλήρου οπτική εγκατάσταση. Αυτό ίσως να μας ωθεί στην ύπαρξη επιπέδων ομοαξονικών καλωδίων που πάνω σ' αυτά μεταδίδονται τα αναλογικά σήματα video. Η αρχιτεκτονική FTTC ορισμένες φορές αναφέρεται και σαν BMFCB (baseband modulated fiber coax bus) ή SDV (switched digital video).

## 6.7 Αρχιτεκτονικές οπτικών δικτύων άμεσης πρόσβασης

Σ' αυτά που ακολουθούν, θα συγκεντρωθούμε σε διάφορες εναλλακτικές για την κατανόηση του μέρους ή μεγέθους των δικτύων άμεσης πρόσβασης που είναι οπτικό. Οι αρχιτεκτονικές των οπτικών μερών πρέπει να είναι απλές και το δίκτυο πρέπει να είναι απλό στη χρήση και την παροχή υπηρεσιών. Αυτό σημαίνει πως παθητικές αρχιτεκτονικές, όπου το δίκτυο από μόνο του δεν έχει δυνατότητες δρομολόγησης και δεν χρειάζεται να ελέγχεται, προτιμώνται από τις ενεργές. Αυτό είναι ανάλογο και με τις στατικές αρχιτεκτονικές δικτύου. Εκτός αυτού το ONU πρέπει να είναι και αυτό πολύ απλό με σκοπό να βελτιωθεί το κόστος και η αξιοπιστία του. Αυτό αποκλείει την χρησιμοποίηση εξελιγμένων laser και άλλου οπτικού εξοπλισμού μέσα στο ONU. Γενικά προτιμάται τα συστατικά που δουλεύουν μέσα στο ONU να έχουν τη δυνατότητα λειτουργίας χωρίς κάποιον έλεγχο θερμοκρασίας. Ο εξοπλισμός των κεντρικών γραφείων, μπορεί να είναι κατά κάποιον τρόπο πιο εξελιγμένος, εφόσον βρίσκεται σε ελεγχόμενο περιβάλλον και το κόστος του μπορεί να αποσβένεται από τους πολλούς συνδρομητές που εξυπηρετούνται από τα κεντρικά γραφεία.

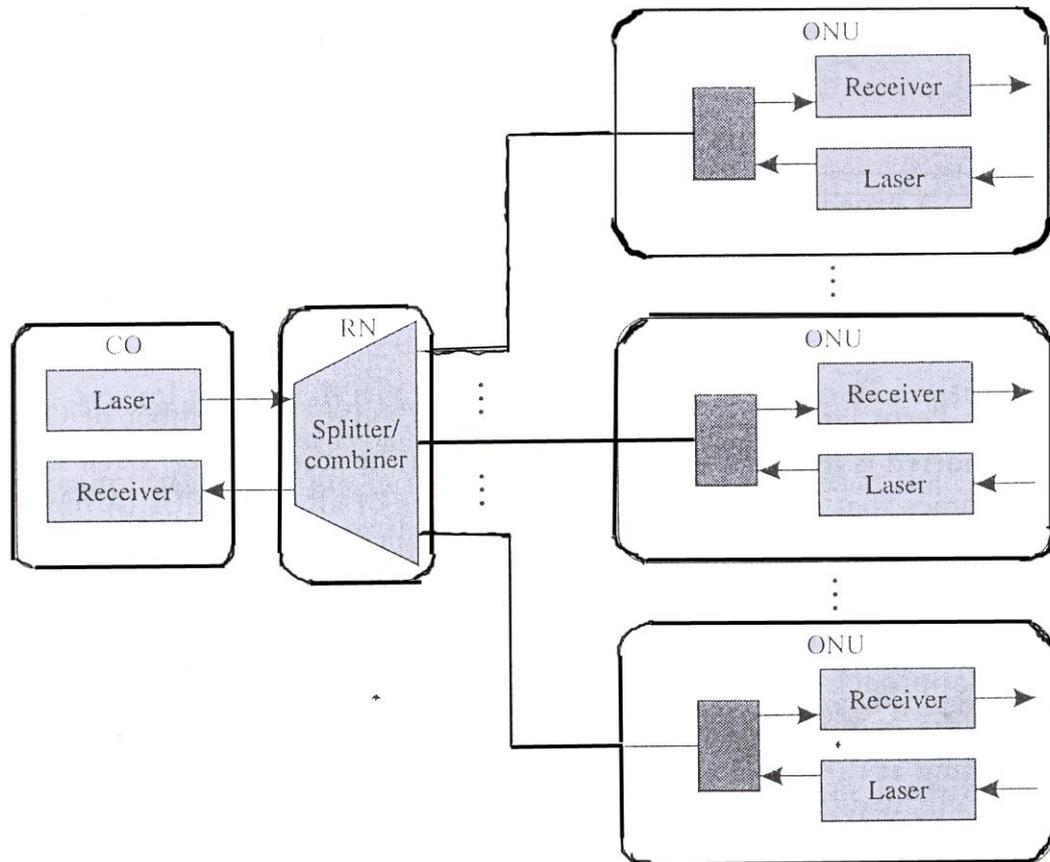
**Πίνακας 6.2** Σύγκριση διαφορετικών αρχιτεκτονικών PON. Το N υποδηλώνει τον αριθμό των μονάδων οπτικού δικτύου (ONUs) στο δίκτυο. Ένας ρυθμός bit ONU ίσος με 1 δείχνει ότι η ONU λειτουργεί με ρυθμό bit που αντιστοιχεί στην κίνηση που τερματίζει παρά στην συνολική κίνηση του N. Ο κόμβος sync αναφέρεται στο πότε οι κόμβοι στο δίκτυο πρέπει να συγχρονιστούν σε ένα κοινό ρολόι ή όχι.

<b>Architecture</b>	<b>Fiber Sharing</b>	<b>Power Splitting</b>	<b>ONU Bit Rate</b>	<b>Node Sync.</b>	<b>CO Sharing</b>
All fiber	No	None	1	No	No
TPON	Yes	1/N	N	Yes	Yes
WPON	Yes	1/N	1	Yes	No
WRPON	Yes	None	1	Yes	Yes



**Σχήμα 6.2** (α) Η οπτική προσέγγιση στη σύνδεση point-to-point (β) Στη πράξη η ίνα μπορεί να τοποθετηθεί σε σχήμα δακτυλιδιού.

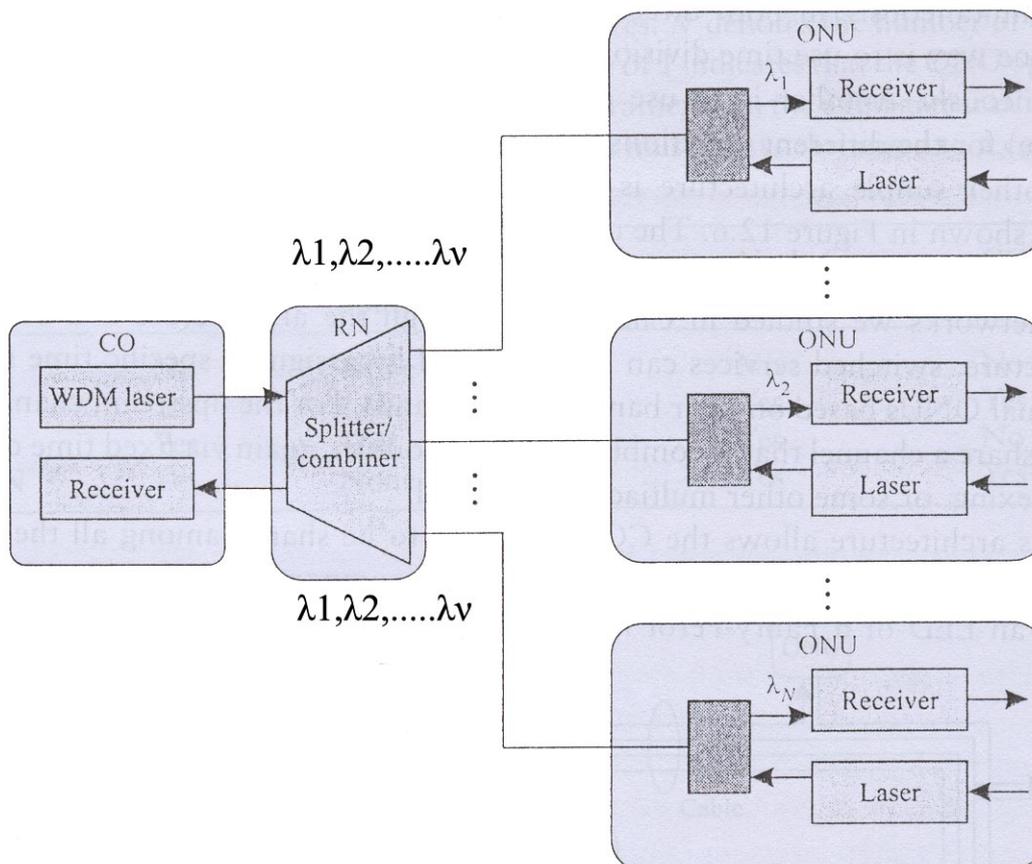
Τα οπτικά δίκτυα που έχουν προταθεί με αυτά τα χαρακτηριστικά, κοινά ονομάζονται PONs (passive optical networks) – όλα αυτά χρησιμοποιούν παθητικές αρχιτεκτονικές. Χρησιμοποιούν κάποιο είδος παθητικού εξοπλισμού, όπως οπτικούς συζεύκτες τύπου αστέρα ή στατικούς δρομολογητές μήκους κύματος, όπως στον απομακρυσμένο κόμβο. Τα κύρια πλεονεκτήματα της χρησιμοποίησης παθητικών αρχιτεκτονικών σ' αυτή την περίπτωση, πηγάζουν από την αξιοπιστία, την ευκολία στη συντήρηση και το γεγονός ότι ο εγκατεστημένος εξοπλισμός στο ύπαιθρο, δεν έχει την ανάγκη τροφοδοσίας. Επιπλέον, η οπτική δομή από μόνη της προσφέρεται για υψηλούς ρυθμούς δεδομένων και μορφές διαμόρφωσης του σήματος. Έτσι, το συνολικό δίκτυο μπορεί να αναβαθμιστεί στο μέλλον, χωρίς να χρειαστεί να αλλάξει τη δομή του. Ο πίνακας 6.2 συγκρίνει τις διάφορες αρχιτεκτονικές.



**Σχήμα 6.3** Ένα PON εκπομπής και επιλογής.

Η πιο απλή αρχιτεκτονική PON, φαίνεται στο σχήμα 6.2 (α), χρησιμοποιεί ένα ξεχωριστό ζευγάρι οπτικών ινών από τα κεντρικά γραφεία σε κάθε ONU. Το κύριο πρόβλημα με αυτή την προσέγγιση, είναι ότι το κόστος εξοπλισμού των κεντρικών γραφείων ποικίλει ανάλογα με τον αριθμό των ONUs. Επιπλέον κάποιος χρειάζεται για την εγκατάσταση και συντήρηση όλων αυτών των ζευγών οπτικών ινών. Αυτή η προσέγγιση λαμβάνει χώρα σε περιορισμένη κλίμακα σήμερα, κυρίως για να προσφέρει υπηρεσίες υψηλών ταχυτήτων μεταξύ επιχειρήσεων. Στην Ιαπωνία, τέτοιο σύστημα χρησιμοποιεί το NTT, με ρυθμούς από 8 έως 32Mb/s πάνω σε κάθε ίνα. Παρόλο που λογικά υπάρχει ένα ξεχωριστό ζευγάρι ινών για κάθε ONU, φυσικά οι ίνες μπορούν να σχηματίζουν τοπολογία δακτυλίου, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.2 (β). Παρόμοιες τεχνικές χρησιμοποιούνται και στις ΗΠΑ με τη μορφή δακτυλίου SONET, που τρέχουν με ταχύτητες OC – 3 και OC – 12 για να παρέχουν στις επιχειρήσεις υπηρεσίες μισθωμένων γραμμών σε υψηλές ταχύτητες. Σ' αυτή την περίπτωση ένα ONU είναι ένα SONET ADM και πολλαπλά ONUs μπορούν να υπάρχουν στον ίδιο δακτύλιο.

Αντί για ζευγάρια ινών σε κάθε ONU, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μόνο ίνα δύο κατευθύνσεων. Όμως το ίδιο μήκος κύματος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκπομπή δεδομένων και στις δυο κατευθύνσεις ταυτόχρονα λόγω ανεξέλεγκτων αντανακλάσεων μέσα στην ίνα. Μια λύση είναι η χρησιμοποίηση πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου, για να μην εκπέμπουν και οι δυο πλευρές ταυτόχρονα. Μια άλλη λύση είναι η χρησιμοποίηση διαφορετικού μήκους κύματος προς κάθε κατεύθυνση (π.χ. 1310 και 1550nm).



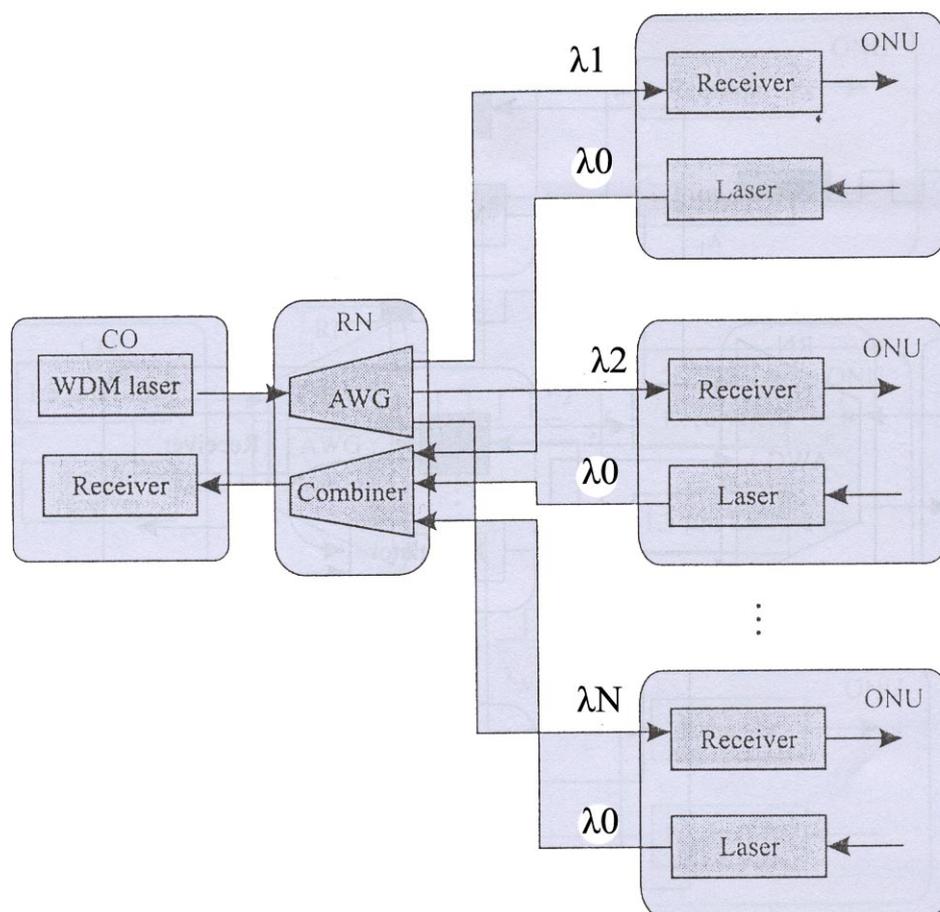
**Σχήμα 6.4** Ένα WDM PON εκπομπής και επιλογής.

Μια άλλη απλή αρχιτεκτονική είναι το TPON (PON για τηλεφωνία) που φαίνεται στο σχήμα 6.3. Η κυκλοφορία (downstream) είναι καθολική από έναν πομπό στα κεντρικά γραφεία, προς όλα τα ONUs από έναν παθητικό συζεύκτη τύπου αστέρα, παρόμοια με τα καθολικά και τα δίκτυα άμεσης πρόσβασης που μελετήσαμε ως τώρα. Παρόλο που η αρχιτεκτονική είναι καθολικής εκπομπής, υπηρεσίες που απαιτούν δρομολόγηση μπορούν να υποστηριχθούν ορίζοντας συγκεκριμένα time slots σε κάθε ONU, σε σχέση πάντα με το εύρος ζώνης που απαιτούν. Για το κανάλι επιστροφής, τα ONUs μοιράζονται ένα

κανάλι που συνδυάζεται χρησιμοποιώντας ένα συζεύκτη, πάλι μέσω προκαθορισμένης πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου ή κάποιου άλλου πρωτοκόλλου πολλαπλής πρόσβασης.

