



ΟΠΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ

ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ: Κοκελίδου Λεμονιά

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Λάμπρου Κων/νος

Άρτα, 27 Σεπτεμβρίου 2006

**Πτυχιακή εργασία μέρος των απαιτήσεων του Τμήματος Τηλεπληροφορικής και
Διοίκησης**

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- 1.1 Σύντομη αναδρομή της συμβολής των σημαντικότερων ερευνητών στην εξέλιξη των οπτικών ενισχυτών
- 1.2 Προέλευση της οπτικής ενίσχυσης
- 1.3 Η πορεία προς τους ενισχυτές ιών
- 1.4 Ζώνες ανταγωνισμού και άντλησης
- 1.5 Η έκπληξη των 1480nm
- 1.6 Πειράματα μετάδοσης
- 1.7 Ιστορική άποψη
- 1.8 Ανάγκη για επικοινωνίες οπτικών ιών
- 1.9 Πέντε γενιές οπτικών συστημάτων

2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ

- 2.1 Φάσμα απολαβής και εύρος ζώνης
- 2.2 Κόρος Απολαβής
- 2.3 Θόρυβος Ενισχυτή
- 2.4 Ενδοκαναλική διαφωνία
- 2.5 Ευαισθησία πόλωσης

3. ΤΥΠΟΙ ΟΠΤΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ

- 3.1 Ενισχυτές διόδου laser (SOA)
 - 3.1.1 Τύποι των SOA
 - 3.1.2 Οι SOA σε δράση
- 3.2 Ενισχυτές οπτικών ιών Raman
 - 3.2.1 Κόρος Απολαβής
 - 3.2.2 Απόδοση Ενισχυτή
- 3.3 Ενισχυτές ιών Brillouin
 - 3.3.1 Απόδοση του ενισχυτή
- 3.4 Ενισχυτές οπτικών ιών με προσμίξεις
 - 3.4.1 Απαιτήσεις Άντλησης
 - 3.4.2 Φάσμα Απολαβής
 - 3.4.3 Χαρακτηριστικά Απολαβής
 - 3.4.4 Θόρυβος ενισχυτή
 - 3.4.5 Πολυκαναλική Ενίσχυση
 - 3.4.6 Ενίσχυση υπερβολικά στενών παλμών
 - 3.4.7 Ενισχυτές οπτικών ιών εμπλουτισμένων με Pr (προσεοδύμιο)
 - 3.4.8 Ενισχυτές καταναεμημένης απολαβής

4. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ του EDFA

- 4.1 Γιατί έρβιο;
- 4.2 Κατασκευή οπτικών ινών με προσμίξεις ερβίου
 - 4.2.1 Εναλλακτικά σχέδια
- 4.3 Συγκολλήσεις
- 4.4 Πηγές ισχύος για άντληση
- 4.5 Παθητικά στοιχεία
- 4.6 EDFA Modules
- 4.7 Άλλες εφαρμογές
- 4.8 Μελλοντικές εξελίξεις

5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ

- 5.1 Οπτικοί Προενισχυτές
- 5.2 Υποστηρικτές Ισχύος
- 5.3 Ενισχυτές Τοπικών Δικτύων (LAN)
- 5.4 Διαδοχικοί Ενισχυτές εντός γραμμής
 - 5.4.1 Θόρυβος του ενισχυτή
 - 5.4.2 Διασπορά και Μη-γραμμικότητα στις οπτικές ίνες
- 5.5 Οπτικά Συστήματα WDM
 - 5.5.1 Γιατί χρησιμοποιούνται τα WDM;
 - 5.5.2 Πως λειτουργεί το WDM;
 - 5.5.3 WDM σε DWDM
 - 5.5.4 Πλεονεκτήματα των WDM
 - 5.5.5 Επαναλήπτες
 - 5.5.6 Εφαρμογές
 - 5.5.7 Περαιτέρω εμπλουτισμός
- 5.6 Νέα γενιά ενισχυτών φθάνει στην οπτική δικτύωση
 - 5.6.1 Από SONET στα WDM
 - 5.6.2 “Η διανομή” είναι πρόβλημα
 - 5.6.3 Περισσότερη ισχύς
 - 5.6.4 Τα WDM απαιτούν ενισχυτές ελεύθερους από επιβάρυνση
 - 5.6.5 Τα WDM απαιτούν ενισχυτές διαχείρισης
 - 5.6.6 Νέα γενιά

5. ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΑΓΟΡΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ

Όλες οι προτάσεις οι οποίες παρουσιάζονται σε αυτό το κείμενο και οι οποίες ανήκουν σε άλλον αναγνωρίζονται από τα εισαγωγικά και υπάρχει η σαφής δήλωση του συγγραφέα. Τα υπόλοιπα αναγραφόμενα είναι επινόηση του γράφοντος ο οποίος φέρει και την καθολική ευθύνη για αυτό το κείμενο και δηλώνω υπεύθυνα ότι δεν υπάρχει λογοκλοπή σε αυτό το κείμενο.

Όνοματεπώνυμο:

Υπογραφή:

Ημερομηνία:

Αφιερώνω αυτήν την εργασία ...

*Στους γονείς μου
Στάθη & Νόπη ,*

*Για την μακρά σε διάρκεια
και ανεκτίμητη σε αξία ,*

στήριξή τους ...

Μέσα από αυτές τις γραμμές μου δίνεται η ευκαιρία να ευχαριστήσω όλους εκείνους τους ανθρώπους που συνέβαλαν, ο καθένας με τον τρόπο του, στην ολοκλήρωση της εργασίας. Ιδιαίτερα ,θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον καθηγητή μου κύριο Κωνσταντίνο Λάμπρου για τις καίριες επισημάνσεις και συμβουλές του, την αδερφική-φίλη Ανίτα διότι η συμβολή της υπήρξε καταλυτική, τη συμφοιτήτρια και φίλη Ντίνα που με στήριξε σε όλες τις δύσκολες στιγμές και της οφείλω ευγνωμοσύνη και τέλος τη Σπυριδούλα που μπήκε στον κόπο να αναζητήσει πηγές πληροφοριών για να με βοηθήσει.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σύντομη αναδρομή της συμβολής των σημαντικότερων ερευνητών στην εξέλιξη των οπτικών ενισχυτών

Μια αξιοπρόσεκτη διαδοχή καινοτομιών από το 1985 ως το 1990 παρήγαγε τον εμπλουτισμένο με έρβιο ενισχυτή ινών. Η οπτική ενίσχυση ήταν περισσότερο όνειρο απ'ότι πραγματικότητα το 1985: οι οπτικοί ενισχυτές ημιαγωγών και οι ενισχυτές ινών Raman ήταν δείγματα του εργαστηρίου αλλά ήταν μακριά από την πράξη. Πέντε έτη αργότερα, ο εμπλουτισμένος με έρβιο ενισχυτής ινών ήλθε από το πουθενά για να κατακτήσει τον τομέα. Η εμφάνιση των πρακτικών οπτικών ενισχυτών άνοιξε την πόρτα στην πολυπλεξία με διαίρεσης μήκος κύματος, η οποία επέκτεινε την ικανότητα των μεγάλης απόστασης fiber-optic συστημάτων.

Ο εμπλουτισμένος με έρβιο ενισχυτής ινών είναι μια δραματική περίπτωση τεχνολογικής επιτυχίας. Η τύχη διαδραμάτισε έναν σημαντικό ρόλο στην επιτυχία της. Το έρβιο είναι ο πιο γνωστός ενισχυτής ινών, και για καλή τύχη, η σειρά μήκους κύματός του ταιριάζει με το ελάχιστο του συντελεστή εξασθένησης κοντά σε 1550 nm. Ωστόσο, το πραγματικό κλειδί για την επιτυχία ήταν ένα παγκόσμιο δίκτυο υπευθύνων που στηρίχτηκαν ο ένας στα επιτεύγματα του άλλου για την ανάπτυξη μιας νέας τεχνολογίας.

1.2 Προέλευση της οπτικής ενίσχυσης

Η οπτική ενίσχυση είναι βασισμένη στην εξαναγκασμένη εκπομπή, αλλά η δυνατότητα δεν αντιμετωπίστηκε σοβαρά έως ότου πολύ αργότερα ο Albert Einstein το έθεσε ως αίτημα το 1916. Στην αδημοσίευτη διατριβή του το 1939, ο Ρώσος μηχανικός Valentin A. Fabrikant πρότεινε έναν οπτικό ενισχυτή – αν και δεν έφθασε ποτέ για να τον καταδείξει. Το σοβαρό ενδιαφέρον ήρθε μόνο αφότου ο Charles Townes χρησιμοποίησε την εξαναγκασμένη εκπομπή για να παράγει την ταλάντωση μικροκυμάτων στο μείζερ το 1954. Ο Townes και ο Arthur Schawlow (και χωριστά ο Gordon Gould) πρότειναν τη δράση λέιζερ μερικά έτη αργότερα, και ο Theodore Maiman έφτιαξε το πρώτο laser το 1960. Ο Gould άντλησε τη λέξη "laser" από το "light amplification by the stimulated emission of radiation" ("ελαφριά ενίσχυση από την διεγερμένη εκπομπή της ακτινοβολίας"), αλλά η έμφαση στην ταλάντωση παρέμεινε. Ο Schawlow, σύμφωνα με τις υπάρχουσες πληροφορίες, αστειεύτηκε ότι κανένας δεν θέλησε να αναφέρει την ταλάντωση επειδή θα μετέτρεπε το laser σε LOSER.

Οι πρώτοι υπεύθυνοι για την ανάπτυξη laser θεώρησαν την ενίσχυση ως βήμα στην οικοδόμηση ενός laser. Ο Elias Snitzer, τότε στην αμερικανική οπτική εταιρία, περιέγραψε έναν ενισχυτή ινών από νεοδύμιο-γυαλιού το 1964. Είχε κάνει νωρίτερα ένα laser Nd-γυαλιού σε μια ράβδο, και θα κατεδείκνυε αργότερα έναν σε ίνα..

Χωρίς έναν ταλαντωτή laser για να παραγάγει ένα σήμα, ένας οπτικός ενισχυτής δεν είχε τίποτα για να ενισχύει. Εκτός από μερικούς οπτικούς ενισχυτές κατασκευασμένους να εγείρουν ισχύεις ηχητικών παλμών σε πολύ υψηλά επίπεδα, δεν υπήρξε καμία ζήτηση για τους οπτικούς ενισχυτές μέχρι την εμφάνιση των fiber-optic επικοινωνιών. Η εξασθένηση των ινών σήμανε ότι τα σήματα έπρεπε να ενισχυθούν για να διασχίσουν τις μεγάλες αποστάσεις. Το κόστος και η πολυπλοκότητα της μετατροπής του σήματος σε ηλεκτρονική μορφή στους ήλεκτρο-οπτικούς επαναλήπτες δημιούργησαν την ανάγκη για τους οπτικούς ενισχυτές.

Μια προσέγγιση ήταν να αναπτυχθούν οι ενισχυτές από τα laser ημιαγωγών που χρησιμοποιήθηκαν ως πηγές φωτός. Οι ημιαγωγοί έχουν υψηλή απολαβή ενίσχυσης, έτσι η καταστολή της αντανάκλασης από τα ακροφύσια του τσιπ φάνηκε ελκυστική. Η σκέδαση Raman φάνηκε επίσης ελπιδοφόρος επειδή αν και απαιτήσε πολύ υψηλή ισχύς άντλησης, μπόρεσε να διανεμηθεί κατά μήκος ολόκληρου του μήκους μιας ίνας. Τόσο οι οπτικοί ενισχυτές ημιαγωγών όσο και η ενίσχυση Raman υπέστησαν σοβαρά τεχνικά προβλήματα, εντούτοις.

1.3 Η πορεία προς τους ενισχυτές ινών

Όταν ο David Payne του πανεπιστημίου Southampton (U.K.) άρχισε από τους ενισχυτές ινών έρβιου, έψαχνε για laser ινών ή για fiber-optic αισθητήρες. Το Southampton ήταν ενεργό στην έρευνα ινών από τη δεκαετία του '60, και ο Payne είχε κερδίσει το πρώτο διδακτορικό του προγράμματος. Η ομάδα είχε κατασκευάσει πολλές ίνες ειδικότητας, και το 1985, ο Payne λέει ότι "λογαριάσαμε ότι το επόμενο πράγμα που έπρεπε να κάνουμε ήταν να εξετάσουμε την τοποθέτηση σπανίων γαιών στις ίνες".

Άρχισαν με νεοδύμιο, το καλύτερα αναπτυγμένο στερεάς κατάστασης υλικό πρόσμιξης laser. Αν και είχαν ανησυχήσει ότι η προσθήκη αυτή θα αύξανε τις απώλειες, βρήκαν ότι τα ιόντα σπάνιας γαίας δεν προκάλεσαν καμία σημαντική αύξηση στα χαμηλά επίπεδα εμπλουτισμού που χρησιμοποιήσαν.

Το επόμενο βήμα ήταν να γίνει ένα laser ινών. Ο Snitzer είχε αντλήσει το laser του από την πλευρά με έναν λαμπτήρα λάμπης, αλλά το 1974 η Julian Stone και ο Charles Burrus στα εργαστήρια Bell είχαν αντλήσει από την άκρη ένα νεοδύμιο-εμπλουτισμένο laser ινών πολλαπλού τρόπου με ένα διοδικά laser. Η ομάδα του Payne επέλεξε την άντληση των άκρων, επειδή παρήγαγε πολύ υψηλότερες πυκνότητες άντλησης στην single-mode ίνα τους. Συγκέντρωσε την ισχύ άντλησης τόσο αποτελεσματικά ώστε το laser τους έφθασε στο κατώτατο όριο όταν αντλήθηκε με λιγότερο από ένα milliwatt από ένα laser γάλλιο-αλουμίνιο αρσενιδίου.

Σημείωσαν ότι οι εμπλουτισμένες ίνες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για έναν οπτικό ενισχυτή, αλλά δεν εξέτασαν την ιδέα με ιδιαίτερη σοβαρότητα. Επίσης, η συμβατική φρόνηση ήταν ότι τα στερεάς κατάστασης laser είχαν μικρή απολαβή για να παρέχουν ενίσχυση 30-dB που απαιτείται στα fiber-optic συστήματα. Αντ' αυτού, έπαιζαν με τα laser ινών, στα οποία η ισχύ θα μπορούσε να ενισχύσει μέσα σε μια κοιλότητα. Τα laser ινών ήταν ουσιαστικά κάποια μέτρα σε μήκος-μακράν των συμβατικών προτύπων laser. Ο Payne ανακαλεί, "φτιάχναμε laser μήκους χιλιομέτρων για να δούμε απλά τι συμβαίνει".

Τα στοιχεία σπάνιας γαίας ήταν ήδη αρκετά γνωστά ως laser στο ακατέργαστο γυαλί. Για να δει πώς θα λειτουργούσαν στις ίνες, η ομάδα Payne γενίκευσε τη διαδικασία εμπλουτισμού ώστε να μπορέσουν να προσθέσουν και άλλες σπάνιες γειώσεις στις ίνες. "Βάζουμε ακριβώς κάθε σπάνια γαία – δεν υπάρχουν και τόσα πολλά στοιχεία – μέσα στις ίνες", θυμάται. Δοκίμασαν νεοδύμιο, το θούλιο, και υτέρβιο πριν από το έρβιο και, στα τέλη του 1985, κατέδειξαν τα laser ινών από νεοδύμιο και έρβιο, σημειώνοντας ότι θα μπορούσαν να συντονίσουν το laser νεοδυμίου σε 80 nm και το laser ερβίου σε 25 nm.

Το 1530nm μήκος κύματος ερβίου φάνηκε καλό, αλλά το τριών επιπέδων σύστημα ερβίου απορροφά έντονα στη laser μετάβαση σε χαμηλές δυνάμεις άντλησης. Η ομάδα του Southampton διέγειρε το έρβιο με ένα 514.5nm laser αργό-ιόντων: η μετάβαση laser 1530nm είναι μεταξύ μιας χαμηλότερης σχεδόν ασταθούς κατάστασης και εδαφικής κατάστασης. Δεν ήταν αμέσως προφανές

ότι η υψηλή πυκνότητα άντλησης είχε αλλάξει τους κανόνες. "Μας πήρε 26 δημοσιεύσεις πάνω στα laser ινών προτού να συνειδητοποιήσουμε ότι εάν απομακρύνουμε τους καθρέφτες και εξετάζουμε την απολαβή ενισχυτή... είχαμε μια τεράστια απολαβή ενισχυτή 30 dB, που είναι ακριβώς αυτό που βρήκαμε", λέει ο Payne.

Η ομάδα του Southampton έκανε τον πρώτο ενισχυτή της στα τέλη του 1986 και εξέθεσε τα πολύ ενθαρρυντικά αποτελέσματα στη Διάσκεψη Επικοινωνιών Οπτικών Ινών τον Φεβρουάριο του 1987. Μέγιστη απολαβή ενισχυτή ήταν 26 dB σε 1536 nm σε μια ίνα τριών μέτρων, που αντλήθηκε σε 514.5 nm από ένα laser αργού. Αργότερα μεταπήδησαν στην άντληση με ένα laser αργό-αντλημένο χρωστικών ουσιών κοντά στα 670 nm, το οποίο έδωσε μέγιστη απολαβή 28 dB, με απολαβή τουλάχιστον 10 dB μεταξύ 1530 και 1555 nm.

1.4 Ζώνες ανταγωνισμού και άντλησης

Δεν υπάρχει τίποτα καλύτερο από καλά αποτελέσματα για να υποκινήσει τον ανταγωνισμό. Το laser ακατέργαστου ερβίου στα 1550 nm ήταν ευρέως γνωστό, και τα εργαστήρια Bell σκέφτονταν επίσης για τη δυνατότητα των ενισχυτών εμπλουτισμένων ινών.

Ο Emmanuel Desurvire έφθασε στο Bell το 1986 και άρχισε αμέσως να μελετά τις ίνες ερβίου. Είχε κερδίσει το διδακτορικό του στη Γαλλία για τις πρώτες μελέτες των ενισχυτών ινών Raman, και έπειτα έκανε τη μεταδιδακτορική έρευνα στο πανεπιστήμιο του Στάνφορντ. Στο Bell, έφτιαξε έναν ενισχυτή ινών ερβίου, αντλώντας με ένα συνεχούς-κύματος laser αργού στα 514.5 nm. Το Southampton τον είχε νικήσει σε ότι αφορά τον ενισχυτή, αλλά αυτός έκανε μια σειρά λεπτομερών μετρήσεων, ανέπτυξε ένα θεωρητικό πρότυπο, και έκανε την πρώτη βελτιστοποίηση του μήκους ινών.

Τα ελπιδοφόρα πρόωρα αποτελέσματα έσυραν άλλους ερευνητές στον τομέα, αλλά σημαντικά προβλήματα παρέμειναν. Η ανάγκη για μια καλύτερη πηγή άντλησης ήταν στην κορυφή του καταλόγου. Τα laser αργού ήταν καλά για το εργαστήριο, αλλά κανένας δεν θέλησε να βάλει μια συσκευή που χρειάζεται 100 kilowatts της ηλεκτρικής ενέργειας, ύδρευση δροσερού νερού, και τρυφερής προσοχής και αγάπης από PhDs σε ένα σύστημα τηλεπικοινωνιών. Ένα laser χρωστικών ουσιών ήταν πρακτικότερο, αλλά κατέδειξε τη δυνατότητα άντλησης στα 670 nm, ένα μήκος κύματος στο οποίο τα laser διόδων είχαν διατεθεί πρόσφατα.

Επιδιώκοντας μια αντιστοιχία με καλύτερες πηγές, οι επιστήμονες έψαξαν το φάσμα απορρόφησης ερβίου για τις ζώνες άντλησης. Τα ερευνητικά εργαστήρια της British Telecom βρήκαν το υψηλότερο άκρο κοντά στα 515nm γραμμή αργού, με τρία ακόμη άκρα μεταξύ 400 και 500 nm, και άλλα άκρα στα 660 nm, περίπου 810 nm, 980 nm, και 1530 nm. Αγνόησαν το άκρο 1530 nm επειδή ήταν στη μετάβαση laser. Κανένα laser διόδων δεν ήταν διαθέσιμο στην κλίμακα των 400-520 nm. Τα άκρα 670- και 980- nm ήταν τα ισχυρότερα, αλλά το πιο αδύνατο 810nm ταίριαζε με το μήκος κύματος των υψηλής ισχύος laser διόδων γάλλιου-αρσενιδίου.

Η British Telecom πρώτη άντλησε ένα laser ερβίου-ινών στα 808 nm με ένα laser χρωστικών ουσιών, κατόπιν το Southampton άντλησε ένα με ένα συνεχούς κύματος laser διόδων των 808 nm, που παράγει σε 130 microwatts. Μια αντλία υψηλής διόδου αύξησε την παραγωγή laser. Αλλά οι περαιτέρω μελέτες παρουσίασαν ένα μεγάλο πρόβλημα με άντληση στα 810nm – το ανώτερο επίπεδο laser απορροφούσε στα ίδια μήκη κύματος μειώνοντας την αποδοτικότητα. Η ομάδα του Southampton μέτρησε την διεγερμένη κατάσταση

απορρόφησης μεταξύ 450 και 1050 nm, συγκρίνοντας την με την απορρόφηση για να δώσει τις τιμές. Διαπίστωσαν ότι η διεγερμένη κατάσταση απορρόφησης ήταν τουλάχιστον τόσο μεγάλη όσο και η απορρόφηση εδάφους για την άντληση στα 810 και 488 nm. Δύο άλλες ζώνες άντλησης, 514.5 και 65 nm, είχαν σημαντική διεγερμένη κατάσταση απορρόφησης. Η μόνη ζώνη άντλησης όπου δεν είδαν καμία διεγερμένη κατάσταση απορρόφησης ήταν στα 980 nm. "Το πρόβλημα ήταν ότι δεν υπήρχε μια δίοδος διαθέσιμη που να ταλαντεύεται στα 980 nm", υπενθυμίζει ο Payne, αλλά φάνηκε αρκετά ελπιδοφόρο ώστε να τον προτρέψει να μετατοπιστεί στα 980nm άντλησης.

1.5 Η έκπληξη των 1480nm

Εν τω μεταξύ, ο Snitzer εξέπληξε τους άλλους ερευνητές με το άνοιγμα μιας νέας ζώνης άντλησης στα 1480 nm. Είχε προσχωρήσει στην μια ομάδα Polaroid που εργάζεται στην τέμνουσα άκρη των οπτικών ινών. Οι προσεκτικές μετρήσεις παρουσίασαν σημαντικές διαφορές μεταξύ της απορρόφησης του ερβίου και των ζωνών φθορισμού της. Παρ'όλο που και οι δύο όξυναν στα 1535 nm, η απορρόφηση ήταν πολύ υψηλότερη από το φθορισμό στα πιο χαμηλά μήκη κύματος. Ο Snitzer σκέφτηκε ότι θα μπορούσε να ανοίξει ένα παράθυρο για την άντληση στα μήκη κύματος πιο χαμηλά από την αιχμή εκπομπής, για να διεγερθούν τα άτομα ερβίου σε καταστάσεις ελαφρώς επάνω από το ανώτερο επίπεδο laser. Τα διεγερμένα άτομα έπεσαν γρήγορα στο ανώτερο επίπεδο laser, που απελευθερώνει λίγη θερμότητα. Σε ένα μετά τη λήξη προθεσμίας έγγραφο στο OFC το 1988, εξέθεσε καθαρή απολαβή κατά την άντληση των ενισχυτών ινών ερβίου με ένα χρώμο-εστιασμένο laser στα 1490 και 1500 nm. Τελικά, τα 1480 nm αποδείχτηκε να λειτουργούν καλύτερα.

Μετά το άκουσμα των αποτελεσμάτων του Snitzer, ο Desurvire επέστρεψε στα εργαστήρια Bell και έστρεψε τις προσπάθειές του στην άντληση στα 1480nm, χρησιμοποιώντας επίσης ένα χρώμο-εστιασμένο laser. Το επόμενο έτος κατέδειξε απολαβή 37 dB, ή ένα ρεκόρ 2.1 dB ανά milliwatt της ισχύος άντλησης. Αν και τα χρώμο-εστιασμένα laser ήταν μη πρακτικές πηγές, η παραγωγή των αντλιών δίοδου-laser φάνηκε αρκετά απλή. "Εννοιολογικά, δεν ήταν δύσκολο να επιβραδύνουμε το άνοιγμα της ζώνης του InGaAsP από τα 1.55 μm στα 1.48 μm ", λέει ο Dsurvire. Δυστυχώς, δεν μπόρεσε να προκαλέσει το ενδιαφέρον των ειδικών των δίοδων-laser στα εργαστήρια Bell για το πρόγραμμα.

Οι ερευνητές άργησαν να περάσουν στη μόδα των ενισχυτών ινών. Σαν ηγέτες στους οπτικούς ενισχυτές ημιαγωγών, είχαν τοποθετήσει λογικά τα στοιχήματά τους στους οπτικούς ενισχυτές ημιαγωγών. Όταν ο Payne και ο Desurvire έδωσαν τις συζητήσεις σε μια διάσκεψη οπτικών ενισχυτών στην Ιαπωνία, οι ιαπωνικοί μηχανικοί υπέβαλαν τις ερωτήσεις για τους ενισχυτές ινών. "Μας διέλυσαν. Δεν θέλησαν να ακούσουν ότι οι ενισχυτές ινών μπορεί ακριβώς να τους βγάλουν από τη δουλειά", ανακαλεί ο Payne.

Εν τούτοις, η ομάδα του Masataka Nakazawa στο NTT Εργαστήριο Μετάδοσης Συστημάτων είδε γρήγορα την ευκαιρία να χρησιμοποιήσει την πείρα τους πάνω στα laser δίοδου για να φτιάξει αντλίες στα 1480nm για τους ενισχυτές ινών. Είχαν ένα 40mW laser δίοδου που αντλούσε ένα laser ινών ερβίου εγκαίρως για να υποβάλουν μια τυπική εργασία στο OFC το 1989, εκθέτοντας απολαβή στα 9.5 dB στη δημοσιευμένη περίληψή τους. Τα επίπεδα ισχύος αυξάνονταν γρήγορα. Λίγο αργότερα εκείνο το έτος, είχαν φθάσει στα 46.5-dB απολαβή κατά την άντληση ενός ενισχυτή ινών ερβίου με 133 mW από πολλαπλά 1480nm laser δίοδων.

Η διαδρομή στα laser των 980nm δεν ήταν τόσο σαφής. Ταιριαστό δικτυωτό πλέγμα υποστρωμάτων δεν ήταν διαθέσιμο, έτσι απαιτήθηκαν δομές στρώσεων. Μια ομάδα από το Bellcore (τόρα τεχνολογίες Telcordia) και το Southampton χρησιμοποίησε το καλοκαίρι του 1989 ένα 978nm InGaAs/GaAlAs laser τετρωμένων στρώσεων από το ερευνητικό κέντρο του David Sarnoff για να αντλήσει έναν ενισχυτή ινών ερβίου,

Η άντληση διόδων είχε επιβλητικά πλεονεκτήματα για τους πρακτικούς ενισχυτές ινών, και η ανάπτυξη γρήγορα περιορίστηκε και επικεντρώθηκε στα συστήματα που αντλούν στα 980 και 1480 nm. Τα laser 1480nm αναπτύχθηκαν σίγουρα καλύτερα, αλλά τα laser 980nm θα έρχονταν και αυτά εγκαίρως. Μια δεκαετία περίπου αργότερα, αυτά τα δύο μήκη κύματος παραμένουν οι βασικές επιλογές σήμερα.

1.6 Πειράματα μετάδοσης

Προς το τέλος της δεκαετίας του '80, οι υπεύθυνοι για την ανάπτυξη συστημάτων το γύρισαν στις εξωτικές έννοιες δεδομένου ότι προσπαθούσαν να αυξήσουν τις αποστάσεις μετάδοσης και να αυξήσουν τα ποσοστά στοιχείων. Τα σολιτόνια και τα συστήματα επικοινωνιών έγιναν καυτά θέματα. Όπως ήταν αναμενόμενο, οι ερευνητές δοκίμασαν τους ενισχυτές ινών για τα σολιτόνια και τα συστήματα μετάδοσης, καθώς επίσης και για τα τυποποιημένα, κατά πλάτος διαμορφωμένα σήματα. Στο OFC το 1989, η ομάδα του Desunire εξέθεσε ένα κρίσιμο πείραμα που έδειχνε ότι οι ενισχυτές ινών ερβίου θα μπορούσαν να χειριστούν τα σήματα σε πολλαπλά μήκη κύματος χωρίς ανεπιθύμητη παρεμβολή μεταξύ των καναλιών. Εκείνη η επίδειξη έδειξε τον δρόμο προς έναν σύγχρονο πολυπλέκτη διαίρεσης μήκους κύματος.

Μια ματιά στις εργασίες που παρουσιάζονται το 1989 και το 1990 στο OFCs δείχνει ότι διάρκεσε αρκετά μέχρι να φθάσουν στο παραπάνω στάδιο.