Αυτή η αρχιτεκτονική επιτρέπει στον εξοπλισμό των κεντρικών γραφείων να τον μοιράζονται όλα τα ONUs και γίνεται χρήση σχετικά φθηνών οπτικών συστατικών. Ο πομπός των κεντρικών γραφείων μπορεί να είναι ένα LED ή ένα laser και φθηνή, χωρίς ανάγκη ελέγχου της θερμοκρασίας pin FET δέκτες και LED ή lasers μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσα στα ONUs. Ο αριθμός των ONUs που μπορούν να υποστηριχθούν είναι περιορισμένος, λόγω της απώλειας του κοψίματος στον συζεύκτη.

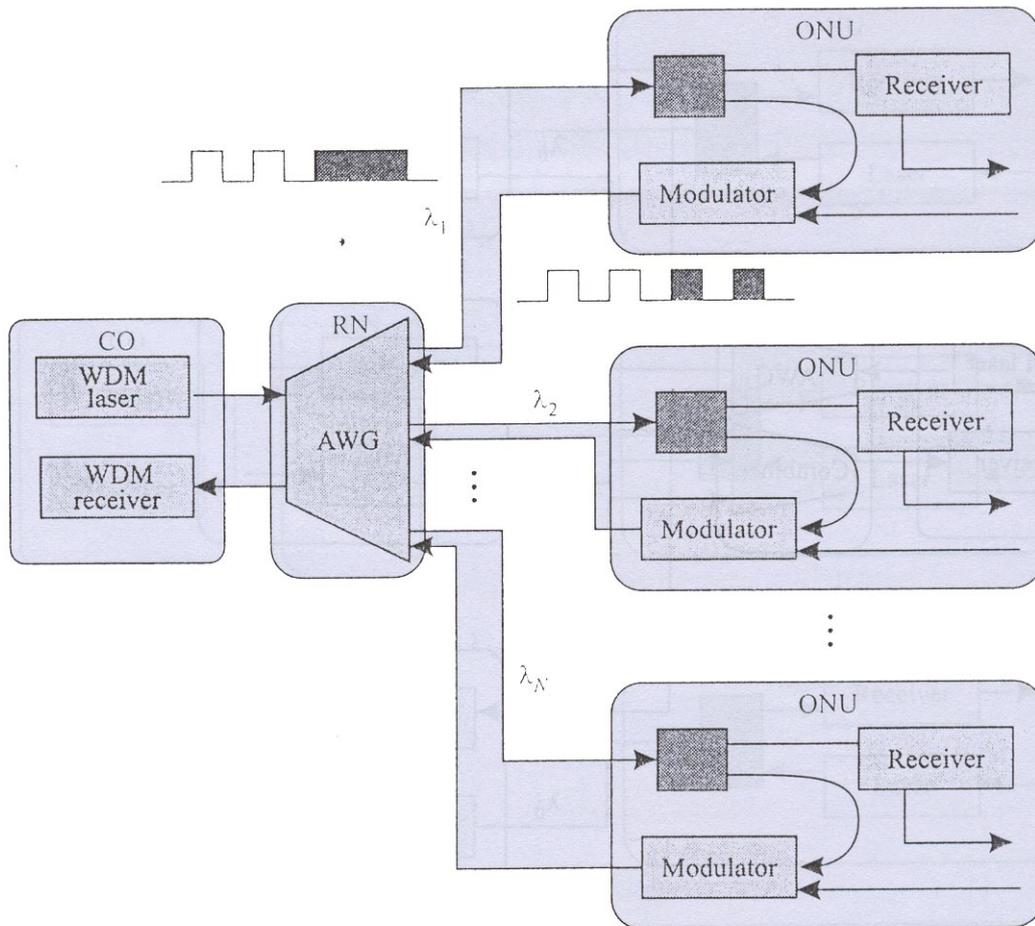
Το επόμενο βήμα, που φαίνεται στο σχήμα 6.4, είναι να αντικατασταθεί ένας απλός πομποδέκτης στα κεντρικά γραφεία με έναν WDM πίνακα πομπό ή έναν M tunable M πομπό, για να έχουμε ένα WDM PON. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει σε κάθε ONU να έχει ηλεκτρονικά να τρέχουν μόνο στο ρυθμό που λαμβάνει τα δεδομένα και όχι στο συνολικό ρυθμό δεδομένων. Όμως, είναι ακόμα περιορισμένο απ' την απώλεια κοψιμάτων στον συζεύκτη αστέρα.



Σχήμα 6.5 WRPON.

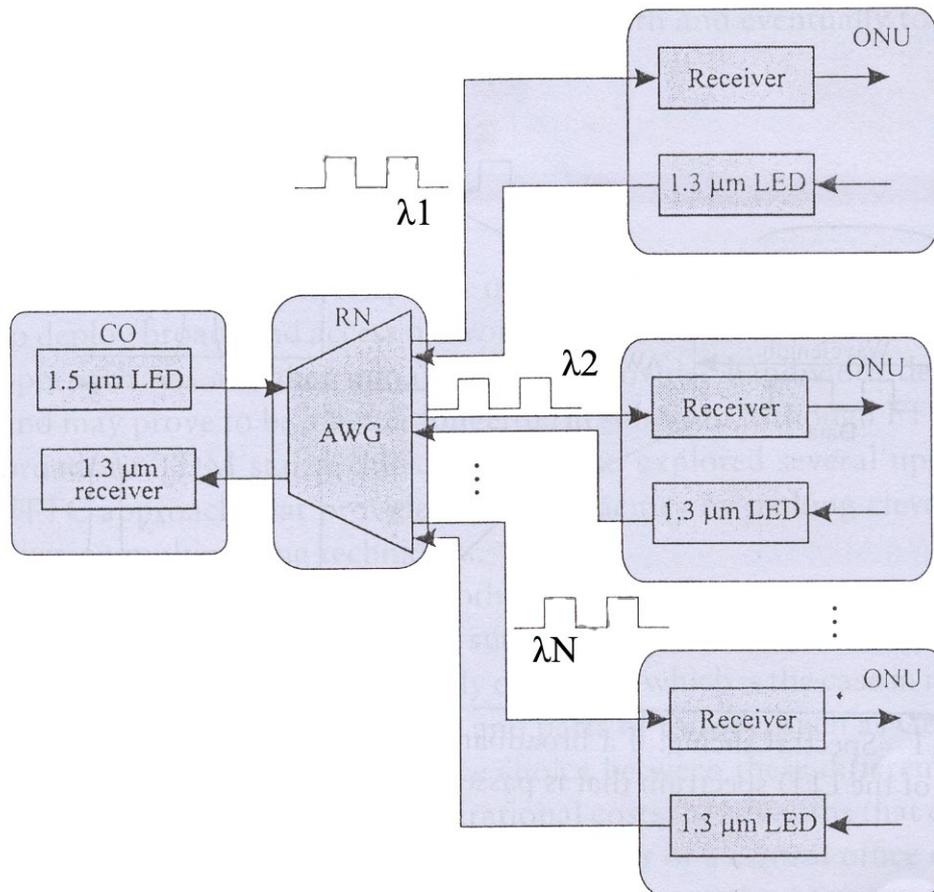
Η εισαγωγή της δρομολόγησης μήκους κύματος λύνει αυτά τα προβλήματα απώλειας στον συζεύκτη ενώ διατηρεί όλα τα αλλά πλεονεκτήματα ενός WDM PON. Επί προσθέτως, επιτρέπει να παρέχονται σημείο προς σημείο δεδομένες υπηρεσίες στα ONUs. Αυτό οδηγεί στην WRPON αρχιτεκτονική, που μπορούμε να δούμε στο σχήμα 6.5 .

Αρκετοί τύποι WRPONs έχουν προταθεί και δοκιμαστεί. Όλοι χρησιμοποιούν έναν δρομολογητή μήκους κύματος και ένα AWG (arrayed waveguide grating) για την κυκλοφορία προς τους χρήστες (downstream), αλλά ποικίλουν στον τύπο του εξοπλισμού των κεντρικών γραφείων και των ONUs και στο πως υποστηρίζεται η κυκλοφορία της επιστροφής (upstream). Ο δρομολογητής κατευθύνει διαφορετικά μήκη κύματος σε διαφορετικά ONUs. Η πιο πρώιμη επίδειξη ήταν η επονομαζόμενη PPL (Passive Photonics Loop). Χρησιμοποιήθηκαν 16 κανάλια στη ζώνη των 1310nm για την κυκλοφορία προς τον χρήστη (downstream) και 16 πρόσθετα κανάλια στη ζώνη 1550nm για την κυκλοφορία επιστροφής. Παρ' όλα αυτά, αυτή προσέγγιση δεν είναι οικονομική γιατί χρειάζονται δυο ακριβά lasers για κάθε ONU: ένα μέσα στο ONU κι ένα στα κεντρικά γραφεία. Παρακάτω περιγράφονται αρκετές παραλλαγές αυτής της αρχιτεκτονικής που παρέχουν πιο οικονομική διαμοίραση των πηγών στα CO και στα ONUs.



**Σχήμα 6.6** Η αρχιτεκτονική του RITE NET WRPON.

Η αρχιτεκτονική RITE NET (σχήμα 6.6), χρησιμοποιεί ένα ρυθμιζόμενο laser στα κεντρικά γραφεία. Ένα frame που στέλνεται σε κάθε ONU από τα κεντρικά γραφεία, αποτελείται από δυο μέρη: ένα μέρος δεδομένων (data part), στο οποίο εκπέμπονται τα δεδομένα από τα κεντρικά γραφεία και ένα μέρος αποστροφής κίνησης (return traffic), κατά το οποίο δεν εκπέμπονται δεδομένα, αλλά το laser των κεντρικών γραφείων παραμένει ανοιχτό. Κάθε ONU έχει και έναν εξωτερικό αποκωδικοποιητή. Κατά την διάρκεια του δεύτερου μέρους του frame, το ONU χρησιμοποιεί τον εξωτερικό αποκωδικοποιητή για να κωδικοποιήσει το οπτικό σήμα από τα κεντρικά γραφεία. Μ' αυτό αποφεύγεται η ανάγκη χρήσης laser και στο ONU. Η κίνηση επιστροφής από τα ONUs επίσης στέλνεται στον δρομολογητή. Ο δρομολογητής συνδυάζει όλα τα διαφορετικά μήκη κύματος και τα στέλνει σε μια κοινή θύρα σε έναν δεκτή στα κεντρικά γραφεία. Αυτή η αρχιτεκτονική επιτρέπει ένα και μόνο laser να χρησιμοποιείται από όλα τα ONUs, αλλά κάθε ONU θα πρέπει να έχει το δικό του εξωτερικό αποκωδικοποιητή.

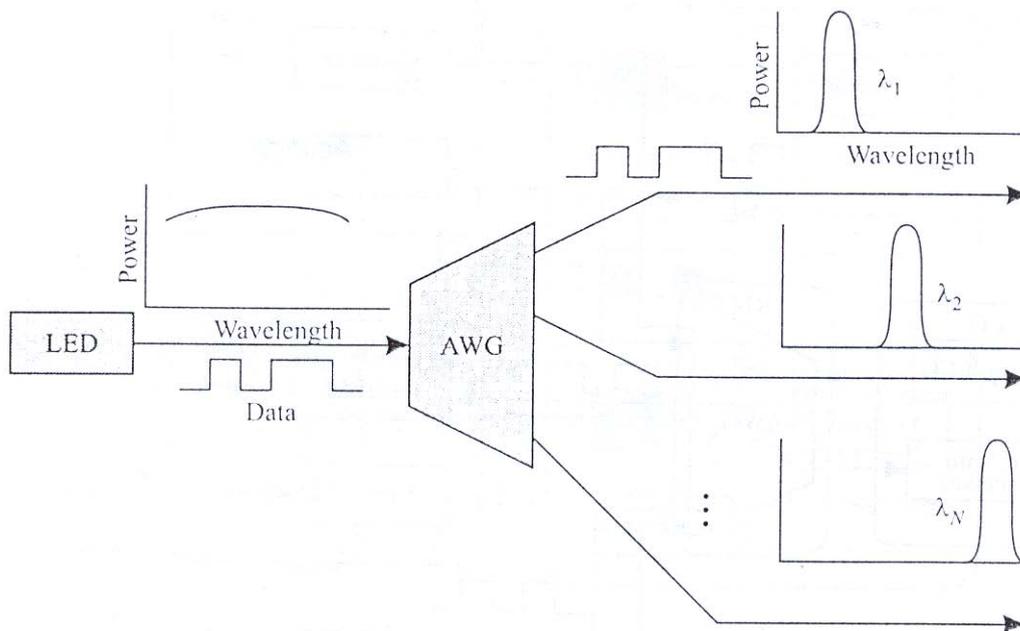


Σχήμα 6.7 Η αρχιτεκτονική του LARNET WRPON.

Μια πιο μικρή σε κόστος αρχιτεκτονική από το RITE NET, είναι το LARNET (σχήμα 6.7), το οποίο χρησιμοποιεί ένα LED σε κάθε ONU αντί για εξωτερικό κωδικοποιητή. Το LED εκπέμπει ένα καθολικό σήμα το οποίο κομματιάζεται καθώς περνά από τον δρομολογητή μήκους κύματος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.8. Μόνο η ενέργεια στο μέρος του φάσματος του LED που ανταποκρίνεται στο φίλτρο του δρομολογητή αφήνεται να περάσει. Να σημειώσουμε, όμως, ότι με  $N$  ONUs, αυτό συνεπάγεται μια απώλεια λόγω κομματιάσματος, τουλάχιστον  $1/N$  (μόνο ένα μικρό κλάσμα της συνολικής ενέργειας περνά μέσα από τη ζώνη του φίλτρου του δρομολογητή).

Πιο σπουδαία, ένα LED μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί στα κεντρικά γραφεία. Σ' αυτή την περίπτωση, το σήμα που στέλνεται από το LED, μεταδίδεται καθολικά σε όλα τα ONUs. Είναι μάλιστα πιθανό να υπάρχουν δυο πομποί στα κεντρικά γραφεία: ένα LED, ας πούμε στα  $1,3\mu\text{m}$ , το οποίο εκπέμπει καθολικά σε όλα τα ONUs και ένα ρυθμιζόμενο laser στα  $1,5\mu\text{m}$  που να εκπέμπει επιλεκτικά σε κάποια ONUs. Αυτός είναι ένας σημαντικός τρόπος για την καθολική μετάδοση σημάτων αναλογικού video πάνω σε ψηφιακά δρομολογούμενη δομή ινών με χαμηλό κόστος, χωρίς την ανάγκη ύπαρξης ανώτερου επιπέδου δικτύων γι' αυτό το σκοπό.

Τα συστατικά WDM για τα PONs δεν έχουν ακόμα καθιερωθεί και είναι πιο ακριβά από αυτά που απαιτούνται για τα απλά, καθολικής μετάδοσης PONs. Παρ' όλα αυτά, τα WRPONs προσφέρουν πολύ υψηλότερες χωρητικότητες απ' τα απλά καθολικής μετάδοσης PONs και ακόμα προσφέρουν ένα πολύ καλό δρόμο αναβάθμισης, χωρίς αλλαγή της δομής τους. Όσο για τα PONs, θα θεωρήσουμε το μέρος του δικτύου που βρίσκεται μεταξύ των κεντρικών γραφείων και των απομακρυσμένων κόμβων σαν το δίκτυο τροφοδότησης και το μέρος που βρίσκεται μεταξύ των απομακρυσμένων κόμβων και των ONUs σαν το δίκτυο διανομής. Να σημειώσουμε ότι αυτή η περίπτωση είναι διαφορετική σε σχέση με αυτά που είχαμε υιοθετήσει για το FTTS, όπου είχαμε πει πως το δίκτυο τροφοδότησης είναι το κομμάτι του δικτύου από τα κεντρικά γραφεία ως τα ONUs.



**Σχήμα 6.8** Εάν ένα σήμα από LED ευρείας ζώνης σταλεί μέσω φίλτρου, το 'κομμάτι' φάσματος που βγαίνει είναι εκείνο που περνάει το φίλτρο.

Βασιζόμενοι λοιπόν σ' αυτή την κατηγοριοποίηση, το σενάριο αναβάθμισης για ένα PON θα ήταν κάπως έτσι: Ο χειριστής μπορεί να αρχίσει εγκαθιστώντας ένα απλό, καθολικής εκπομπής TPON, το οποίο είναι τύπου αστέρα με διαμοιραζόμενο εύρος συχνοτήτων, σύμφωνα με την κατανομή του πίνακα 6.2. Σε περίπτωση που πρέπει να υποστηριχθούν και άλλα ONUs, ο χειριστής μπορεί να αναβαθμίσει το δίκτυο σε ένα καθολικής εκπομπής WDM PON, το οποίο χρησιμοποιεί προκαθορισμένο εύρος ζώνης για κάθε ONU. Αυτό θα μπορούσε αν γίνει αναβαθμίζοντας τους πομπούς στο hub σε WDM πομπούς και ο χειριστής μπορεί να ξαναχρησιμοποιήσει τα υπάρχοντα ONUs. Αν χρειάζεται μεγαλύτερη χωρητικότητα για κάθε ONU, ο χειριστής μπορεί να αναβαθμίσει περαιτέρω το δίκτυο σε ένα PON δρομολογούμενου

μήκους κύματος (wavelength- routed PON), το οποίο είναι δίκτυο με δυνατότητα δρομολόγησης και δεδομένο εύρος ζώνης. Εκτός αυτού, το συγκεκριμένο δίκτυο θα μπορούσε εύκολα να υποστηρίζει καθολικές υπηρεσίες, χρησιμοποιώντας την τεχνική spectral splicing που περιγράψαμε προηγούμενος. Έτσι μπορούμε να έχουμε ένα καλό μονοπάτι αναβάθμισης από ένα δίκτυο καθολικής εκπομπής με διαμοιραζόμενο εύρος ζώνης, σε ένα καθολικής εκπομπής δίκτυο, αλλά με δεδομένο εύρος ζώνης και τελικά σε ένα δίκτυο με δυνατότητα δρομολόγησης της πληροφορίας και δεδομένο εύρος ζώνης.

---

---

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

---

---

1. R. Aaron , editor. *IEEE Communications Magazine: Special Issue on Access to Broadband Services*, volume 33, Aug. 1995.
2. I. Kobayashi , editor. *IEEE Communications Magazine: Special Issue on Fiber-Optic Subscriber L;ps*, volume 32, Feb. 1994
3. P. W. Shumate, O. Krumpholz, and K. Yamaguchi, editors. *IEEE/OSA JLT/JSAC Special Issue on Subscriber Loop Technology*, volume 7, Nov. 1989.
4. S. S. Wagner, H. Kobrinski, T. J. Robe, H. L. Lemberg, and L. S. Smoot. *Experimental demonstration of a passive optical subscriber loop architecture. Electronics Letters*, 344-346, 1988.
5. <http://www.nortelnetworks.com>
6. <http://www.Jfw.com>
7. <http://www.Photonics.com>
8. <http://search networking.techtaget.com>

---

---

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.**

---

---

# **ΥΠΟΒΡΥΧΙΕΣ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ**

*Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται εξολοκλήρου στην υποβρύχια σύζευξη μεταξύ ηπείρων με την βοήθεια τις οπτικής ίνας και την τεχνολογία που υλοποιεί.*

---

## 7.1 Εισαγωγή

Η ιστορία των υπερατλαντικών καλωδίων ξεκίνησε περίπου 150 χρόνια πριν, όταν έγινε η πρώτη προσπάθεια τοποθέτησης ενός τηλεφωνικού καλωδίου κατά μήκος του βόρειου ατλαντικού ωκεανού το 1857. Το πρώτο υπερατλαντικό τηλέφωνο τέθηκε σε λειτουργία έναν αιώνα αργότερα, το 1956. Προσέφερε 48 κανάλια φωνής χρησιμοποιώντας ομοαξονικό καλώδιο διπλής ανανέωσης/αναγέννησης σήματος διπλής κατεύθυνσης. Η ίδια τεχνική χρησιμοποιήθηκε μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του '80. Χάρη στις βελτιώσεις των χαρακτηριστικών των καλωδίων και των ηλεκτρονικών σημάτων, έως τότε η χωρητικότητα των καλωδίων σε όλη την έκταση του ατλαντικού ωκεανού είχε διαμορφωθεί περίπου σε 4000 κανάλια φωνής.

Το πρώτο σύστημα βασισμένο σε οπτική ίνα, το TAT-8 εφαρμόστηκε το 1988. Λειτουργήσε στα 280 Mbits/sec και προσέφερε 35.000 κανάλια φωνής πάνω σε δύο ζευγάρια οπτικών ινών. Αυτή η πρότυπη λύση – εφαρμογή ήταν ένα αποδοτικό υβριδικό οπτικό σύστημα. Οι αναμεταδότες οι οποίοι χρειαζόντουσαν ανά διαστήματα των 100 km, δέχονταν εισερχόμενα οπτικά σήματα και τα μετέτρεπαν σε ηλεκτρικά επιτρέποντας την αναμετάδοση και μετάδοση των οπτικών σημάτων. Η έλευση των οπτικών ενισχυτών επέτρεψε την αφαίρεση των υψηλών ηλεκτρονικών από τους βυθισμένους αναμεταδότες, κάνοντας εφικτή την δημιουργία ενός οπτικού καναλιού end-to-end(με αρχή και τέλος χωρίς ενδιάμεσους κόμβους).

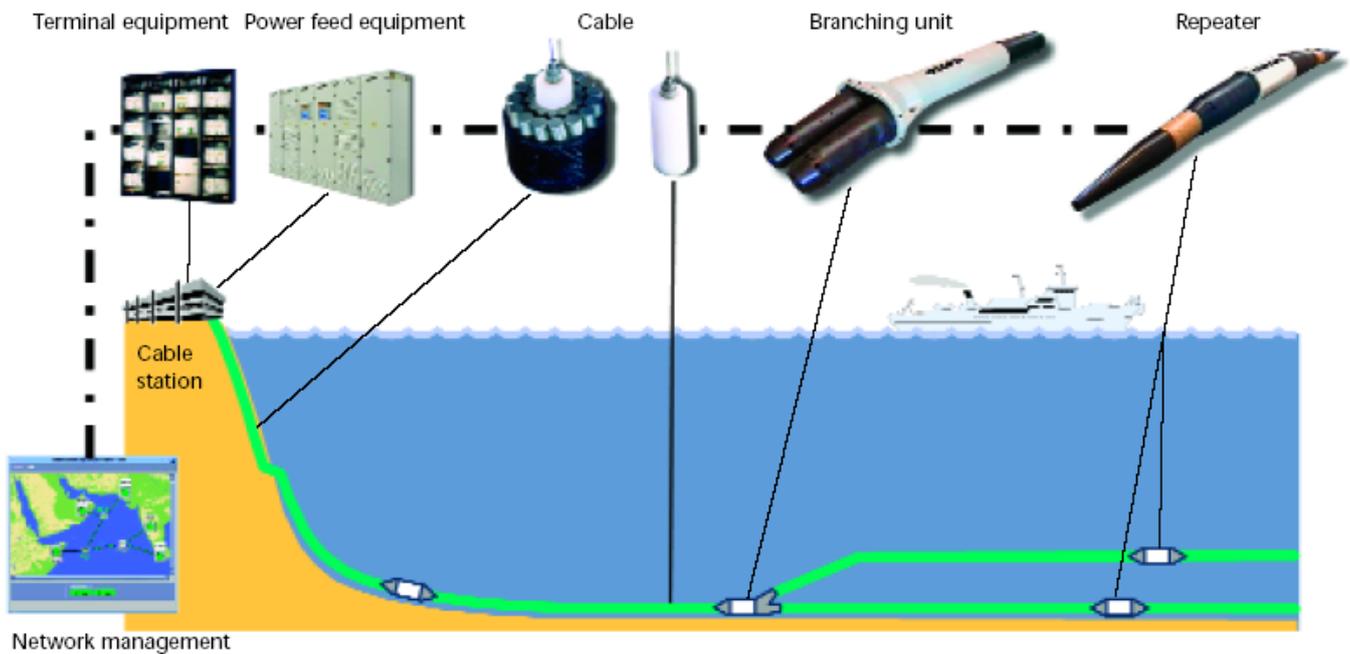
Το πρώτο ολοκληρωμένο οπτικό σύστημα ήταν το TAT-12/13 το οποίο είχε τοποθετηθεί κατά μήκος του βόρειου ατλαντικού ωκεανού το 1995 και 1996. Εφόσον κάθε ίνα μετέδιδε 5 Gbit/sec (τεράστια χωρητικότητα) δύο καλώδια αναπτύχθηκαν σε σχηματισμό δακτυλίου επιτρέποντας αυτοαποκατάσταση της κυκλοφορίας τους σήματος σε περίπτωση αποκοπής του καλωδίου. Μόλις λίγα χρόνια μετά, η χρήση του DWDM (Dense Wave Division Multiplexing = Πυκνή Πολυπλεξία στο πεδίο του Μήκους Κύματος) και του EDFAs έκανε δυνατή την αύξηση της χωρητικότητας αν ίνα περίπου 1 Tbit-sec

Το 2002 η εταιρία ALCATEL submarine networks εγκατέστησε το καλώδιο i2iSN το οποίο συντίθετο από ζεύγη οπτικής ίνας, η οποία συνδέει την Σιγκαπούρη με την Ινδία. Σχεδιασμένη να μεταφέρει μέχρι 8,4 Tbits/sec με τη χρήση της τεχνολογίας 10 Gbits/sec DWDM είναι τώρα σύστημα με τη μεγαλύτερη χωρητικότητα που λειτουργεί στον κόσμο.

## 7.2 Υποβρύχια Δίκτυα

### 7.2.1 Το μοντέρνο υποβρύχιο δίκτυο.

Τα σημερινά υποβρύχια συστήματα αποτελούνται από ένα καλώδιο το οποίο περιέχει το μέγιστο 8 ζευγάρια οπτικής ίνας, υποβρύχιους αναμεταδότες οι οποίοι παρέχουν κέρδος που αποζημιώνει τη απώλεια της ίνας, μια Branching μονάδα η οποία επιτρέπει συνδέσεις ίνας κάτω από την θάλασσα, υποβρύχies γραμμές τερματικού εξοπλισμού (SLTE) η οποία συνδέει την επίγεια κίνηση με την υποβρύχια γραμμή μετάδοσης και εξοπλισμούς για την παροχή ισχύος(PFE) για την «παροχή καύσιμου» στο «βυθισμένο εργοστάσιο» (plant). Όλος ο εξοπλισμός παρακολουθείται και ελέγχεται από ένα υποβρύχιο σύστημα διαχείρισης (SMS).

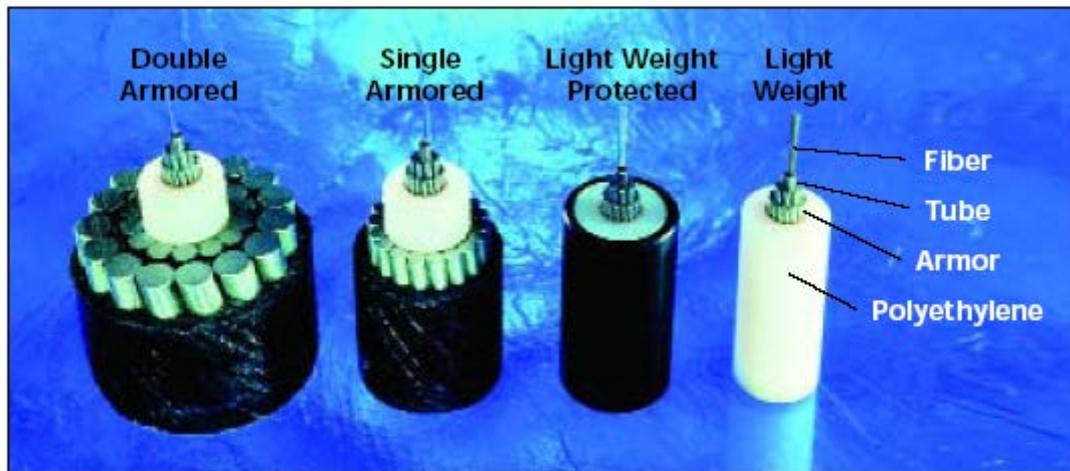


**Σχήμα 7.1** Εξοπλισμός υποβρυχίου συστήματος.

Επειδή τα συστήματα με διάρκεια ζωής 25 χρόνων τοποθετούνται στο νερό σε βάθη μέχρι 8000 μετρά. Η παράμετρος κλειδί για τα υποβρύχια εργοστάσια είναι η αξιοπιστία του καλωδίου και τον αναγεννητή σήματος(repeaters).

### 7.2.2 Το καλώδιο

Η σχεδίαση του καλωδίου βασίζεται σε ένα συγκολλημένο ατσαλένιο σωλήνα, ώστε να βεβαιώσει τις ίνες για μία μακρά διάρκεια ζωής σε ένα περιβάλλον ελεύθερο από ένταση. Στο κέντρο (καρδιά) του καλωδίου υπάρχει η δομική μονάδα της ίνας, εδώ οπτικές ίνες στον ατσαλένιο σωλήνα προστατεύονται από ένα ειδικό ζελέ στη περίπτωση που εισχωρήσει νερό εάν κοπεί το καλώδιο. Ο σύνθετος αγωγός είναι μονωμένος με υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο.

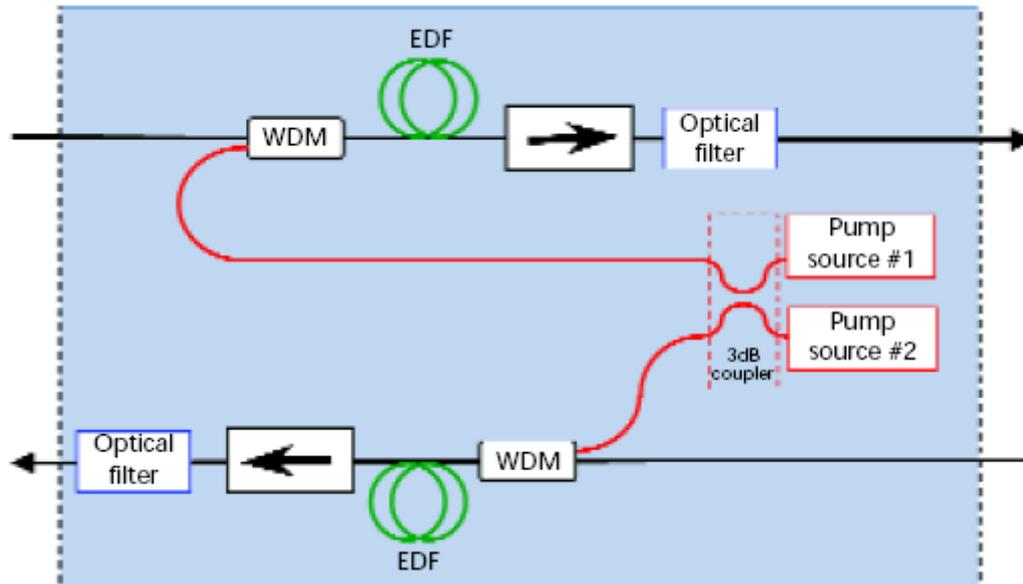


**Σχήμα 7.2** Υποβρύχια καλώδια που χρησιμεύουν για επισκευή τυχών βλαβών του συστήματος.

Η μόνωση προσφέρει επιπλέον αντίσταση σε περίπτωση φθοράς. Αυτή η κατασκευή/διαμόρφωση η οποία χρησιμοποιήθηκε για ανάπτυξη εφαρμογών σε μεγάλα βάθη, είναι η ελαφριά έκδοση καλωδίου της ALCATEL. Σε ρηγά νερά, τα θωρακισμένα καλώδια προσφέρουν επιπλέον προστασία από κινδύνους όπως οι άγκυρες των πλοίων, το ψάρεμα και τη φθορά από τους βράχους.

### 7.2.3 Αναμεταδότες

Οι αναμεταδότες χρησιμοποιούν οπτικούς ενισχυτές εμπλουτισμένους με έρβιο(EDFAs) στα 980 nm “άντληση σήματος” για την ενίσχυση των εισερχόμενων σημάτων στο C band(1530-1565 nm). Εξαρτώμενο από το μήκος και την χωρητικότητα του συστήματος, το κέρδος ενίσχυσης μπορεί να κυμαίνεται από 10εως 22 dB,το οποίο αντιστοιχεί σε ενισχυτές έκτασης από 50-110 km . Ο υπό βύθιση εξοπλισμός σχεδιάστηκε πάνω σε μια βάση οπτικού ζεύγους για την υποστήριξης μετάδοσης διπλής κατεύθυνσης, μπορεί να εμπεριέχει έως 8 ζεύγη ενισχυτών.

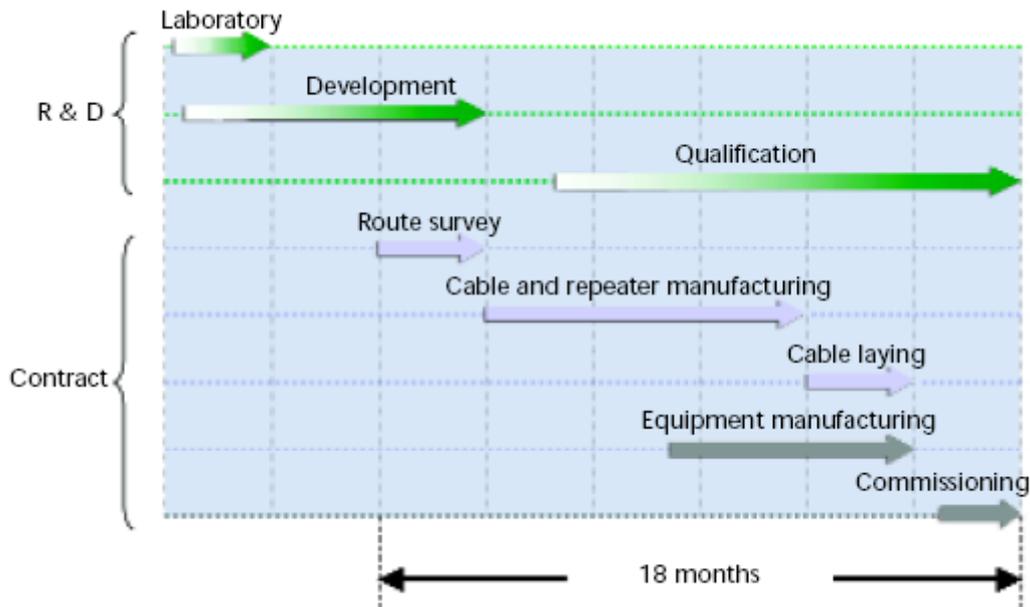


Σχήμα 7.3 Οπτικό σχήμα για έναν ενισχυτή ζεύγους.