Το 1989, το NTT χρησιμοποίησε ένα ζευγάρι laser άντλησης διόδου ενισχυτών ερβίου για "μη-επαναληπτική" μετάδοση στα 1.8 Gbit/s σε 212 km – αλλά αντί να τοποθετήσουν τους ενισχυτές στη μέση του ανοίγματος, τα χρησιμοποίησαν για να ωθήσουν τη ισχύ στη συσκευή αποστολής σημάτων στον πομπό και στο δέκτη. Το υψηλότερο ακατέργαστο ποσοστό στοιχείων ήταν 11 Gbit/s, που διαβιβάστηκε μέσω μιας μηδενικής μετατοπισμένης διασπορά ίνας από την Bellcore.

Με την παρεμβολή ενός ενισχυτή ινών μετά από τα πρώτα 51 km της ίνας, η Bellcore έφτασε την απόσταση μετάδοσης στα 93.7 km, αξιωνοντας ένα ρεκόρ για το προϊόν της χρονικής απόστασης ποσοστού δυαδικών ψηφίων για έναν ενιαίο ενισχυτή. Η Bellcore κατέδειξε επίσης τον πολυπλέκτη με διαίρεση μήκους κύματος 16-καναλιών, χρησιμοποιώντας τη συναφή μετάδοση χωρίς οπτικούς ενισχυτές και διαβιβάζοντας μόνο 155 Mbit/s σε κάθε κανάλι.

Μέχρι το επόμενο έτος, μερικά πειράματα άρχισαν να οδηγούν στον σύγχρονο πολλαπλασιαστή τμήματος μήκους κύματος. Μια ομάδα από τα εργαστήρια KDD R&D μετέδωσε 2.4 Gbit/s σε τέσσερα χωριστά μήκη κύματος σε περίπου 2 nm απόσταση μέσω 459 km ίνας, χρησιμοποιώντας έξι ενισχυτές ερβίου κατά μήκος της διαδρομής. Αργότερα, μια αναθεωρημένη έκδοση εκείνης της τεχνολογίας χρησιμοποιήθηκε για την πρώτη γενεά μήκους κύματος στα υποβρύχια καλώδια και τη μεγάλης απόστασης μετάδοση.

Το ενδιαφέρον ήταν έντονο. Μέσα στον Σεπτέμβριο του 1990, κάθε ένα από τα έγγραφα του 1987 για τους ενισχυτές ινών του Payne και του Desunire έλαβε 65 παραπομπές, κερδίζοντας κάποιο προφίλ στο Ίδρυμα Επιστημονικής Παρακολούθησης των Επιστημονικών Πληροφοριών. Οι εμπορικοί ενισχυτές ινών ερβίου ακολούθησαν σύντομα, μαζί με τις σταθερές βελτιώσεις στην

τεχνολογία. Σήμερα, οι ενισχυτές ινών ερβίου μεταφέρουν σήματα χιλιάδες χιλιόμετρα στα υποβρύχια καλώδια και διαβιβάζουν δωδεκάδες καναλιών σε 10 Gbit/s στα εμπορικά συστήματα εδάφους. Οι υπεύθυνοι για την ανάπτυξη άνοιξαν ένα νέο παράθυρο ινών ερβίου στα 1570 έως 1620 nm, όπου η απολαβή είναι χαμηλότερη αλλά ακόμα επαρκής για τους οπτικούς ενισχυτές. Το έρβιο παραμένει, κατά πολύ, ο καλύτερος ενισχυτής ινών.

Οι Payne και Desurvire έχουν κερδίσει μια αξιόλογη αναγνώριση για τους κρίσιμους ρόλους τους. Το ίδρυμα Franklin στη Φιλαδέλφεια απένειμε και στους δύο το 1998 το μετάλλιο Benjamin Franklin εφαρμοσμένης μηχανικής, αναδεικνύοντας τον Payne για την τοποθέτηση της προκαταρκτικής εργασίας και τον Desurvire για την ανάπτυξη του ενισχυτή ινών ερβίου σε ένα βιώσιμο προϊόν. Οι Snitzer και Nakazawa αξίζουν επίσης αναγνώρισης για τις βασικές τους συνεισφορές.

Ο ενισχυτής ινών ερβίου δεν προέκυψε πλήρως διαμορφωμένος από έναν μόνο εφευρέτη-ερευνητή. Ξανακοιτάζοντας, λέει ο Desurvire, "δεν ξέρω που και πότε ο [εμπλουτισμένος με έρβιο ενισχυτής ινών] θα μπορούσε να κληθεί εφεύρεση. Εάν υπήρξε μια εφεύρεση, έχει γίνει κατά την περίοδο του 1987-1989 με όλη αυτή την εργασία προς μια βέλτιστη συσκευή ". Η τεχνολογία εξελίχθηκε σε μια συλλογική έκρηξη καινοτομιών από πολλούς ανθρώπους σε διάφορες σημαντικές ομάδες σε όλο τον κόσμο. Για εκείνους που συνεισέφεραν, ήταν μια τροχιά ευφορίας.

1.7 Ιστορική άποψη

Ένα σύστημα επικοινωνίας μεταδίδει πληροφορίες από μία θέση σε μία άλλη, που απέχει απόσταση μερικών χιλιομέτρων ή χιλιάδων χιλιομέτρων.

Η πληροφορία συχνά μεταφέρεται από ένα ηλεκτρομαγνητικό φέρον κύμα, του οποίου η συχνότητα μπορεί να κυμαίνεται από μερικά MHz μέχρι αρκετές εκατοντάδες THz. Τα συστήματα οπτικών επικοινωνιών χρησιμοποιούν υψηλές συχνότητες φέροντος (~100 THz) στην περιοχή του ορατού ή του εγγύς υπέρυθρου ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Αυτά μερικές φορές ονομάζονται και συστήματα οπτικών κυμάτων για να τα διακρίνουν από τα μικροκυματικά συστήματα, στα οποία η συχνότητα του φέροντος είναι τυπικά πέντε τάξεις μεγέθους μικρότερη (~ 1 GHz).

Τα συστήματα επικοινωνίας οπτικών ινών είναι συστήματα οπτικών κυμάτων που χρησιμοποιούν οπτικές ίνες για μετάδοση της πληροφορίας. Τέτοια συστήματα έχουν αναπτυχθεί ευρύτατα από το 1980 και έχουν φέρει επανάσταση στην τεχνολογία των επικοινωνιών. Πράγματι, η τεχνολογία των οπτικών σημάτων, μαζί με την Μικροηλεκτρονική, πιστεύεται ότι είναι οι μεγαλύτεροι παράγοντες στην άφιξη της "εποχής της πληροφορίας".

Το αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι οι οπτικοί ενισχυτές χωρίς όμως να αποσκοπεί στο να εμβαθύνει στο θέμα αυτό, κάτι που θα ξέφευγε κατά πολύ από τα όρια των δυνατοτήτων μας.

Η χρησιμοποίηση του φωτός για σκοπούς επικοινωνίας χρονολογείται από την αρχαιότητα, αν ερμηνεύσουμε τις οπτικές επικοινωνίες με την ευρεία έννοια. Οι περισσότεροι πολιτισμοί χρησιμοποίησαν σήματα φωτιάς και καπνού για να μεταβιβάσουν μία πληροφορία (όπως π.χ. μία νίκη σε ένα πόλεμο). Βασικά, η ίδια ιδέα χρησιμοποιήθηκε μέχρι το τέλος του 18^{ου} αιώνα με σήματα από λάμπες, σήματα με σημαίες και άλλες συσκευές σηματοδότησης. Η ιδέα επεκτάθηκε, ακολουθώντας μία πρόταση του Claude Charpe το 1792, για να μεταδώσουν με μηχανικό τρόπο κωδικοποιημένα μηνύματα σε μεγάλες αποστάσεις (~100Km) χρησιμοποιώντας ενδιάμεσους σταθμούς αναμετάδοσης (που ενεργούσαν σαν

αναγεννητές ή επαναλήπτες). Ο ρόλος του φωτός ήταν απλώς να κάνει ορατά τα κωδικοποιημένα μηνύματα ώστε να ανιχνεύονται από τους σταθμούς αναμετάδοσης. Τέτοια οπτικά συστήματα επικοινωνιών ήταν αργά. Πράγματι, με την μοντέρνα ορολογία, ο ρυθμός μετάδοσης των bit ήταν μικρότερος από 1 bit το δευτερόλεπτο ($B < 1$ b/s).

1.8 Ανάγκη για επικοινωνίες οπτικών ινών

Με την έλευση του τηλέγραφου στη δεκαετία του 1830, το φως αντικαταστάθηκε από ηλεκτρισμό και άρχισε η εποχή των ηλεκτρικών επικοινωνιών. Ο ρυθμός μετάδοσης των bit B μπορούσε να αυξηθεί μέχρι ~ 10 b/s με τη χρήση νέων τεχνικών κωδικοποίησης όπως ο κώδικας Morse. Η χρησιμοποίηση ενδιάμεσων σταθμών αναμετάδοσης επέτρεψε επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων (~ 1000 Km). Πράγματι, το πρώτο επιτυχημένο τηλεγραφικό υπερατλαντικό καλώδιο μπήκε σε λειτουργία το 1866.

Είναι αρκετά ενδιαφέρον, ότι ο τηλέγραφος χρησιμοποίησε ουσιαστικά ένα ψηφιακό σχήμα μέσω δύο ηλεκτρικών παλμών διαφορετικής διάρκειας (τελείες και παύλες του κώδικα Morse). Η εφεύρεση του τηλεφώνου το 1876 έφερε μία μεγάλη αλλαγή, αφού ηλεκτρικά σήματα μεταδίδονταν με αναλογικό τρόπο μέσω ενός συνεχώς μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού ρεύματος. Τα συστήματα επικοινωνίας με αναλογικές τεχνικές κυριάρχησαν περίπου ένα αιώνα.

Η ανάπτυξη παγκόσμιων τηλεφωνικών δικτύων κατά τη διάρκεια του εικοστού αιώνα οδήγησε σε πολλές εφαρμογές σχεδίασης ηλεκτρικών συστημάτων επικοινωνίας. Τα ζεύγη συρμάτων αντικαταστάθηκαν από ομοαξονικά καλώδια και αυξήθηκε σημαντικά η χωρητικότητα του συστήματος. Το πρώτο σύστημα ομοαξονικών καλωδίων τοποθετήθηκε το 1940 και ήταν ένα σύστημα 3 MHz ικανό να μεταδώσει 300 κανάλια φωνής ή ένα απλό τηλεοπτικό κανάλι. Το εύρος ζώνης τέτοιων συστημάτων περιορίζεται από τις απώλειες των καλωδίων που εξαρτώνται από τη συχνότητα, οι οποίες αυξάνουν πάρα πολύ για συχνότητες πάνω από 10 MHz. Αυτός ο περιορισμός οδήγησε στην ανάπτυξη μικροκυματικών συστημάτων επικοινωνίας, στα οποία χρησιμοποιήθηκε ένα ηλεκτρομαγνητικό φέρον κύμα με συχνότητες 1 έως 10 GHz, για να μεταδώσει τα σήματα χρησιμοποιώντας κατάλληλες τεχνικές διαμόρφωσης. Το πρώτο μικροκυματικό σύστημα, που λειτουργούσε με συχνότητα φέροντος 4 GHz, τέθηκε σε εφαρμογή το 1948. Από τότε, αναπτύχθηκαν σημαντικά και τα ομοαξονικά και τα μικροκυματικά συστήματα και είναι ικανά να λειτουργήσουν με ρυθμούς bit ~ 100 Mb/s. Το πιο εξελιγμένο ομοαξονικό σύστημα τοποθετήθηκε το 1975 και λειτουργεί με ρυθμό bit 274 Mb/s. Ένα μεγάλο μειονέκτημα αυτών των ομοαξονικών συστημάτων υψηλής συχνότητας είναι η μικρή απόσταση μεταξύ επαναληπτών (~ 1 Km), η οποία καθιστά το σύστημα σχετικά ακριβό στη λειτουργία του. Τα μικροκυματικά συστήματα επικοινωνίας επιτρέπουν γενικά μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ επαναληπτών, αλλά ο ρυθμός μετάδοσης των bit περιορίζεται επίσης από τη συχνότητα του φέροντος κύματος. Ένα προσόν αξιολόγησης που συχνά χρησιμοποιείται για τηλεπικοινωνιακά συστήματα είναι το γινόμενο ρυθμού των bit επί την απόσταση, BL, όπου B είναι ο ρυθμός μετάδοσης των bit και L είναι η απόσταση του επαναλήπτη. Το Σχήμα 1.1 μας δείχνει πως έχει αυξηθεί το γινόμενο BL μέσω τεχνολογικών εξελίξεων του τελευταίου αιώνα και ειδικά το τελευταίο ήμισυ του αιώνα. Τηλεπικοινωνιακά συστήματα με $BL \sim 100$ (Mb/s)-Km διετίθεντο μέχρι το 1970 και περιορίζονταν σε τέτοιες τιμές λόγω θεμελιωδών περιορισμών.

Κατά τη διάρκεια του δεύτερου μισού του εικοστού αιώνα συνειδητοποιήθηκε ότι ήταν δυνατόν να γίνει μία αύξηση του BL κατά αρκετές τάξεις μεγέθους αν χρησιμοποιείτο σαν φέρον κύμα, το οπτικό κύμα. Όμως, ούτε σύμφωνη οπτική πηγή ούτε κατάλληλο μέσο μετάδοσης ήταν διαθέσιμο κατά τη διάρκεια του 1950. Η εφεύρεση του laser και η επίδειξη του το 1960 έλυσε το πρώτο πρόβλημα. Η προσοχή τότε εστιάσθηκε στο να βρεθούν τρόποι για τη χρησιμοποίηση του φωτός του laser για οπτικές επικοινωνίες.

Πολλές ιδέες αναπτύχθηκαν κατά τη δεκαετία του 1960, η πιο αξιοπρόσεκτη όμως είναι η ιδέα του περιορισμού του φωτός χρησιμοποιώντας μία ακολουθία φακών αερίου. Το 1966 προτάθηκε, ότι οι οπτικές ίνες θα μπορούσαν να είναι η καλύτερη επιλογή, καθώς αυτές μπορούσαν να κυματοδηγήσουν το φως με ένα τρόπο παρόμοιο με εκείνο της κυματοδηγησης των ηλεκτρονίων σε χάλκινα σύρματα.

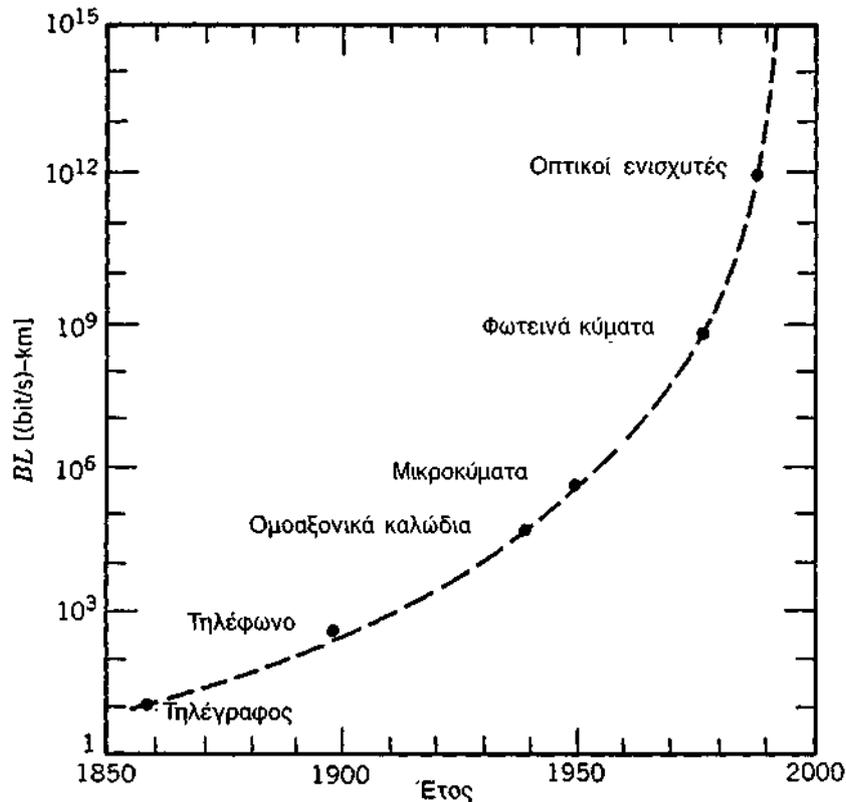
Το κύριο πρόβλημα ήταν οι μεγάλες απώλειες των οπτικών ινών. Ίνες που χρησιμοποιούνταν κατά τη δεκαετία του 1960 είχαν απώλειες πάνω από 1000db/Km. Μία ξαφνική ανακάλυψη έγινε το 1970, όταν οι απώλειες οπτικής ίνας μπορούσαν να μειωθούν περίπου σε 20db/Km σε μήκη κύματος κοντά στην περιοχή του 1μm. Τον ίδιο χρόνο περίπου, επιδείχθηκαν lasers ημιαγωγού GaAs, που λειτουργούσαν συνέχεια σε θερμοκρασία δωματίου. Η ταυτόχρονη ύπαρξη μιας συμπαγούς οπτικής πηγής και μιας οπτικής ίνας χαμηλών απωλειών οδήγησαν σε παγκόσμια προσπάθεια για την ανάπτυξη συστημάτων επικοινωνίας με οπτικές ίνες.

Το Σχήμα 1.2 δείχνει την πρόοδο στη λειτουργικότητα των οπτικών συστημάτων επικοινωνίας που πραγματοποιήθηκε μετά το 1974 μέσω αρκετών γενεών ανάπτυξης. Η πρόοδος είναι πράγματι ραγδαία, όπως είναι προφανές από την αύξηση πολλών τάξεων μεγέθους στο γινόμενο ρυθμού bit-απόστασης σε μία περίοδο μικρότερη από 25 χρόνια.

1.9 Πέντε γενιές οπτικών συστημάτων

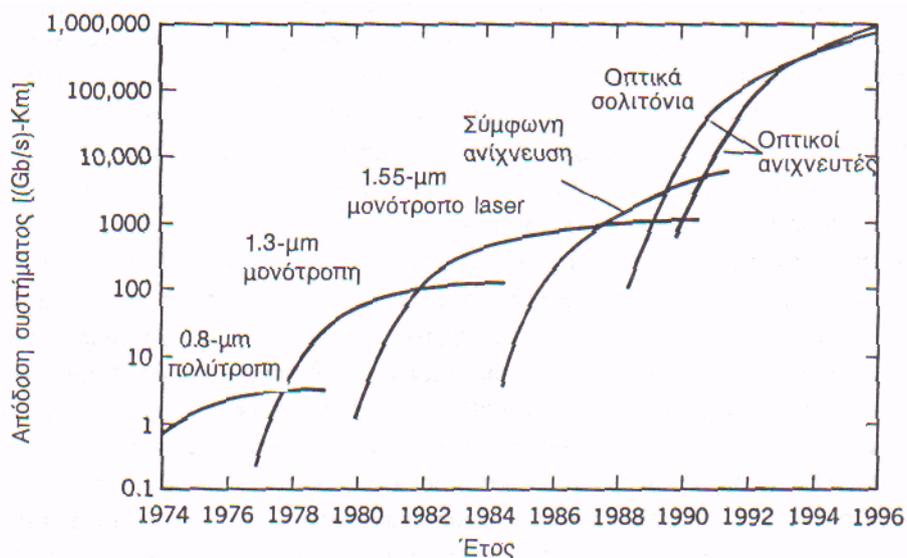
Η εμπορική ανάπτυξη των οπτικών συστημάτων επικοινωνίας ακολούθησε η έρευνα. Μετά από πολλές δοκιμές, η πρώτη-γενιά οπτικών συστημάτων που λειτουργούσε κοντά στα 0.8μm έγινε εμπορικά διαθέσιμη το 1980. Τα συστήματα αυτά λειτούργησαν σε ρυθμό bit 45 Mb/s και επέτρεψαν απόσταση μεταξύ επαναληπτών γύρω 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.



Σχήμα 1.1: Αύξηση του γινομένου ταχύτητας μετάδοσης bit επί απόσταση μεταξύ επαναληπτών κατά τη διάρκεια της περιόδου 1850-2000. Η εμφάνιση μιας νέας τεχνολογίας σημειώνεται με ένα μαύρο κύκλο.

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 1.3μm, 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 1.3μm. Η δεύτερη γενιά συστημάτων επικοινωνίας με οπτικές ίνες εμφανίσθηκε πριν το 1980, αλλά ο ρυθμός μετάδοσης των συστημάτων αυτών περιορίσθηκε κάτω από 100Mb/s λόγω διασποράς σε πολύτροπες οπτικές ίνες. Αυτός ο περιορισμός ξεπεράσθηκε 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 1.3μm, 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 περιορίσθηκε από τις απώλειες της οπτικής ίνας σε λειτουργία στα 1.3μm (τυπικά 0.5 db/Km). Οι απώλειες στις γυάλινες οπτικές ίνες είναι ελάχιστες κοντά στα 1.55μm. 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



Σχήμα 1.2: Εξέλιξη στην τεχνολογία ίων επικοινωνιών με φως την περίοδο 1974-1996. Οι διάφορες καμπύλες δείχνουν αύξηση στο γινόμενο ρυθμού των bits επί απόσταση, BL, για πέντε γενιές συστημάτων επικοινωνίας με οπτικές ίνες.

1.55μm καθυστέρησε σημαντικά, από μεγάλες διασπορές της ίνας κοντά στα 1.55μm.

Συμβατικά lasers ημιαγωγού InGaAsP δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν εξαιτίας του απλώματος του παλμού που συνέβαινε, σαν αποτέλεσμα ταυτόχρονης ταλάντωσης πολλών διαμηκών τρόπων μετάδοσης. Το πρόβλημα της διασποράς μπορούσε να ξεπερασθεί 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 bit μέχρι 4Gb/s σε αποστάσεις που υπερβαίνουν τα 100 Km. Η τρίτη-γενιά συστημάτων στα 1.55 μm, που λειτουργούσε στα 2.5 Gb/s, εμφανίστηκε στο εμπόριο το 1990. Τέτοια συστήματα είναι ικανά να λειτουργούν σε ρυθμούς bit μέχρι 10 Gb/s. Η καλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας οπτικές ίνες με ολίσθηση στη διασπορά μαζί με laser διαμήκους τρόπου μετάδοσης.

Ένα μειονέκτημα των συστημάτων τρίτης γενιάς στα 1.55 μm 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 ομόδυνα ή ετερόδυνα τεχνική φάρασης, 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 ιών 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 bit. Σε τέτοια

συστήματα, οι απώλειες οπτικών ινών αντισταθμίζονται περιοδικά με τη χρήση ενισχυτών οπτικών ινών με εμπλουτισμό με έρβιο, οι οποίοι τοποθετούνται σε αποστάσεις 60-100 Km. Τέτοιοι ενισχυτές αναπτύχθηκαν κατά τη δεκαετία του 1980 και διατέθηκαν στο εμπόριο το 1990. 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 ανακυκλωμένου 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 διηπειρωτικές επικοινωνίες. Το 1996, όχι μόνο μετάδοση πάνω από 11.300 Km με ρυθμό 5Gb/s είχε γίνει με τη χρήση υποθαλάσσιων καλωδίων, αλλά λειτούργησε και ένα εμπορικό υπερωκεάνιο καλώδιο (TPC-5).

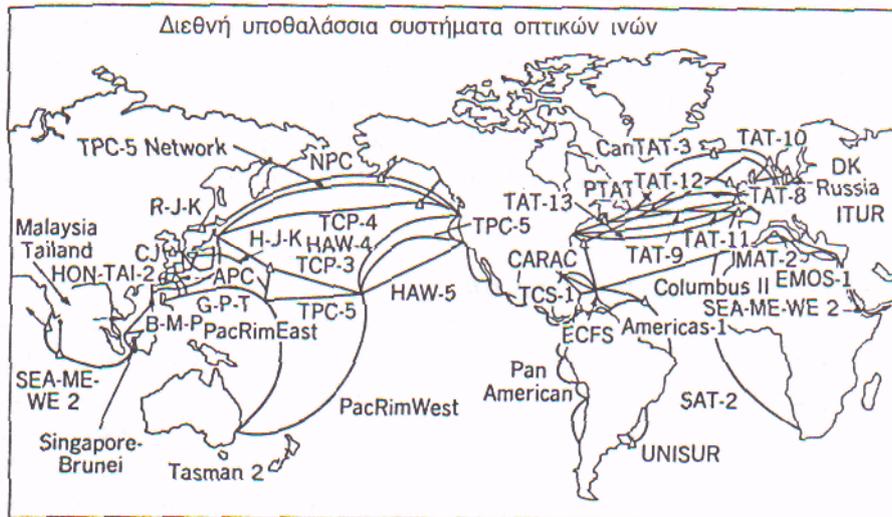
Το Σχήμα 1.3 δείχνει ένα διεθνές δίκτυο υποθαλάσσιων οπτικών συστημάτων που λειτούργησε το 1996. Έχουν σχεδιασθεί πολλά άλλα υπερωκεάνια οπτικά συστήματα. Η ζεύξη των 27.300 Km οπτικών ινών ανά τον κόσμο (γνωστή σαν FLAG) άρχισε να λειτουργεί το 1997, συνδέοντας χώρες της Ασίας και της Ευρώπης σε 5Gb/s,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

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 στα 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 ήταν 910 (Tb/s)-Km. Σε μία άλλη πειραματική καταχώρηση, επιτεύχθηκε συνολικός ρυθμός bit 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 διέσχισε 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.

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.



Σχήμα 1.3: Διεθνές υποθαλάσσιο δίκτυο συστημάτων επικοινωνιών με οπτικές ίνες όπως διαμορφώνεται κατά ίο τέλος του 1996. (©1995 AT&T. Ανατυπώθηκε κατόπιν αδείας).

Παρόλο που η βασική ιδέα προτάθηκε αρκετά νωρίς, το 1973, μόνο το 1988 ένα εργαστηριακό πείραμα απέδειξε τη δυνατότητα μετάδοσης 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, σολιτόνια 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 70Gb/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. Αυτό είναι επίσης προφανές από την έκδοση μεγάλου αριθμού βιβλίων σε οπτικές επικοινωνίες από το 1991.

2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ

Οι οπτικοί ενισχυτές ενισχύουν το προσπίπτον φως μέσω της εξαναγκασμένης εκπομπής, ο ίδιος μηχανισμός που χρησιμοποιήθηκε από τα laser. Πράγματι, ένας οπτικός ενισχυτής δεν είναι τίποτε άλλο παρά ένα laser χωρίς ανάδραση. Το κύριο συστατικό του είναι η *οπτική απολαβή* που πραγματοποιείται όταν ο ενισχυτής υφίσταται άντληση (οπτικά ή ηλεκτρικά) για να επιτύχει αντιστροφή του πληθυσμού.

Η οπτική απολαβή, γενικά, εξαρτάται όχι μόνο από τη συχνότητα (ή το μήκος κύματος) του προσπίπτοντος φωτός, αλλά και από την ένταση της τοπικής δέσμης σε οποιοδήποτε σημείο στο εσωτερικό του ενισχυτή. Λεπτομέρειες της εξάρτησης από την συχνότητα και την ένταση της οπτικής απολαβής εξαρτώνται από το μέσο του ενισχυτή. Για να δείξουμε τις γενικές έννοιες, ας πάρουμε την περίπτωση στην οποία το μέσο της απολαβής μοντελοποιείται σαν ένα ομοιογενώς διευρυμένο σύστημα δύο-σταθμών. Ο *συντελεστής απολαβής* ενός τέτοιου μέσου μπορεί να γραφεί ως εξής

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1 + (\omega - \omega_0)^2 T_2^2 + P/P_s} \quad (2.1)$$

όπου g_0 είναι η μέγιστη τιμή της απολαβής, ω είναι η οπτική συχνότητα του προσπίπτοντος σήματος, ω_0 είναι η ατομική συχνότητα μετάβασης και P είναι η οπτική ισχύς του σήματος που ενισχύεται. Η ισχύς κόρου P_s εξαρτάται από τις παραμέτρους του μέσου απολαβής, όπως ο χρόνος φθορισμού T_1 και η ενεργός διατομή της μετάβασης. Η έκφραση της για διάφορα είδη ενισχυτών δίνεται στις παρακάτω ενότητες. Η παράμετρος T_2 στην Εξίσωση (2.1), γνωστή σαν *χρόνος διπολικής χαλάρωσης*, είναι τυπικά αρκετά μικρή (<1ps). Ο χρόνος φθορισμού T_1 , ονομάζεται επίσης και *χρόνος πληθυσμιακής χαλάρωσης*, μεταβάλλεται μεταξύ 100ps και 10ms, ανάλογα με το μέσο απολαβής. Η Εξίσωση (2.1) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να σχολιάσουμε σημαντικά χαρακτηριστικά των οπτικών ενισχυτών, όπως το εύρος ζώνης της απολαβής, τον συντελεστή ενίσχυσης και την ισχύ κόρου της εξόδου.