Το βιομηχανικό πρότυπο για την αξιοπιστία των υποβρυχίων εφαρμογών είναι ότι δεν πρέπει να υπάρξει πάνω από μια μοναδική επιδιόρθωση (μέσω πλοίου) σε χρονικό διάστημα 25 χρόνων ενός υπερατλαντικού συστήματος. Για την επίτευξη αυτής της προϋπόθεσης είναι απαραίτητα εξαρτήματα υψηλής αξιοπιστίας και αρχιτεκτονική επιδιόρθωσης. Για παράδειγμα, η ισχύς της διόδου άντλησης laser των 980 nm κατανέμεται ανάμεσα σε δυο (EDFAs) ενός ζεύγους ενισχυτή έτσι ώστε αν ένα LD χαλάσει το άλλο να είναι (ακόμη)σε λειτουργία.

#### 7.2.4 Ο εξοπλισμός τροφοδοσίας (ισχύος)

Οι αναμεταδότες τροφοδοτούνται σε σειρά με περίπου ένα Α συνεχούς ρεύματος το οποίο παρέχεται PFE στους τερματικούς σταθμούς οι οποίοι να παράγουν έως και 1 kV. Το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει διαμέσου χάλκινου αγωγού στο καλώδιο και επιστρέφει μέσω του εδάφους. Οι μεγάλες απαιτήσεις σε ισχύ, αξιοπιστία και έλεγχο οι οποίες χρειάζονται μπορούν να επιτευχθούν με τον διπλασιασμό των στρατηγικών κυκλωμάτων.



**Σχήμα 7.4** Οι φάσεις της έρευνας και ανάπτυξης και η εφαρμογή ενός σχεδίου εργασίας.

Για την ελαχιστοποίηση του χρόνου επιδιόρθωσης ο σχεδιασμός θα πρέπει επίσης να χαρακτηρίζεται από μικρή πολυπλοκότητα και αρθρωτή κατασκευή. Δύο μονάδες (κάθε μια ικανή για την παραγωγή του απαιτούμενου ρεύματος εξόδου) εγκαθίστανται αρχικά για την παροχή μόνο της μισής απαιτούμενης ισχύος. Σε περίπτωση βλάβης μιας μονάδας, η δεύτερη σχεδιάζεται ώστε να αυξήσει αυτόματα το παραγόμενο ρεύμα και να παρέχει το συνολικό φορτίο.

### 7.2.5 Ο εξοπλισμός της υποβρύχιας τερματικής γραμμής

Για την δημιουργία παλμικών μορφών συμβατών με την υπερατλαντική αναπαραγωγή χωρίς την ανάγκη για αναγέννηση σήματος, το SLTE προσαρμόζεται με έναν μεταδότη γραμμής υψηλής απόδοσης. Για την επίτευξη του υψηλότερου δυνατού επιπέδου απόδοσης ο εξοπλισμός λήψης περιλαμβάνει μονάδες αντιστάθμισης της χρωματικής διασποράς καθώς και οπτικούς προενισχυτές. Σε μια εγκατάσταση 100 καναλιών των 10 Gbits/sec με απόσταση καναλιού χαμηλότερη των 33 Gherz που πολυπλέκονται και αποπολυπλέκονται. Ένα τόσο υψηλού επιπέδου φάσμα αποδοτικότητας απαιτεί σταθερές πηγές laser στο μέρος του μεταδότη και πολύ επιλεκτικές οπτικές ίνες στο μέρος του λήπτη. Η χρήση της διόρθωσης του σφάλματος προς τροφοδότηση (FEC) δίνει την δυνατότητα για ευρύτερα φάσματα αναμετάδοση και υψηλότερες επιδόσεις από αυτές που προκύπτουν από ITU-T G.826 το οποίο καθορίζει ένα ρυθμό σφάλματος bit (BER) κάτω από  $1 \times 10^{-13}$ . Το FEC επίσης παρέχει μια εύκολη μέθοδο ορισμού της εξέλιξης της επίδοσης της μετάδοσης υποδεικνύοντας τον αριθμό των διορθωμένων σφαλμάτων.



**Σχήμα 7.5** Χώρος αποθήκευσης καλωδίου μέσα στο αμπάρι του πλοίου.

Για την επίβλεψη των παραμέτρων του βυθισμένου αναμεταδότη όπως η ενέργεια που προσδίδεται, η ενεργεία που εκλύεται και η κλίση της αντλίας LD, το SLTE είναι εξοπλισμένο με μια γραμμή που επιβλέπει την παραγωγή σήματος και ανίχνευση μέσω χαμηλής συχνότητας υπερδιαμόρφωση του οπτικού φορέα. Η κατανοητή πλέον επιβλέπουσα πληροφορία περνάει στο υποβρύχιο σύστημα διαχείρισης, ένα αφοσιωμένο δίκτυο που παραβλέπει την όλη οικογένεια εξοπλισμού της υποβρύχιας γραμμής, συμπεριλαμβανομένων και των SLTE, PFE και αναμεταδοτών.

### **7.2.6 18 μήνες μέχρι την υλοποίηση**

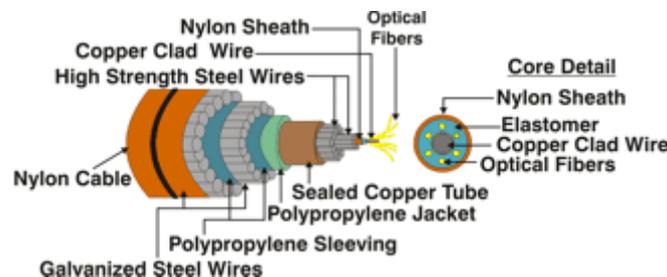
Συνεχείς βελτιώσεις στην τεχνολογία των οπτικών ινών έχει οδηγήσει στην μείωση χρόνου στην αγορά. Τα σημερινά υποβρύχια συστήματα συνήθως κατασκευάζονται, βγαίνουν στην αγορά, εγκαθίστανται και

ιεραρχούνται μέσα σε ένα διάστημα 18 μηνών ξεκινώντας από την στιγμή που το συμβόλαιο υπογράφεται.

Η ανάλυση της απόδοσης με κάποια προγράμματα benchmark δείχνει ότι τα εργαστηριακά πειράματα στα οποία έχουν αναφερθεί βιομηχανικά συνέδρια όπως το Optical Fiber Communication Conference and Exhibit (OFC), Sub optic και το ευρωπαϊκό συνέδριο πάνω σε οπτικές επικοινωνίες είναι συνήθως 24 μήνες μπροστά από την πραγματική εγκατάσταση του συστήματος.

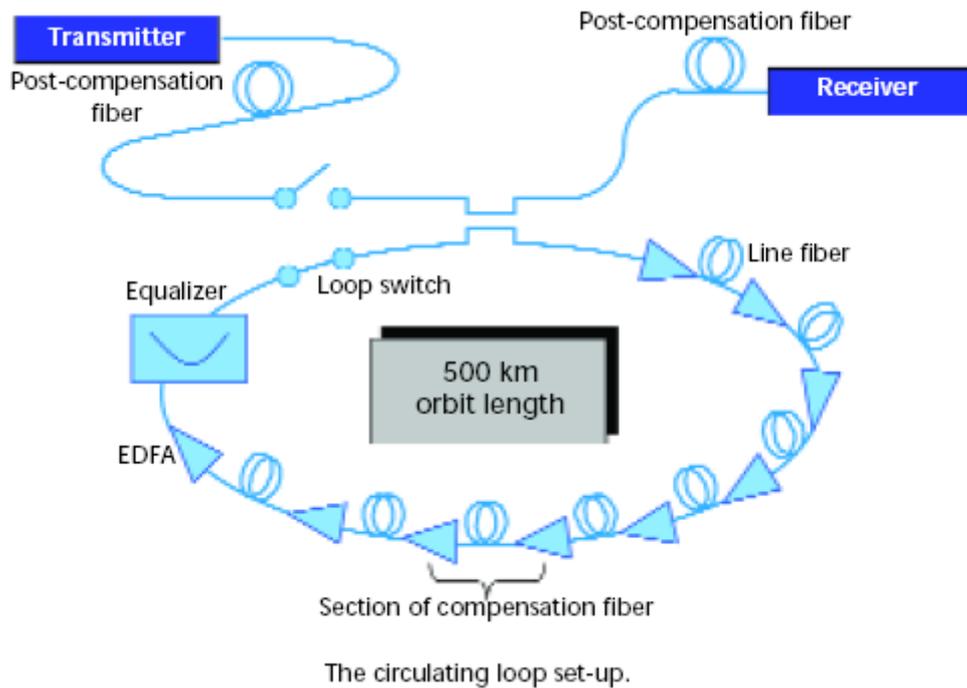
### 7.2.7 Εργαστηριακά πειράματα

Με το πέρασμα των τελευταίων 20 χρόνων, μεγάλης κλίμακας προσπάθειες για έρευνα και ανάπτυξη κάνουν εφικτή την αύξηση της χωρητικότητας και της σθεναρότητας του καλωδίου σε συσχετισμό με τις ανάγκες της αγοράς, την ίδια στιγμή που τα υποβρύχια συστήματα αποτελούν την ραχοκοκαλιά των διηπειρωτικών τηλεπικοινωνιών. Οι πιο σημαντικές καινοτομίες, λαμβάνοντας υπό όψη αυτό ήταν ο ενισχυτής ίνας από έρβιο που αναπτύχθηκε από τους Payne και Poole του πανεπιστημίου του Southampton το 1980 και το έξω από την ζώνη συχνότητας μετάδοση του FEC, κάτι το πρωτοποριακό από την ALCATEL το 1990.



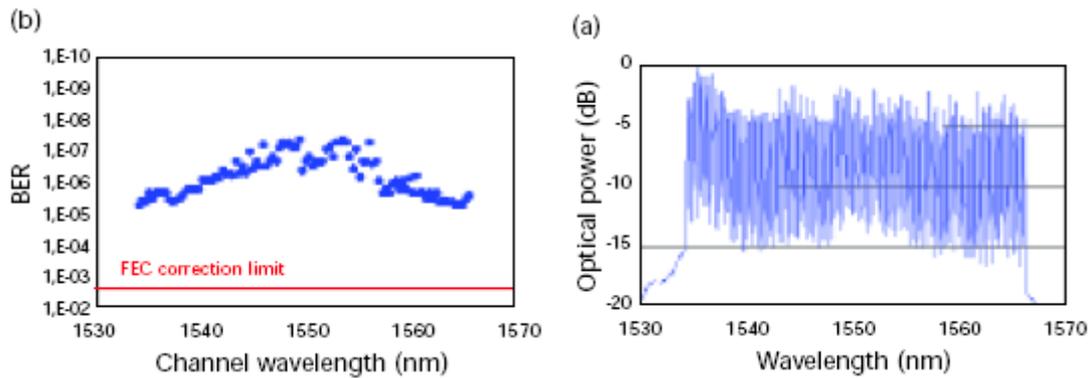
**Σχήμα 7.6** Θωρακισμένο υποβρύχιο καλώδιο.

Πριν την υποβρύχια εγκατάσταση, όλες οι τεχνικές καινοτομίες υφίστανται εντατικές εργαστηριακές δοκιμές. Για την επίβλεψη της απόδοσης των οπτικών μεταδόσεων, στα περισσότερα υιοθετείται μια δομή κυκλικού βρόγχου. Τα πλεονεκτήματα αυτής της διαμόρφωσης είναι ότι το κόστος είναι χαμηλό εφόσον απαιτούνται μόνο μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα ίνας και ένας ορισμένος αριθμός από ενισχυτές, αποτέλεσμα αυτού είναι η εύκολη αναδιαμόρφωση στην διαδικασία εγκατάστασης. Για την προσομοίωση εκτεταμένης μετάδοσης, το οπτικό σήμα κινείται κυκλικά διαμέσου στενού ενισχυμένου καναλιού. Ο βρόγχος, ο οποίος είναι συνήθως της τάξεως των 500 km και διαθέτει αντιπροσωπευτικά συστατικά μέρη, χρησιμοποιείται επίσης για να άγει παραμετρικές έρευνες οι οποίες στοχεύουν στην εγκατάσταση σαφών περιορισμών του εξοπλισμού.



**Σχήμα 7.7** Δομή ενός σύνθετου βρόχου.

Οποιοδήποτε και αν είναι το μήκος του συστήματος και η χωρητικότητα του στόχου, οι standard απαιτήσεις απόδοσης για ένα υποβρύχιο σύστημα είναι ένα BER κάτω των  $10^{-13}$  στο τέλος ζωής του. Η χρήση 3<sup>ης</sup> γενιάς FEC επιτρέπει στις απαιτήσεις των BER να μειωθούν στο  $4 \times 10^{-3}$  πριν την διόρθωση λάθους. Λαμβάνοντας υπόψη τα περιθώρια ανοχής για την επιδιόρθωση του συστήματος, aging και κατασκευή, το εργαστήριο πειραματίζεται για να επιβεβαιώσει τον σχεδιασμό του συστήματος ανταποκρίνεται σε ένα BER των  $5 \times 10^{-5}$  πριν την διόρθωση λάθους. Τέτοιο πείραμα κυκλικού βρόχου επαναλήφθηκε 100 φορές στα 10 Gbits/sec μετάδοσης σε πάνω από 6000 km. Σε αυτό το συγκεκριμένο υπερατλαντικό πείραμα τα 100 κανάλια εξαπλώθηκαν πάνω σε ένα ενισχυτή με εύρος ζώνης αλυσίδας (chain bandwidth) 32-nm αντιστοιχούσε σε κανάλι με διάταξη ανά διαστήματα των 0.32 nm ή 40 GHz. Το μετρούμενο BER από κάθε κανάλι ήταν καλύτερο από  $5 \times 10^{-6}$  ή 10 φορές καλύτερο από το  $5 \times 10^{-5}$  προϋπόθεση BER. Το πείραμα παρόλα αυτά επαληθεύει τον σχεδιασμό μετάδοσης terabit/s ανά ίνα σε υπερατλαντικές αποστάσεις.



**Σχήμα 7.8** a) Λήψη οπτικού φάσματος και b) εγγραφή BER κάθε 100 καναλιών έπειτα από 6000km.

Για να βελτιστοποιήσουμε το κόστος της διάταξης ανά διαστήματα του αναμεταδότη σχεδιάζεται στη βάση του συγκεκριμένου μήκους και χωρητικότητας του κάθε συστήματος έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσουμε τη μέτρηση του αναμεταδότη.

### 7.3 Η έρευνα της διαδρομής του καλωδίου

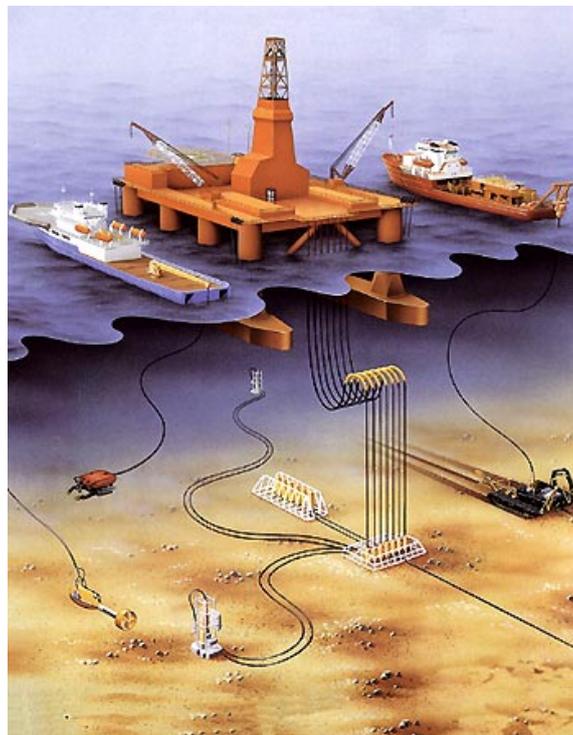
Δυο τρόποι υπάρχουν για να βελτιώσουμε την αξιοπιστία: το καλώδιο μπορεί να είναι θωρακισμένο για την αύξηση της δυναμικής ή θαμμένο για την προστασία του από φθορά. Επειδή και οι δυο τεχνικές μεγαλώνουν το κόστος του συστήματος, επιλογές σχετικές με θωράκιση (armor) και ταφή (burial) είναι σημαντικές. Επιλογή διαδρομής και επιλογή προστασίας πάνε χέρι-χέρι. Η βέλτιστη διαδρομή αποφεύγει τόσο τα ανθρώπινα λάθη όπως άγκυρες πλοίων και φυσικούς κινδύνους. Ο ορισμός της διαδρομής είναι μια διαδικασία 3<sup>ov</sup> βημάτων η οποία αποτελείται από μια έρευνα στην επιφάνεια καλωδίου, μια έρευνα ηλεκτρονικής διαδρομής (ERS) και μια έρευνα ηλεκτρονικού εκτίμησης ταφής (EBAS). Το πρώτο βήμα επιτρέπει προκαθορισμό της καλύτερης διαδρομής και μια εκτίμηση των διαδικασιών θωράκισης και ταφής(burial) στη βάση γνωστών προφίλ θαλάσσιου στρώματος και ανθρώπινης δραστηριότητας. Τα ERS και EBAS επιτρέπουν περαιτέρω (refinement): κληροδοτούν γενιά ενός γεωφυσικού προφίλ του θαλάσσιου στρώματος παράλληλα με την εξέταση διακριτών δειγμάτων ιζήματος. Αυτή η τριμερής τεχνική επιτρέπει τον καθορισμό αρκετά νωρίς μέσα στην διαδικασία των τύπων των armored καλωδίων τα οποία θα χρειαστούν, τα μήκη τούς και τις σαφείς περιγραφές των προδιαγραφών ταφής και τα εργαλεία.