2.1 Φάσμα απολαβής και εύρος ζώνης

Ας πάρουμε το μη κορεσμένο σύστημα στο οποίο $P/P_s \ll 1$ σ'ολόκληρο τον ενισχυτή. Αγνοώντας τον όρο P/P_s στην Εξίσωση (2.1), ο συντελεστής απολαβής γίνεται

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1 + (\omega - \omega_0)^2 T_2^2}$$

Η εξίσωση αυτή δείχνει πως η απολαβή είναι μέγιστη όταν η προσπίπτουσα συχνότητα ω συμπίπτει με την ατομική συχνότητα μετάβασης ω_0 . Η μείωση της απολαβής για $\omega \neq \omega_0$ διέπεται από την κατανομή Lorentz που αποτελεί χαρακτηριστικό των ομοιογενώς διευρυμένων συστημάτων με δύο στάθμες. Όπως σχολιάζεται παρακάτω, το φάσμα της απολαβής των πραγματικών ενισχυτών μπορεί να αποκλίνει αρκετά από την κατανομή Lorentz. Το εύρος ζώνης της απολαβής ορίζεται σαν το πλήρες εύρος του ημιμεγίστου (FWHM) του φάσματος απολαβής $g(\omega)$. Για το φάσμα Lorentz, το εύρος ζώνης της απολαβής δίνεται από τον τύπο $\Delta\omega_g = 2/T_2$, ή από τη σχέση:

$$\Delta\nu_g = \frac{\Delta\omega_g}{2\pi} = \frac{1}{\pi T_2}$$

(2.1.2)

Για παράδειγμα είναι, $\Delta\nu_g \sim 3\text{THz}$ για τους ενισχυτές laser ημιαγωγών για το οποίο $T_2 \sim 0.1\text{ps}$. Οι ενισχυτές με σχετικά μεγάλο εύρος ζώνης προτιμώνται για τα οπτικά συστήματα επικοινωνίας, αφού η απολαβή είναι σχεδόν σταθερή σ' όλο το εύρος ζώνης ακόμη κι ενός πολυκαναλικού σήματος.

Η έννοια του εύρους ζώνης του ενισχυτή χρησιμοποιείται συχνά αντί του εύρους ζώνης απολαβής. Η διαφορά είναι φανερή όταν θεωρήσουμε την απολαβή του ενισχυτή G , γνωστή και σαν συντελεστή ενίσχυσης ορίζεται ως εξής

$$G = P_{out} / P_{in} \quad (2.1.3)$$

όπου P_{in} και P_{out} είναι η ισχύς εισόδου και εξόδου του σήματος CW που ενισχύεται. Μπορούμε να πάρουμε μία έκφραση της G χρησιμοποιώντας

$$\frac{dP}{dz} = gP \quad (2.1.4)$$

όπου $P(z)$ είναι η οπτική ισχύς σε απόσταση z από το άκρο εισόδου. Μία κατευθείαν ολοκλήρωση με την αρχική συνθήκη $P(0) = P_{in}$ δείχνει ότι η ισχύς του σήματος αυξάνεται εκθετικά ως εξής

$$P(z) = P_{in} \exp(gz) \quad (2.1.5)$$

Σημειώνοντας ότι $P(L) = P_{out}$ και χρησιμοποιώντας της Εξίσωση (2.1.3), ο συντελεστής ενίσχυσης για έναν ενισχυτή μήκους L δίνεται από την

$$G(\omega) = \exp[g(\omega)L] \quad (2.1.6)$$

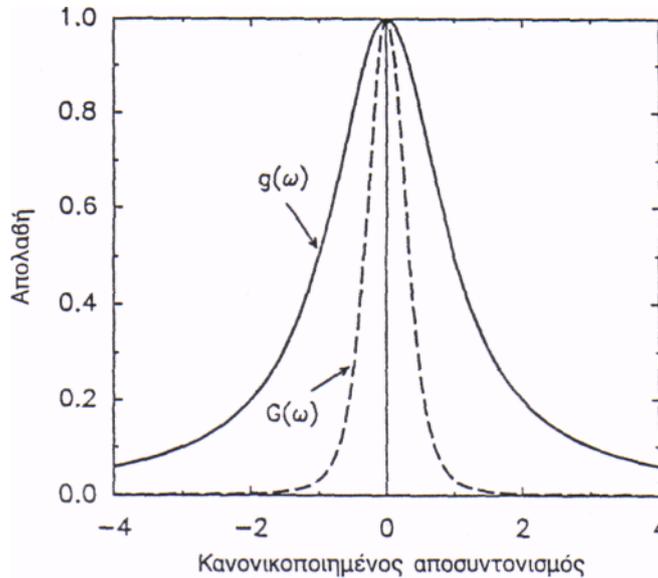
όπου φαίνεται ξεκάθαρα η εξάρτηση από τη συχνότητα της G και της g . Και η απολαβή ενισχυτή $G(\omega)$ και ο συντελεστής απολαβής $g(\omega)$ είναι μέγιστα όταν $\omega = \omega_0$ και μειώνεται με τον αποσυντονισμό του σήματος $\omega - \omega_0$. Ωστόσο, η $G(\omega)$ μειώνεται πολύ γρηγορότερα από την $g(\omega)$. Το εύρος ζώνης του ενισχυτή $\Delta\nu_A$ ορίζεται σαν το FWHM της $G(\omega)$ και σχετίζεται με το εύρος ζώνης απολαβής $\Delta\nu_g$ ως εξής

$$\Delta\nu_A = \Delta\nu_g \left(\frac{\ln(2)}{\ln(G_0/2)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.1.7)$$

όπου $G_0 = \exp(g_0L)$. Το Σχήμα 2.1 παρουσιάζει το προφίλ της απολαβής $g(\omega)$ και τον συντελεστή ενίσχυσης $G(\omega)$ σχεδιάζοντας την g/g_0 και την G/G_0 σαν συνάρτηση της $(\omega - \omega_0)T_2$. Το εύρος ζώνης του ενισχυτή είναι μικρότερο από το εύρος ζώνης της απολαβής και η διαφορά εξαρτάται από την ίδια την απολαβή του ενισχυτή.

2.2 Κόρος Απολαβής

Η προέλευση του κόρου της απολαβής βρίσκεται στην εξάρτηση της $g(\omega)$ από την ισχύ στην Εξίσωση (2.1). Αφού η απολαβή g μειώνεται όταν η P γίνεται συγκρίσιμη με την P_s , ο συντελεστής ενίσχυσης G μειώνεται με κάθε αύξηση της ισχύος του σήματος. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *κόρος της απολαβής*. Ας πάρουμε την περίπτωση όπου η συχνότητα του προσπίπτοντος σήματος συντονίζεται ακριβώς στη μέγιστη απολαβή ($\omega = \omega_0$).



Σχήμα 2.1 Το προφίλ της απολαβής Lorentz $g(\omega)$ και το αντίστοιχο φάσμα της απολαβής του ενισχυτή $G(\omega)$ για ένα μέσο απολαβής δύο επιπέδων.

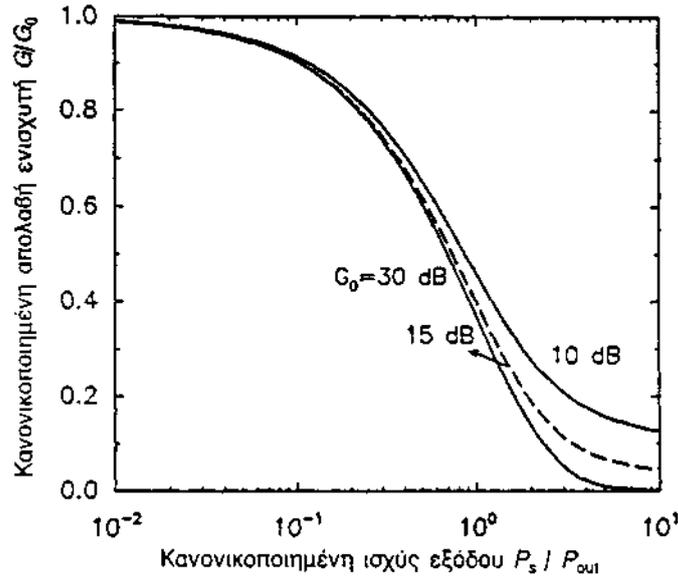
Οι αποσυντονιστικές επιδράσεις μπορούν να ενσωματωθούν με τρόπο άμεσο. Αντικαθιστώντας την g από την Εξίσωση (2.1) στην Εξίσωση (2.1.5), παίρνουμε

$$\frac{dP}{dz} = \frac{g_o P}{1 + P/P_s} \quad (2.2.1)$$

Η εξίσωση αυτή μπορεί εύκολα να ολοκληρωθεί στο μήκος του ενισχυτή. Χρησιμοποιώντας την αρχική συνθήκη $P(0)=P_{in}$ μαζί με την $P(L)=P_{out}=GP_{in}$, παίρνουμε την παρακάτω σχέση για την απολαβή του ενισχυτή μεγάλου σήματος:

$$G = G_o \exp\left(-\frac{G-1}{G} \frac{P_{out}}{P_s}\right) \quad (2.2.2)$$

Η Εξίσωση (2.2.2) δείχνει ότι ο παράγοντας ενίσχυσης G μειώνεται από τη μη κορεσμένη τιμή της G_o όταν η P_{out} γίνεται συγκρίσιμη με την P_s . Το Σχήμα 2.2 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά του κόρου σχεδιάζοντας την G σαν συνάρτηση της P_{out}/P_s για διάφορες τιμές της G_o . Μία ποσότητα που παρουσιάζει πρακτικό ενδιαφέρον είναι η ισχύς κόρου της εξόδου P^s_{out} , ορίζεται σαν η ισχύς εξόδου στην οποία η απολαβή του ενισχυτή G μειώνεται κατά 3dB από την ακόρεστη τιμή G_o . Χρησιμοποιώντας την $G = G_o/2$ στην Εξίσωση (2.2.2), η P^s_{out} είναι μικρότερη από την P_s κατά περίπου 30%. Πράγματι, σημειώνοντας ότι $G_o \gg 2$ στην πράξη ($G_o=1000$ για απολαβή ενισχυτή 30dB), $P^s_{out} \approx (\ln 2)P_s \approx 0.69P_s$. Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 2.2, η P^s_{out} γίνεται σχεδόν ανεξάρτητη από την G_o για $G_o > 20$ dB.



Σχήμα 2.2 Η κορεσμένη απολαβή ενισχυτή G σαν συνάρτηση της ισχύος εξόδου (κανονικοποιημένη προς την ισχύ κόρου) για διάφορες τιμές της μη κορεσμένης απολαβής του ενισχυτή G_0 .

$$P_{out}^g = \frac{G_0 \ln(2)}{G_0 - 2} P_s$$

(2.2.3)

2.3 Θόρυβος Ενισχυτή

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

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

(2.3.1)

όπου ο SNR αναφέρεται στην ηλεκτρική ισχύ που υποβαθμίζεται όταν το οπτικό σήμα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό ρεύμα. Γενικά, η F_n εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους του ανιχνευτή που διέπουν τον θερμικό θόρυβο, που σχετίζεται με τον ανιχνευτή. Μπορούμε να πάρουμε μία απλή έκφραση της F_n αν θεωρήσουμε έναν ιδανικό ανιχνευτή του οποίου η απόδοση περιορίζεται μόνον από τον θόρυβο βολής.

Ας πάρουμε έναν ενισχυτή με απολαβή G , έτσι ώστε οι ισχύς εισόδου και εξόδου να σχετίζονται με τον τύπο $P_{out} = GP_{in}$. Ο SNR του σήματος εισόδου δίνεται από τη σχέση:

$$(SNR)_{in} = \frac{(I)^2}{\sigma_s^2} = \frac{(RP_{in})^2}{2q(RP_{in})\Delta f} = \frac{P_{in}}{2h\nu\Delta f} \quad (2.3.2)$$

όπου $\langle I \rangle = RP_{in}$ είναι το μέσο φωτόρρευμα, $R=q/h\nu$ είναι η αποκρισσιμότητα ενός ιδανικού φωτοανιχνευτή με κβαντική απόδοση ίση με τη μονάδα και το

$$\sigma_s^2 = 2q(RP_{in})\Delta f \quad (2.3.3)$$

το παίρνουμε από την εξίσωση $\sigma_s^2 = 2q(I_p + Id)\Delta f$ για τον θόρυβο βολής, θέτοντας το ρεύμα σκότους ίσο με $Id=0$. Εδώ, η Δf είναι το εύρος ζώνης του ανιχνευτή. Για να εκτιμήσουμε τον SNR του ενισχυμένου σήματος, θα πρέπει να προσθέσουμε τη συνεισφορά της αυθόρμητης εκπομπής στον θόρυβο του δέκτη.

Η φασματική πυκνότητα του επαγόμενου θορύβου αυθόρμητης εκπομπής είναι σχεδόν σταθερή (λευκός θόρυβος) και μπορεί να γραφεί ως εξής

(2.3.4)

$$S_{ps}(\nu) = (G-1)_{ngp} hn$$

όπου ν είναι η οπτική συχνότητα. Η παράμετρος n_{sp} ονομάζεται *συντελεστής αυθόρμητης εκπομπής* ή *συντελεστής πληθυσμιακής αντιστροφής* και δίνεται από την

$$(2.3.5) \quad n_{gp} = N_2 / (N_2 - N_1)$$

όπου N_1 και N_2 είναι οι ατομικοί πληθυσμοί για τις καταστάσεις βασικής και διέγερσης, αντίστοιχα. Η επίδραση της αυθόρμητης εκπομπής είναι η πρόσθεση διακυμάνσεων στην ενισχυμένη ισχύ, οι οποίες μετατρέπονται σε διακυμάνσεις ρεύματος κατά τη διαδικασία φωτοανίχνευσης.

Τελικά αποδεικνύεται ότι η βασική συνεισφορά στον θόρυβο του δέκτη προέρχεται από τον παλμικό κτύπο αυθόρμητης εκπομπής με το σήμα. Αυτό το φαινόμενο του παλμικού κτύπου μοιάζει με την ετερόδουνη ανίχνευση από την άποψη ότι η αυθόρμητη εκπεμπόμενη ακτινοβολία αναμειγνύεται με το ενισχυμένο σήμα στον φωτοανιχνευτή και παράγει μία ετερόδουνη συνιστώσα του φωτορρεύματος. Ο παλμικός κτύπος της αυθόρμητης μετάδοσης με το σήμα παράγει θόρυβο ρεύματος

$$\Delta I = 2R(GP_{in}P_{sp})^{1/2} \cos \theta$$

όπου $P_{sp}=2S_{sp}\Delta f$ είναι η ισχύς αυθόρμητης εκπομπής στο εύρος του δέκτη και θ είναι μία αυθόρμητη διαφορά φάσης. Αν αγνοήσουμε όλες τις άλλες πηγές θορύβου, η μεταβολή του φωτορεύματος μπορεί να γραφεί ως εξής

(2.3.6)

$$\sigma^2 \approx 4(RGP_{in})(RS_{sp})\Delta f$$

όπου $\cos^2\theta$ αντικαταστάθηκε από τη μέση τιμή του $1/2$. Επομένως, ο SNR του ενισχυμένου σήματος δίνεται από τη σχέση

$$(SNR)_{out} = \frac{(I)^2}{\sigma^2} = \frac{(RGP_{in})^2}{\sigma^2} \approx \frac{GP_{in}}{4S_{sp}\Delta f} \quad (2.3.7)$$

Ο δείκτης θορύβου του ενισχυτή μπορεί τώρα να αποκτηθεί αν αντικαταστήσουμε με τις Εξισώσεις (2.3.2) και (2.3.7) την Εξίσωση (2.3.1). Επίσης, αν χρησιμοποιήσουμε την Εξίσωση (2.3.4) για το S_{sp}

$$Fn = 2n_{sp}(G-1)/G \approx 2n_{sp} \quad (2.3.8)$$

Η εξίσωση αυτή δείχνει πως ο SNR του ενισχυμένου σήματος υποβαθμίζεται κατά 3dB ακόμη και για έναν ιδανικό ενισχυτή για τον οποίο $n_{sp}=1$. Στους πιο πρακτικούς ενισχυτές, η F_n υπερβαίνει τα 3dB και μπορεί να φτάσει τα 6-8dB. Για την εφαρμογή του στα οπτικά συστήματα επικοινωνίας, ένας οπτικός ενισχυτής θα πρέπει να έχει F_n όσο το δυνατόν μικρότερη.

2.4 Ενδοκαναλική διαφωνία

Ένα από τα πλεονεκτήματα της χρήσης οπτικών ενισχυτών είναι ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ενισχύσουν αρκετά κανάλια ταυτόχρονα αρκεί οι φέρουσες συχνότητες τους των πολλαπλών καναλιών να βρίσκονται στα πλαίσια του εύρους ζώνης του ενισχυτή. Στην ιδανικότερη περίπτωση, το σήμα σε κάθε κανάλι θα πρέπει να ενισχύεται κατά το ίδιο ποσό. Στην πράξη, διάφορα μη γραμμικά φαινόμενα στα SLA επάγουν ενδοκαναλική διαφωνία, ένα ανεπιθύμητο χαρακτηριστικό που θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί στα πρακτικά οπτικά συστήματα. Δύο μη-γραμμικά φαινόμενα είναι ο διασταυρούμενος κόρος και η μίξη τεσσάρων κυμάτων (FWM). Η FWM δεν δημιουργεί πρόβλημα στα μονοκάναλα οπτικά συστήματα, αλλά αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για τα πολυκάναλα συστήματα που χρησιμοποιούν πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος. Μια σημαντική ποσότητα ισχύος του καναλιού μπορεί να μεταφερθεί σε γειτονικά κανάλια μέσω της FWM. Μία τέτοια μεταφορά ενέργειας, όχι μόνο έχει σαν αποτέλεσμα απώλεια ισχύος για ένα συγκεκριμένο κανάλι, αλλά επίσης οδηγεί σε (διαφωνία μεταξύ καναλιών ενδοκαναλική διαφωνία), πράγμα που υποβιβάζει την απόδοση του συστήματος. Είπαμε, λοιπόν, πως δύο μη-γραμμικά φαινόμενα, ο διασταυρούμενος κόρος και η μίξη τεσσάρων κυμάτων, μπορεί να οδηγήσουν σε διαφωνία μεταξύ των καναλιών, έτσι ώστε η ένταση και η φάση του ενός καναλιού να επηρεάζεται από άλλα γειτονικά κανάλια. Και τα δύο παραπάνω μη γραμμικά φαινόμενα οφείλονται στον όρο της εξαναγκασμένης επανασύνδεσης στην εξίσωση ρυθμού των φορέων. Στην περίπτωση της πολυκαναλικής ενίσχυσης, η ισχύς P στην εξίσωση

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{q} - \frac{N}{Tc} - \frac{\sigma_g(N-N_0)}{\sigma_m hn} P \quad (2.4.1)$$

την οποία παίρνουμε από την εξίσωση που εκφράζει τον αριθμό των φωτονίων ως προς την οπτική ισχύ, αντιστοιχεί στην

$$P = \frac{1}{2} \left| \sum_{j=1}^M A_j \exp(-i\omega_j t) + c.c \right|^2 \quad (2.4.2)$$

όπου c.c. είναι ένας συζυγής μιγαδικός, M είναι ο αριθμός των καναλιών, A_j είναι το πλάτος και ω_j είναι η φέρουσα συχνότητα του $j^{ου}$ καναλιού. Λόγω της σύμφωνης πρόσθεσης των πεδίων των μεμονωμένων καναλιών, η Εξίσωση (2.4.2) εμπεριέχει όρους που εξαρτώνται από τον χρόνο, οι οποίοι οφείλονται στους παλμικούς κτύπους του σήματος σε διαφορετικά κανάλια, δηλαδή,

$$P = \sum_{j=1}^M P_j + \sum_{j=1}^M \sum_{k \neq j}^M 2\sqrt{P_j P_k} \cos(\Omega_{jk}t + \Phi_j - \Phi_k) \quad (2.4.3)$$

όπου, $A_j = \sqrt{P_j} \exp(i\phi_j)$ υπολογίστηκε μαζί με την $\Omega_{jk} = \omega_j - \omega_k$. Όταν η Εξίσωση (2.4.3) αντικατασταθεί στην Εξίσωση (2.4.1), ο πληθυσμός των φορέων βλέπουμε ότι ταλαντώνεται στη συχνότητα παλμικού κτύπου Ω_{jk} . Αφού και η απολαβή και ο δείκτης διάθλασης εξαρτώνται από τον N , επίσης διαμορφώνονται στη συχνότητα Ω_{jk} . Μία τέτοια διαμόρφωση δημιουργεί απολαβή και σχάρες διάθλασης του δείκτη, που επάγουν διαφωνία μεταξύ των καναλιών σκεδάζοντας ένα μέρος του σήματος από το ένα κανάλι στο άλλο. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να θεωρηθεί και σαν ανάμειξη τεσσάρων κυμάτων.

Η προέλευση του διασταυρούμενου κόρου είναι επίσης εμφανής από την Εξίσωση (2.4.3). Ο πρώτος όρος στη δεξιά πλευρά δείχνει ότι η ισχύς P στην Εξίσωση

$$g = \frac{g_o}{1 + p/p_s} \quad (2.4.4)$$

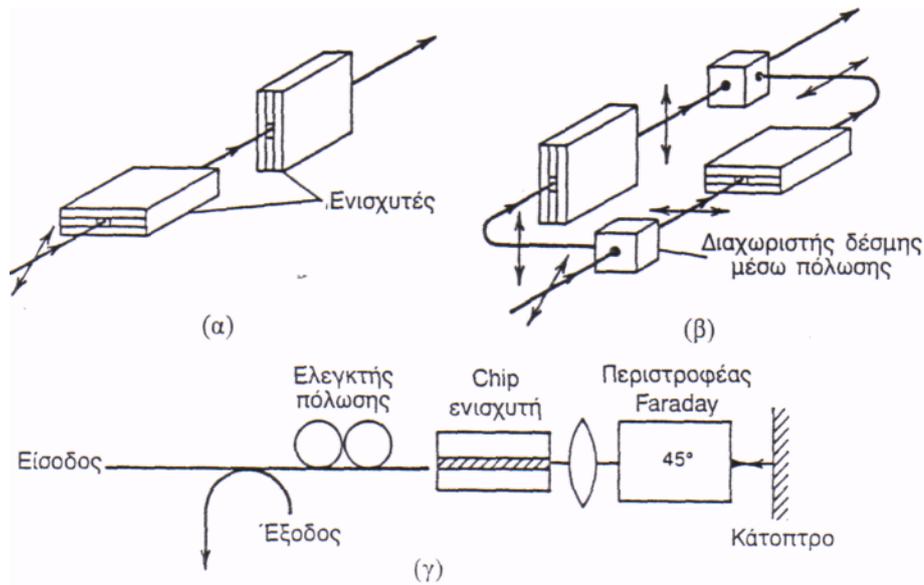
θα πρέπει να αντικατασταθεί από την ολική ισχύ σε όλα τα κανάλια. Επομένως, η απολαβή ενός συγκεκριμένου καναλιού φτάνει στον κόρο όχι μόνο μέσω της δικής του ισχύος, αλλά και μέσω της ισχύος των γειτονικών καναλιών, φαινόμενο γνωστό σαν *διασταυρούμενος κόρος*. Ο διασταυρούμενος κόρος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μετατροπή του μήκους κύματος στα συστήματα WDM. Ωστόσο, είναι ανεπιθύμητος στην ενίσχυση του σήματος, αφού η απολαβή του ενισχυτή μεταβάλλεται με τον χρόνο ανάλογα με τον συνδυασμό των bit στα γειτονικά κανάλια. Σαν αποτέλεσμα, το ενισχυμένο σήμα παρουσιάζει διακυμάνσεις λίγο-πολύ τυχαίες. Οι διακυμάνσεις αυτές υποβαθμίζουν τον ενεργό SNR στον δέκτη. Η διαφωνία αυτή μεταξύ καναλιών εμφανίζεται ανεξάρτητα από την έκταση της απόστασης μεταξύ καναλιών. Μπορούν να αποφευχθούν μόνο αν λειτουργήσουμε SLA εκτός της περιοχής κόρου. Επίσης, δεν εμφανίζονται και στα σύμφωνα συστήματα που χρησιμοποιούν διαμορφώσεις FSK και PSK, αφού η ισχύς σε κάθε κανάλι, επομένως και η ολική ισχύς, παραμένει σταθερή με τον χρόνο.

Η διαφωνία μεταξύ καναλιών λόγω FWM, από την άλλη, μπορεί να εμφανιστεί σε όλα τα πολυκαναλικά οπτικά συστήματα, ανεξάρτητα από τον τρόπο διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται. Οι επιδράσεις είναι πιο σημαντικές στα σύμφωνα συστήματα, λόγω της σχετικά μικρής απόστασης μεταξύ των καναλιών. Η FWM μπορεί να εμφανιστεί ακόμη και για κανάλια με μεγάλη μεταξύ τους απόσταση, λόγω της μη γραμμικότητας των ενδιάμεσων ζωνών συχνοτήτων που εμφανίζονται στις γρήγορες χρονικές κλίμακες (< 1 ps). Στην πραγματικότητα, μία τέτοια μηεκφυλισμένη FWM χρησιμοποιείται για τη μετατροπή του μήκους κύματος. Γενικά, ο διασταυρούμενος κόρος και η FWM δυσχεραίνουν τη χρήση των SLA σαν ενισχυτές σε σειρά.

2.5 Ευαισθησία πόλωσης

Ένα ανεπιθύμητο χαρακτηριστικό των SLA είναι η *ευαισθησία πόλωσης* τους. Η

απολαβή του ενισχυτή G διαφέρει στους τρόπους διάδοσης TE και TM μέχρι κατά 5-8dB απλώς και μόνο λόγω του ότι και η G και η a_g είναι διαφορετικές για δύο ορθογώνια πολωμένους τρόπους διάδοσης. Το χαρακτηριστικό αυτό καθιστά την απολαβή του ενισχυτή ευαίσθητη στην κατάσταση πόλωσης της δέσμης εισόδου, ιδιότητα ανεπιθύμητη για τα οπτικά συστήματα, στα οποία η κατάσταση πόλωσης μεταβάλλεται ανάλογα με τη μετάδοση σ' όλο το μήκος της οπτικής ίνας (εκτός αν χρησιμοποιήσουμε οπτικές ίνες διατήρησης-πόλωσης). Έχουν βρεθεί διάφορες τεχνικές για τη μείωση της ευαισθησίας της πόλωσης. Σε μια τεχνική, ο ενισχυτής σχεδιάζεται έτσι ώστε το εύρος και το πάχος της ενεργούς περιοχής να είναι συγκρίσιμα. Μια διαφορά απολαβής μικρότερη από 1.3dB μεταξύ των πολώσεων TE και TM πραγματοποιήθηκε παίρνοντας ενεργό πάχος $0.26\mu\text{m}$ και εύρος $0.4\mu\text{m}$. Μία άλλη τεχνική χρησιμοποιεί τη δομή μεγάλης-οπτικής-κοιλότητας. Έχουμε πάρει διαφορά απολαβής λιγότερη από 1dB με μια τέτοια δομή.



Σχήμα 2.5 Τρεις διατάξεις που χρησιμοποιούνται για τη μείωση της ευαισθησίας της πόλωσης των ενισχυτών Laser ημιαγωγών: (α) δύο ενισχυτές σε σειρά, (β) δύο ενισχυτές παράλληλοι και (γ) διπλή διέλευση μέσω ενός απλού ενισχυτή.

Διάφορες άλλες τεχνικές μειώνουν την ευαισθησία πόλωσης χρησιμοποιώντας δύο ενισχυτές ή δύο διελύσεις μέσω του ίδιου ενισχυτή. Το Σχήμα 2.5 παρουσιάζει τρεις διατάξεις τέτοιου είδους. Στο Σχήμα 2.5(α), το σήμα πόλωσης-TE στον έναν ενισχυτή γίνεται πόλωσης-TM στον δεύτερο ενισχυτή κι αντίστροφα. Αν και οι δύο ενισχυτές έχουν πανομοιότυπα χαρακτηριστικά απολαβής, ο διπλός ενισχυτής παρέχει απολαβή σήματος ανεξάρτητη από την πόλωση του σήματος. Ένα μειονέκτημα των διατάξεων σε σειρά είναι ότι οι υπολειμματικές πλευρικές ανακλαστικότητες οδηγούν σε αμοιβαία ζεύξη μεταξύ των δύο ενισχυτών. Στην παράλληλη διάταξη, που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.5(β), το προσπίπτον σήμα διαιρείται σε δύο σήματα πόλωσης TE και TM, το καθένα εκ των οποίων ενισχύεται από διαφορετικό ενισχυτή. Τα ενισχυμένα σήματα TE και TM κατόπιν συνδυάζονται για να δώσουν το ενισχυμένο σήμα με την ίδια πόλωση όπως και η δέσμη εισόδου. Η διάταξη διπλής διέλευσης του Σχήματος 2.5(γ) επιτρέπει τη διέλευση του σήματος μέσα από τον ίδιο ενισχυτή δύο φορές, αλλά η πόλωση περιστρέφεται κατά 90° μεταξύ των δύο διελύσεων. Αφού το ενισχυμένο σήμα διαδίδεται προς την αντίθετη κατεύθυνση, χρειάζεται ένας συζεύκτης οπτικών ινών 3dB για να το διαχωρίσουμε από το προσπίπτον σήμα. Παρά την απώλεια των 6dB που εμφανίζεται στον συζεύκτη οπτικών ινών (3dB για το σήμα εισόδου και 3dB για το ενισχυμένο σήμα) η διάταξη αυτή παρέχει υψηλή απολαβή από έναν απλό ενισχυτή, αφού ο ίδιος ενισχυτής παρέχει την απολαβή και στις δύο διελύσεις.

3. ΤΥΠΟΙ ΟΠΤΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ

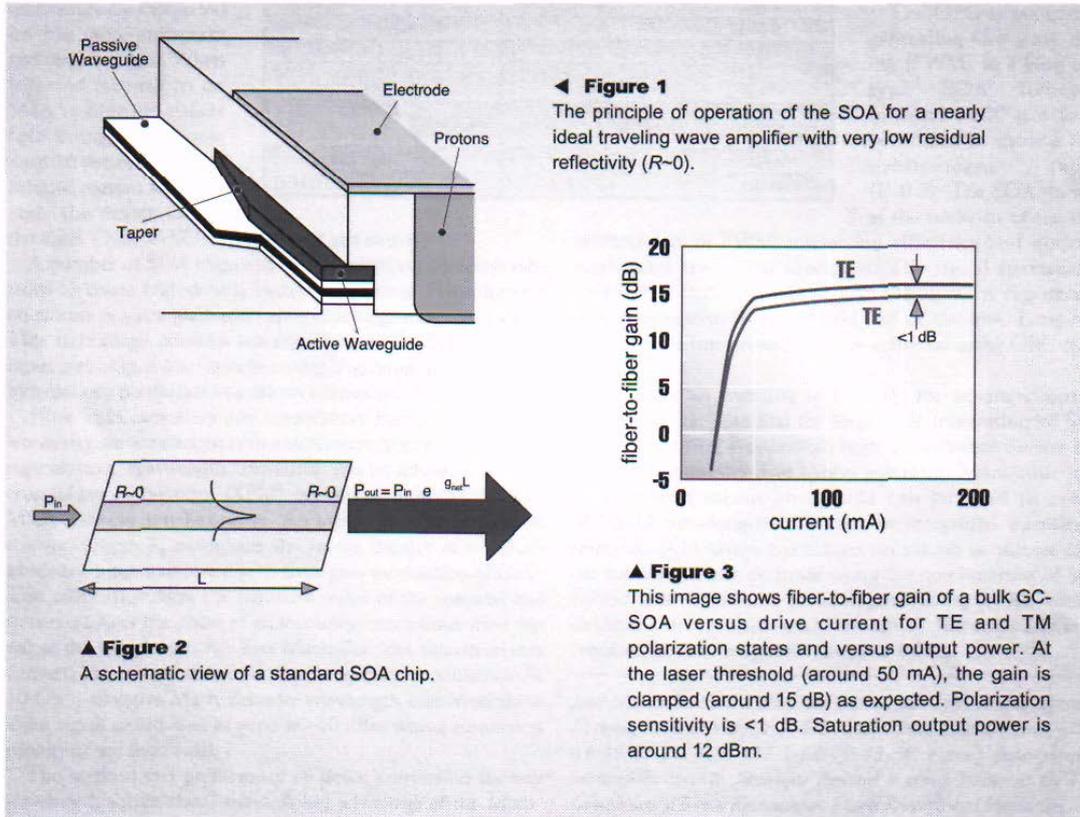
3.1 Ενισχυτές διόδου laser (SOA)

Με την απαίτηση για πιο μακρά μήκη μετάδοσης, οι οπτικοί ενισχυτές έχουν γίνει ένα ουσιαστικό συστατικό στα μεγάλης απόστασης οπτικά συστήματα ιών. Οπτικοί ενισχυτές ημιαγωγού (SOAs), εμπλουτισμένοι με έρβιο ενισχυτές ιών (EDFAs) και οι οπτικοί ενισχυτές Raman ελαττώνουν τις επιδράσεις της διασποράς επιτρέποντας τη βελτιωμένη απόδοση των μεγάλης απόστασης οπτικών συστημάτων. Καθώς η απαίτηση εύρους ζώνης αυξάνεται, η κατασκευή κόμβων οπτικής δέσμης-μεταγωγής που στοχεύουν στους οπτικούς δρομολογητές θα προωθείται από τους γρήγορους οπτικούς διακόπτες. Η τεχνολογία των οπτικών ενισχυτών ημιαγωγού (SOAs) παρέχει αυτήν την ικανότητα υψηλής μετατροπής καθώς επίσης και την απολαβή, την υψηλή αναλογία εξάλειψης, και την υψηλή δυνατότητα ολοκλήρωσης.

Ένας SOA είναι βασισμένος στην ίδια τεχνολογία με μια Fabry-Perot διόδου laser. Ένα τέτοιο laser αποτελείται από ένα ενεργό μέσο ενίσχυσης που βρίσκεται μέσα σε μια ηχηρή (τύπου Fabry-Perot) κοιλότητα. Η λειτουργία ενίσχυσης επιτυγχάνεται με εξωτερική άντληση των ενεργειακών επιπέδων του υλικού. Προκειμένου να αποκτηθεί μόνο η λειτουργία ενίσχυσης, είναι απαραίτητο να προστατευθεί η συσκευή από την ανάδραση του laser. Αυτό ολοκληρώνεται με το φράξιμο των κοιλοτήτων αντανάκλασης χρησιμοποιώντας τόσο ένα επίστρωμα αντι-αντανάκλασης (AR) όσο και την τεχνική γωνιακού ανοίγματος των όψεων του chip. Σε αντίθεση με τους εμπλουτισμένους με έρβιο ενισχυτές ιών (EDFAs), που αντλούνται οπτικά, οι SOAs αντλούνται ηλεκτρικά με εμβολή ρεύματος.

Ένας βασικός SOA αποτελείται από ένα κεντρικό ενεργό τμήμα περίπου 600 μm μακρύ και δύο παθητικά τμήματα στις πλευρές εισαγωγής και εξαγωγής του chip, καθένα περίπου στα 100 μm μακρύ. Το κεντρικό ενεργό στρώμα είναι βασισμένο σε μια χωριστά περιορισμένη ετεροδομή (SCH) και αποτελείται από ένα 0.2 μm παχύ ελαστικό ακατέργαστο ενεργό στρώμα ενσωματωμένο μεταξύ δύο 0.1 μm παχιά τετραδικά στρώματα. Εκλεπτύνεται πέρα από το μήκος των 150 μm, το οποίο επιτρέπει την οπτική σύζευξη σε έναν θεμελιώδη παθητικό κυματοδηγό. Αυτός ο τύπος δομής παρέχει έναν υψηλό οπτικό περιοριστικό παράγοντα λόγω του κακού συνδυασμού δεικτών μεταξύ των στρωμάτων στον τομέα απολαβής, μαζί με ένα μεγάλο μέγεθος στιγμάτων στις όψεις για την επίτευξη μιας υψηλής αποδοτικότητας συζεύξεων chip σε ίνα.

- Οι βασικές παράμετροι που απαιτούνται για ένα SOA περιλαμβάνουν:
- υπολειμματική ανακλαστικότητα λιγότερο από 10^{-4} για να εξασφαλίσει έναν κυματισμό κέρδους κάτω από 0.5 dB
 - χαμηλή οπτική απώλεια για να επιτύχει καθαρή απολαβή τόσο υψηλή όσο 30 dB
 - υψηλή απολαβή υλικού για να επιτρέψει χαμηλής-κίνηση λειτουργία ρεύματος (20 με 30 dB απολαβή ίνας σε ίνα για ένα 100-mA οδηγό ρεύματος)
 - υψηλή ισχύ απόδοσης κόρου, που ορίζεται ως η ισχύ απόδοση για την οποία η απολαβή μειώνεται κατά 3 dB
 - απώλεια συζεύξεων chip σε ίνα λιγότερο από 3 dB ανά όψη, η οποία πραγματοποιείται με την χρησιμοποίηση ολοκληρωμένων κυματοδηγών σε κατάσταση σταδιακής μείωσης στις όψεις απόδοσης
 - ευαισθησία πόλωσης λιγότερο από 0.5 dB, επειδή η κατάσταση της πόλωσης του οπτικού σήματος που προέρχεται από μια ίνα συνδέσεων είναι συνήθως τυχαία.



Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά δεν μπορούν να ληφθούν ταυτόχρονα, έτσι πρέπει να βρεθούν συμβιβασμοί. Μια κβαντικών-φρεατίων δομή (QW) SOA θα ικανοποιήσει τις απαιτήσεις χαμηλή υπολειμματική ανακλαστικότητα και την οπτική απώλεια, καθώς επίσης και την υψηλή απολαβή υλικού. Αφ' ετέρου, μια τέτοια δομή είναι εγγενώς ευαίσθητη στην πόλωση, δεδομένου ότι η επικρατούσα απολαβή TE είναι μεγαλύτερη από την επικρατούσα απολαβή TM. Η επίδραση μπορεί να μειωθεί με το συνδυασμό συμπιεστικά τεντωμένων QW, τα οποία παράγουν υψηλότερη απολαβή TM.

3.1.1 Τύποι των SOA

Ανάλογα με την αποδοτικότητα του επιστρώματος AR, οι SOA μπορούν να ταξινομηθούν ως συσκευές ή συσκευές τρεχόντων κυμάτων (TW). SOAs κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας ένα επίστρωμα AR με μια ανακλαστικότητα γύρω στα 10^{-2} . Παρουσιάζουν κυματισμό απολαβής 10 έως 20 dB και ένα εύρος ζώνης 2 έως 10GHz. Συσκευές TW ενσωματώνουν ένα επίστρωμα με μια ανακλαστικότητα λιγότερο από 10^{-4} (βλ. Figure 2). Παρουσιάζουν κυματισμό απολαβής μερικών dB και εύρος ζώνης καλύτερο από 5 THz (π.χ., 40 nm σε 1550 nm άνοιγμα).

Οι εφαρμογές τηλεπικοινωνιών απαιτούν ένα σχέδιο TW, που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές όπως η μονοκαναλική ή η πολυκαναλική (WDM) ενίσχυση, η οπτική μεταγωγή σε κόμβους κεντρικών δικτύων, η μετατροπή μήκους κύματος σε οπτικές διαγώνιο-συνδέσεις, και σε οπτικούς αναγεννητές αναδιαμόρφωσης και επανενίσχυσης (2R) ή οπτικούς αναγεννητές αναδιαμόρφωση, επανενίσχυσης και επανασυγχρονισμού (3R) για μεγάλης απόστασης δίκτυα μεταφορών.

Η οπτική ισχύς εισαγωγής P_{in} που εγχέεται στον κυματοδηγό SOA ενισχύεται σύμφωνα με το $P_{out} = G_{sp}P_{in}$, όπου G_{sp} είναι η απολαβή μονής κατεύθυνσης κατά το μήκος L του TW SOA τέτοιο ώστε $G_{sp} = \exp(g_{net}L)$. Η καθαρή απολαβή g_{net} δίνεται από το $g_{net} = \Gamma g - \alpha$, όπου Γ , g , και α είναι ο οπτικός περιοριστικός παράγοντας, η απολαβή υλικού και η οπτική απώλεια, αντίστοιχα.

Χρησιμοποιώντας στρώματα οξειδίου τιτανίου/οξειδίου πυριτίου (TiO_2/SiO_2) για την τεχνολογία επιστρώματος AR, είναι δυνατόν να επιτευχθούν ανακλαστικότητες της τάξεως 10^{-5} . Με το συνδυασμό όψεων σε κλίση (περίπου 7° γωνία) και επιστρώματος AR, μπορεί να επιτευχθεί μια συσκευή με ιδιαίτερα υψηλή αναπαραγωγίμη και εξαιρετικά χαμηλή υπολειμματική ανακλαστικότητα, οδηγώντας κυματισμούς απολαβής τόσο χαμηλούς όσο 0.5 dB.

Ένας μεγάλος αριθμός εισερχόμενων καναλιών μπορεί να διαποτίσει έναν SOA. Ο κορεσμός απολαβής που προκαλείται από ένα κανάλι τροποποιεί την απόκριση των άλλων καναλιών, προκαλώντας τη διαπλοκή μεταξύ των καναλιών. Οι εφαρμογές WDM απαιτούν έτσι μια συσκευή με υψηλή ισχύ απόδοσης κόρου. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα, ερευνητές της Alcatel έχουν αναπτύξει SOA στερεωμένης απολαβής (GC), ο οποίος είναι βασισμένος στην τεχνολογία κατανεμημένων ανακλαστήρων Bragg (DBR).

Σε έναν GC-SOA, το σχέδιο τροποποιείται για να ενσωματώσει ένα φράγμα Bragg σε κάθε έναν από τους δύο παθητικούς κυματοδηγούς. Αυτό δημιουργεί μια ηχηρή κοιλότητα και έτσι μια επίδραση φωτός του laser. Προγραμματίζοντας τον SOA να παράγει επίδραση φωτός laser σε ένα μήκος κύματος λ_{laser} τοποθετημένο εξωτερικά του επιθυμητού εύρους ζώνης ενίσχυσης του SOA, είναι δυνατό να σταθεροποιηθεί η απολαβή. Χαρακτηριστικά, το λ_{laser} είναι περίπου 1510 nm για το λειτουργικό εύρος ζώνης του SOA που αντιστοιχεί στη C-ζώνη (1530 έως 1560 nm). Λόγω της επίδρασης φωτός του laser, η πυκνότητα του κομιστή φορτίου N φτάνει σε κορεσμό και η οπτική απολαβή (που είναι ανάλογη προς το N) φτάνει επίσης σε κορεσμό, οποιοδήποτε κι αν είναι το επίπεδο σημάτων εισαγωγής (βλ. Figure3). Κατά συνέπεια, η απολαβή σταθεροποιείται, αλλά σε χαμηλότερο επίπεδο σε σύγκριση με την πρότυπη δομή του SOA (περίπου 15 έως 18 dB). Αφ' ετέρου, η ισχύ παραγωγής κορεσμού 3 dB είναι υψηλότερη (περίπου 12 dBm). Έχουν αναπτυχθεί και έχουν κατασκευαστεί οι ξεχωριστές αυτόνομες μονάδες SOA στερεωμένης απολαβής.

3.1.2 Οι SOA σε δράση

Ενισχυτές: Ξεχωριστοί-αυτόνομοι SOAs μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συμπαγείς συμπληρωματικοί ενισχυτές (μια τυποποιημένη συσκευή για μονοκαναλική λειτουργία, μια έκδοση στερεωμένης απολαβής για λειτουργία WDM), ή για να επιτύχουν υψηλής-ευαισθησίας δέκτες οπτικών αναγεννητών ως ενδιαφέρουσα εναλλακτική λύση για την αντικατάσταση φωτοδιόδων χιονοστιβάδας για αναλογία δεδομένων στα 40 Gb/s ή υψηλότερα.

Ο βαθμός θορύβου είναι μια βασική εκτίμηση για τις εφαρμογές ενισχυτών. Ο βαθμός θορύβου ορίζεται ως n_{sp} και C_1 όπου n_{sp} είναι ο παράγοντας αντιστροφής και C_1 είναι η γενική απώλεια εισαγωγής (κυρίως απώλεια εισαγωγής ηλεκτρικής σύζευξης περίπου 3 dB). Επειδή τα n_{sp} και C_1 εξαρτώνται από την κατάσταση πόλωσης του φωτός εισαγωγής, ο βαθμός θορύβου καθορίζεται για κάθε κατάσταση πόλωσης. Συνήθως, για τους εξαρτημένους μη πόλωσης ενισχυτές όπως είναι οι EDFA, ο βαθμός θορύβου ορίζεται ως $2n_{sp}/C_1$. Έτσι, υπάρχει μια διαφορά 3 dB μεταξύ των SOAs και EDFAs.

Μετατροπή: Οι optical cross-connects (OXC) αποτελούν έναν σημαντικό τομέα εφαρμογής για τους SOAs. Μεγάλης χωρητικότητας οπτικοί δρομολογητές σε

WDM κόμβους πρέπει να εκτελέσουν μετατροπή υψηλής ταχύτητας οπτικής δέσμης καθώς επίσης και μετατροπή ολικό-οπτικού μήκους κύματος για την αποφυγή σύγκρουσης καναλιών και για την παροχή επαναδιανομής μήκους κύματος. Οι σειρές πυλών SOA είναι καλά ταιριασμένες για γρήγορη μετατροπή της 1550nm WDM αναλογίας μήκους κυμάτων.

Μια σειρά πύλης SOA είναι μια σειρά συσκευών μονολιθικά ενσωματωμένων στο ίδιο υπόστρωμα και χρησιμοποιούνται ως πύλη. Όταν το εισαγόμενο ρεύμα σε ένα SOA είναι υψηλό, διέρχεται ελαφρά με κάποια ενίσχυση. Όταν το εισαγόμενο ρεύμα πέφτει κοντά στο μηδέν, η συσκευή φράζει το φως. Κατά συνέπεια, μια σειρά SOA μπορεί να ενεργήσει ως διακόπτης.

Διάφορα chips SOA μπορούν να ενσωματωθούν στο ίδιο υπόστρωμα για να δημιουργήσουν υψηλής πυκνότητας μήτρες μετατροπής. Η υβριδοποίηση στις πλατφόρμες πυριτίου ή διοξειδίου πυριτίου μπορεί να επιτρέψει τη μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωση. Αυτή η τεχνολογία παρέχει την αυτό-ευθυγράμμιση της σειράς SOA στις δέσμες ινών εισαγωγής και εξαγωγής χρησιμοποιώντας V-grooves και εγκοπές ευθυγράμμισης που εκτελούνται σε πυρίτιο submount.

Μετατροπή και αναγέννηση μήκους κύματος: Αναδιαμορφωμένα δίκτυα απαιτούν δυνατότητες μετατροπής μήκους κύματος και ολικό-οπτική αναγέννηση. Η μετατροπή μήκους κύματος μπορεί να επιτευχθεί μέσω της διαμόρφωσης cross-phase (XPM) που εκτελείται σε ένα συμβαλλόμετρο SOA-Mach-Zehnder. Ένα διαμορφωμένο σήμα εισαγωγής στο μήκος κύματος λ_s διαμορφώνει την πυκνότητα κομιστή του SOA μέσα στο συμβαλλόμετρο λόγω της διαμόρφωσης cross-gain (XGM). Αυτή η επίδραση διαμορφώνει το διαθλαστικό δείκτη του υλικού και διαμορφώνει έτσι τη φάση ενός εισερχόμενου σήματος συνεχούς-κύματος στο μήκος κύματος λ_c . Το συμβαλλόμετρο Mach-Zehnder μετατρέπει αυτήν την διαμόρφωση φάσης σε διαμόρφωση κατά πλάτος. Στα 10 Gb/s, οι ολικό-ενεργοί μετατροπείς μήκους κύματος Mach-Zehnder παρουσιάζουν ευαισθησία εισαγόμενων σημάτων ουσιαστικά -10 dBm με μια κύρωση μετατροπής λιγότερο από 1 dB

Η μέθοδος μπορεί να εκτελέσει ανοδική ή καθοδική μετατροπή για οποιοδήποτε μήκος κύματος ζώνης. Ένα βασικό πλεονέκτημα της δομής Mach-Zehnder είναι ότι η μη γραμμική απόκριση του ιντερφερομέτρου οδηγεί σε μια αύξηση της αναλογίας εξάλειψης σημάτων μετά από τη μετατροπή, που οδηγεί σε αναγέννηση 2R.

Μια λειτουργία μετατροπής μήκους κύματος που ενσωματώνει μια διαδοχή των δύο SOA-βασισμένων MZ-ιντερφερομέτρων μετατροπών μήκους κύματος και χρησιμοποιείται σε ένα σχέδιο ομο-διάδοσης μπορεί να παράγει αναγέννηση 3R. Το πρώτο στάδιο εκτελεί την αναδιοργάνωση και τον επανασυγχρονισμό. Κατόπιν το δεύτερο στάδιο εναρμονίζει το τερέτισμα των δεδομένων εξόδου για μετάδοση πέρα από μια υψηλή σύνδεση διασποράς. Σε μια διαφορετικού τρόπου διαμόρφωση, αυτή η προσέγγιση μπορεί να λειτουργήσει σε αναλογία στοιχείων τόσο υψηλή όσο 40 Gb/s.

Επιλογή και αντιστροφή: Οι συσκευές SOA μπορούν επίσης να εκτελέσουν την επιλογή μήκους κύματος και την μεσαίου ανοίγματος φασματική αντιστροφή. Ένας επιλογέας μήκους κύματος έχει δημιουργηθεί χρησιμοποιώντας τις πύλες SOA που τοποθετούνται μεταξύ δύο συγχρονισμένων σειρών αποπολυπλεκτών μήκους κύματος. Αυτό το σχέδιο μπορεί να επιτύχει την επιλογή μήκους κύματος σε κλίμακα nanosecond. Η μονολιθική ολοκλήρωση είναι πολύ ελκυστική από την άποψη συμβατότητας και κατάληψης μικρού χώρου με κατασκευή υψηλής έντασης ήχου.

Η φασματική αντιστροφή είναι μια επίδραση κατόπτρων που επιτυγχάνεται στο φάσμα σήματος μεταξύ των υψηλότερων συχνοτήτων και των χαμηλότερων συχνοτήτων, οι οποίες έχουν αντιστραφεί. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως τεχνική αντιστάθμισης διασποράς. Μπορεί να εφαρμοστεί χρησιμοποιώντας φάση οπτικής σύζευξης (OPC) σε μια δομή SOA σε υψηλής αναλογίας ψηφίων συστημάτων

μετάδοσης χρησιμοποιώντας τυποποιημένη single-mode ίνα. Μια τέτοια προσέγγιση μπορεί να επιτρέψει σε ένα σύστημα να λειτουργήσει ακόμη και παρά την υψηλή χρωματική διασπορά.

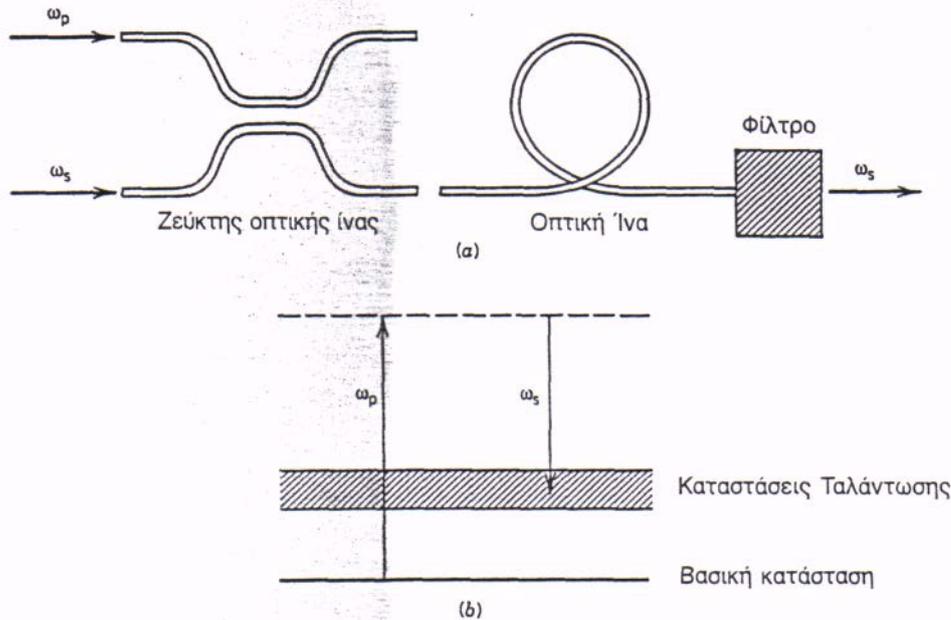
Το OPC πραγματοποιείται με την παραγωγή μίγματος τεσσάρων κυμάτων (FWM) σε μια μακρά ακατέργαστη δομή τύπων SOA (περίπου 1200 μm μακρύ) βελτιστοποιημένο για να παρουσιάσει υψηλό παράγοντα περιορισμού ($\Gamma \sim 0.6$). Ο SOA, που βρίσκεται στο μεσαίο άνοιγμα της σύνδεσης, εκθέτει μια υψηλή αποδοτικότητα μετατροπής FWM και ενώνει οπτικά το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα σήματος. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα σήματος είναι αντεστραμμένο στην απόδοση του SOA και το σήμα αναπαράγεται μετά από τη διάδοση στο δεύτερο μισό της σύνδεσης. Η μεγάλης απόστασης μετάδοση υψηλής αναλογίας ψηφίων μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας το OPC σε έναν SOA.

Οι SOAs είναι μια τεχνολογία διευκόλυνσης για προηγμένα οπτικά δίκτυα. Η δυνατότητα για μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωση της τεχνολογίας SOA προσφέρει οικονομικές, υψηλής απόδοσης συσκευές που συνδυάζουν μονολιθικές και υβριδικές λύσεις. Η μονολιθική ολοκλήρωση στο φωσφίδιο ινδίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργήσει τους μετατροπείς μήκους κύματος MZ-SOA ή τους ενσωματωμένους επιλογείς μήκους κύματος. Υβριδοποιημένες σε submounts πυριτίου ή διοξείδιο πυριτίου σειρές SOA μπορούν να γίνουν χρησιμοποιώντας το συνδυασμό τόσο υβριδικών όσο και μονολιθικών τεχνολογιών. Χρησιμοποιώντας τους SOA, οι διάφορες συσκευές μπορούν να φτιαχτούν με ενισχυμένες λειτουργίες όπως απαιτείται για τα μελλοντικά οπτικά δίκτυα.

3.2 Ενισχυτές Οπτικών Ινών Raman

Ένας ενισχυτής οπτικών ινών Raman χρησιμοποιεί εξαναγκασμένη σκέδαση Raman (SRS) που εμφανίζεται στις ίνες πυριτίου, όταν μία ισχυρή δέσμη άντλησης μεταδίδεται μέσω αυτής. Ο SRS διαφέρει από τη εξαναγκασμένη μετάδοση σε ένα βασικό σημείο. Ενώ στην περίπτωση της εξαναγκασμένης μετάδοσης ένα προσπίπτον φωτόνιο διεγείρει την μετάδοση ενός άλλου πανομοιότυπου φωτονίου χωρίς απώλεια της ενέργειας του, στην περίπτωση του SRS το προσπίπτον φωτόνιο άντλησης δίνει την ενέργεια του για να δημιουργήσει ένα άλλο φωτόνιο μειωμένης ενέργειας και χαμηλότερης συχνότητας (ανελαστική σκέδαση). Η υπόλοιπη ενέργεια απορροφάται από το μέσο με τη μορφή μοριακών δονήσεων (οπτικά φωτόνια). Επομένως, οι ενισχυτές οπτικών ινών Raman θα πρέπει να αντληθούν οπτικά για να δώσουν απολαβή, αντίθετα με τα SLA, τα οποία μπορούν να υποστούν ηλεκτρική άντληση. Μια σημαντική διαφορά από τα SLA είναι ότι η πληθυσμιακή αντιστροφή δεν είναι απαραίτητη για τους ενισχυτές οπτικών ινών Raman.

Στην πραγματικότητα, ο SRS είναι ένα μη συντονισμένο, μη γραμμικό φαινόμενο που δεν απαιτεί πληθυσμιακή μεταφορά μεταξύ των ενεργειακών σταθμών. Το Σχήμα 3.1 παρουσιάζει σχηματικά έναν ενισχυτή οπτικών ινών Raman καθώς και την τεχνική ενεργειακού επιπέδου. Η άντληση και οι δέσμες του σήματος σε συχνότητες ω_p και ω_s , εκπέμπονται στην οπτική ίνα μέσω ενός ζεύκτη οπτικών ινών WDM. Η ενέργεια μεταφέρεται από τη δέσμη άντλησης στη δέσμη σήματος μέσω του SRS, αφού οι δύο δέσμες μεταδίδονται από κοινού σ' όλο το μήκος της οπτικής ίνας. Οι δέσμες άντλησης και σήματος μπορούν επίσης να εκτοξευτούν με τέτοιο τρόπο ώστε να μεταδίδονται με αντίθετο τρόπο στο εσωτερικό της οπτικής ίνας.



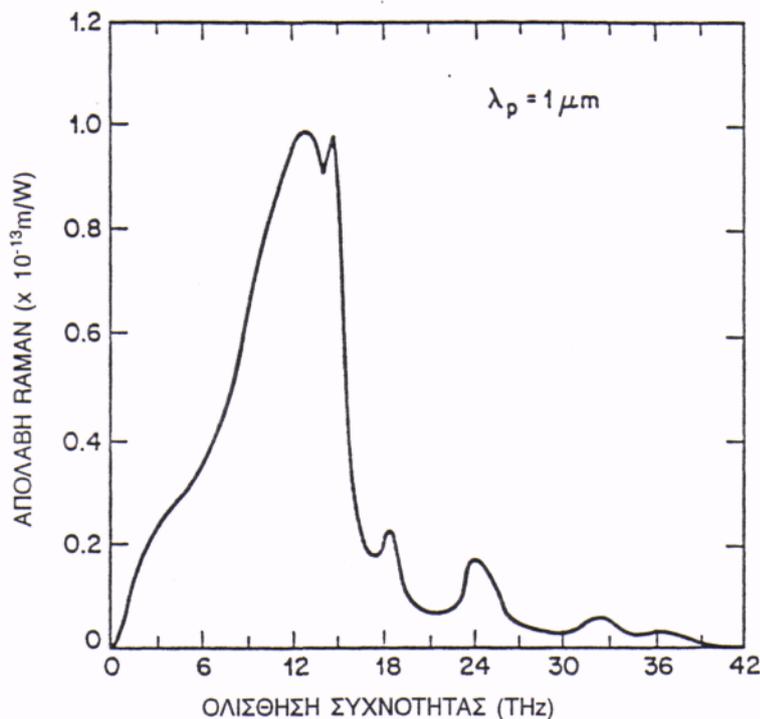
Σχήμα 3.1 (α) Ενισχυτής οπτικών ινών Raman και (β) τεχνική ενεργειακού σταθμού σχετικά με το SRS.