### 7.3.1 Η συναρμολόγηση της υποβρύχιας εγκατάστασης

Μετά τους αναμεταδότες και τα καλώδια που δομείται έχουν φτιαχτεί το σύστημα σε τομείς και ένας αριθμός από ελέγχους εφαρμόζονται. Ηλεκτρικά και οπτικά τεστ μόνωσης, αγωγιμότητας, τάσης ρεύματος πραγματοποιούνται στους τομείς. Τα οπτικά τεστ μετράνε την αποκτηθείς επιπεδότητα και την χρωματική διασπορά. Τα αποτελέσματα του τεστ επιτρέπουν να γίνουν ρυθμίσεις και χρησιμοποιούνται επίσης ως πηγή αναφοράς δεδομένων κατά τη διάρκεια φόρτωσης και στησιμάτων του καλωδίου. Το καλωδιακό σύστημα –συνήθως σε περισσότερα του ενός κομμάτια- φορτώνεται τότε στο καλωδιακό πλοίο όπου είναι προσεχτικά τυλιγμένο σε αποθηκευτικές δεξαμενές.

### 7.3.2 Στήσιμο καλωδίου

Η ουσιαστική διαδικασία στη θάλασσα ξεκινά με το καλώδιο να κρέμεται επί ξηράς από το πλοίο με τα καλώδια(cable ship) στη θέση απόβασης. Αυτό συμβαίνει για την αποφυγή ζημιάς στο θαλάσσιο στρώμα όσο και στο ίδιο το καλώδιο. Αφού το τέλος του καλωδίου βρίσκεται επί ξηράς και ασφαλές, οι σάκοι που βοηθούν στην επίπλευση αφαιρούνται και το καλώδιο κατακάθεται στο θαλάσσιο στρώμα. Το cable ship τότε ακολουθεί την προκαθορισμένη διαδρομή: το καλώδιο θάβεται ή οδηγείται στην επιφάνεια.



**Σχήμα 7.9** Διαδικασία περάσματος(άπλωμα και ταφή) του υποβρύχιου καλωδίου.

Το καλώδιο μπορεί ταυτόχρονα να απλωθεί και να θαφτεί με χρήση είτε ειδικής μηχανής που μπορεί να το θαφτεί σε βάθη μεταξύ 1.5 και 3 μέτρων είτε με όχημα που λειτουργεί με απομακρυσμένη διαχείριση εξοπλισμένο με εκτοξευόμενα εργαλεία. Τέτοιες περίπλοκες λειτουργίες άγονται με μειωμένη ταχύτητα των 50 και 1500 μέτρων ανά ώρα, ανάλογα με την κατάσταση του θαλάσσιου στρώματος και του ιζήματος. Όταν το άπλωμα (laying) και η ταφή δεν μπορούν να εφαρμοστούν ταυτόχρονα λόγω της ποιότητας του εδάφους ή του ότι το σκαπτικό μηχανήμα δεν είναι διαθέσιμο, εφαρμόζεται ταφή μετά το άπλωμα με χρήση εκτόξευση των εργαλείων. Σε μεγάλα συστήματα όμως το περισσότερο μέρος του καλωδίου απλώνεται στην ανοιχτή θάλασσα, όπου ένα πλοίο το οποίο περιέχει τόσο όσο 4000km από ελαφρύ καλώδιο μπορεί να το απλώσει με ταχύτητα 10 km/h.

### **7.3.3 Συγκρότηση συστήματος**

Παράλληλα με τις θαλάσσιες λειτουργίες, SLTE και PFE εγκαθίστανται στους καλωδιακούς σταθμούς όταν αυτός ο εξοπλισμός είναι συνδεδεμένος στη υποβρύχια εγκατάσταση, η διαδικασία αλληλουχίας εντολών μπορεί να αρχίσει. Τα τεστ αλληλουχίας εντολών επιβεβαιώνουν την ισχύ του καλωδίου, τον υποβρύχιο εξοπλισμό και την απόδοση της μετάδοσης για να υπολογιστούν τα ακριβή περιθώρια του συστήματος. Όταν όλα τα αποτελέσματα έχουν επιβουλευθεί και έχουν γίνει αποδεκτά από τους αγοραστές, το σύστημα είναι έτοιμο για εξυπηρέτηση/υπηρεσία και αναβαθμίζεται εισαγόμενο στον παγκόσμιο δίκτυο.

## **7.4 Fiber To The Home**

### **7.4.1 ΟΡΙΣΜΟΣ**

Το *Fiber To The Home* (FTTH) είναι η ιδανική αρχιτεκτονική για τις οπτικές ίνες. Στην αρχιτεκτονική αυτή, η οπτική ίνα οδηγείται όλη τη διαδρομή έως το σπίτι του τελικού αποδέκτη.

### 7.4.2 ΣΥΝΟΨΗ

Στις μέρες μας φαίνεται ότι καθένας θέλει υψηλές ταχύτητες στο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, αξιόπιστες υπηρεσίες φωνής καθώς και υψηλής ποιότητας video. Το αν αυτές οι υπηρεσίες παρέχονται μέσω DSL γραμμών, modems ή ασύρματων δικτύων είναι άνευ σημασίας εφόσον η υπηρεσία είναι γρήγορη και αξιόπιστη. Η παροχή όμως των υπηρεσιών αυτών παρουσιάζει διάφορες προκλήσεις όπως το πώς να πας τις γραμμές αυτές σε κάθε πελάτη καθώς και το πώς θα εξασφαλίσεις μια αρχιτεκτονική που θα μπορέσει να αντέξει στις προκλήσεις του μέλλοντος. Παρακάτω θα αναφέρουμε μια πιθανή λύση που ονομάζεται FTTH (fiber to the home).

### 7.4.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το FTTH έχει αναπτυχθεί για διάφορους λόγους κυριότεροι από τους οποίους είναι οι εξής:

- Η «έκρηξη» στο internet τα τελευταία χρόνια, η απαίτηση για δεύτερη γραμμή στο σπίτι, η ανάγκη για μεγαλύτερες ταχύτητες, διάφορες εναλλακτικές τεχνολογίες όπως το VoDSL (voice over DSL), το VoIP (voice over internet protocol), το VoATM και τα modems καλωδίων.
- Η ανταγωνιστικότητα στην αγορά λόγω του μεγάλου αριθμού παροχέων υπηρεσιών τέτοιου είδους, η αύξηση των υπηρεσιών αυτών από τους παροχές (ASP's) καθώς και οι εκκρεμείς κανονισμοί του FCC (Federal Communications Commission).
- Οι δυσκολίες που προκύπτουν στην εγκατάσταση και διατήρηση των δικτύων.
- Το συνεχώς μειωμένο κόστος του οπτικού εξοπλισμού.
- Η απαίτηση γνώσης της τεχνολογίας για εγκατάσταση δικτύων που θα μπορούν να αντέξουν στις προκλήσεις του μέλλοντος.

Παρακάτω θα αναφερθούμε σε όλα αυτά τα θέματα, καθώς και το τι μπορεί να προσφέρει το FTTH απέναντι σε όλες αυτές τις προκλήσεις. Αναλυτικότερα θα δούμε :

- Την εξέλιξη του FTTH στη βιομηχανία.
- Τις ανάγκες που συναντά.
- Πώς λειτουργεί το FTTH και πώς σχετίζεται με άλλες υπηρεσίες.
- Τα πλεονεκτήματα του FTTH.
- Τον βαθμό διείσδυσης και αποδοχής του από την αγορά.
- Το πιθανό μέλλον του FTTH.

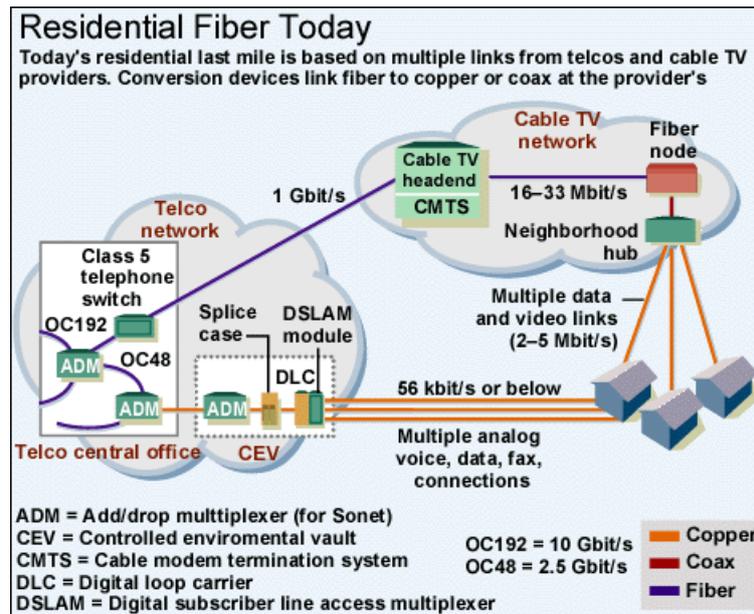
- Τον εξοπλισμό που προσφέρεται από τους παροχής.
- Αν το FTTH θα μπορέσει να γίνει το νέο βιομηχανικό standard.

#### **7.4.4 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ FTTH**

Τα δίκτυα οπτικών ινών γενικότερα, εξελίχθηκαν σαν απάντηση στην απαίτηση των καταναλωτών για μια μεγάλη ποικιλία υπηρεσιών και εφαρμογών multimedia. Για να ικανοποιήσουν αυτή την απαίτηση, οι παροχείς υπηρεσιών χρειάζονται μια δυνατή λύση για τη δημιουργία ενός ευρείας χρήσης δικτύου, όπως το δίκτυο οπτικών ινών, που προσφέρει ένα απεριόριστο εύρος συχνοτήτων και μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των καταναλωτών για δυο κατευθύνσεων, διαδραστικές υπηρεσίες κινούμενης εικόνας.

#### **7.4.5 ΟΙ ΑΝΑΓΚΕΣ ΤΟΥ ΤΩΡΑ ΚΑΙ ΟΙ ΠΡΟΣΔΟΚΙΕΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ**

Το FTTH επιτρέπει στους παροχής υπηρεσιών να προσφέρουν μια μεγάλη ποικιλία επικοινωνιών και ψυχαγωγίας, συμπεριλαμβανομένων της τηλεφωνίας carrier class, πρόσβασης στο internet με υψηλές ταχύτητες, καλωδιακή τηλεόραση, απευθείας δορυφορική τηλεόραση (DBS) και διαδραστικότητα σε υπηρεσίες video. Όλες αυτές οι υπηρεσίες προσφέρονται πάνω σε ένα παθητικό οπτικό δίκτυο, δια μέσου μιας οπτικής ίνας που καταλήγει σε κάθε σπίτι. Επί προσθέτως, ένα δίκτυο FTTH με πολυπλεξία διαίρεσης του μήκους κύματος (WDM), επιτρέπει επιπλέον εξελιξιμότητα και προσαρμοστικότητα στην υποστήριξη μελλοντικών υπηρεσιών.

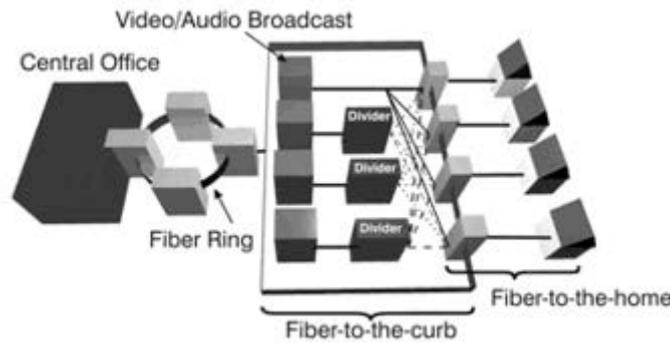


Σχήμα 7.10 Fiber To The Home.

Η πρόκληση των δικτύων full service (FSAN), των οποίων σκοπός είναι οι φθηνές λύσεις για την επιτάχυνση της εισροής υπηρεσιών στο δημόσιο δίκτυο, δοκιμάζει τον ασύγχρονο τρόπο μετάδοσης (ATM) και την τεχνολογία παθητικού οπτικού δικτύου (PON) για το FTTH, έτσι ώστε να γίνεται μεταφορά υπηρεσιών στο δίκτυο με ATM cells πάνω σε ένα PON. Αυτός ο τρόπος μετάδοσης έχει σημαντικά χαρακτηριστικά, όπως εγγυήσεις για την ποιότητα της υπηρεσίας (QoS), που με τη σειρά της δίνει τη δυνατότητα εκπομπής φωνής, κινούμενης εικόνας και δεδομένων με τη χρήση προτεραιότητας κατά την κίνηση. Επίσης επιτρέπει τη στατική πολυπλεξία σε ξεσπάσματα κίνησης στο δίκτυο, όπως για παράδειγμα συμβαίνει συχνά στο internet και στην μεταφορά δεδομένων.

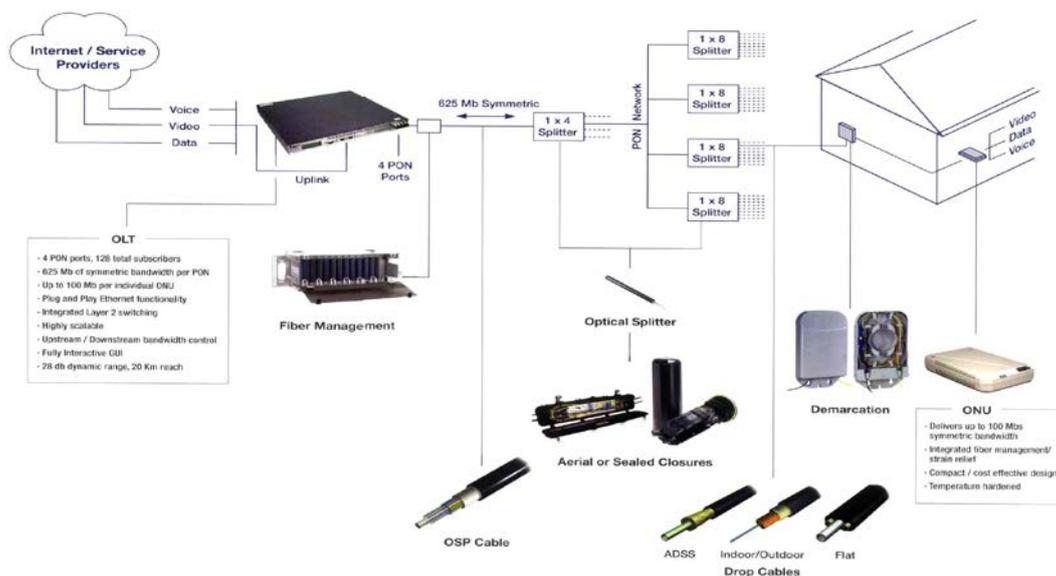
#### 7.4.6 ΠΩΣ ΔΟΥΛΕΥΕΙ ΤΟ FTTH

Σε ένα σύστημα FTTH, ο εξοπλισμός δικτύου ή του κεντρικού γραφείου (CO) είναι διασυνδεδεμένος με το δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο (PSTN), χρησιμοποιώντας ATM ή Ethernet συνδέσεις. Οι υπηρεσίες video διακινούνται στο σύστημα μέσω της καλωδιακής τηλεόρασης (CATV) ή από κάποιο δορυφόρο.



Σχήμα 7.11 FTTC σε σύνδεση με FTTH.