Όπως αποδεικνύει το Σχήμα 3.2, το φάσμα απολαβής των ενισχυτών οπτικών ινών Raman είναι κάθε άλλο παρά τύπου Lorentz. Η απολαβή είναι μέγιστη όταν η ολίσθηση Stokes είναι περίπου 13.2THz. Το εύρος ζώνης της απολαβής $\Delta\nu_s$ είναι περίπου 6THz αν το ορίσουμε σαν το FWHM της επικρατέστερης κορυφής στο σχήμα 3.2. Το μεγάλο εύρος ζώνης των ενισχυτών οπτικών ινών Raman τους καθιστά ελκυστικούς για εφαρμογές επικοινωνίας οπτικών ινών. Ωστόσο, απαιτείται σχετικά μεγάλη ισχύς άντλησης για να πάρουμε έναν μεγάλο συντελεστή ενίσχυσης.

Η απαιτούμενη ισχύς μπορεί να μειωθεί σε μεγαλύτερες οπτικές ίνες, αλλά τότε θα πρέπει να συμπεριλάβουμε και την απώλεια στις οπτικές ίνες..

3.2.1 Κόρος Απολαβής

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



Σχήμα 3.2 Το μετρηθέν σφάλμα απολαβής Raman στις οπτικές ίνες πυριτίου. Η απολαβή Raman κλιμακώνεται αντιστρόφως ανάλογα προς το μήκος κύματος άντλησης λ_p . (©1972 IEEE. Ανατύπωση κατόπιν αδειάς.)

3.2.2 Απόδοση του Ενισχυτή

Οι ενισχυτές οπτικών ιών Raman δίνουν απολαβή 30dB με ισχύ άντλησης 1.5W για οπτική ίνα μήκους 1.3 km. Για τη βέλτιστη απόδοση, η διαφορά συχνότητας μεταξύ της δέσμης άντλησης και της δέσμης σήματος θα πρέπει να αντιστοιχεί στην κορυφή του φάσματος απολαβής Raman στο Σχήμα 3.2 (που εμφανίζεται περίπου στα 13THz). Στην εγγύς του υπέρυθρου περιοχή, η πιο πρακτική πηγή άντλησης είναι το laser Nd:YAG διόδου-άντλησης που λειτουργεί στα 1.6 μm . Για ένα τέτοιο laser άντλησης, η μέγιστη απολαβή εμφανίζεται για μήκη κύματος γύρω στα 1.12 μm , αντίστοιχα. Ωστόσο, τα μήκη κύματος του σήματος στα πιο ενδιαφέροντα συστήματα επικοινωνίας οπτικών ιών είναι γύρω στα 1.3 και 1,5 μm .

Ένα laser Nd:YAG μπορεί ακόμη να χρησιμοποιηθεί αν μία γραμμή Stokes υψηλότερης-τάξης, που δημιουργήθηκε με διαδοχικούς SRS, χρησιμοποιηθεί για άντληση. Για παράδειγμα, μία γραμμή Stokes τρίτης-τάξης στα 1.24 μm που δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας SRS, μπορεί να εκτελέσει άντληση για την ενίσχυση του σήματος 1.3 μm . Το 1984 με την τεχνική αυτή μετρήθηκαν απολαβές ενισχυτή μέχρι και 20dB.

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

φίλτρο. Το μεγάλο εύρος ζώνης των ενισχυτών οπτικών ινών Raman χρησιμεύει στην ταυτόχρονη ενίσχυση πολλών καναλιών. Σ' ένα πείραμα, σήματα από τρία DFB Laser ημιαγωγών που λειτουργούσαν στην περιοχή 1.57-1.58 μm ενισχύθηκαν ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας άντληση 1.47 μm . Το πείραμα αυτό χρησιμοποίησε έναν πολύτροπο laser ημιαγωγό σαν πηγή άντλησης. Επιτεύχθηκε απολαβή ενισχυτή 5dB με ισχύ άντλησης μόλις 60mW.

Το μεγάλο εύρος ζώνης των ενισχυτών οπτικών ινών Raman τους καθιστά κατάλληλους για ενίσχυση μικρών οπτικών παλμών. Πιο συγκεκριμένα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ξεπεράσουμε την απώλεια οπτικών ινών στα συστήματα επικοινωνίας σολιτονίων. Ένα άλλο χαρακτηριστικό της προσέγγισης αυτής είναι ότι η ίδια οπτική ίνα που χρησιμοποιείται για την μετάδοση του σήματος, χρησιμοποιείται και για την ενίσχυση του. Η ιδιότητα αυτή μερικές φορές ονομάζεται *κατανεμημένη ενίσχυση*, σε αντίθεση με την συγκεντρωμένη ενίσχυση που παρέχουν άλλοι ενισχυτές.

Το βασικό μειονέκτημα των ενισχυτών οπτικών ινών Raman όσον αφορά τις εφαρμογές των οπτικών συστημάτων, είναι ότι απαιτείται ένα laser υψηλής ισχύος για την άντληση. Τα πειράματα γύρω στα 1.55 μm συχνά χρησιμοποιούν συντονισμένα laser έγχρωμου-κέντρου για την άντληση. Τέτοια laser είναι πολύ ογκώδη για εφαρμογή στις επικοινωνίες. Πράγματι, με την άφιξη του ενισχυτή οπτικών ινών εμπλουτισμένου με έρβιο, οι ενισχυτές Raman χρησιμοποιούνται σπάνια στην περιοχή μήκους κύματος 1.55 μm .

Η κατάσταση μπορεί να αλλάξει με τη διάθεση των συμπαγών laser ημιαγωγών υψηλής-ισχύος. Σ' ένα ενδιαφέρον πείραμα του 1992, ένας ενισχυτής οπτικών ινών Raman υπέστη άντληση από έναν laser ημιαγωγού 1.55 μm , του οποίου η έξοδος ενισχύθηκε χρησιμοποιώντας έναν ενισχυτή οπτικών ινών εμπλουτισμένο με έρβιο.

Οι παλμοί άντλησης των 140ns είχαν μέγιστη ισχύ 1.4W με ρυθμό επανάληψης KHz και κατάφεραν να ενισχύσουν παλμούς σήματος των 1.66 μm κατά περισσότερο από 23dB μέσω SRS, χρησιμοποιώντας οπτική ίνα ολισθημένης διασποράς μήκους 20km. Η μέγιστη ισχύς 200mW των παλμών 1.66 μm ήταν αρκετά μεγάλη για τη χρήση τους για τις μετρήσεις οπτικών ανακλάσεων στο πεδίο του χρόνου, μία τεχνική που χρησιμοποιείται συνήθως για την παρακολούθηση και διατήρηση των δικτύων οπτικών ινών.

Η χρήση των ενισχυτών οπτικών ινών Raman στην περιοχή των 1.3 μm προσέκλυσε αρκετά την προσοχή κατά τη δεκαετία του 1990, απλά επειδή οι ιδιότητες των ενισχυτών εμπλουτισμένης οπτικής ίνας των 1.3 μm είναι συχνά κάθε άλλο παρά ικανοποιητικές. Σε μία προσέγγιση, τρία ζευγάρια φραγμάτων διάθλασης οπτικών ινών τοποθετούνται στο εσωτερικό της οπτικής ίνας που χρησιμοποιείται για ενίσχυση Raman. Τα μήκη κύματος Bragg των φραγμάτων αυτών επιλέχθηκαν έτσι ώστε να σχηματίζουν τρεις κοιλότητες για τρία laser Raman που λειτουργούν σε μήκη κύματος 1.117, 1.175 και 1.24 μm , τα οποία αντιστοιχούν στη γραμμή Stokes πρώτης, δεύτερης και τρίτης-τάξης άντλησης 1.06 μm . Και τα τρία laser αντλούνται χρησιμοποιώντας laser οπτικών ινών -Nd διόδου-άντλησης μέσω διαδοχικών SRS. Το laser των 1.24 μm τότε αντλεί τον ενισχυτή οπτικών ινών Raman για να δώσει ενίσχυση σήματος στην περιοχή των 1.3 μm . Η ίδια ιδέα των διαδοχικών SRS χρησιμοποιήθηκε για να πάρουμε απολαβή 39 dB σε 1.3 μm μέσω ζευκτών WDM στη θέση των φραγμάτων διάθλασης στις οπτικές ίνες. Σε μία άλλη προσέγγιση, ο πυρήνας της οπτικής ίνας πυριτίου εμπλουτίζεται έντονα με γερμάνιο. Μία τέτοια οπτική ίνα μπορεί να αντληθεί ώστε να παρέχει απολαβή 30dB ισχύος άντλησης μόλις 350mW. Τέτοια ισχύς άντλησης μπορεί να αποκτηθεί χρησιμοποιώντας δύο ή περισσότερους laser ημιαγωγών.

Οι ενισχυτές οπτικών ινών Raman 1.3 μm με διαδοχικούς SRS αναπτύχθηκαν έχοντας κατά νου πολλές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης και της χρήσης τους από τη βιομηχανία CATV. Μπορούν να παρουσιάσουν απολαβές μέχρι και 40dB με δείκτη

θορύβου περίπου 4dB και είναι αρκετά κατάλληλοι για οπτικούς προενισχυτές που χρησιμοποιούνται στους οπτικούς δέκτες υψηλής-ταχύτητας. Σ' ένα πείραμα του 1996, ένας τέτοιος δέκτης έδωσε ευαισθησία 151 φωτόνια/bit σε ρυθμό μετάδοσης bit 10Gb/s. Οι ενισχυτές οπτικών ινών Raman 1.3 μ m μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να αναβαθμίσουν την ικανότητα μετάδοσης των υπαρχόντων ζεύξεων οπτικών ινών από τα 2.5 στα 10Gb/s.

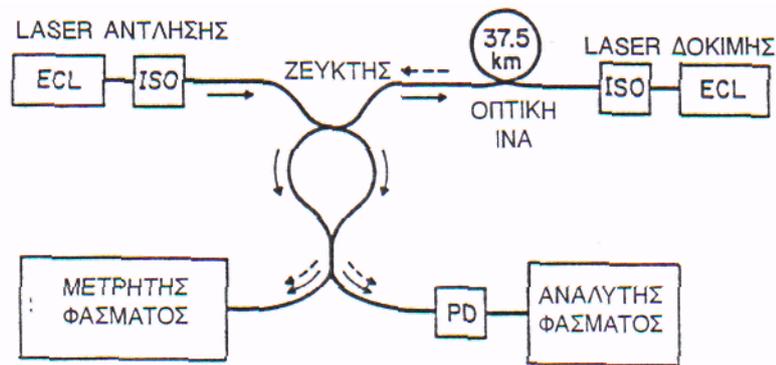
3.3 Ενισχυτές Ινών Brillouin

Η αρχή λειτουργίας των ενισχυτών οπτικών ινών Brillouin είναι ουσιαστικά η ίδια μ' εκείνη των ενισχυτών οπτικών ινών Raman, εκτός του ότι η οπτική απολαβή παρέχεται από την *διεγερμένη σκέδαση Brillouin* (SBS) αντί του SRS. Οι ενισχυτές οπτικών ινών Brillouin υφίστανται επίσης οπτική άντληση κι ένα μέρος της ισχύος άντλησης μεταφέρεται στο σήμα μέσω του SBS. Από φυσική άποψη, κάθε φωτόνιο ενέργειας άντλησης ω_p χρησιμοποιεί την περισσότερη ενέργεια του για να δημιουργήσει ένα φωτόνιο ενέργειας σήματος ω_s , ενώ η υπόλοιπη ενέργεια χρησιμοποιείται για να διεγείρει ένα *ακουστικό φωνόνιο*.

Κλασικά, η δέσμη άντλησης διασκορπίζεται από ένα ακουστικό κύμα που μετακινείται με τη βοήθεια του μέσου και με την ταχύτητα του ήχου. Παρά την τυπική ομοιότητα μεταξύ των SBS και SRS, ο SBS διαφέρει από τον SRS σε τρία βασικά σημεία, τα οποία επηρεάζουν σημαντικά τη λειτουργία των ενισχυτών οπτικών ινών Brillouin: (1) η ενίσχυση εμφανίζεται μόνο όταν η δέσμη σήματος διαδίδεται σε κατεύθυνση αντίθετη προς εκείνη της δέσμης άντλησης (διάταξη ανάστροφης-άντλησης), (2) η ολίσθηση Stokes για τον SBS είναι μικρότερη (~10GHz) κατά τρεις τάξεις μεγέθους σε σύγκριση με εκείνη του SRS κι εξαρτάται από τη συχνότητα άντλησης, και (3) το φάσμα απολαβής Brillouin είναι υπερβολικά στενό, με εύρος ζώνης <100MHz. Οι διαφορές αυτές οφείλονται σε μία σχετικά μικρή τιμή του λόγου v_A/c (~ 10^5), όπου v_A είναι η ακουστική ταχύτητα στο πυρίτιο και c είναι η ταχύτητα του φωτός. Το στενό εύρος ζώνης των ενισχυτών οπτικών ινών Brillouin τους καθιστά ακατάλληλους για την ενίσχυση των οπτικών καναλιών στα οπτικά συστήματα. Το ίδιο χαρακτηριστικό μπορεί, ωστόσο, να χρησιμοποιηθεί για ορισμένες νέες εφαρμογές στα σύμφωνα και πολύ-καναλικά συστήματα επικοινωνίας. Στην ενότητα αυτή περιγράφουμε τους ενισχυτές οπτικών ινών Brillouin με έμφαση στις εφαρμογές των οπτικών συστημάτων επικοινωνίας.

3.3.1 Απόδοση του Ενισχυτή

Παρόλο που ο SBS στις οπτικές ίνες παρατηρήθηκε το 1972 κι αργότερα μελετήθηκε σαν μη-γραμμικό φαινόμενο που περιορίζει την ισχύ του σήματος στα συστήματα επικοινωνίας οπτικών ινών, η χρήση του για την κατασκευή ενισχυτών οπτικών ινών Brillouin δεν προσέλκυσε αρκετή προσοχή λόγω του στενού εύρους ζώνης της απολαβής που σχετίζεται με τους ενισχυτές αυτού του είδους. Αφού οι συχνότητες άντλησης και σήματος θα πρέπει να διαφέρουν σχεδόν πλήρως από την ολίσθηση Brillouin (περίπου 11GHz στα 1.55 μ m), που αλλάζει από οπτική ίνα σε οπτική ίνα, απαιτείται ένα συντονισμένο laser άντλησης με στενό εύρος γραμμής (~1MHz). Σ' ένα πείραμα, δύο laser ημιαγωγού εξωτερικής κοιλότητας (εύρος γραμμής <10kHz) χρησιμοποιήθηκαν σαν laser άντλησης και σήματος. Και τα δύο laser λειτούργησαν συνεχώς και συντονίστηκαν σε μεγάλη περιοχή συχνοτήτων κοντά στα 1.5 μ m. Το Σχήμα 3.3 παρουσιάζει σχηματικά την πειραματική διάταξη. Η δέσμη άντλησης συζεύχτηκε σε μια οπτική ίνα μήκους 37.5km μέσω ενός ζεύκτη 3dB.



Σχήμα 3.3 Ενισχυτής οπτικών ινών Brillouin. Τα ECL, ISO και PD είναι αντίστοιχα το laser ημιαγωγού εξωτερικής κοιλότητας, ο οπτικός απομονωτής και ο φωτοανιχνευτής. Τα συνεχή και διακεκομμένα βέλη δείχνουν την οπτική διέλευση των δεσμών άντλησης και σήματος, αντίστοιχα. (©1986 IEE. Ανατύπωση κατόπιν αδείας.)

Οι ενισχυτές οπτικών ινών Brillouin μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν προενισχυτές για να βελτιώσουν την ευαισθησία του δέκτη. Σ' ένα πείραμα του 1987, η ευαισθησία του δέκτη βελτιώθηκε κατά 16dB όταν μεταδόθηκε σήμα 90Mb/s μέσω οπτικής ίνας 30km κι ενισχύθηκε ταυτόχρονα διοχετεύοντας 2.9mW ισχύος άντλησης στο άκρο του δέκτη. Η βελτίωση της ευαισθησίας ταιριάζει σχεδόν με την απολαβή του ενισχυτή της τάξης των 16.5dB, πράγμα που σημαίνει πως έχουμε μικρή καταστολή από τον θόρυβο του ενισχυτή. Αυτή η απόδοση επιτεύχθηκε λόγω του ότι η ισχύς του σήματος στο εσωτερικό της οπτικής ίνας ήταν αρκετά μεγαλύτερη από τον θόρυβο που δημιουργήθηκε λόγω της αυθόρμητης σκέδασης Brillouin.

Ο δείκτης θορύβου των ενισχυτών οπτικών ινών Brillouin είναι αρκετά μεγαλύτερος (>15dB) λόγω του μεγάλου πληθυσμού των ακουστικών φωνονίων σε θερμοκρασία δωματίου και περιορίζει τη χρησιμότητά τους σαν προενισχυτές. Η χρήση τους σαν ενισχυτές ισχύος ή σαν ενισχυτές σε σειρά επίσης περιορίζεται λόγω του στενού εύρους ζώνης και της μικρής ισχύος κόρου.

Το στενό εύρος ζώνης των ενισχυτών οπτικών ινών Brillouin μπορεί να χρησιμοποιηθεί προς όφελος των σύμφωνων και πολυκαναλικών οπτικών συστημάτων. Στην περίπτωση των σύμφωνων συστημάτων επικοινωνίας, μπορούμε να διεξάγουμε ομόδونه ανίχνευση χωρίς να απαιτεί τοπικό ταλαντωτή κλειδώματος-φάσης στον δέκτη. Η βασική ιδέα είναι η επιλεκτική ενίσχυση του οπτικού φέροντος, ενώ δεν ενισχύει τη διαμόρφωση των πλευρικών ζωνών συχνοτήτων. Το ενισχυμένο φέρον λειτουργεί σαν τοπικός ενισχυτής, του οποίου η φάση ασφαρίζεται αυτόματα στη φάση του μεταδιδόμενου φέροντος. Για τον σκοπό αυτό η ενίσχυση Brillouin είναι ιδανική λόγω του στενού εύρους ζώνης. Η τεχνική θα πρέπει να έχει πολύ καλή απόδοση σε ρυθμούς μετάδοσης $\text{bit} > 100 \text{ Mb/s}$ λόγω του ότι η διαμόρφωση των πλευρικών ζωνών συχνοτήτων βρίσκεται εκτός του εύρους ζώνης του ενισχυτή και το οπτικό φέρον μπορεί να ενισχυθεί επιλεκτικά. Σε μία επίδειξη της τεχνικής αυτής, το φέρον ενισχύθηκε κατά 30dB περισσότερο από τη διαμόρφωση των πλευρικών ζωνών συχνοτήτων σε ρυθμούς μετάδοσης bit μόλις 80 Mb/s.

Κάτω από ιδανικές συνθήκες, η αναμενόμενη βελτίωση της ευαισθησίας του δέκτη είναι περίπου $\sqrt{G_A}$, όπου G_A είναι ο συντελεστής ενίσχυσης. Επομένως, φαίνεται εφικτή η βελτίωση της ευαισθησίας μέχρι και 15dB με την κατάλληλη σχεδίαση. Ο περιοριστικός παράγοντας είναι η μη-γραμμική ολίσθηση φάσης που επάγεται από την άντληση στο σήμα (ένα είδος διαμόρφωσης διασταυρούμενης φάσης) όταν η συχνότητα άντλησης και η φέρουσα συχνότητα δεν ταιριάζουν επακριβώς με την ολίσθηση Brillouin. Οι υπολογισμοί δείχνουν ότι η απόκλιση από την ολίσθηση Brillouin θα πρέπει να είναι <100kHz για

σταθερότητα φάσης ίση με 0.1rad . Η μη γραμμική ολίσθηση φάσης μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητη διαμόρφωση πλάτους ενός σήματος διαμορφωμένου κατά συχνότητα. Μία άλλη εφαρμογή των ενισχυτών στενού εύρους ζώνης είναι η επιλογή του καναλιού σ' ένα πολυκαναλικό σύστημα επικοινωνίας. Ένα κανάλι μπορεί να ενισχυθεί επιλεκτικά μέσω της ενίσχυσης Brillouin εκτοξεύοντας μία δέσμη άντλησης στο άκρο του δέκτη, έτσι ώστε να μεταδίδεται στο εσωτερικό της οπτικής ίνας σε κατεύθυνση αντίθετη προς εκείνη του πολυκαναλικού οπτικού σήματος. Η συχνότητα άντλησης ρυθμίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι μεγαλύτερη από εκείνη του επιλεγόμενου καναλιού κατά την ολίσθηση Brillouin ακριβώς. Διαφορετικά κανάλια μπορούν να ενισχυθούν επιλεκτικά συντονίζοντας το laser άντλησης. Το κύριο μειονέκτημα αυτής της τεχνικής επιλογής-καναλιού είναι ότι ο ρυθμός μετάδοσης bit περιορίζεται περίπου στα 100Mb/s , αφού το φάσμα του καναλιού θα πρέπει να βρίσκεται μέσα στο εύρος ζώνης του φάσματος απολαβής Brillouin. Μπορεί να αυξηθεί διευρύνοντας το φάσμα άντλησης, αφού τότε αυξάνεται το εύρος ζώνης της απολαβής, παρόλο που μειώνεται η μέγιστη απολαβή. Οι δυνατότητες αυτής της τεχνικής επιλογής-καναλιού παρουσιάστηκε σε ένα πείραμα όπου ένα δίκτυο WDM 128 καναλιών λειτούργησε χρησιμοποιώντας έναν συζεύκτη αστέρα 8×8 σε σειρά. Ένα συγκεκριμένο κανάλι που λειτουργεί στα 150Mb/s μπορεί να επιλεγεί με διαχωρισμό καναλιών μόλις 1.5GHz . Επίσης, είναι δυνατό να ενισχύσουμε και να αποδιαμορφώσουμε ταυτόχρονα το σήμα FSK σε ρυθμούς μετάδοσης bit μέχρι και 250Mb/s χρησιμοποιώντας ενισχυτές οπτικών ινών Brillouin. Σε μία παρόμοια προσέγγιση, ένας ενισχυτής οπτικών ινών Brillouin μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ενισχύσουμε επιλεκτικά πολλά κανάλια πολυπλεγμένων-υποφερόντων (SCM) που μεταφέρονται από ένα απλό οπτικό φέρον στο εσωτερικό του σήματος WDM. Σε μία άλλη εφαρμογή, η ενίσχυση Brillouin στο εσωτερικό της οπτικής ίνας μετάδοσης χρησιμοποιείται για να ενισχύσει ένα σήμα ελέγχου ανάστροφης-διάδοσης. Η τεχνική αυτή είναι μοναδική με την έννοια ότι ένα κανάλι δεδομένων 2.5Gb/s , κι όχι μία δέσμη CW, χρησιμοποιήθηκε για να αντλήσει ένα κανάλι ελέγχου 5kb/s .

3.4 Ενισχυτές Οπτικών Ινών με προσμίξεις

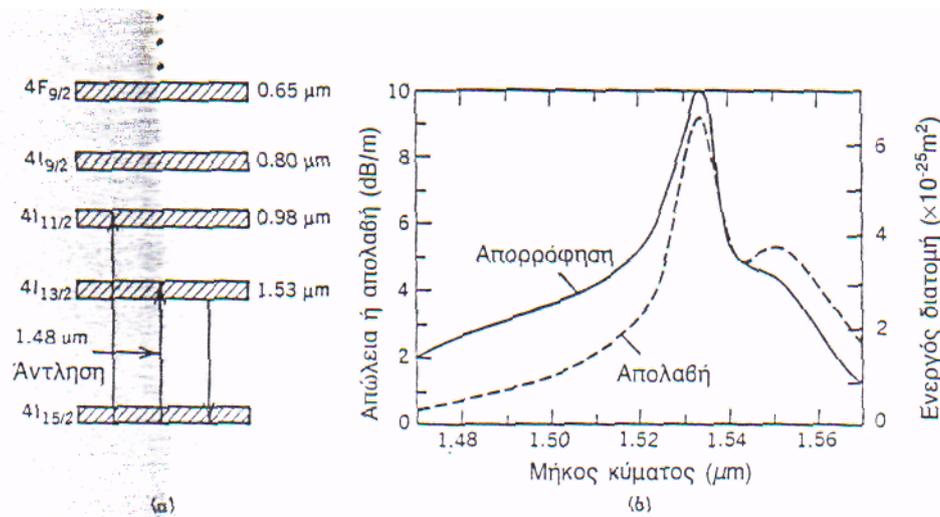
Μία σημαντική τάξη ενισχυτών οπτικών ινών χρησιμοποιεί *στοιχεία σπανίων-γαιών* σαν μέσο απολαβής εμπλουτίζοντας τον πυρήνα της οπτικής ίνας κατά τη διαδικασία κατασκευής. Παρόλο που οι ενισχυτές εμπλουτισμένων οπτικών ινών μελετήθηκαν ήδη από το 1964, η χρήση τους εφαρμόστηκε 25 χρόνια αργότερα, αφού τελειοποιήθηκαν οι τεχνικές κατασκευής και χαρακτηρισμού εμπλουτισμένων οπτικών ινών χαμηλής απώλειας. Τα χαρακτηριστικά των ενισχυτών όπως το λειτουργικό μήκος κύματος και το εύρος ζώνης της απολαβής καθορίζονται από τα στοιχεία πρόσμειξης παρά από την οπτική ίνα πυριτίου, που παίζει τον ρόλο του μέσου-ξενιστή. Πολλά διαφορετικά ιόντα σπανίων γαιών, όπως το έρβιο, το όλμιο, το νεοδύμιο, το σαμάριο, το ούλιο και το υτέρβιο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δημιουργήσουμε ενισχυτές οπτικών ινών που λειτουργούν σε διαφορετικά μήκη κύματος, καλύπτοντας μία μεγάλη περιοχή από τα $0.5\text{-}3.5\mu\text{m}$.

Οι ενισχυτές οπτικών ινών εμπλουτισμένων με έρβιο (EDFA) προσέλκυσαν τη μεγαλύτερη προσοχή απλώς επειδή λειτουργούν γύρω στα $1.55\mu\text{m}$, η περιοχή μήκους κύματος στην οποία έχουμε ελάχιστη απώλεια οπτικών ινών. Η ανάπτυξη τους έφερε επανάσταση στη σχεδίαση των οπτικών συστημάτων. Οι EDFA χρησιμοποιήθηκαν για μετάδοση εικόνας από το 1992. Τα υπερατλαντικά και υπερείρηνα καλώδια οπτικών ινών, που χρησιμοποιούν EDFA σαν ενισχυτές σε σειρά λειτουργώντας στα 5Gb/s , τέθηκαν σε λειτουργία το 1996. Οι EDFA επίσης χρησιμοποιούνταν συχνά για υπέργεια συστήματα WDM. Η ενότητα αυτή αφιερώνεται στα λειτουργικά τους χαρακτηριστικά, με έμφαση στις δυνατότητες εφαρμογών.

3.4.1 Απαιτήσεις Άντλησης

Τα χαρακτηριστικά απολαβής των EDFA εξαρτώνται από την τεχνική άντλησης καθώς και από άλλες προσμείξεις, όπως γερμάνιο και αλουμίνιο, που βρίσκονται στο εσωτερικό του πυρήνα της οπτικής ίνας. Η άμορφη φύση του πυριτίου διευρύνει τις ενεργειακές στάθμες των ιόντων του ερβίου (Er^{3+}) στις ζώνες. Το Σχήμα 3.8(α) παρουσιάζει μερικές ενεργειακές στάθμες του Er^{3+} στο γυαλί πυριτίου. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πολλές μετακινήσεις για να αντλήσουμε τους EDFA. Πρώιμα πειράματα χρησιμοποίησαν για άντληση την ορατή ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα laser υψηλής-ισχύος, όπως ιόν-αργόν, Nd:YAG και έγχρωμα laser παρόλο που τέτοιου είδους τεχνικές άντλησης έχουν σχετικά περιορισμένη απόδοση. Από πρακτική άποψη, προτιμάται η χρήση ενός laser ημιαγωγού.

Η ικανοποιητική άντληση των EDFA είναι δυνατή χρησιμοποιώντας laser ημιαγωγών που λειτουργούν σε μήκος κύματος 0.98 και 1.48 μm . Πράγματι, η ανάπτυξη των laser αυτών ωθήθηκε από την ανάγκη για laser με την κατάλληλη ικανότητα άντλησης των EDFA. Μπορούμε να πάρουμε υψηλές απολαβές ενισχυτή μεταξύ 30-40dB με μόλις 10-20mW απορροφημένης ισχύος άντλησης, όταν οι EDFA αντλούνται χρησιμοποιώντας τέτοιου είδους laser ημιαγωγών. Επιτεύχθηκαν αποδόσεις μέχρι και 11dB/mW με άντληση 0.98 μm . Η μεταφορά της άντλησης $4I_{15/2} - 4I_{9/2}$ μπορεί να χρησιμοποιήσει laser GaAs υψηλής ισχύος για την άντληση των EDFA.



Σχήμα 3.4 (α) Το διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών των ιόντων-ερβίου στις οπτικές ίνες πυριτίου. (β) Τα φάσματα απορρόφησης κι απολαβής ενός EDFA του οποίου ο πυρήνας εμπλουτίστηκε από κοινού με γερμάνιο, για την αύξηση του δείκτη διάθλασης. (©1991 IEEE. Ανατύπωση κατόπιν αδειάς.)

Μπορούμε να επιτύχουμε απόδοση άντλησης περίπου 1dB/mW στα 820nm. Παρόλο που η απόδοση είναι μικρότερη από εκείνη των laser 0.98 μm κατά μία τάξη μεγέθους, μπορούμε να πάρουμε απολαβή 30dB με ισχύ άντλησης 40-50mW, στάθμες ισχύος που έχουμε ήδη επιτύχει με τους laser ημιαγωγών. Η ισχύς άντλησης μπορεί να μειωθεί χρησιμοποιώντας ίνες πυριτίου εμπλουτισμένες με αλουμίνιο και φώσφορο ή χρησιμοποιώντας φθόριο-φωσφορικές ίνες. Με τη διάθεση των ορατών laser ημιαγωγών, οι EDFA μπορούν επίσης να αντληθούν σε μήκος κύματος μεταξύ 0.6-0.7 μm . Σ' ένα πείραμα, πραγματοποιήθηκε απολαβή 33dB σε 27mW ισχύ άντλησης, που πήραμε από ένα laser AlGaInP που λειτουργεί στα 670nm. Η απόδοση άντλησης έφτασε τα 3dB/mW σε χαμηλή ισχύ άντλησης.

Τα EDFA μπορούν να σχεδιαστούν για να λειτουργούν με τέτοιο τρόπο ώστε οι δέσμες άντλησης και σήματος να διαδίδονται σε αντίθετες κατευθύνσεις, διάταξη που ονομάζεται *ανάστροφη-άντληση* για να την ξεχωρίζουμε από τη μορφοποίηση ορθής-άντλησης, στην οποία και οι δύο δέσμες διαδίδονται προς την ίδια κατεύθυνση.

Η απόδοση είναι σχεδόν η ίδια καν στις δύο διατάξεις άντλησης, όταν η ισχύς σήματος είναι αρκετά μικρή ώστε ο ενισχυτής να παραμείνει ακόρεστος. Στην περιοχή κόρου, η απόδοση μετατροπής-ισχύος είναι γενικά καλύτερη στη διάταξη ανάστροφης-άντλησης, κυρίως λόγω του σημαντικού ρόλου που παίζει η ενισχυμένη αυθόρμητη εκπομπή. Στη διάταξη αμφίδρομης άντλησης, ο ενισχυτής υφίσταται άντληση και προς τις δύο κατευθύνσεις ταυτόχρονα, χρησιμοποιώντας δύο laser ημιαγωγών τοποθετημένα στα δύο άκρα της οπτικής ίνας. Η διάταξη αυτή απαιτεί δύο laser άντλησης αλλά έχει το πλεονέκτημα ότι η πληθυσμιακή αντιστροφή και επομένως και η απολαβή μικρού σήματος είναι σχετικά ομοιόμορφη σε όλο το μήκος της οπτικής ίνας.

3.4.2 Φάσμα Απολαβής

Το φάσμα της απολαβής των EDFA επηρεάζεται σημαντικά από την άμορφη φύση του πυριτίου και από την παρουσία άλλων προσμείξεων στο εσωτερικό του πυρήνα της οπτικής ίνας, όπως γερμάνιο και αλουμίνιο. Μόνο το προφίλ απολαβής των ιόντων ερβίου (μεμονωμένα) διευρύνεται ομοιογενώς και το εύρος ζώνης του καθορίζεται από τον χρόνο διπολικής χαλάρωσης T_2 σύμφωνα με την Εξίσωση (2.1.1). Ωστόσο, διευρύνεται σημαντικά με την παρουσία γυαλιού πυριτίου. Οι παραμορφώσεις στη δομή οδηγούν σε ανομοιογενή διεύρυνση του προφίλ απολαβής, ενώ ο *διαχωρισμός Stark* των διαφόρων ενεργειακών σταθμών ευθύνεται για την ομοιογενή διεύρυνση. Από μαθηματική άποψη, η απολαβή $g(\omega)$ της Εξίσωσης (2.1.1) θα πρέπει να δώσει τον μέσο όρο της με τη κατανομή των συχνοτήτων ατομικής μετάβασης ω_0 έτσι ώστε

$$g_e f(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} (\omega_j \omega_o) F(\omega_o) d\omega_o \quad (3.4.1)$$

όπου $f(\omega_0)$ είναι η συνάρτηση κατανομής, η μορφή της οποίας εξαρτάται από την παρουσία των επιπλέον προσμείξεων στο εσωτερικό του πυρήνα της οπτικής ίνας. Το Σχήμα 3.4(β) παρουσιάζει τα φάσματα απολαβής και απορρόφησης ενός EDFA του οποίου ο πυρήνας έχει εμπλουτιστεί με γερμάνιο. Το φάσμα απολαβής είναι αρκετά ευρύ (FWHM > 10nm), με δομή διπλής κορυφής. Η πρόσθεση αλουμινίου στον πυρήνα διευρύνει ακόμη περισσότερο το φάσμα απολαβής. Έχουν καταβληθεί προσπάθειες να απομονωθούν οι συνεισφορές της ομοιογενούς κι ανομοιογενούς διεύρυνσης με μετρήσεις της *φασματικής οπής*, Για τους EDFA εμπλουτισμένους με γερμάνιο οι σχετικές συμβολές της ομοιογενούς κι ανομοιογενούς διεύρυνσης έχει βρεθεί ότι είναι 4 και 8 nm, αντίστοιχα. Αντίθετα, το φάσμα απολαβής του γυαλιού αλουμινίου-πυριτίου μάλλον δεν έχει την ίδια συνεισφορά με τους μηχανισμούς ομοιογενούς κι ανομοιογενούς διεύρυνσης. Το εύρος ζώνης της απολαβής ενός τέτοιου EDFA τυπικά υπερβαίνει τα 30nm.

Το φάσμα απολαβής EDFA μπορεί να αλλάζει από ενισχυτή σε ενισχυτή ακόμη και όταν η σύνθεση του πυρήνα είναι η ίδια, επειδή αυτό εξαρτάται και από το μήκος του ενισχυτή. Ο λόγος είναι ότι η απολαβή εξαρτάται από τις ενεργές διατομές της απορρόφησης και μετάδοσης, οι οποίες έχουν διαφορετικά φασματικά χαρακτηριστικά. Η τοπική αντιστροφή ή απολαβή μεταβάλλεται κατά μήκος της οπτικής ίνας λόγω των διακυμάνσεων της ισχύος άντλησης. Η ολική απολαβή βρίσκεται αν

ολοκληρώσουμε σε όλο το μήκος του ενισχυτή. Το χαρακτηριστικό αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να πάρουμε ένα σχετικά σταθερό (επίπεδο) φάσμα απολαβής βελτιώνοντας το μήκος της οπτικής ίνας.

3.4.3 Χαρακτηριστικά Απολαβής

Η απολαβή των EDFA εξαρτάται από έναν μεγάλο αριθμό παραμέτρων του εξαρτήματος, όπως για παράδειγμα την συγκέντρωση ιόντων ερβίου, το μήκος του ενισχυτή, την ακτίνα του πυρήνα και την ισχύ άντλησης. Έχει καταβληθεί σημαντική προσπάθεια να κατανοηθούν τα χαρακτηριστικά απολαβής μέσω μίας θεωρητικής προσέγγισης. Συνήθως χρησιμοποιείται σαν πρότυπο μία εξίσωση ρυθμού τριών επιπέδων, όπως και για ορισμένα laser (π.χ. ένα laser Ruby), η οποία μπορεί να προσαρμοστεί και στα EDFA κάθε μήκους κύματος άντλησης, αφού σε κάθε περίπτωση η διεγερμένη μετάδοση σταματά στη βασική κατάσταση [βλέπε σχήμα 3.4(α)].

Μερικές φορές είναι απαραίτητο να προσθέσουμε μια τέταρτη στάθμη για να συμπεριλάβουμε την απορρόφηση διεγερμένης-κατάστασης. Γενικά, οι εξισώσεις που προκύπτουν θα πρέπει να λυθούν αριθμητικά. Αν πάρουμε ένα πρότυπο δύο επιπέδων, που ισχύει όταν αγνοούμε την ενισχυμένη αυθόρμητη εκπομπή και την απορρόφηση διεγερμένης-κατάστασης, μπορούμε να κατανοήσουμε καλύτερα κάποια στοιχεία. Το πρότυπο υποθέτει ότι η στάθμη άντλησης 3 του συστήματος τριών επιπέδων παραμένει σχεδόν άδεια λόγω της γρήγορης μετάβασης του πληθυσμού που υπέστη άντληση στην κατάσταση διέγερσης 2. Αν N_2 είναι ο πληθυσμός της διεγερμένης κατάστασης, τότε ικανοποιεί την εξίσωση ρυθμού

$$\frac{\partial N_2}{\partial T} = W_p N_j - W_s (N_2 - N_1) - \frac{N_2}{T_1}$$

(3.4.2)

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

$$W_p = \sigma_p P_p / a_p h \nu_p$$

(3.4.3)

μαζί με μία παρόμοια έκφραση για το W_s . Εδώ σ_p είναι η ενεργός διατομή της μετάβασης με συχνότητα άντλησης ν_p , a_p είναι η ενεργός διατομή του τρόπου διάδοσης της άντλησης στο εσωτερικό της οπτικής ίνας και P_p είναι η ισχύς άντλησης. Η λύση, μόνιμης-κατάστασης της Εξίσωσης (3.4.2) δίνεται από τη σχέση:

(3.4.4)

$$N_2 = \frac{(P_p + P_s) N_t}{1 + 2P_s + P_p}$$

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

$$P'_p = \frac{a_p h \nu_p}{\sigma_p \Pi}, P'_g = \frac{a_g h \nu_g}{\sigma_g \Pi} \quad (3.4.5)$$

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

$$\frac{dP'_g}{dz} = \sigma_g (N_2 - N_1) - aP'_s, \frac{dP'_s}{dz} = \sigma_p N_1 - \alpha' P'_p \quad (3.4.6)$$

όπου $a_s = \sigma_s N t$ και $a_p = \sigma_p N t$ δίνουν την απορρόφηση της επαγομένης-πρόσμειξης, ενώ τα a και α' την απώλεια στις οπτικές ίνες, στα μήκη κύματος του σήματος και της άντλησης, αντίστοιχα. Η απώλεια στις οπτικές ίνες πυριτίου μπορεί να αγνοηθεί για τυπικά μήκη ενισχυτών της τάξης των 10-20m. Ωστόσο, θα πρέπει να την συμπεριλάβουμε στην περίπτωση της κατανεμημένης ενίσχυσης. Αν αντικαταστήσουμε με τα $N_1 = N t - N_2$ και N_2 από την Εξίσωση (3.4.4), οι ισχύς σήματος και άντλησης βλέπουμε ότι ικανοποιούν τις σχέσεις:

$$\frac{dP'_s}{dz} = \frac{(P'_p - 1) a_g P'_s}{1 + 2 P'_g + P'_p} - a P'_g \quad (3.4.7)$$

$$\frac{dP'_p}{dz} = - \frac{(P'_g + 1) a_p P'_p}{1 + 2 P'_p + P'_p} - \alpha' P'_p \quad (3.4.8)$$

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

Ένα μειονέκτημα που παρουσιάζει το προηγούμενο πρότυπο είναι ότι οι ενεργές διατομές απορρόφησης και μετάδοσης θεωρούνται ίδιες και για τη δέσμη άντλησης και

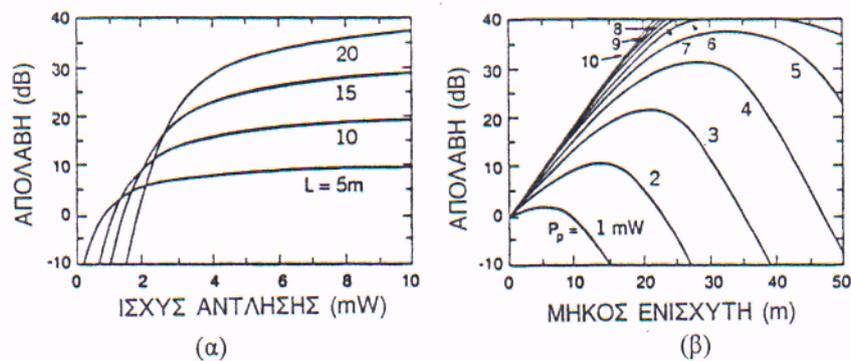
για τη δέσμη σήματος. Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 3.4(β), οι ενεργές αυτές διατομές γενικά διαφέρουν. Εύκολα μπορούμε να επεκτείνουμε το πρότυπο ώστε να συμπεριλάβουμε το χαρακτηριστικό αυτό. Το Σχήμα 3.5 δείχνει την υπολογισμένη απολαβή μικρού-σήματος στα $1.55\mu\text{m}$ σαν συνάρτηση της ισχύος άντλησης και του μήκους του ενισχυτή χρησιμοποιώντας τις τυπικές τιμές των παραμέτρων. Για δεδομένο μήκος του ενισχυτή L , η απολαβή του ενισχυτή αρχικά αυξάνεται εκθετικά με την ισχύ άντλησης, αλλά η αύξηση αυτή γίνεται μικρότερη όταν η ισχύς άντλησης υπερβαίνει μία συγκεκριμένη τιμή [αντίστοιχη με το "γόνατο" στο Σχήμα 3.5(α)]. Για δεδομένη ισχύ άντλησης, η απολαβή του ενισχυτή γίνεται μέγιστη στη βέλτιστη τιμή του L και πέφτει απότομα όταν το L υπερβαίνει τη βέλτιστη αυτή τιμή. Ο λόγος είναι ότι το τελευταίο τμήμα του ενισχυτή δεν υφίσταται άντληση και απορροφά το ενισχυμένο σήμα.

Αφού η βέλτιστη τιμή του L εξαρτάται από την ισχύ άντλησης P_p , είναι απαραίτητο να επιλέξουμε κατάλληλα τόσο το L , όσο και την P_p . Το Σχήμα 3.5(β) δείχνει ότι για άντληση $1.48\mu\text{m}$ μπορούμε να πάρουμε απολαβή 35dB με ισχύ άντλησης 5mW για $L=30\text{m}$. Μπορούμε να σχεδιάσουμε ενισχυτές έτσι ώστε να πάρουμε υψηλή απολαβή για μήκος ενισχυτή μόλις μερικά μέτρα.

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.5 παρατηρήθηκαν σε όλους τους EDFA. Η συμφωνία μεταξύ της θεωρίας και του πειράματος είναι γενικά αρκετά καλή.

Γενικά, η ισχύς κόρου της εξόδου είναι μικρότερη από την ισχύ άντλησης της εξόδου που περιμένουμε όταν δεν έχουμε σήμα. Μπορεί να ποικίλει πολύ ανάλογα με τον σχεδιασμό του EDFA, με τυπικές τιμές $\sim 10\text{mW}$. Γι' αυτόν τον λόγο, οι στάθμες της ισχύος εξόδου γενικά περιορίζονται σε τιμές κάτω των 100mW , παρόλο που έχουμε πάρει ισχύ μέχρι και 250mW με την κατάλληλη σχεδίαση.

Η παραπάνω ανάλυση υποθέτει πως και το κύμα άντλησης και το κύμα σήματος έχουν τη μορφή δέσμης CW. Στην πράξη, οι EDFA αντλούνται χρησιμοποιώντας laser ημιαγωγού CW, αλλά το σήμα έχει τη μορφή μιας σειράς παλμών (που περιέχουν μία αυθόρμητη ακολουθία bit 1 και 0), και η διάρκεια των μεμονωμένων παλμών είναι αντιστρόφως ανάλογη προς τον ρυθμό μετάδοσης bit. Όλοι οι παλμοί θα πρέπει να έχουν την ίδια απολαβή. Ευτυχώς, αυτό εμφανίζεται με φυσιολογικό τρόπο στους EDFA για παλμούς μικρότερους από μερικά microseconds. Ο λόγος είναι η σχετικά μεγάλη τιμή του χρόνου



Σχήμα 3.5 Η απολαβή μικρού σήματος σε συνάρτηση με (α) την ισχύ άντλησης και (β) το μήκος του ενισχυτή για ένα EDFA που υποθέτουμε ότι αντλείται στα 1.48μm. (©1991 IEEE. Ανατύπωση κατόπιν αδειάς).

φθορισμού, που σχετίζεται με τα διεγερμένα ιόντα ερβίου ($T_1 \sim 10\text{ms}$). Όταν η χρονική κλίμακα των μεταβολών ισχύος-σήματος είναι πολύ μικρότερη από τον T_1 , τα ιόντα-ερβίου είναι ανίκανα να ακολουθήσουν τόσο γρήγορες μεταβολές. Αφού οι ενέργειες απλού-παλμού είναι τυπικά πολύ μικρότερες από την ενέργεια κόρου ($\sim 10\mu\text{J}$), οι EDFA αντιστοιχούν στη μέση ισχύ. Σαν συνέπεια, ο κόρος της απολαβής διέπεται από τη μέση ισχύ σήματος και η απολαβή του ενισχυτή δεν μεταβάλλεται από παλμό σε παλμό.

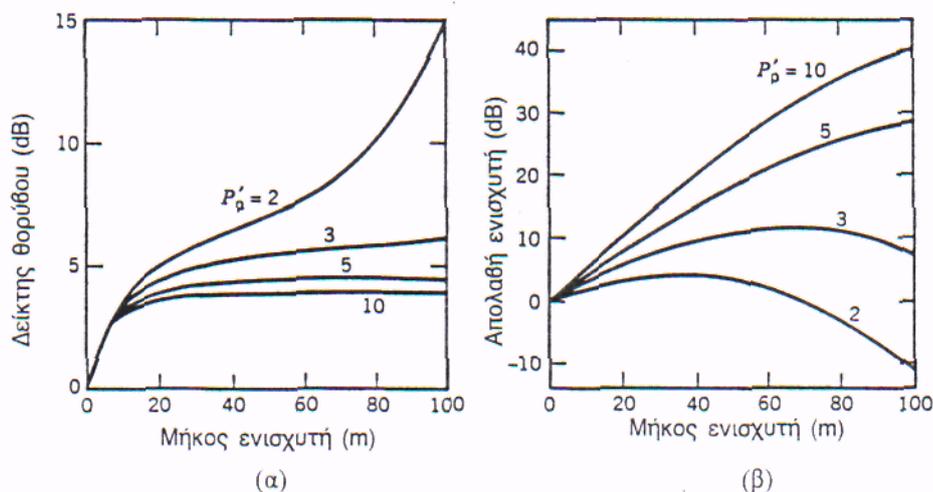
Σε μερικές εφαρμογές, όπως τα δίκτυα μεταγωγής πακέτων, η ισχύς σήματος μπορεί να μεταβάλλεται σε χρονική κλίμακα συγκρίσιμη με τον T_1 . Η απολαβή του ενισχυτή στην περίπτωση αυτή πιθανότατα εξαρτάται από τον χρόνο, χαρακτηριστικό ανεπιθύμητο όσον αφορά στην απόδοση του συστήματος.

Μπορούμε να υλοποιήσουμε έναν ενσωματωμένο-μηχανισμό ελέγχου απολαβής, που διατηρεί την απολαβή του ενισχυτή σε σταθερή τιμή. Η βασική ιδέα είναι να κάνουμε τον EDFA να ταλαντώνεται σε ελεγχόμενο μήκος κύματος έξω από τα όρια που μας ενδιαφέρουν (τυπικά κάτω από $1.5\mu\text{m}$). Αφού η απολαβή παραμένει σταθερή στην τιμή κατωφλίου για ένα laser, το σήμα ενισχύεται με τον ίδιο συντελεστή, παρά τις μεταβολές της ισχύος του.

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

3.4.4 Θόρυβος Ενισχυτή

Ο θόρυβος του ενισχυτή είναι ο τελευταίος περιοριστικός παράγοντας στην εφαρμογή των συστημάτων. Όπως σχολιάζεται στην Ενότητα 2.3, ο θόρυβος του ενισχυτή δίνεται ποσοτικά μέσω του δείκτη θορύβου F_n , που δίνεται από τον τύπο $F_n = 2n_{sp}$. Ο συντελεστής αυθόρμητης εκπομπής n_{sp} εξαρτάται από τους σχετικούς πληθυσμούς N_1 και N_2 και της βασικής κατάστασης και των διεγερμένων καταστάσεων ως εξής: $n_{sp} = N_2 / (N_2 - N_1)$. Αφού οι EDFA λειτουργούν βάση μιας τεχνικής άντλησης τριών-σταθμών, $N_1 \neq 0$ και $n_{sp} > 1$. Επομένως, ο δείκτης θορύβου των EDFA υποθέτουμε ότι θα είναι μεγαλύτερος από την ιδανική τιμή των 3dB.



Σχήμα 3.6 (α) Ο δείκτης θορύβου και (β) η απολαβή ίου ενισχυτή σαν συνάρτηση του μήκους για διάφορα επίπεδα άντλησης. (©1990 IEE. Ανατύπωση κατόπιν αδείας.)

Ο συντελεστής αυθόρμητης εκπομπής για τους EDFA μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας το πρότυπο των εξισώσεων-ρυθμού τριών-επιπέδων που σχολιάζεται στην Ενότητα 3.4.3. Ωστόσο, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας το γεγονός ότι και ο N_1 και ο N_2 μεταβάλλονται κατά μήκος της οπτικής ίνας λόγω της εξάρτησης τους από την ισχύ άντλησης και σήματος [βλέπε Εξίσωση (3.4.4)].

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

Το Σχήμα 3.6(α) δείχνει τη μεταβολή του F_n με το μήκος του ενισχυτή για διάφορες τιμές του P_p/P_p^{sa} όταν ένα σήμα $1.53\mu\text{m}$ ενισχύεται ανάλογα με την ισχύ εισόδου 1mW . Η απολαβή του ενισχυτή κάτω από τις ίδιες συνθήκες παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.6(β). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μπορούμε να αποκτήσουμε δείκτη θορύβου γύρω στα 3dB για έναν ενισχυτή υψηλής απολαβής που αντλείται έτσι ώστε $P_p \gg P_p^{sa}$.

Τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν πως μπορούμε να πάρουμε F_n γύρω στα 3dB στους EDFA. Μετρήθηκε δείκτης θορύβου 3.2dB σε EDFA μήκους 30m που αντλήθηκε στα $0.98\mu\text{m}$ με μόλις 11mW ισχύ. Μία παρόμοια τιμή μετρήθηκε σ' ένα άλλο πείραμα με μόλις 5.8mW ισχύ άντλησης στα $0.98\mu\text{m}$. Γενικά, είναι δύσκολο να επιτύχουμε υψηλή απολαβή, χαμηλό θόρυβο και υψηλή απόδοση άντλησης ταυτόχρονα. Ο βασικός περιορισμός είναι η ενισχυμένη αυθόρμητη εκπομπή, που μεταδίδεται ανάστροφα, προς την κατεύθυνση της άντλησης και ελαττώνει την ισχύ άντλησης. Το πρόβλημα λύνεται με την ενσωμάτωση ενός εσωτερικού απομονωτή. Σε μία υλοποίηση, πραγματοποιήθηκε απολαβή 51dB με δείκτη θορύβου 3.1dB και με ισχύ άντλησης μόλις 48mW .

Οι μετρημένες τιμές του F_n είναι γενικά μεγαλύτερες για τους EDFA που αντλούνται στα $1.48\mu\text{m}$. Αποκτήσαμε δείκτη θορύβου 4.1dB για ένα EDFA μήκους 60m όταν αντλείται στα $1.48\mu\text{m}$ με ισχύ άντλησης 24mW . Ο λόγος για ένα μεγαλύτερο δείκτη θορύβου για τους EDFA άντλησης στα $1.48\mu\text{m}$ μπορεί να γίνει κατανοητός από το Σχήμα 3.8(α), που δείχνει ότι η στάθμη άντλησης και η διεγερμένη στάθμη βρίσκονται στην ίδια ζώνη συχνοτήτων για άντληση $1.48\mu\text{m}$. Είναι δύσκολο να επιτύχουμε πλήρη πληθυσμιακή αντιστροφή ($N_1 \approx 0$) κάτω από τέτοιες συνθήκες. Ωστόσο, είναι δυνατό να πάρουμε $F_n < 3.5\text{dB}$ για μήκος κύματος άντλησης γύρω στα $1.46\mu\text{m}$.

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

3.4.5 Πολυκαναλική Ενίσχυση

Ένα πλεονέκτημα των οπτικών ενισχυτών είναι ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ενισχύσουν αρκετά κανάλια επικοινωνίας ταυτόχρονα, αρκεί το εύρος ζώνης του

πολυκαναλικού σήματος να είναι μικρότερο από το εύρος ζώνης του ενισχυτή. Το εύρος ζώνης των EDFA είναι συγκρίσιμο μ' εκείνο των SLA (1-5THz) κι έτσι και οι δύο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πολυκαναλική επικοινωνία. Τα SLA υφίστανται διαφωνία των καναλιών που επάγεται από τη διαμόρφωση πυκνότητας της φέρουσας, που εμφανίζεται σε συχνότητα παλμικού κτύπου Ω των γειτονικών οπτικών φερόντων. Η διαφωνία αυτή δεν εμφανίζεται όταν $\Omega\tau_c$, όπου τ_c είναι η διάρκεια ζωής των φορέων. Στην περίπτωση των EDFA τον ρόλο του τ_c παίζει ο T_1 στην Εξίσωση (3.4.1). Αφού ο T_1 είναι πολύ μεγαλύτερος (περίπου 10ms) σε σύγκριση με τον τ_c (περίπου 0.5ns), η συνθήκη $\Omega T_1 \gg 1$ ικανοποιείται για απόσταση μεταξύ καναλιών μόλις 10kHz. Σαν συνέπεια, οι επιδράσεις διαμόρφωσης-απολαβής είναι αμελητέες όταν χρησιμοποιούμε τους EDFA για ενίσχυση ενός πολυκαναλικού σήματος. Η ιδιότητα αυτή τα καθιστά κατάλληλα για οπτικά συστήματα WDM.

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

Πειραματικά αποτελέσματα υποστηρίζουν το συμπέρασμα αυτό. Σ' ένα πείραμα παρατηρήθηκε αμελητέα καταστολή ισχύος όταν χρησιμοποιήθηκε ένας EDFA για να ενισχύσουμε δύο κανάλια στα 2Gb/s που απέχουν μεταξύ τους απόσταση 2nm, αρκεί οι ισχύς των καναλιών να ήταν αρκετά χαμηλές ώστε να αποφύγουμε τον κόρο της απολαβής.

Μία τρίτη πηγή διαφωνίας μεταξύ των καναλιών σχετίζεται με τη φασματική ανομοιομορφία της απολαβής του ενισχυτή στα EDFA. Παρόλο που το φάσμα της απολαβής ενός EDFA είναι σχετικά ευρύ, όπως βλέπουμε στο Σχήμα 3.4, η απολαβή είναι κάθε άλλο παρά ομοιόμορφη (ή επίπεδη) σε μεγάλη περιοχή μήκους κύματος. Σαν συνέπεια, ενισχύονται διαφορετικά κανάλια ενός σήματος WDM μέσω διαφορετικών ποσοτήτων. Το πρόβλημα αυτό γίνεται αρκετά έντονο στα συστήματα μετάδοσης σε μεγάλες αποστάσεις χρησιμοποιώντας μία αλυσίδα διαδοχικών EDFA. Επίσης οδηγεί σε παραμόρφωση στα δίκτυα CATV που μεταδίδουν πολλά κανάλια εικόνας μέσω της πολυπλεξίας των υποφερόντων. Η επαγωγική παραμόρφωση των EDFA έχει σαν αποτέλεσμα την μετατροπή ενός τετερισμένου σήματος από FM σε AM, λόγω της κεκλιμένης απολαβής ($dg/d\omega \neq 0$) στο λειτουργικό μήκος κύματος. Η κεκλιμένη απολαβή των EDFA, που χρησιμοποιείται για εφαρμογές CATV, μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με την κατάλληλη σχεδίαση.