Κατόπιν όλα αυτά τα σήματα συνδυάζονται σε μια και μόνο οπτική ίνα, χρησιμοποιώντας τεχνικές πολυπλεξίας διαίρεσης του μήκους κύματος και φτάνουν ως τον τελικό χρήστη μέσω ενός παθητικού οπτικού διαχωριστή (splitter). Ο διαχωριστής τοποθετείται περίπου 10km μακριά από το κεντρικό γραφείο (CO). Το μέγεθος των γραμμών στο διαχωριστή κυμαίνεται από 2 έως 32 χρήστες και γίνεται χωρίς τη χρησιμοποίηση ενεργών συσκευών στο δίκτυο. Το σήμα τότε μεταφέρεται ακόμα 1km από το διαχωριστή έως τον τελικό αποδέκτη στο σπίτι, μέσω μιας οπτικής ίνας. Ένα ιδανικό σύστημα FTTH θα έχει τη δυνατότητα να παρέχει όλες τις υπηρεσίες για τις οποίες ένας τελικός χρήστης πληρώνει, όπως τηλεφωνία κλειστού κυκλώματος, υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και καθολικές υπηρεσίες κινούμενης εικόνας (video).



Σχήμα 7.12 Εξοπλισμός δικτύου FTTH.

Στο σπίτι το οπτικό σήμα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό με τη χρησιμοποίηση ενός οπτικού ηλεκτρικού μετατροπέα (optical electrical converter – OEC). Ο OEC κατόπιν διαχωρίζει το σήμα στις υπηρεσίες που ζήτησε ο τελικός χρήστης. Στην ιδανική περίπτωση ο OEC έχει θύρες επικοινωνιών για κάθε τι που μπορεί να ζητήσει ο τελικός χρήστης. Αυτές οι θύρες επικοινωνιών συμπεριλαμβάνουν RJ11 πρίζες για

τηλεφωνία, RJ45 πρίζες για μεταφορά δεδομένων υψηλής ταχύτητας και 75 Ohm ομοαξονικές θύρες για τη χρήση CATV και DBS υπηρεσιών.

#### **7.4.7 ΤΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ FTTH**

Υπάρχουν αρκετά πλεονεκτήματα συσχετιζόμενα με τη χρήση του FTTH, μερικά εκ των οποίων είναι τα ακόλουθα:

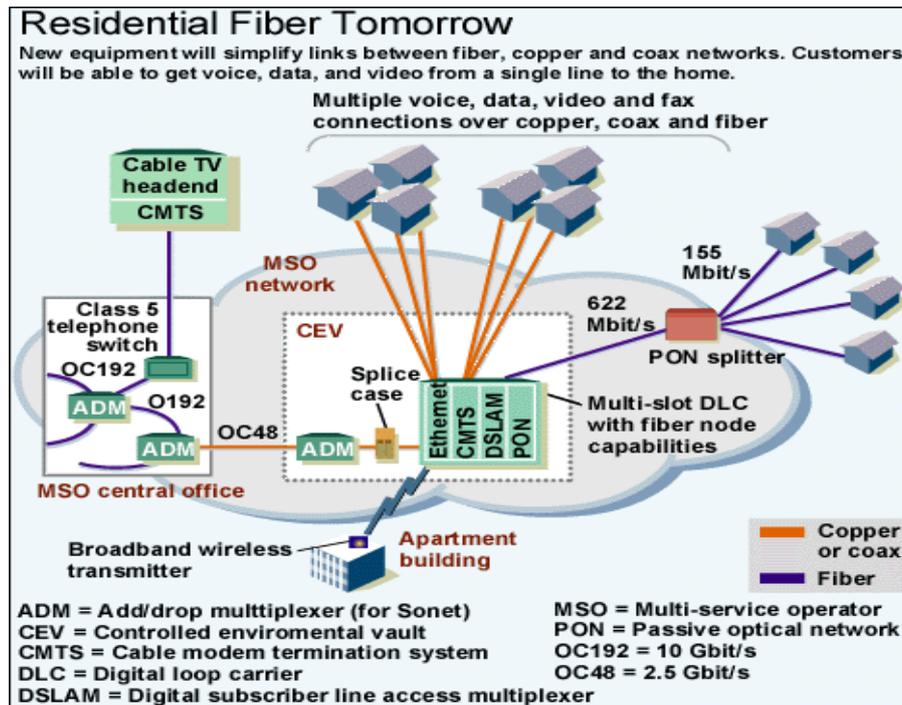
- Είναι ένα παθητικό δίκτυο, κι έτσι δεν υπάρχουν ενεργά συστατικά από τα κεντρικά γραφεία έως τον τελικό χρήστη. Το γεγονός αυτό μειώνει στο ελάχιστο τα έξοδα συντήρησης και γενικότερα τις απαιτήσεις που προκύπτουν αλλά και εξαλείφει την ανάγκη για χρήση δικτύου ενέργειας.
- Η χρήση της οπτικής ίνας έως τον τελικό χρήστη μπορεί να του προσφέρει όλες τις βασικές υπηρεσίες, όπως CATV, DBS, video on demand αλλά και ότι άλλο αυτός ζητήσει, λόγω των τρομερών δυνατοτήτων σε χωρητικότητα και ταχύτητα διάδοσης δεδομένων που έχει μια οπτική ίνα.
- Το FTTH έχει τοπικές μπαταρίες για backup και πολύ μικρή κατανάλωση ενέργειας.
- Το FTTH είναι αξιόπιστο, διαβαθμισμένο και ασφαλές.
- Το FTTH είναι ένα δίκτυο που εύκολα θα μπορέσει να αντεπεξέλθει στις προκλήσεις του μέλλοντος.

#### **7.4.8 ΕΠΙΠΕΔΟ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΧΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΓΟΡΑ**

Με την απαίτηση των καταναλωτών για υπηρεσίες που χρειάζονται υψηλή ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων, το FTTH έχει αναγνωριστεί σαν η καλύτερη λύση για την παροχή των υπηρεσιών αυτών στον τελικό χρήστη. Τα δίκτυα ομοαξονικών καλωδίων, καλωδίων συνεστραμμένων ζευγών και τα HFC (hybrid fiber / coax) δεν είναι τόσο εύρωστα και καλά προετοιμασμένα για τις προκλήσεις του μέλλοντος, όπως είναι η αρχιτεκτονική του FTTH. Και με το συνεχώς μειωμένο κόστος του οπτικού εξοπλισμού, το FTTH έχει αποδειχθεί μια τεχνολογία άξια παρακολούθησης καθώς κερδίζει συνεχώς και το ενδιαφέρον διαφόρων παροχέων. Σήμερα, έχει μόλις αρχίσει να διεισδύει στη αγορά, με πολυάριθμους παροχείς να έχουν ήδη αρχίσει την εγκατάσταση μικρών δικτύων.

### 7.4.9 ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ ΤΟΥ FTTH

Η επιθυμία για αμφίδρομες υπηρεσίες video, όπως η διαδραστική τηλεόραση, η εξ' αποστάσεως μάθηση, το υψηλής ποιότητας video conference και τα τηλέφωνα με οθόνη προβολής εικόνας, αναμένεται να αυξάνει συνεχώς στο κοντινό μέλλον. Στην πραγματικότητα ορισμένοι παρατηρητές πιστεύουν ότι ήδη υπάρχει καθολική απαίτηση για αυτές τις φουτουριστικές υπηρεσίες. Η προσπάθεια να ικανοποιηθούν κάποια στιγμή οι απαιτήσεις αυτές, αλλά και νέων που συνεχώς προκύπτουν με το πάτημα ενός απλού κουμπιού, δημιουργεί τεράστιες ανταγωνιστικές πιέσεις. Επίσης προσφέρει τη δυνατότητα μεγάλης αύξησης του εισοδήματος. Οι παροχείς υπηρεσιών που είναι σε θέση να προσφέρουν τις υπηρεσίες αυτές σε μια συνεχώς αυξανόμενη βάση πελατών, μπορούν να διπλασιάσουν ή ακόμα και να τριπλασιάσουν τα εισοδήματά τους σε ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

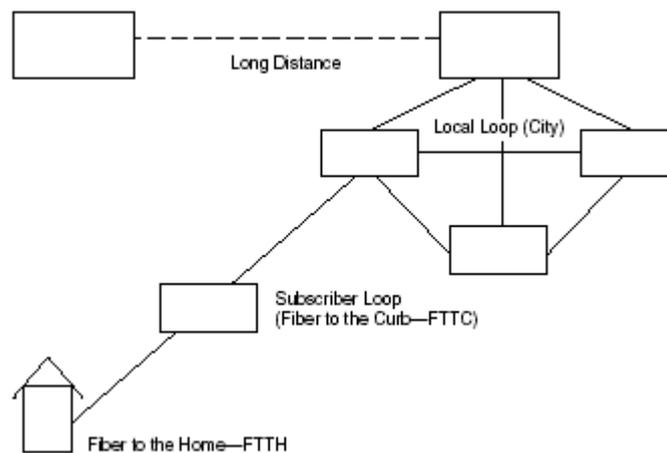


Σχήμα 7.13 Όλη η τεχνολογία στη πόρτα του σπιτιού μας με τη βοήθεια του FTTH.

Σαν αποτέλεσμα όλων αυτών, η απαίτηση για τεχνολογίες οπτικών ινών όπως το FTTH, βρίσκεται στην αρχή της ανόδου της. Οι τεχνολογικές βελτιώσεις γύρω από το WDM αναμένονται να επανακαθορίσουν και να εμπλουτίσουν την τεχνολογία, δίνοντας τη δυνατότητα στους παροχείς υπηρεσιών να δικαιωθούν για τις επενδύσεις τους γύρω από το FTTH.

### 7.4.10 ΠΑΡΟΧΗΣ FTTH

Ήδη αρκετές εταιρίες τηλεπικοινωνιών προσφέρουν την υπηρεσία FTTH. Αυτές ποικίλουν από μικρές έως και εταιρίες που μπορούν να διαθέσουν το μέγιστο τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό. Η πλειοψηφία των εγκαταστάσεων σήμερα είναι μικρά δίκτυα χαρακτήρα περιοχής, αλλά αυτό αναμένεται να αλλάξει μέσα στους επόμενους δώδεκα μήνες. Ήδη σε μεγάλες χώρες όπως τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και την Ιαπωνία, οι εγκαταστάσεις FTTH έχουν αρχίσει να γίνονται πραγματικότητα για ένα αρκετά μεγάλο αριθμό περιοχών τους ή και ολόκληρων πόλεων.



Σχήμα 7.14 Απλό σχέδιο τοπολογίας FTTH.

### 7.4.11 FTTH: TO NEO STANDARD ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ;

Θα μπορούσαμε να πούμε ότι το FTTH προορίζεται να γίνει το νέο standard στη βιομηχανία κατασκευής δικτύων για τους εξής λόγους:

- Η μείωση στο κόστος που σχετίζεται με τον οπτικό εξοπλισμό.
- Η απουσία ενεργών συσκευών από τα κεντρικά γραφεία (CO) έως τον τελικό χρήστη.
- Η αυξανόμενη ζήτηση για φωνή, δεδομένα και υπηρεσίες video πάνω σε οπτική ίνα.
- Η ανωτερότητα στην αξιοπιστία, στην ασφάλεια και η διαβάθμιση του δικτύου.
- Η ικανότητά του να μπορεί να αντεπεξέρχεται στις προκλήσεις που συνεχώς προκύπτουν, αλλά και σ' αυτές που θα προκύψουν στο μέλλον.

---

---

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8.**

---

---

# **ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ**

*Παρακάτω παρουσιάζονται δύο παραδείγματα πραγματικών εργασιών εγκατάστασης οπτικών δικτύων, από εταιρία που ειδικεύεται σε αυτό. Το πρώτο παράδειγμα αναφέρεται σε εγκατάσταση στο ΤΕΙ της Χαλκίδας ενώ το δεύτερο στο εργοστάσιο της ΔΕΗ στη Κοζάνι.*

---

**ΕΡΓΟ: <<ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ ΣΤΟ ΚΤΙΡΙΟ ΤΟΥ Τ.Ε.Ι. ΧΑΛΚΙΔΑΣ>>****ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ****1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η τεχνική αυτή μελέτη αφορά την εγκατάσταση δικτύου μεταφοράς δεδομένων ηλεκτρονικών υπολογιστών στο κτίριο του Τ.Ε.Ι. Χαλκίδας

**2. ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ****2.1 Γενικά**

Λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις και τις υποδείξεις που μας έγιναν και σε σχέση με τις τεχνολογικές ανάγκες του δικτύου προτείνεται η παρακάτω λύση για την κατασκευή οπτικού δικτύου μεταφοράς δεδομένων στο κτίριο του Τ.Ε.Ι. Χαλκίδας.

Αξίζει να σημειωθεί πως η απαίτηση για ύπαρξη μόνο οπτικών ινών (fiber to the desk) καθιστά το δίκτυό μας δύσκολα υλοποιήσιμο λόγω των μεγάλων οικονομικών απαιτήσεων που απαιτεί η αποκλειστική χρήση οπτικών ινών σε δίκτυα δεδομένων. Επιπλέον στα γνωστά συγγράμματα οπτοηλεκτρονικής δεν υφίσταται ακόμα η τεχνολογία για απευθείας σύνδεση οπτικών ινών με τηλεφωνικές συσκευές και η μόνη λύση είναι η χρησιμοποίηση voice over IP συσκευών που είναι οικονομικά ασύμφορες για ένα τεχνολογικό ίδρυμα. Πρέπει δε να επισημανθεί πως σε διάφορους χώρους του κτιρίου έχουν προβλεφθεί εφεδρικές πρίζες για εφαρμογές τηλεσυνδιασκέψεων, τηλεδιδασκαλίας και πιθανές μελλοντικές ανάγκες. Επίσης ο παρακάτω σχεδιασμός αφήνει ανοιχτό το πεδίο επιλογής ενεργών και παθητικών συσκευών που διαθέτονται στο εμπόριο ενώ δεν δεσμεύει το διαχειριστή του δικτύου ως προς την επιλογή συγκεκριμένων προϊόντων τώρα και στο προβλέψιμο μέλλον.

**2.2. Περιγραφή του δικτύου δεδομένων**

Το βασικό πρωτόκολλο επικοινωνίας των δεδομένων του δικτύου είναι το FastEthernet @100Mbps και όλοι οι χρήστες είναι συνδεδεμένοι με αυτό το πρωτόκολλο. Όπως φαίνεται και στα διαγράμματα (βλέπε Παράρτημα) το δίκτυο αναπτύσσεται με έναν βασικό δικτυακό άξονα κάτω από τρεις μεταγωγείς οπτικών ινών <<Fiber Optic Switching Hub>> @100Mbps. Ο δικτυακός άξονας διαχωρίζεται σε δύο βασικά δίκτυα: Το <<δίκτυο Κορμού>> [κατακόρυφο ή σκελετός (backbone)] και το <<δίκτυο διανομής>> (οριζόντιο).

### 2.2.1. Δίκτυο Κορμού (βλέπε Παράρτημα)

Το δίκτυο κορμού αποτελείται από έναν βασικό άξονα ETHERNET. Συνολικά θα υπάρχουν τρεις (3) κόμβοι σύνδεσης στα 100Mbps μία σε κάθε όροφο. Ο άξονας είναι βασισμένος σε ένα κεντρικό μεταγωγέα οπτικών ινών πρωτοκόλλων ETHERNET και πολλαπλών επιπέδων. Οι συνδέσεις των απομακρυσμένων μεταξύ τους Κεντρικών σημείων θα γίνονται μέσω οπτικών ινών, όπως και κάθε άλλη σύνδεση στο δίκτυο μας.

### 2.2.2 Δίκτυο Διανομής

Το δίκτυο διανομής βασίζεται και δημιουργείται με την χρήση των Fiber Optic Switching Hubs. Η ανάπτυξη του δικτύου διανομής θα βασίζεται σε τοπολογία αστέρα ώστε να εξασφαλίζεται η ευελιξία του δικτύου (εύκολη κεντρική μικτονόμηση) για υποστήριξη ευρέως φάσματος εφαρμογών και αρχιτεκτονικών (Ethernet, FDDI, Token Ring, ATM, κλπ). Παράλληλα η κεντρική αυτή ανάπτυξη προσφέρει σημαντικό βαθμό ασφαλείας του δικτύου από εξωγενείς παράγοντες. Οι συνδέσεις με τους κεντρικούς μεταγωγείς γίνεται με οπτική θύρα (100-BaseFX) ενώ μπορεί να γίνει και πρόβλεψη για μια εφεδρική σε κάθε κόμβο. Οι συνδέσεις των χρηστών στο δίκτυο επιτυγχάνεται με δεσμευμένες μεταγωγίσιμες συνδέσεις Ethernet (100-Base F). Εδώ αξίζει να σημειωθεί πως για όλα τα τερματικά του δικτύου απαιτούνται ευρέως διαθέσιμες κάρτες δικτύων με οπτικές θύρες. Οι ενεργές διατάξεις θα πρέπει να είναι πλήρως εξοπλισμένες και να έχουν δυνατότητα κάλυψης των τρεχουσών και προβλεπόμενων αναγκών καθώς και να προσφέρουν κάποιες εφεδρικές αναμονές για μελλοντικές ή έκτακτες συνδέσεις.

Αριθμός ενεργού συσκευής (ΕΣ. Νο) x (αρ. συσκευών)	Θέση ενεργού συσκευής (ΙΚΡΙΩΜΑ , Ι Κ #)	Τύπος ενεργού συσκευής
ΕΣ. Νο.1 x 7	ΙΚ. 01 (ΙΣΟΓΕΙΟ)	F/O Network Switching Hub (FONSH)
ΕΣ Νο.2 x 3	ΙΚ. 02 (ΠΡΩΤΟΣ ΟΡΟΦΟΣ)	F/O Network Switching Hub (FONSH)
ΕΣ Νο.3 x 17	ΙΚ. 03 (ΔΕΥΤΕΡΟΣ ΟΡΟΦΟΣ)	F/O Network Switching Hub (FONSH)

Κάθε ενεργός συσκευή θα πρέπει να καλύπτει τουλάχιστον τις παρακάτω δυνατότητες δικτυακών χαρακτηριστικών του κόμβου για τον οποίο προορίζεται.

Κόμβος	Αριθμός Ενεργού Συσκευής (No)	Μεταγωγίσιμες θύρες Οπτ.Ινών FastEthernet (100BaseFx)	Εφεδρικές θύρες
K1 (ΙΣΟΓΕΙΟ)	1 X 7	180	6 (100BaseFX)
K2 (ΠΡΩΤΟΣ)	2 X 3	70	2(100BaseFX)

ΟΡΟΦΟΣ)			
Κ3 (ΔΕΥΤΕΡΟΣ ΟΡΟΦΟΣ)	3 X 17	480	14(100BaseFX)
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	3 X 27	730	22

Όπως είναι εύκολο παρατηρήσιμο όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των πριζών τόσο μεγαλύτερος είναι και ο αριθμός εφεδρικών θυρών που προβλέπουμε για μελλοντική χρήση.

### 2.2.3. Διαχείριση Δικτύου

Η διαχείριση δικτύου θα γίνεται κεντρικά επί ειδικού σταθμού διαχείρισης (computer room) με ειδικό λογισμικό διαχείρισης δικτύου όπου ο διαχειριστής θα επικοινωνεί σε εικονικό περιβάλλον με τα τερματικά του δικτύου. Τα χαρακτηριστικά του σταθμού διαχείρισης θα καθοριστούν κατά τη φάση της ανάθεσης του έργου ώστε να εξασφαλιστεί η όσον το δυνατόν πιο τρέχουσα και πρόσφατη τεχνολογική λύση. Σημαντικά σημεία της διαχείρισης του δικτύου αποτελούν η διευθυνσιοδότηση των τοπικών δικτύων, των σταθμών εργασίας των χρηστών, την καθιέρωση υπηρεσιών καταλόγου (βάση δεδομένων για Domain Name Servers), την σύνταξη ενός εγχειριδίου της πολιτικής του διαχειριστή σε θέματα ασφαλείας και λειτουργίας του δικτύου (πρόσβαση, παραβίαση αρχείων, κλπ).

### 2.3. Εναλλακτική Λύση

Επειδή η αποκλειστική χρησιμοποίηση οπτικής ίνας στο δίκτυό μας δε μας περιορίζει όσον αφορά τις αποστάσεις των οπτικών καλωδίων που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε, προτείνεται και μια δεύτερη εναλλακτική λύση που περιλαμβάνει μόνο ένα κεντρικό ζεύγος ικριωμάτων στον πρώτο όροφο. Το ένα από αυτά περιλαμβάνει μόνο παθητικές συσκευές (συγκεκριμένα οπτικούς κατανομητές για τις οπτικές ίνες όλου του δικτύου μας) -(ΙΚΡΙΩΜΑ 1α-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ #9) και το άλλο περιλαμβάνει ενεργητικές συσκευές (τα SWITCHES που χρειάζονται για το δίκτυό μας) -(ΙΚΡΙΩΜΑ 1β -ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ #10). Η εναλλακτική αυτή λύση φαίνεται σχηματικά στο ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ #8. Πλεονεκτήματα της είναι η ύπαρξη για κάθε τερματικό ανεξάρτητης καλωδιακής διαδρομής μέχρι το σταθμό διαχείρισης, η κεντρική καλωδιακή διαχείριση και η ανάγκη για ύπαρξη ενός μόνο ελεγχόμενου χώρου συγκέντρωσης των καλωδίων. Μειονεκτήματα είναι το περισσότερο μήκος καλωδίου που επιβάλλεται να χρησιμοποιηθεί (και επομένως και αυξημένο κόστος) και η δύσκολη εγκατάσταση 730 οπτικών ινών σε δύο ικριώματα.

### 3. ΚΑΛΩΔΙΩΣΕΙΣ

#### 3.1. Γενικά

Οι καλωδιώσεις του δικτύου δεδομένων του κτιρίου του Τ.Ε.Ι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, το δίκτυο κορμού και το δίκτυο διανομής.

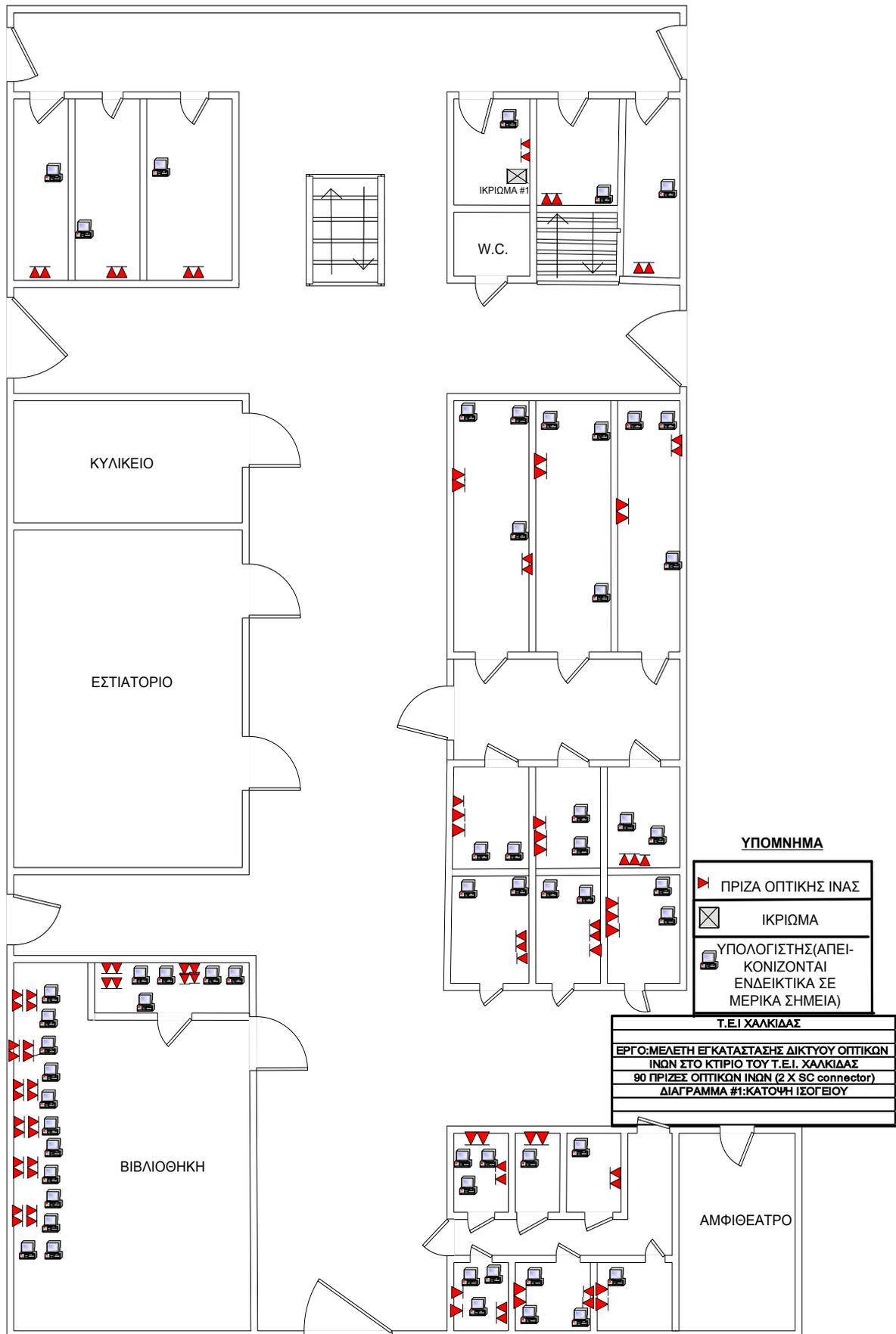
Το δίκτυο κορμού αποτελείται εξ ολοκλήρου από καλώδια οπτικών ινών. Το δίκτυο διανομής θα αναπτυχθεί καλωδιακός όπως έχει αναφερθεί σε τοπολογία αστέρος και αποτελείται και αυτό εξ ολοκλήρου από οπτικές ίνες.

#### 3.2. Δίκτυο Κορμού

Και οι καλωδιώσεις του δικτύου κορμού όπως έχει ήδη αναφερθεί θα αναπτυχθούν με τη φιλοσοφία του ιεραρχημένου αστέρος .

Οι δυο αυτές συνδέσεις θα γίνονται με καλώδια οπτικών ινών τα χαρακτηριστικά των οποίων δίδονται σε σχετικό πίνακα.

ΚΟΜΒΟΣ	ΑΦΕΤΗΡΙΑ	ΠΡΟΟΡΙΣΜΟΣ	ΠΛΗΘΟΣ ΑΓΩΓΩΝ	ΕΙΔΟΣ ΚΑΛΩΔΙΟΥ	ΕΚΤΙΜ.ΜΗΚΟΣ ΚΑΛΩΔΙΟΥ	ΑΡΙΘ.ΚΑΛ.
K1	OK1	OK2	12	ΚΟΙ(ΠΤ) ΕΣΩ/ΕΞΩ	20	ΚΟΙ #2
K2	OK2	OK3	12	ΚΟΙ(ΠΤ) ΕΣΩ/ΕΞΩ	40	ΚΟ I#1



# DOCUMENTATION ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ & ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ  
ΟΠΤΙΚΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ  
ΣΤΗ:

ΔΕΗ  
ΚΟΖΑΝΗ  
ΜΑΡΤΙΟΣ 2003



222 El. Venizelou str., 175 63 Athens, Greece. Tel.: +30-210-9837121, 9886041  
Fax: +30-210-9834814, [www.optronics.gr](http://www.optronics.gr), e-mail: [optronics@optronics.gr](mailto:optronics@optronics.gr)

## 1. ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ – ΚΩΔΙΚΟΙ

ΧΩΡΟΣ: ΔΕΗ ΚΟΖΑΝΗΣ

### ΑΡΙΘΜΗΣΗ ΘΕΣΕΩΝ:

1. COMPUTER ROOM
2. Ισόγειο
3. 1<sup>ος</sup> Όροφος
4. 2<sup>ος</sup> Όροφος
5. 3<sup>ος</sup> Όροφος
6. Χημείο
7. Control 1,2
8. Control 3,4
9. Control 5

### ΑΡΙΘΜΗΣΗ ΚΑΛΩΔΙΩΝ:

- No1. ΑΠΟ ΘΕΣΗ 1 ΣΕ ΘΕΣΗ 2
- No2. ΑΠΟ ΘΕΣΗ 1 ΣΕ ΘΕΣΗ 3
- No3. ΑΠΟ ΘΕΣΗ 1 ΣΕ ΘΕΣΗ 4
- No4. ΑΠΟ ΘΕΣΗ 1 ΣΕ ΘΕΣΗ 5
- No5. ΑΠΟ ΘΕΣΗ 1 ΣΕ ΘΕΣΗ 6
- No6. ΑΠΟ ΘΕΣΗ 1 ΣΕ ΘΕΣΗ 9
- No7. ΑΠΟ ΘΕΣΗ 1 ΣΕ ΘΕΣΗ 8
- No8. ΑΠΟ ΘΕΣΗ 1 ΣΕ ΘΕΣΗ 7

**ΑΡΙΘΜΗΣΗ ΚΑΤΑΝΕΜΗΤΩΝ:** FP(Fiber Panel)No κατανεμητή/αριθμός ίνας

### ΑΡΙΘΜΗΣΗ ΙΝΩΝ ΚΑΛΩΔΙΟΥ 8 ΙΝΩΝ (MM):

1. Πορτοκαλί
2. Κόκκινο
3. Πράσινο
4. Μπλε
5. Καφέ
6. Γκρι
7. Λευκό
8. Μαύρο

### ΑΡΙΘΜΗΣΗ ΙΝΩΝ ΚΑΛΩΔΙΟΥ 8 ΙΝΩΝ (SM):

1. Πορτοκαλί
2. Κόκκινο
3. Πράσινο
4. Μπλε

5. Καφέ
6. Γκρι
7. Λευκό
8. Μαύρο

## 2.ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ – ΣΧΟΛΙΑ

Οι εργασίες εγκατάστασης και τερματισμού των καλωδίων οπτικών ινών στη ΔΕΗ στη ΚΟΖΑΝΗ πραγματοποιήθηκαν από τις 13 έως στις 19 Μαρτίου 2005.

Η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε στο τερματισμό είναι αυτή της συγκόλλησης (fusion splicing) κάθε ίνας με κατάλληλο μονόινο προτερματισμένο καλώδιο (με συνδετήρα ST).

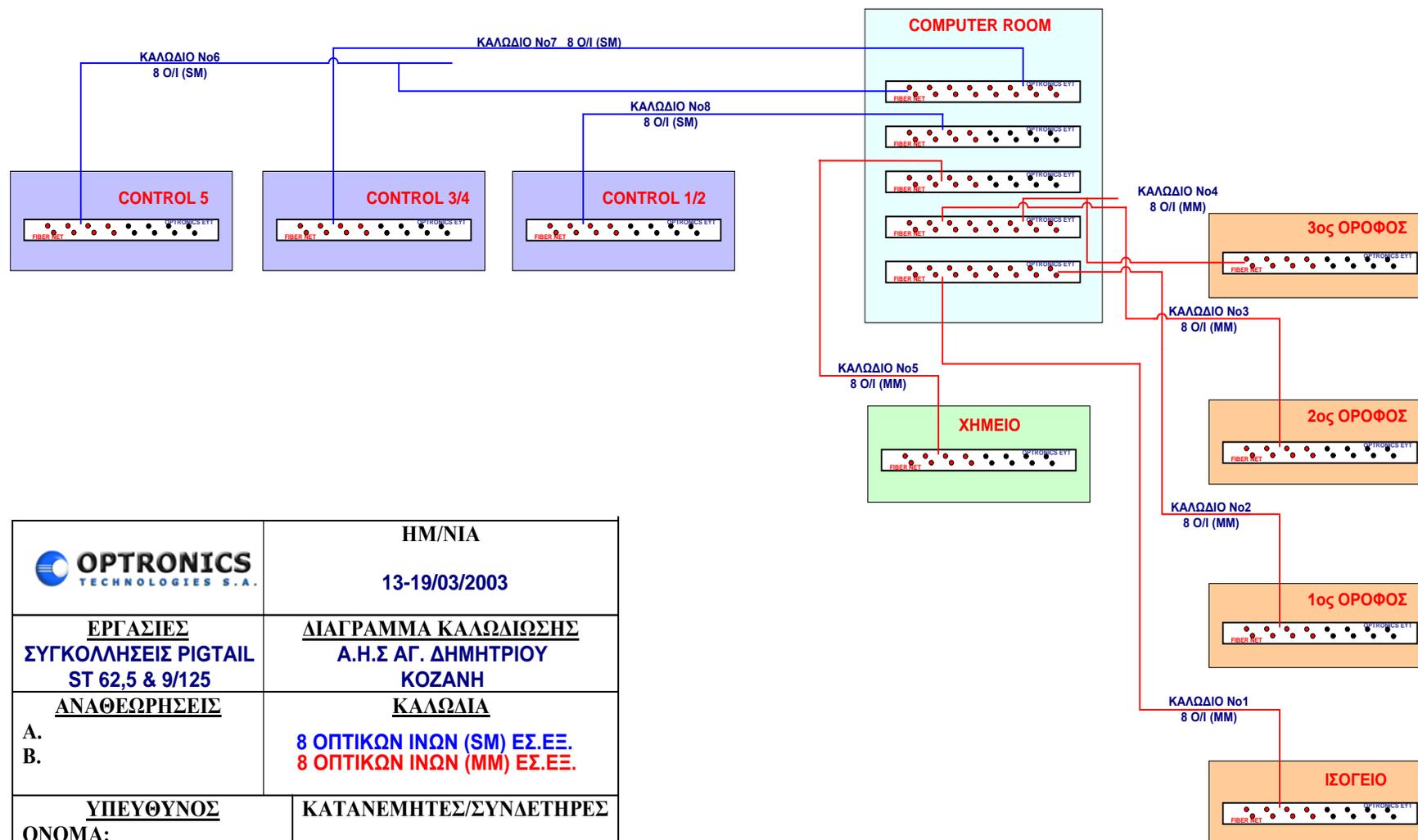
Τα σημεία συγκολλήσεων καλύφθηκαν με ειδικό προστατευτικό θερμοσυστελλόμενο σωληνίσκο (που διαθέτει μεταλλικό στέλεχος) και τοποθετήθηκαν σε ειδική κασέτα.