3.4.6 Ενίσχυση υπερβολικά στενών παλμών

Το σχετικά μεγάλο εύρος ζώνης (~30nm) των EDFA δηλώνει ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ενισχύσουν οπτικούς παλμούς διάρκειας 1ps ή και ακόμη μικρότερους χωρίς παραμόρφωση. Σ' ένα πείραμα του 1990, οπτικοί παλμοί των 9ps ενισχύθηκαν κατά 30dB χωρίς σημαντικές μεταβολές της μορφής ή του εύρους του παλμού. Ο κόρος της απολαβής ήταν αμελητέος στους χαμηλούς ρυθμούς επανάληψης αλλά έγινε σημαντικός όταν ο ρυθμός επανάληψης πέρασε τα 100MHz. Ωστόσο, η ποσότητα του κόρου καθορίστηκε από τη μέση ισχύ, με αποτέλεσμα την ίδια απολαβή για όλους τους παλμούς. Αυτές οι ιδιότητες των EDFA είναι αρκετά χρήσιμες στα συστήματα επικοινωνίας σολιτονίων.

Η χρήση της πολυπλεξίας με διαίρεση χρόνου επιβάλλει τη χρήση παλμών femtosecond αφού ο ρυθμός μετάδοσης bit πλησιάζει το 1Tb/s. Σε αρκετά πειράματα, οι EDFA χρησιμοποιήθηκαν για να ενισχύσουν οπτικούς παλμούς της τάξης του femtosecond. Το φασματικό εύρος ζώνης τόσο στενών παλμών είναι αρκετά μεγάλο ώστε η διασπορά της απολαβής (φασματική ανομοιομορφία της απολαβής) να πρέπει να ληφθεί υπόψη. Είναι επίσης σημαντικό να συμπεριλάβουμε και την διεγερμένη

σκέδαση Raman στο εσωτερικό τον παλμού, φαινόμενο μέσω των οποίων οι συνιστώσες υψηλής-συχνότητας ενός πάρα πολύ στενού παλμού μπορούν να επιφέρουν άντληση των συνιστωσών χαμηλής-συχνότητας του ίδιου παλμού.

Η ενίσχυση των πολύ στενών παλμών επίσης επηρεάζεται από τη διασπορά ταχύτητας-ομαδής (GVD) και από την εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από την ένταση στις ίνες πυριτίου, λειτουργώντας σαν ξενιστής για τα ιόντα ερβίου, τα οποία παρέχουν απολαβή. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις δείχνουν ότι ο παλμός εισόδου μπορεί να ενισχυθεί και να συμπιεστεί ταυτόχρονα από ένα EDFA όταν η μέγιστη ισχύς του υπερβαίνει μία συγκεκριμένη τιμή.

Μπορεί επίσης να διαιρεθεί σε αρκετούς υποπαλμούς. Τα χαρακτηριστικά αυτά παρατηρήθηκαν πειραματικά. Από την άποψη των εφαρμογών των οπτικών συστημάτων, οι δυνατότητες των EDFA βρίσκονται στην ικανότητα τους να ενισχύουν παλμούς picosecond χωρίς παραμόρφωση.

3.4.7 Ενισχυτές οπτικών ινών εμπλουτισμένων με Pr (πρασεοδύμιο)

Οι EDFA μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για τα οπτικά συστήματα που λειτουργούν γύρω στα 1,55 μm . Ωστόσο, το παγκόσμιο δίκτυο τηλεπικοινωνιών περιέχει περισσότερα από 50 εκατομμύρια χιλιόμετρα συνηθισμένων οπτικών ινών, των οποίων η απόδοση βελτιώνεται για λειτουργία στα 1.33 μm . Επιπλέον, η κατανομή εικόνας από τη βιομηχανία CATV διεξάγεται κυρίως στα 1.33 μm . Είναι ολοφάνερο πως αυτά τα οπτικά συστήματα θα βελτιώνονταν αν υπήρχαν ενισχυτές οπτικών ινών που να λειτουργούσαν γύρω στα 1.3 μm . Σημαντική προσπάθεια κατευθύνθηκε προς την ανάπτυξη οπτικών ενισχυτών ευρείας ζώνης συχνοτήτων που παρέχουν απολαβή στη συγκεκριμένη περιοχή μήκους κύματος. Ο εμπλουτισμός στις οπτικές ίνες πυριτίου με ιόντα νεοδυμίου παρέχει ενισχυτή οπτικών ινών ικανό να ενισχύει στη φασματική περιοχή των 1.30-1.36 μm . Ωστόσο, ανεπιθύμητες επιδράσεις όπως η απορρόφηση διεγερμένης κατάστασης και ανταγωνιστικές ακτινοβόλες μεταβάσεις έχουν περιορίσει την απόδοση των ενισχυτών αυτών. Τελικά η απόδοση βελτιώνεται σημαντικά αν προσθέσουμε ιόντα Nd³⁺ σε μία φθοριούχο οπτική ίνα. Η συνηθισμένη οπτική ίνα που χρησιμοποιείται για τον σκοπό αυτό είναι γνωστή σαν ZBLAN, ακρώνυμο που σχηματίζεται από το πρώτο γράμμα των υλικών που χρησιμοποιούνται για τη βιομηχανική κατασκευή του (ZrF₄-BaF₂-LaF₃-AlF₃-NaF).

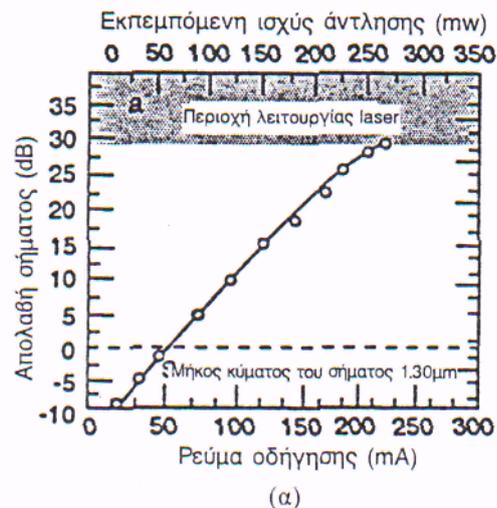
Λόγω της σχετικά φτωχής απόδοσης των ενισχυτών οπτικών ινών εμπλουτισμένων με Nd, αναπτύχθηκαν ενισχυτές οπτικών ινών που λειτουργούν στα 1.3 μm εμπλουτίζοντας οπτικές ίνες ZBLAN με ιόντα πρασεοδυμίου (Pr³⁺), που παρουσιάζουν συντονισμό στα 1.32 μm . Οι ενισχυτές αυτοί απαιτούν άντληση στην περιοχή μήκους κύματος γύρω στα 1.01 μm . Το 1991 παρουσιάστηκαν απολαβές ενισχυτών μέχρι 38dB και ισχύς εξόδου κόρου μέχρι και 20mW χρησιμοποιώντας για άντληση ένα laser Ti:ζαφειριού. Η απόδοση άντλησης των ενισχυτών 1.3 μm είναι αρκετά μικρή (τυπικά, <0.2dB/mW) σε σύγκριση με εκείνη των EDFA (μέχρι και 11dB/mW).

Οι ισχύς άντλησης που χρειάζονται για απολαβή 30dB, οι ενισχυτές εμπλουτισμένοι με Pr είναι αρκετά μεγάλη (~1W). Για τον λόγο αυτό, τα περισσότερα αρχικά πειράματα χρησιμοποιούσαν ογκώδη laser ιόντων ή στερεάς κατάστασης για οπτική άντληση. Ένα laser δίοδου-άντλησης στερεάς-κατάστασης παρέχει μία εναλλακτική λύση στην άμεση άντληση των laser ημιαγωγών. Σε πείραμα του 1993 χρησιμοποιήθηκε ένα laser Nd:YLF άντλησης που λειτουργεί στα 1.047 μm . Ο συντελεστής απορρόφησης στα 1.047 μm είναι μόλις το 30% της μέγιστης τιμής του που εμφανίζεται γύρω στα 1.017 μm . Ωστόσο, ο συντελεστής απορρόφησης των 0.36dB/m ήταν αρκετά μεγάλος ώστε να επιτύχουμε απολαβή της τάξης των 29.5dB σε ενισχυτή οπτικών ινών μήκους 30m και με ισχύ άντλησης 1.8W. Ο ενισχυτής κατάφερε να παρέχει απολαβή 10dB με ισχύ άντλησης

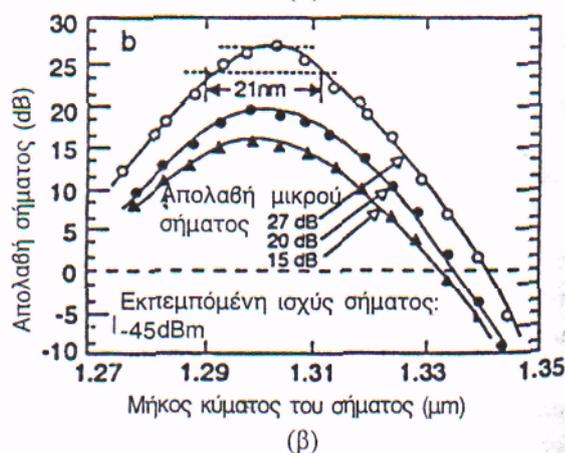
325mW. Η ισχύς κόρου εξόδου ήταν αρκετά μεγάλη (-0.2W). Πράγματι, πήραμε έξοδο 250mW στα 1.3μm εκπέμποντας μόλις 1.2mW της ισχύος του σήματος.

Laser ημιαγωγού επιμηκυνμένου-στρώματος κβαντικού-φρέατος που λειτουργούν στα 1.017μm αναπτύχθηκαν για να καλύψουν τις απαιτήσεις άντλησης των ενισχυτών οπτικών ινών εμπλουτισμένων με Pr. Σε μία επίδειξη του 1993, ένας τέτοιος ενισχυτής παρείχε απολαβή 28.3dB με ισχύ άντλησης 280mW. Τόσο υψηλή ισχύ άντλησης πήραμε χρησιμοποιώντας την τεχνική άντλησης διπλής κατεύθυνσης, με δύο ορθογώνια πολωμένους laser ημιαγωγών σε κάθε πλευρά. Κάθε laser μπορούσε να μεταφέρει ισχύ εξόδου 100mW με ρεύμα οδήγησης 250mA. Η μέγιστη απολαβή περιορίστηκε όχι μόνο από τη διαθέσιμη ισχύ άντλησης, αλλά και από το κατώφλι του laser του ενισχυτή. Το Σχήμα 3.7 δείχνει την απολαβή του ενισχυτή σαν συνάρτηση της ισχύος άντλησης και του ρεύματος οδήγησης όταν ένα σήμα 1.3μm με ισχύ εισόδου 32nW εκχύνεται στο εσωτερικό του ενισχυτή.

Η εξάρτηση του σήματος από το μήκος κύματος παρουσιάζεται επίσης για διάφορες τιμές της απολαβής μικρού-σήματος. Ο ενισχυτής κατάφερε να αποδώσει απολαβή πάνω από 25dB σε μεγάλο εύρος ζώνης (>20nm). Σε μετέπειτα πείραμα, που χρησιμοποιεί laser Nd:YLF, πραγματοποιήθηκε απολαβή 40dB και δείκτη θορύβου 5dB με δύο διαδοχικούς ενισχυτές οπτικών ινών εμπλουτισμένων με Pr. Η ανάπτυξη των ενισχυτών οπτικών ινών εμπλουτισμένων με Pr ωρίμασε το 1995, όταν οι ενισχυτές αυτοί διατέθηκαν στο εμπόριο. Ωστόσο, η αποδοχή τους περιορίζεται από το σχετικά υψηλό κόστος τους και την πρακτική τους δυσκολία να εργαστούν με οπτικές ίνες φθορίου.



Σχήμα 3.7 (α) Η μετρημένη απολαβή σήματος σ αν συνάρτηση του ρεύματος οδήγησης, ή της εκπεμπόμενης ισχύος άντλησης για έναν ενισχυτή οπτικών ινών εμπλουτισμένων με Pr. (β) Η μετρημένη απολαβή σήματος σαν συνάρτηση του μήκους κύματος του σήματος για τον ίδιο ενισχυτή. (©1993 IEEE. Ανατύπωση κατόπιν αείας.)



3.4.8 Ενισχυτές κατανεμημένης-απολαβής

Οι περισσότεροι ενισχυτές εμπλουτισμένων οπτικών ινών παρέχουν ενίσχυση 20-25dB σε μήκος $\sim 10\text{m}$ με προσμείξεις σχετικά υψηλής πυκνότητας (-500 μέρη ανά εκατομμύριο). Αφού οι EDFA αντισταθμίζουν την απώλεια που συσσωρεύεται στα 100km σε μία σχετικά μικρή απόσταση μόλις 10-20m, ονομάζονται συχνά *συσσωρευμένοι ενισχυτές*. Μία εναλλακτική τεχνική αντισταθμίζει την απώλεια στις οπτικές ίνες μέσω της *κατανεμημένης ενίσχυσης*. Στην προσέγγιση αυτή, η ίδια η οπτική ίνα μετάδοσης εμπλουτίζεται ελαφρά (πυκνότητα πρόσμειξης ~ 50 μέρη ανά δισεκατομμύριο) για να παρέχει απολαβή κατανεμημένη σε όλο το μήκος της οπτικής ίνας που τοπικά αντισταθμίζει την απώλεια στις οπτικές ίνες, με αποτέλεσμα μία ουσιαστικά διάφανη (“χωρίς απώλεια”) οπτική ίνα με συγκεκριμένο μήκος κύματος, όταν η οπτική ίνα αντλείται σε ένα άλλο κατάλληλο μήκος κύματος, χρησιμοποιώντας διάταξη άντλησης δύο κατευθύνσεων. Η τεχνική μοιάζει με εκείνη που σχολιάζεται στην Ενότητα 3.2 για τους κατανεμημένους ενισχυτές Raman, εκτός του ότι οι προσμείξεις παρέχουν απολαβή αντί για το μη-γραμμικό φαινόμενο του SRS κι έχουν τη δυνατότητα να απαιτούν μικρότερη ισχύ άντλησης από εκείνη που απαιτείται για τα SRS. Κατά τη δεκαετία του 1990, δόθηκε μεγάλη προσοχή στη σχεδίαση των κατανεμημένων EDFA.

Στην ιδανική περίπτωση, θα θέλαμε να αντισταθμίσουμε την απώλεια στις οπτικές ίνες με τέτοιο τρόπο ώστε η ενέργεια του σήματος να μην μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της διάδοσης. Μία τέτοια απόδοση, ωστόσο, δεν πραγματοποιείται ποτέ στην πράξη λόγω των μεταβολών της ισχύος άντλησης, που εμφανίζονται εξαιτίας και της απορρόφησης της άντλησης από τις προσμείξεις και της απώλειας στις οπτικές ίνες στο μήκος κύματος της άντλησης. Το βέλτιστο μήκος κύματος της άντλησης για τους κατανεμημένους EDFA είναι 1.48 μm , αφού η απώλεια στις οπτικές ίνες σ' αυτό το μήκος κύματος είναι ελάχιστη (περίπου 0.25dB/km) σε σύγκριση με εκείνο των άλλων μηκών κύματος άντλησης (όπως 0.98 μm). Ακόμη και τότε η ολική απώλεια άντλησης τυπικά υπερβαίνει τα 0.4dB/km, δηλώνοντας απώλεια της τάξης των 10dB για οπτική ίνα μήκους μόλις 25km. Αν η οπτική ίνα αντληθεί προς μία μόνο κατεύθυνση εκχύνοντας τη δέσμη άντλησης από το ένα άκρο, η ανομοιόμορφη άντληση οδηγεί σε μεγάλες μεταβολές της ισχύος του σήματος. Γι' αυτό και χρησιμοποιείται συνήθως η *διάταξη άντλησης διπλής κατεύθυνσης*, στην οποία η οπτική ίνα αντλείται και από τα δύο άκρα χρησιμοποιώντας δύο laser 1.48 μm . Τα χαρακτηριστικά ενίσχυσης τέτοιου είδους κατανεμημένων EDFA βρίσκονται ολοκληρώνοντας τις Εξισώσεις (3.4.7) και (3.4.8) που υπόκεινται στις οριακές συνθήκες όπου η P_p ισούται με την P_λ και P_2 σε $z=0$ και $z=L$, αντίστοιχα, όπου P_1 και P_2 είναι οι ισχύς άντλησης που εισάγονται στα δύο άκρα της οπτικής ίνας.

Γενικά, οι μεταβολές της ισχύος του σήματος λόγω της ανομοιόμορφης άντλησης μπορούν να διατηρηθούν σε ελάχιστη στάθμη για ίνες σχετικά μικρού μήκους 10-15km. Πράγματι, σε πείραμα του 1990, η μετάδοση σε μήκος 10km παρουσίασε *υπερβολικά χαμηλή* απόκλιση ισχύος-σήματος. Για πρακτικούς λόγους, είναι σημαντικό να αυξήσουμε το μήκος της οπτικής ίνας γύρω στα 50km ή και περισσότερο, έτσι ώστε οι σταθμοί άντλησης να έχουν τόσο μεγάλη απόσταση μεταξύ τους. Σ' ένα πείραμα του 1995, παλμοί 11.5ps μεταδόθηκαν σε απόσταση 93.4km ενός κατανεμημένου EDFA εκχύνοντας μέχρι 90mW ισχύος άντλησης από το κάθε άκρο. Η ισχύς σήματος υπολογίστηκε ότι μεταβάλλεται κατά συντελεστή πάνω από 10, λόγω της ανομοιόμορφης άντλησης. Ένα κατανεμημένο EDFA μπορεί να εφαρμοστεί για μετάδοση σολιτονίων.

Η απόδοση των κατανεμημένων EDFA εξαρτάται από το μήκος κύματος του σήματος, αφού και ο δείκτης θορύβου και η ισχύς άντλησης που απαιτούνται για να επιτύχουμε τη διαφάνεια μεταβάλλονται ανάλογα με το μήκος κύματος του σήματος. Ο δείκτης θορύβου

είναι τυπικά μεγάλος ($>6\text{dB}$) σε σύγκριση με ένα συγκεντρωμένο EDFA, λόγω της χαμηλής τιμής της απολαβής μικρού-σήματος σ'όλο το μήκος της οπτικής ίνας. Γενικά, θα πρέπει να θεωρήσουμε τις επιδράσεις του SRS στα καταναμημένα EDFA που αντλούνται στα $1.48\mu\text{m}$ αφού η διαφορά άντλησης-μήκος κύματος του σήματος βρίσκεται μέσα στα πλαίσια του εύρους ζώνης απολαβής-Raman (βλέπε Σχήμα 3.2). Σαν συνέπεια, το σήμα υφίσταται όχι μόνο την απολαβή που παρέχουν οι προσμείξεις αλλά και εκείνη που παρέχει ο SRS (βλέπε Ενότητα 3.2). Ο SRS αυξάνει την καθαρή απολαβή και μειώνει τον δείκτη θορύβου για μία δεδομένη ποσότητα της ισχύος άντλησης.

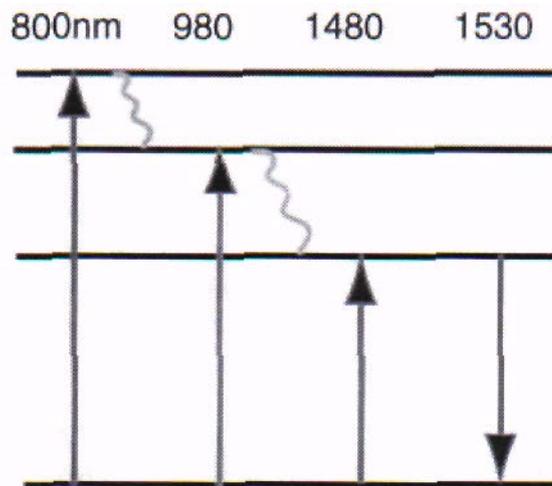
Οι καταναμημένοι EDFA χρησιμοποιήθηκαν σε πειραματικά συστήματα. Σε πείραμα του 1996, ένα σήμα RZ των 40Gb/s μεταδόθηκε σε απόσταση 68km χρησιμοποιώντας οπτικούς παλμούς 7.8ps . Προσομοιώσεις υπολογιστών δείχνουν ότι η χρήση καταναμημένης ενίσχυσης για συστήματα NRZ έχει τη δυνατότητα να διπλασιάζει την απόσταση μεταξύ σταθμών άντλησης σε σύγκριση με την απόσταση συγκεντρωμένων ενισχυτών.

4. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ του EDFA

Περιγράφοντας την τεχνολογία των τμημάτων του EDFA θα εξετάσουμε την κατασκευή των οπτικών ινών με προσμίξεις ερβίου, τις συγκολλήσεις, τα laser άντλησης, τα παθητικά στοιχεία και τα EDFA modules.

4.1 Γιατί έρβιο;

Το έρβιο έχει διάφορες σημαντικές ιδιότητες που το κάνουν μια άριστη επιλογή για έναν οπτικό ενισχυτή. Ας θυμηθούμε ότι υπάρχουν διάφορες συγκεκριμένες ζώνες (μήκη κύματος) που μπορούν να φέρουν τα οπτικά καλώδια ινών. Τα ιόντα ερβίου (Er^{3+}) έχουν τα κβαντικά επίπεδα που τους επιτρέπουν να διεγερθούν ώστε να εκπέμψουν στην ζώνη των 1540nm, η οποία είναι η ζώνη που έχει τη λιγότερη απώλεια ισχύ σε όλη την ίνα. Αυτό τους δίνει τη δυνατότητα να ενισχύουν τα σήματα σε μια ζώνη όπου απαιτούνται



Σχήμα 4.1 Ενεργειακές καταστάσεις ερβίου υψηλής ποιότητας ενισχυτές.

Τα κβαντικά επίπεδα ερβίου επιτρέπουν επίσης σε αυτό να διεγερθεί από ένα σήμα κατά είτε 800nm είτε 980nm, όπου η διοξειδίου πυριτίου-βασισμένη ίνα μπορεί να φέρει και τα δύο χωρίς μεγάλες απώλειες, αλλά δεν είναι στη μέση των μηκών κύματος σημάτων. Αυτές οι ζώνες είναι επίσης αρκετά μακριά από τις ζώνες σήματος ώστε είναι εύκολο να κρατηθούν η ακτίνα άντλησης και η ακτίνα σήματος χωριστά.

Όταν το έρβιο διεγείρεται από τα φωτόνια κατά 800nm ή 980nm, έχει ενεργειακές πτώσεις χωρίς παραγωγή φωτός σε μια κατάσταση όπου μπορεί να μείνει διεγερμένη για σχετικά μεγάλες χρονικές περιόδους - τάξεως των 10ms. Αυτή η ιδιότητα είναι εξαιρετικά σημαντική, επειδή η κβαντική αποδοτικότητα της συσκευής εξαρτάται από το πόσο καιρό μπορεί να μείνει σε διεγερμένη κατάσταση. Εάν χαλαρώνει υπερβολικά γρήγορα, απαιτούνται περισσότερα φωτόνια για να το κρατήσουν διεγερμένο, που σημαίνει πως απαιτείται περισσότερη ισχύ εισαγωγής για να κάνει τον ενισχυτή να δουλέψει.

Το έρβιο μπορεί επίσης να διεγερθεί από φωτόνια κατά 1480nm, αλλά αυτό είναι ουσιαστικά ανεπιθύμητο. Όταν διεγείρεται σε εκείνο το μήκος κύματος, τόσο η διαδικασία ενεργειακής άντλησης όσο και η διεγερμένη εκπομπή από το σήμα συμβαίνουν στην ίδια ζώνη μήκους κύματος και ενέργειας, η οποία μπορεί να δημιουργήσει αλληλεπιδράσεις που χαμηλώνουν την αποδοτικότητα της συσκευής και αυξάνουν το θόρυβο ενισχυτή. Μια άλλη σημαντική ιδιότητα του ερβίου για

χρήση σε έναν ενισχυτή ινών είναι ότι είναι αρκετά διαλυτό στο πυρίτιο, καθιστώντας το εύκολο να εμπλουτίσει στα μίγματα για την κατασκευή της πυριτίου - βασισμένης ίνας. Για πολλές εφαρμογές, φθηνά EDFAs μπορούν να φτιαχτούν με απλή διάλυση Er₂O₃ σε ένα σκεύος τήξης με το SiO₂ που χρησιμοποιείται για να φτιαχτεί ένα διοξείδιο πυριτίου. Με τη χρησιμοποίηση τα Al₂O₃, GeO₂-Al₂O₃, ή P₂O₅, η διαλυτότητα της ένωσης ερβίου στο μίγμα διοξείδιο πυριτίου μπορεί να αυξηθεί πολύ, και μερικές από τις ιδιότητες του EDFA μπορούν να βελτιωθούν. Παραδείγματος χάριν, το GeO₂-Al₂O₃ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διπλασιάσει σχεδόν τον χρόνο που χρειάζεται το διεγερμένο έρβιο ώστε να χαλαρώσει, το οποίο επομένως διπλασιάζει σχεδόν την κβαντική αποδοτικότητα του EDFA. Οι EDFAs δεν είναι τέλει. Στην πράξη, απαιτούνται πολλές ακτίνες άντλησης κατά μήκος της απόστασης μιας ίνας για την παροχή ενέργειας στους EDFAs και αυτοί απαιτούν δύναμη και οπτική (συζευκτήρες και φίλτρα.). Οι EDFAs έχουν επίσης απολαβή που ποικίλλει με το μήκος κύματος ενός σήματος, το οποίο δημιουργεί προβλήματα σε πολλές εφαρμογές WDM. Αυτό μπορεί να λυθεί με τη χρησιμοποίηση των ειδικών οπτικών παθητικών φίλτρων που σχεδιάζονται για να αντισταθμίσουν την απόκλιση απολαβής του EDFA.

4.2 Κατασκευή Οπτικών Ινών με Προσμίξεις Ερβίου

Οι οπτικές ίνες με πυρήνες προσμίξεως ερβίου μπορούν να κατασκευαστούν με μία από τις ακόλουθες τεχνολογίες: MCDV (Modified Chemical Vapor Deposition), ODV (Outside Chemical Deposition) και VAD (Vapor Axial Deposition). Θα σχολιάσουμε μονό την διαδικασία MCVD η οποία χρησιμοποιείται και από την AT&T αλλά και από άλλους κατασκευαστές.

Κατά την διαδικασία MCVD ένας σωλήνας από silica (άμορφο SiO₂) εξωτερικής διαμέτρου 25mm στερεώνεται σε ένα στρεφόμενο σύστημα επεξεργασίας γυαλιού και θερμαίνεται τοπικά περίπου στους 1900 C με την βοήθεια μίας φλόγας οξυγόνου-υδρογόνου που διαπερνά καθ' όλο το μήκος το σωλήνα. Χημικά αντιδραστήρια αποτελούμενα κυρίως από τετραχλωριούχο πυρίτιο (SiCl₄) και αέριο οξυγόνο μαζί με στοιχεία προσμίξεων όπως τετραχλωριούχο γερμάνιο (GeCl₄) ρέουν κατά μήκος του σωλήνα και αντιδρούν στην οδούσα θερμή ζώνη σχηματίζοντας μόρια διοξειδίου του πυριτίου με αντίστοιχες προσμίξεις. Τα μόρια αυτά επικάθονται προοδευτικά στα τοιχώματα του σωλήνα σχηματίζοντας ένα πορώδες στρώμα πάχους αρκετών χιλιοστών. Καθώς η κινούμενη φλόγα περνάει μέσα από αυτή την επίστρωση, τα μόρια του διοξειδίου του πυριτίου μετατρέπονται σε συμπαγές γυαλί πάχους μερικών δεκάδων μm. Επανειλημμένο πέρασμα της φλόγας αναπτύσσει ένα πάχος επιστρωμένου γυαλιού του οποίου η σύνθεση ελέγχεται από την σύσταση της αέριας δέσμης αντιδραστηρίων. Τότε ο σωλήνας θερμαίνεται στους 2300°C, οπότε συσπειρώνεται σε μία στερεά ράβδο υπό την επίδραση των ίδιων της των επιφανειακών τάσεων, αποτελώντας ένα πρόπλασμα από το οποίο αργότερα "τραβάμε" την οπτική ίνα.

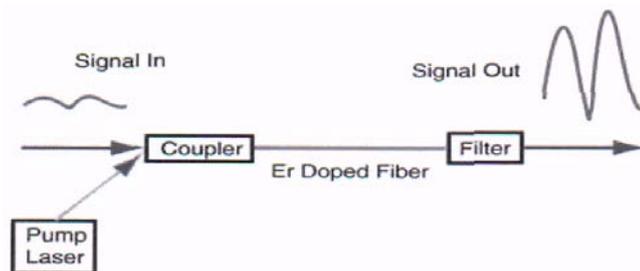
Η ενσωμάτωση ιχνών ερβίου κατά την διαδικασία MCDV απαιτεί μερικές τροποποιήσεις που θα επιτρέψουν την εισαγωγή και προσαρμογή της αντίστοιχης πηγής ατμών χαμηλής πίεσης στη διαδικασία. Οι τροποποιήσεις επιβάλλουν την θέρμανση μιας αμπούλας τριχλωριδίου του ερβίου (ErCl₃) στους 1000°C για την δημιουργία ατμών κατά την στιγμή που εναποτίθενται τα στρώματα του πυρήνα της ίνας. Η αιθάλη διοξειδίου του πυριτίου που σχηματίζεται τότε περιέχει προσμίξεις ερβίου. Μια εναλλακτική μέθοδος είναι η δημιουργία ατμών που περιέχουν έρβιο με χρήση μίας τεχνικής στην οποία δημιουργούνται με υπερήχους και εγχέονται στο σωλήνα σταγονίδια υγρού που περιέχει κατάλληλη διάλυση συνθετικών του ερβίου.