Μετά το τέλος των εργασιών τερματισμού έγινε έλεγχος με πηγή LASER εκπομπής στα **670 nm** (κόκκινο χρώμα) και μετρήσεις απωλειών οπτικής ισχύος με πηγή LED συνεχούς εκπομπής στα **1300 nm** και οπτικό ισχύόμετρο (**optical power meter**). (Σύμφωνα με την **IEC 874-1 method 6**)

Στον πίνακα που ακολουθεί βρίσκονται οι αντίστοιχες τιμές της κάθε ζεύξης. Οι τιμές αυτές κρίνονται ιδιαίτερα ικανοποιητικές και περιλαμβάνουν την απώλεια από: δύο coupler (διπλός υποδοχέας του κατανεμητή), δύο συνδετήρες ST (των άκρων) και το ειδικό συστημάρισμα στο εσωτερικό του κατανεμητή και φυσικά την απώλεια λόγω του μήκους και τη διαδρομή του καλωδίου.

Στην παρούσα εγκατάσταση πραγματοποιήθηκαν 48 συγκολλήσεις pigtails ST 9/125 και 80 συγκολλήσεις pigtails ST 62,5/125. Επίσης έγιναν 64 μετρήσεις απωλειών με power meter (μεταξύ των δύο σημείων) και 64 μετρήσεις συνέχειας με OTDR.

### 3. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΙΚΤΥΩΣΗΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ



		ΗΜ/ΝΙΑ 13-19/03/2003
ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ RIGTAIL ST 62,5 & 9/125		ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΑΛΩΔΙΩΣΗΣ Α.Η.Σ ΑΓ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΚΟΖΑΝΗ
ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΕΙΣ Α. Β.		ΚΑΛΩΔΙΑ 8 ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ (SM) ΕΣ.ΕΞ. 8 ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ (MM) ΕΣ.ΕΞ.
ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΟΝΟΜΑ: ΥΠΟΓΡΑΦΗ:		ΚΑΤΑΝΕΜΗΤΕΣ/ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ  ΟΡΤΡΟΝΙΚΣ/ ΑΜΡΗΕΝΟΛ
ΣΦΡΑΓΙΔΑ ΕΛΕΓΧΟΥ	QA2	

## 4. ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΩΝ (POWER METER)

ΕΤΑΙΡΙΑ: Δ.Ε.Η							
ΚΤΗΡΙΟ:							
ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ:			Δ/ΝΣΗ: ΚΟΖΑΝΗ		ΗΜ/ΝΙΑ: 13-19/03/2003		ΕΛΕΓΧΟΣ: QA2
			ΥΠΟΓΡΑΦΗ				
Θέση	No Καλωδίου	No Οπτ.Ινας	Κατανομητής	Σύνδεση σε	Μέσω:	Test 670nm	1300nm (dB)
	1	1	FP05-CR /1	FP01-ΙΣΟΓΕΙΟ/1	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,09
		2	2	2	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,08
		3	3	3	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,09
		4	4	4	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,11
		5	5	5	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,11
		6	6	6	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,18
		7	7	7	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,15
		8	8	8	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,25
	2	1	FP05-CR/9	FP01-10ς ΟΡΟΦΟΣ/1	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,08
		2	10	2	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,21
		3	11	3	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,19
		4	12	4	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,18
		5	13	5	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,21
		6	14	6	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,22
		7	15	7	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,21
		8	16	8	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,24
	3	1	FP04-CR /1	FP01-20ς ΟΡΟΦΟΣ/1	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,31
		2	2	2	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,34
		3	3	3	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,36
		4	4	4	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,33
		5	5	5	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,33
		6	6	6	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,29
		7	7	7	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,33
		8	8	8	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,31

	<b>4</b>	1	FP04-CR/9	FP01-30ς ΟΡΟΦΟΣ/1	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,31
		2	10	2	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,29
		3	11	3	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,28
		4	12	4	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,33
		5	13	5	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,31
		6	14	6	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,29
		7	15	7	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,28
		8	16	8	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,39
	<b>5</b>	1	FP03-CR /1	FP01-ΧΗΜΕΙΟ/1	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,16
		2	2	2	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,19
		3	3	3	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,15
		4	4	4	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,25
		5	5	5	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,16
		6	6	6	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,34
		7	7	7	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,34
		8	8	8	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,29
	<b>6</b>	1	FP01-CR/1	FP01-CONTROL 5 /1	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,85
		2	2	2	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,67
		3	3	3	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,77
		4	4	4	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,91
		5	5	5	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,95
		6	6	6	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	1,09
		7	7	7	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,66
		8	8	8	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,78
	<b>7</b>	1	FP01-CR /9	FP01-CONTROL 3,4/1	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,51
		2	10	2	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,78
		3	11	3	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,22
		4	12	4	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,53
		5	13	5	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,28
		6	14	6	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,29
		7	15	7	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,42
		8	16	8	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,54

	8	1	FP02-CR/1	FP01-CONTROL 1,2/1	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,75
		2	2	2	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,47
		3	3	3	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,84
		4	4	4	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,14
		5	5	5	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,23
		6	6	6	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,39
		7	7	7	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,61
		8	8	8	Συγκόλληση Pigtail ST	OK	0,45

## **5. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ OTDR**

Cable 01 (104m) C01019AO.SOR – C01089AO.SOR  
Cable 02 (095m) C02019AO.SOR – C02089AO.SOR  
Cable 03 (090m) C03019AO.SOR – C03089AO.SOR  
Cable 04 (085m) C04019AO.SOR – C04089AO.SOR  
Cable 05 (041m) C05019AO.SOR – C05089AO.SOR  
Cable 06 (415m) C06015AO.SOR – C06085AO.SOR  
Cable 07 (360m) C07015AO.SOR – C07085AO.SOR  
Cable 08 (213m) C07015AO.SOR – C08085AO.SOR

## Cable 01 (104m) C01019AO.SOR – C01089AO.SOR

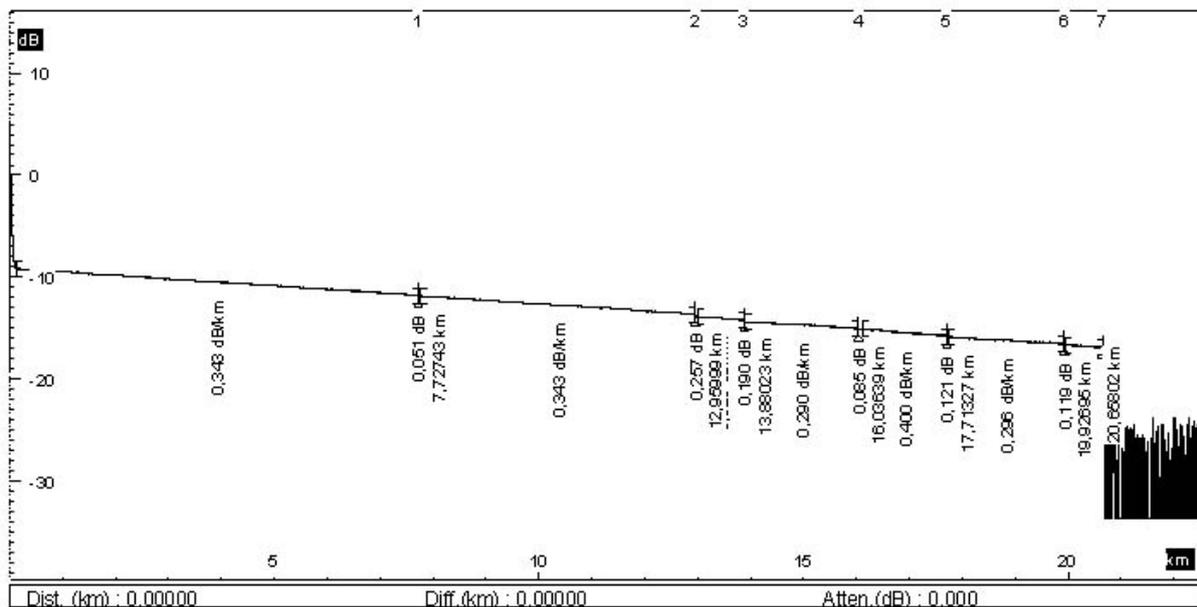
MTS 5100



17/02/2003 4:24:21.61

WinTrace v4.20 © WFG

File :	hm1233fo.sor	Device :	MTS 5100 Num. 3213	Backscatter coeff. :	-79,00 dB
Date :	1/8/2003 11:23:44 δi	Module :	5026SR Num. 3738	Loss thresholds :	0,05 dB
Title :	MTS 5100	Lambda (nm):	1320	Slope thresholds :	0,000 dB/km
Technic. :	N.K	Index :	1,466000	Reflectance threshold:	60,00 dB
Cable :	HM1	Pulse (ns) :	100		
Fiber :	23	Range (km) :	40,899		
Origin :	METAM-SUBR1	Acq. time :	01min		
Extremity :	HUB/AMPEL-SUBR1	Resolution :	1,25 m		
Way :	O-->E				
Comment :	CABLE HM1(1310NM)				



Event (°)	Distance (km)	Attenuation (dB)	Reflectance (dB)	Slope (dB/km)	Rel. Dist. (km)	Link Budget (dB)	Uncertainty
1	7,72743	0,051		0,343	7,72743	2,651	
2	12,95999	0,257		0,343	5,23256	4,493	
3	13,88023	0,190		0,329	0,92024	5,062	
4	16,03639	0,085		0,290	2,15616	5,866	
5	17,71327	0,121		0,400	1,67687	6,624	
6	19,92695	0,119		0,296	2,21368	7,398	
7	20,66802			0,297	0,73108	7,738	



## Cable 02 (095m) C02019AO.SOR – C02089AO.SOR

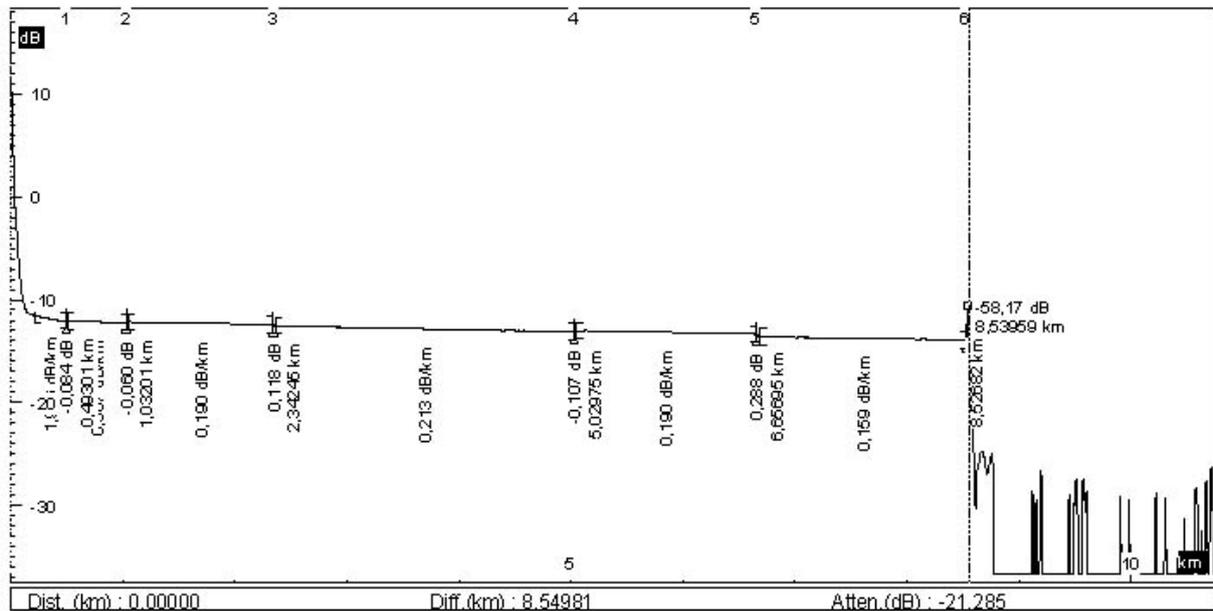
MTS 5100



170200342733 A1

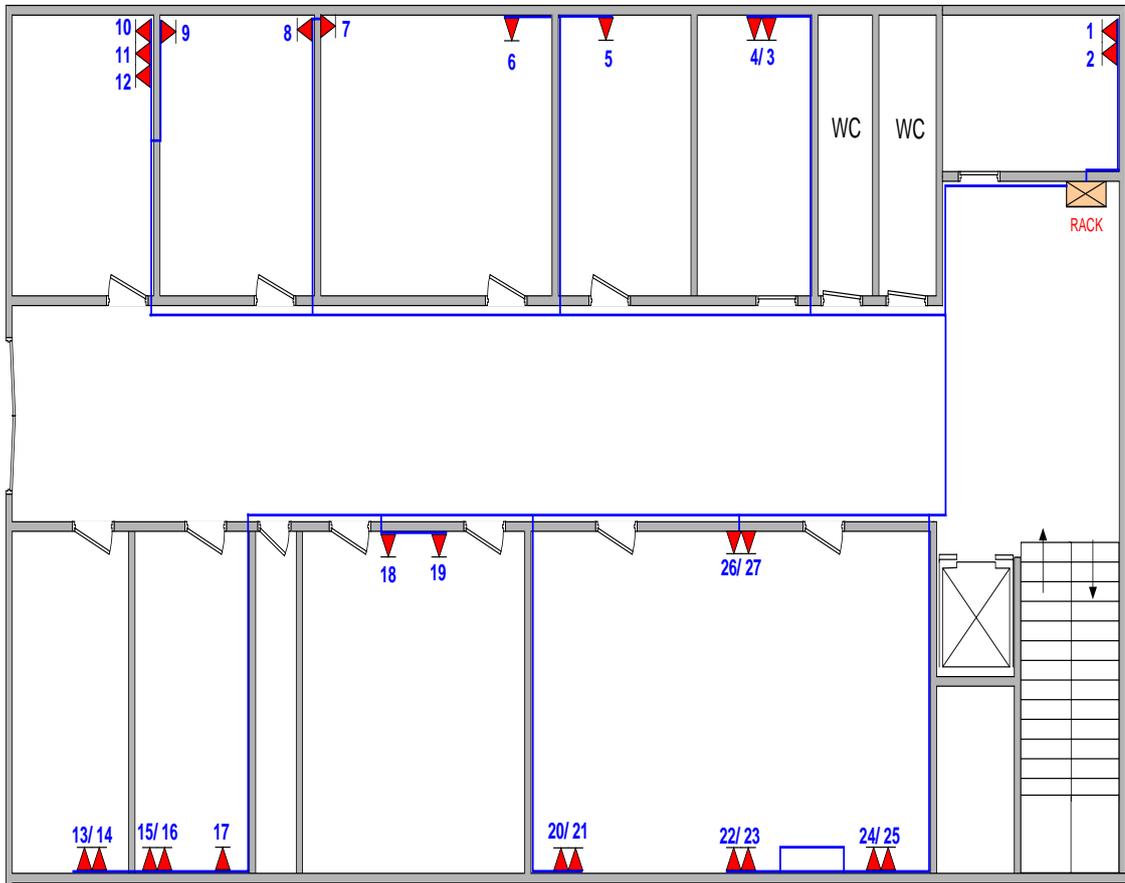
WinTrace v1.20 © WMG

File :	pk1095fo.sor	Device :	MTS 5100 Num. 3213
Date :	1/10/2003 7:03:18 ii	Module :	5026SR Num. 3738
Title :	MTS 5100	Lambda (nm)	1551
Technic. :	N.K	Index :	1,467000
Cable :	PK1	Pulse (ns) :	100
Fiber :	9	Range (km) :	20,436
Origin :	PALLINI-SUBR1	Acq. time :	01min
Extremity :	KIFISSIAS-SUBR3	Resolution :	2,50 m
Way :	O->E		
Comment :	CABLE PK1(1510)		



Beit ①	Distance (km)	Attenuation (dB)	Reflectance (dB)	Slope (dB/km)	Rel. Dist. (km)	Link Budget (dB)	Uncertainty
1	0,49301	-0,084		1,926	0,49301	0,950	
2	1,03201	-0,060		0,387	0,53899	1,078	
3	2,34245	0,118		0,190	1,31044	1,259	
4	5,02975	-0,107		0,213	2,68730	1,954	
5	6,65695	0,288		0,190	1,62720	2,156	
6	8,52682		-58,17	0,159	1,86987	2,737	

## 6. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΡΙΖΩΝ(UTPCAT5e)



---

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

---

1. *[www.osa-opn.org/survey.cfm](http://www.osa-opn.org/survey.cfm)*
2. *[www.Alcatel.com](http://www.Alcatel.com)*
3. *[www.optronics.gr](http://www.optronics.gr)*
4. *[www.itu.int](http://www.itu.int)*