Μια τρίτη τεχνική γνωστή με το όνομα "solution doping", επιτυγχάνει την

εναπόθεση των στρωμάτων του πυρήνα σε αρκετά χαμηλότερη θερμοκρασία για να προληφθεί η απαρχή τήξης, με την βοήθεια διαλύματος τριχλωριδίου του ερβίου.

4.2.1 Εναλλακτικά σχέδια

Το απλό διάγραμμα ενός EDFA που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2 δεν είναι ο μόνος τρόπος που μπορούν να λειτουργούν οι EDFA. Η άντληση μπορεί να γίνει σε μια κατεύθυνση προς τα μπρος όπως παρουσιάζεται, προς τα πίσω από το άκρο εξόδου παραγωγής ή και στις δύο κατευθύνσεις. Οι οπτικοί μονωτές χρησιμοποιούνται συνήθως και στις δύο άκρες του EDFA για να αποτρέψουν την δραπέτευση της ενέργειας άντλησης προς τα πίσω της ίνας ή τις ανεπιθύμητες αντανακλάσεις που μπορούν να έχουν επιπτώσεις στη σταθερότητα του laser. Τα φίλτρα, συχνά κικλιδώματα Bragg (φίλτρα που κατασκευάζονται στις ίνες), χρησιμοποιούνται για την απολαβή πέρα από την ευρύτερη σειρά μήκους κύματος για τη χρήση στα συστήματα WDM



Σχήμα 4.2 Βασικός Ενισχυτής Ίνας

4.3 Συγκολλήσεις

Για την καλή απόδοση των οπτικών ενισχυτών απαιτούνται διάμετροι πυρήνων και διάμετροι οπτικής δέσμης πολύ μικρότερες από ότι στις κοινές οπτικές ίνες. Για παράδειγμα οι σύγχρονοι EDFAs έχουν πυρήνες διαμέτρου $2.5\mu\text{m}$ οι οποίοι παράγουν οπτικές δέσμες με διάμετρο $4\mu\text{m}$ έναντι 7 ή $8\mu\text{m}$ που παράγουν οι κοινές οπτικές ίνες με αποτέλεσμα αυξημένες απώλειες στα σημεία συγκόλλησης.

Ακόμα όμως και για τόσο μεγάλες διαφορές διαμέτρων είναι δυνατόν να επιτευχθούν απώλειες συγκόλλησης της τάξης του 0.1 έως 1dB μεταξύ της ίνας με πυρήνα προσμίξεων ερβίου και της κοινής οπτικής ίνας, παράγοντας μια συγκόλληση με τήξη η οποία έχει πολύ μικρές απώλειες στην περιοχή της συγκόλλησης.

4.4 Πηγές Ισχύος για Άντληση

Εξαιρετικά αποδοτική άντληση έχει παρατηρηθεί στα 980nm και στα 1480nm , με απολαβή που ξεπερνάει τα 20dB προκαλούμενη από ισχύ αντλήσεως μικρότερη των 5mW . Συνήθως απαιτούνται από 10 μέχρι 100mW ισχύ άντλησης για παροχή αρκετής ισχύος εξόδου. Τα κβαντικά όρια των 3dB της εικόνας θορύβου έχουν προσεγγίσει στα 980nm . Στα 1480nm , όμως, η εικόνα θορύβου είναι περίπου κατά 1dB μεγαλύτερη επειδή οι ζώνες απορρόφησης για άντληση και η απολαβή του σήματος ταυτίζονται, ενώ η εξαναγκασμένη εκπομπή από το αντλούμενο φως περιορίζει την αναστροφή

των πληθυσμών.

Οι δίοδοι laser ημιαγωγού είναι κατάλληλες για την παροχή ισχύος άντλησης στους EDFAs από milliwatts τόσο στα 980 όσο και στα 1480nm. Για laser στα 980nm, χρησιμοποιούνται δομές “κβαντικών πηγαδιών” από “τεταμένο” ινδιο-αρσενικούχο γάλιο που αναπτύσσεται πάνω σε αρσενικούχο γάλιο, ενώ για laser στα 1480nm τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι ινδιο-γάλιο-αρσενικούχος φώσφορος επάνω σε φωσφορούχο ίνδιο, δηλαδή δομές εντελώς ανάλογες με αυτές που χρησιμοποιούνται στα τυπικά laser επικοινωνιών. Οι δίοδοι laser του μικρότερου μήκους κύματος, 980 nm, χρειάζονται λιγότερο ρεύμα έγχυσης και μικρότερη ψύξη, δηλαδή έχουν μικρότερες απαιτήσεις σε ηλεκτρική ισχύ. Τελευταία, όμως οι αντλίες 1480nm χρησιμοποιούνται ευρύτερα, κυρίως γιατί είναι ευκολότερα διαθέσιμες και παρουσιάζουν μεγαλύτερη λειτουργική αξιοπιστία. Η αξιοπιστία είναι ιδιαίτερα σημαντική για τα laser άντλησης, τα οποία καλούνται να παράγουν ισχύ σε ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Οι εφαρμογές των ενισχυτών ισχύος απαιτούν τα υψηλότερα επίπεδα ισχύος και η αξιοπιστία της άντλησης αποτελεί σημαντικό θέμα στην ανάπτυξή τους. Εάν η εμπιστοσύνη στην αξιοπιστία των lasers των 980nm συνεχίσει να αυξάνει, ίσως αυτά αντικαταστήσουν τις αντλίες των 1480nm, εκτός από τις εφαρμογές που απαιτούν την ελαχιστοποίηση των απωλειών της άντλησης εκπομπής, όπως είναι οι ενισχυτές άντλησης εξ αποστάσεως και οι κατανεμημένοι EDFAs.

4.5 Παθητικά Στοιχεία

Οι φωτεινές ισχύς άντλησης και σήματος συνδυάζονται συνήθως με ένα πολυπλέκτη μήκους κύματος (WDMUX), ο οποίος είναι συνήθως είτε ένας ζεύκτης τηγμένης ίνας είτε μια μικροσκοπική ολοκληρωμένη οπτική διάταξη. Οι τελευταίες διατάξεις χρησιμοποιούν φακούς για να εστιάσουν το φως μέσα και έξω από την οπτική ίνα και περιέχουν τους κατάλληλους καθρέπτες και τα κατάλληλα φίλτρα. Σε αυτούς τους WDMUXs, η άντληση και το σήμα έχουν συνήθως απώλειες περίπου 0.5dB.

Η ανατροφοδότηση από μικρές ανακλάσεις και από τις δύο κατευθύνσεις σε έναν οπτικό ενισχυτή υψηλής απολαβής μπορεί να ξεκινήσει ταλάντωση και να μειώσει τις επιδόσεις θορύβου. Η παρεμβολή εν σειρά ενός οπτικού απομονωτή καταπνίγει τις περισσότερες ανακλάσεις. Πράγματι, οι απομονωτές εξασθενούν το ανακλώμενο φως κατά 35dB, ενώ εισάγουν απώλειες μικρότερες του 1dB.

Η διαδικασία της ενίσχυσης συνοδεύεται πάντα από την γέννηση ASE (ενισχυμένης αυθόρμητης εκπομπής) σε όλο το εύρος ζώνης της απολαβής. Ένα μέρος αυτής της ASE μπορεί να αποφευχθεί τοποθετώντας ένα οπτικό φίλτρο μετά τον ενισχυτή, πράγμα που βελτιώνει τα χαρακτηριστικά του θορύβου σε ένα σύστημα οπτικής ενίσχυσης. Η τοποθέτηση φίλτρου μέσα στον οπτικό ενισχυτή επιτρέπει τον περιορισμό του οπτικού εύρους ζώνης και αποτρέπει τον κόρο του ενισχυτή από την ίδια του την ASE.

4.6 Άλλες εφαρμογές

Εκτός από τη χρησιμοποίησή τους ως επαναλήπτες, οι ενισχυτές ινών χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν το επίπεδο σήματος για τα συστήματα CATV, τα οποία απαιτούν επίπεδα υψηλής δύναμης στο δέκτη για να διατηρήσουν το επαρκές σήμα σε απόδοση θορύβου, επιτρέποντας μακρύτερες καλωδιακές διαδρομές ή χρησιμοποιώντας θραύστες για "να μεταδώσουν" ένα ενιαίο σήμα

μέσω ενός συζευκτήρα σε πολλές ίνες, εξοικονομώντας κόστος των πρόσθετων συσκευών αποστολής σημάτων. Στην τηλεφωνία, συνδυάζουν με DWDM (πυκνοί πολυδιαλωτές διαίρεσης μήκους κύματος) ώστε να υπερνικήσουν τις ανεπάρκειες των DWDM για μεγάλης απόστασης μετάδοση.

4.7 Μελλοντικές εξελίξεις

Οι ενισχυτές ινών συνεχίζουν να αναπτύσσονται για να υποστηρίξουν τους DWDM και για να επεκταθούν στις άλλες ζώνες μήκους κύματος που υποστηρίζονται από τις οπτικές ίνες. Τώρα που οι κατασκευαστές ινών έχουν αφαιρέσει σχεδόν τις ζώνες ύδατος από το φάσμα, υπάρχει μια σειρά 1260 έως 1610nm διαθέσιμη για χρήση. Οι ενισχυτές ινών και τα laser διόδου θα αναπτυχθούν πιθανώς μέσα σε αυτήν την ζώνη για να τη γεμίσουν εντελώς με το χρησιμοποιήσιμο εύρος ζώνης.

Σήμερα οι EDFAs κατασκευάζονται με την συγκόλληση (με τήξη) διακριτών τερματισμένων με ίνα στοιχείων (δηλαδή της ίνας ερβίου, του οπτικού απομονωτή, του WDMUX, του φίλτρου και φυσικά της διόδου άντλησης). Στο μέλλον οι EDFAs ίσως να χρησιμοποιούν εξελιγμένες τεχνολογίες όπως είναι η οπτική υβριδική συσκευασία ή τα φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα, για τον συνδυασμό πολλών λειτουργιών σε μία ολοκληρωμένη συσκευασία.

5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ

Οι ενισχυτές οπτικών ινών έχουν πολλές εφαρμογές και αποτελούν αναπόσπαστο μέρος πολλών συστημάτων επικοινωνίας οπτικών ινών, λόγω των εξαιρετικών χαρακτηριστικών ενίσχυσης τους, όπως η χαμηλή απώλεια εισαγωγής, η υψηλή απολαβή, το μεγάλο εύρος ζώνης, ο χαμηλός θόρυβος και η χαμηλή διαφωνία. Χρησιμοποιήθηκαν και για τις τέσσερις εφαρμογές που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.1.

Οι οπτικοί ενισχυτές μπορούν να εξυπηρετήσουν σημαντικούς σκοπούς στην σχεδίαση των συστημάτων επικοινωνίας οπτικών ινών: Στο Σχ. 5.1 παρουσιάζονται σχηματικά τέσσερις εφαρμογές. Μία σημαντική εφαρμογή για συστήματα μεγάλων αποστάσεων είναι η χρήση ενισχυτών σαν ενισχυτές εντός γραμμής, που αντικαθιστούν τους ηλεκτρονικούς αναμεταδότες. Μία τέτοια αντικατάσταση μπορεί να διεξαχθεί αρκεί να μην περιορίζεται η απόδοση του συστήματος από τις συνολικές επιδράσεις της διασποράς και της μη γραμμικότητας των οπτικών ινών καθώς και του θορύβου του ενισχυτή. Η χρήση των οπτικών ενισχυτών είναι ιδιαίτερα ελκυστική για τα πολυκάναλα οπτικά συστήματα, αφού μπορούν να ενισχύουν όλα τα κανάλια ταυτόχρονα.

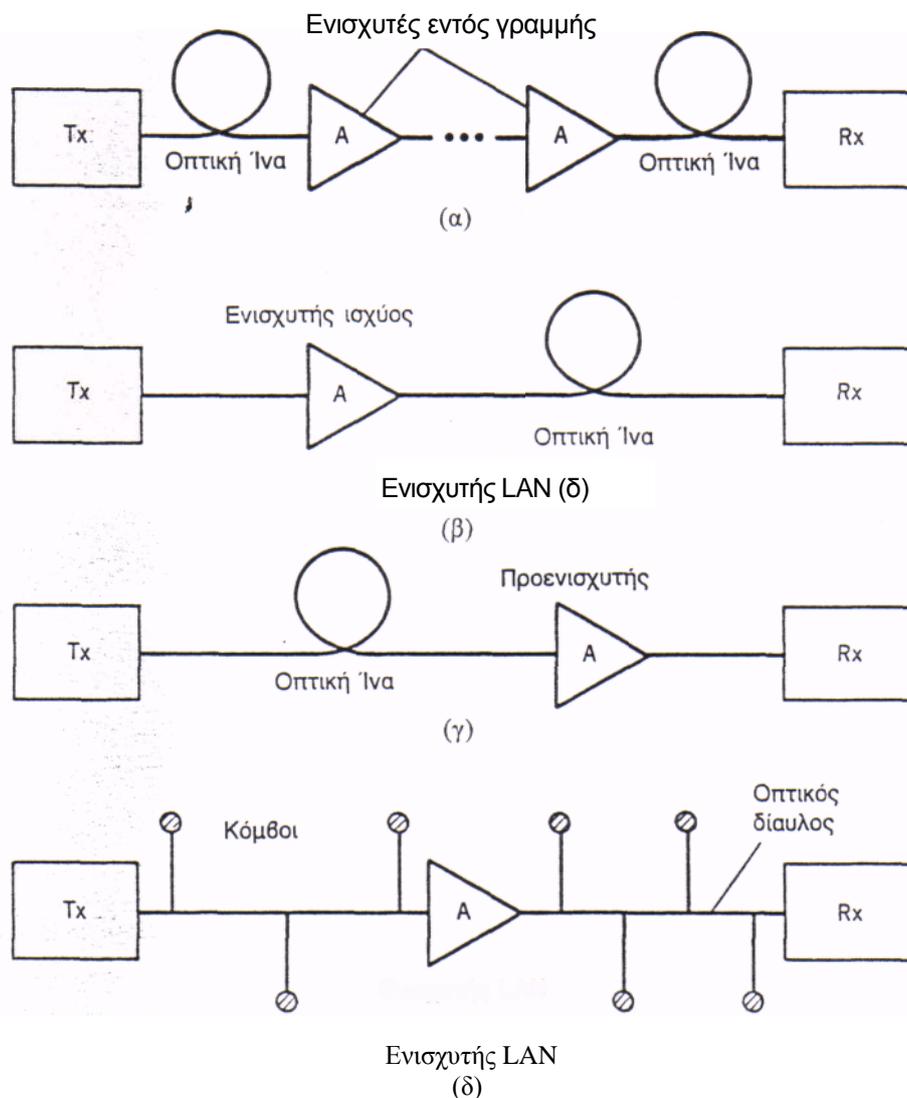
Ένας άλλος τρόπος χρήσης των οπτικών ενισχυτών είναι να αυξήσουμε την ισχύ του πομπού τοποθετώντας έναν ενισχυτή ακριβώς μετά τον πομπό. Οι ενισχυτές αυτοί ονομάζονται *ενισχυτές ισχύος*, αφού ο κύριος σκοπός τους είναι να υποστηρίξουν την μεταδιδόμενη ισχύ. Ένας ενισχυτής ισχύος μπορεί να αυξάνει την απόσταση μετάδοσης κατά 100km ή και περισσότερο, ανάλογα με την απολαβή του ενισχυτή και την απώλεια των οπτικών ινών.

Η απόσταση μετάδοσης μπορεί επίσης να αυξηθεί αν τοποθετήσουμε έναν ενισχυτή ακριβώς πριν τον δέκτη για να υποστηρίξει την λαμβανόμενη ισχύ. Οι ενισχυτές αυτοί ονομάζονται *οπτικοί προενισχυτές* και συνήθως χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν την ευαισθησία του δέκτη. Μία άλλη εφαρμογή των οπτικών ενισχυτών είναι να τους χρησιμοποιούμε για αντιστάθμιση της απώλειας κατανομής στα τοπικά δίκτυα. Η απώλεια κατανομής συχνά περιορίζει τον αριθμό των κόμβων στο δίκτυο. Τόσο η χαμηλή απώλεια όσο και το μεγάλο εύρος ζώνης των οπτικών ινών αποτελούν σημαντικούς παράγοντες στη σχεδίαση των υπερωκεάνιων συστημάτων, από την άποψη της μείωσης του συνόλου κόστους λειτουργίας. Η απώλεια της οπτικής ίνας μπορεί να αντισταθμιστεί χρησιμοποιώντας οπτικούς ενισχυτές, οι οποίοι ενισχύουν το οπτικό ρεύμα bit άμεσα, χωρίς να απαιτούν μετατροπή του σήματος στην ηλεκτρική περιοχή.

Στην πραγματικότητα οι οπτικοί ενισχυτές έφεραν επανάσταση στην εξέλιξη των συστημάτων επικοινωνίας οπτικών ινών.

5.1 Οπτικοί Προενισχυτές

Οι ενισχυτές οπτικών ινών χρησιμοποιούνται μονίμως για τη βελτίωση της ευαισθησίας του δέκτη, προενισχύοντας το προσπίπτον οπτικό σήμα πριν αυτό πέσει στον ανιχνευτή. Η βασική ιδέα είναι όμοια μ' εκείνη της σύμφωνης ανίχνευσης: Η προενίσχυση του οπτικού σήματος το καθιστά αρκετά δυνατό ώστε ο θερμικός θόρυβος να γίνεται αμελητέος σε σύγκριση με τον θόρυβο βολής. Σαν συνέπεια, η ευαισθησία του δέκτη μπορεί να βελτιωθεί 10-20dB χρησιμοποιώντας ένα EDFA σαν προενισχυτή. Σ' ένα πείραμα του 1990, χρειάστηκαν μόνο 152 φωτόνια/bit για ένα σύστημα IM/DD να λειτουργήσει σε ρυθμούς μετάδοσης bit μεταξύ 0.6-2.5Gb/s. Σ' ένα άλλο πείραμα, επιτεύχθηκε ευαισθησία ενός δέκτη -37.2dBm (147 φωτόνια/bit) σε ρυθμούς μετάδοσης bit 10Gb/s. Είναι ακόμη δυνατό να χρησιμοποιήσουμε δύο προενισχυτές σε σειρά. Η ευαισθησία του δέκτη βελτιώθηκε κατά 18.8dB, χρησιμοποιώντας αυτή την τεχνική. Ένα πείραμα το



Σχήμα 5.1 Τέσσερις δυνατές εφαρμογές των οπτικών ενισχυτών στα οπτικά συστήματα: (α) σαν ενισχυτές εντός γραμμής, (β) σαν υποστηρικτής της μεταδιδόμενης ισχύος, (γ) σαν προενισχυτής στον δέκτη και (δ) για αντιστάθμιση της απώλειας κατανομής στα τοπικά δίκτυα.

1992 απέδειξε ευαισθησία -38.8dB (102 φωτόνια/bit) σε 10Gb/sec , χρησιμοποιώντας δύο EDFA. Η υποβάθμιση της ευαισθησίας περιορίστηκε σε στάθμες κάτω από 1.2dB όταν το σήμα μεταδόθηκε σε απόσταση 45km μέσω οπτικής ίνας ολισθημένης διασποράς.

5.2 Υποστηρικτές Ισχύος

Οι βελτιώσεις της ευαισθησίας του δέκτη, που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας EDFA, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αυξήσουν την απόσταση μετάδοσης των ζεύξεων οπτικών ινών σημείο-προς-σημείο, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τις επικοινωνίες μεταξύ των πόλεων και των νησιών, αφού μπορούμε να μην συμπεριλάβουμε ενδιάμεσους αναμεταδότες. Ωστόσο, τέτοια οπτικά συστήματα απαιτούν συχνά ισχύ πομπού μέχρι και 100mW , όταν η απόσταση μετάδοσης αυξάνεται πέρα από τα 200km . Σ' ένα πείραμα, ένα σήμα 1.8Gb/s μεταδόθηκε σε απόσταση 250km (χωρίς αναμετάδοση ή ενίσχυση σε σειρά) χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό δύο EDFA, που λειτουργούν σαν ενισχυτής

ισχύος στον πομπό και σαν προενισχυτής στον δέκτη. Η απόδοση βελτιώθηκε σε μία πειραματική μετάδοση του 1992 όπου ένα σήμα 2.5Gb/s μεταδόθηκε σε απόσταση 318km. Ο ρυθμός μετάδοσης bit αυξήθηκε ακόμη περισσότερο στα 5Gb/s σ' ένα άλλο πείραμα που μετέδωσε σήμα σε απόσταση 226km μέσω συμβατικών οπτικών ινών με ολική διασπορά 4100ps/nm. Στο πείραμα αυτό, χρησιμοποιήθηκαν δύο EDFA για να αυξήσουν την ισχύ σήματος από -8dBm σε 15.5dBm (περίπου 35mW). Αυτή η στάθμη ισχύος είναι αρκετά μεγάλη ώστε ο SBS (βλέπε Ενότητα 3.2) να αποτελεί πρόβλημα. Το πείραμα συμπίεζε τον SBS διευρύνοντας το εύρος γραμμής του laser από 35MHz σε 160MHz [βλέπε Εξίσωση (3.2.5)]. Τα περισσότερα πειράματα χρησιμοποίησαν μετάδοση μίας κατεύθυνσης. Σε μια καινούρια τεχνική πραγματοποιήθηκε μετάδοση διπλής κατεύθυνσης χωρίς αναμετάδοση χρησιμοποιώντας δύο EDFA σε κάθε πλευρά, τα οποία κι επιτελούν διπλό σκοπό. Κάθε EDFA λειτουργούσε σαν υποστηρικτής ισχύος στην ορθή κατεύθυνση και σαν οπτικός προενισχυτής στην ανάστροφη κατεύθυνση. Παρόλο που το μήκος κύματος των δύο πομπών διαφέρει κατά 11nm, το ίδιο EDFA λειτουργεί σαν υποστηρικτής ισχύος και σαν οπτικός προενισχυτής λόγω του μεγάλου εύρους ζώνης της απολαβής.

Για αποστάσεις μετάδοσης πάνω από τα 300km, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιήσουμε ενίσχυση εντός γραμμής. Αρκετά εργαστηριακά πειράματα παρουσίασαν μετάδοση χωρίς αναμεταδότη στα 2.5Gb/s σε απόσταση πάνω από 500km χρησιμοποιώντας δύο ενισχυτές σε σειρά, οι οποίοι αντλούνται από μακριά από τα άκρα του πομπού και του δέκτη, χρησιμοποιώντας laser άντλησης υψηλής ισχύος. Επιπλέον, ένας ενισχυτής στον πομπό υποστήριξε την εκτοξευμένη ισχύ γύρω στα 100mW. Ο SBS συμπίεστηκε μέσω της διαμόρφωσης φάσης ενός οπτικού φέροντος, που διεύρυνε το εύρος γραμμής του φέροντος σε στάθμες πάνω από τα 200MHz (κάτω από λειτουργία CW).

Η επίδραση της GVD μειώθηκε χρησιμοποιώντας ίνες αντιστάθμισης-διασποράς. Σε πείραμα του 1996, το σήμα των 2.5Gb/s μεταδόθηκε σε απόσταση 465km διαμορφώνοντας άμεσα ένα laser DFB. Το τετέρισμα συχνότητας του διαμορφωμένου σήματος διεύρυνε αρκετά το φάσμα ώστε να μην χρειάζονταν εξωτερικός διαμορφωτής φάσης, αρκεί η ισχύς εκτόξευσης να διατηρούνταν κάτω από τα 100mW. Ο ρυθμός μετάδοσης bit των συστημάτων χωρίς αναμεταδότη μπορεί να αυξηθεί στα 10Gb/s χρησιμοποιώντας την ίδια τεχνική που χρησιμοποιήσαμε και στα 2.5Gb/s. Σε πείραμα του 1996, το σήμα των 10Gb/s μεταδόθηκε σε απόσταση 442km χρησιμοποιώντας δύο ενισχυτές σε σειρά με άντληση από απόσταση. Χρησιμοποιήθηκαν δύο εξωτερικοί διαμορφωτές, ο ένας για τη συμπίεση του SBS κι ο άλλος για τη δημιουργία σήματος. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ξεκάθαρα την πρόοδο που επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας ενισχυτές οπτικών ινών.

5.3 Ενισχυτές Τοπικών Δικτύων (LAN)

Χρησιμοποιήσαμε τους EDFA για να ξεπεράσουμε την απώλεια κατανομής καθώς και τα άλλα είδη απώλειας στα LAN και στα δίκτυα ραδιομετάδοσης. Μία σημαντική εφαρμογή τους είναι στα δίκτυα κατανομής εικόνας αναλογικού πολυκαναλικού SCM, των οποίων η διαχείριση ισχύος είναι περιορισμένη. Η διαχείριση ισχύος σε ένα πείραμα επεκτάθηκε στα 15dB ενισχύοντας το πολυκαναλικό σήμα με ένα EDFA που παρείχε απολαβή οπτικής ίνας προς ένα 11.5dB. Σ' ένα άλλο πείραμα, ένας EDFA ενίσχυσε 100 κανάλια εικόνας FM κι έξι ψηφιακά κανάλια βασικής ζώνης των 622Mb/s ταυτόχρονα, καλύπτοντας φασματική περιοχή 34nm. Το ενισχυμένο πολυκαναλικό σήμα μπορούσε να κατανεμηθεί σε 4096 συνδρομητές. Η ιδέα αυτή μπορεί να επεκταθεί σε εκατομμύρια συνδρομητές χρησιμοποιώντας πολλούς ενισχυτές. Το 1990 παρουσιάστηκε ένα δίκτυο ραδιομετάδοσης ικανό να εξυπηρετήσει 39.5

εκατομμύρια συνδρομητές, χρησιμοποιώντας ζεύκτες οπτικών ινών δύο σταδίων. Ένας EDFA, που λειτουργεί σαν ενισχυτής ισχύος, υποστήριξε το πολυκαναλικό σήμα σε κάθε στάδιο. Το δίκτυο κατανομής κατάφερε να εκπέμψει 384 ψηφιακά κανάλια εικόνας σε απόσταση 27.7km.

Η εφαρμογή των EDFA για την αναλογική κατανομή εικόνας συνέχισε να ελκύει την προσοχή κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990, λόγω της πρακτικής τους χρήσης από την τηλεφωνία και τη βιομηχανία CATV. Σ' ένα πείραμα των 30 καναλιών, η διαχείριση ισχύος έφτασε τα 45dB. Σε ένα μετέπειτα πείραμα, η διαχείριση ισχύος αυξήθηκε στα 73dB, χρησιμοποιώντας μόνο τρεις EDFA. Το σύστημα κατάφερε να μεταδώσει το σύνθετο σήμα εικόνας σε 0.52 εκατομμύρια συνδρομητές και είναι κατάλληλο για LAN όπως τα συστήματα σύνδεσης των τερματικών μέσω οπτικών ινών. Σ' ένα άλλο πείραμα, το δίκτυο ραδιομετάδοσης κατάφερε να μεταδώσει 35 κανάλια εικόνας σε 4.2 εκατομμύρια συνδρομητές.

Έχουν διεξαχθεί επίσης πειράματα για να δείξουν πως οι EDFA μπορούν να ενισχύσουν την απόδοση του LAN όταν χρησιμοποιούνται ζεύκτες αστέρος για να εγκαταστήσουν την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ των χρηστών. Σ' ένα πείραμα, χρησιμοποιήθηκε ένας EDFA σαν προενισχυτής μεταξύ του ζεύκτη αστέρα και του δέκτη. Η βελτίωση της ευαισθησίας του δέκτη κατά 14dB αυξάνει τον αριθμό των χρηστών κατά 20. Μια άλλη τεχνική χρησιμοποιεί ζεύκτες αστέρος με απολαβή. Αρκετοί ζεύκτες αστέρος και EDFA συνδυάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε το σήμα να μπορεί να κατανεμηθεί χωρίς μεγάλη απώλεια. Επιπλέον, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα απλό laser άντλησης για να αντλήσουμε όλους τους EDFA, καθιστώντας την τεχνική οικονομικά ελκυστική. Μια φωτονική αρχιτεκτονική διπλού διαύλου με οπτικούς ενισχυτές έχει επίσης προταθεί. Η χρήση των ενισχυτών οπτικών ινών επιτρέπει τη λειτουργία πολλών gigabit με 100 κόμβους σε εκατοντάδες χιλιόμετρα.

5.4 Διαδοχικοί Ενισχυτές εντός γραμμής

Οι οπτικοί ενισχυτές συχνά συνδέονται διαδοχικά για να ξεπεράσουν την απώλεια στις οπτικές ίνες σ' ένα σύστημα επικοινωνίας μεγάλης απόστασης (π.χ. υποθαλάσσιο). Η σχεδίαση αυτού του είδους των οπτικών συστημάτων απαιτεί την προσεκτική εξέταση πολλών παραγόντων, οι πιο σημαντικοί εκ των οποίων είναι ο θόρυβος του ενισχυτή, η διασπορά της οπτικής ίνας και η μη-γραμμικότητα στις οπτικές ίνες.

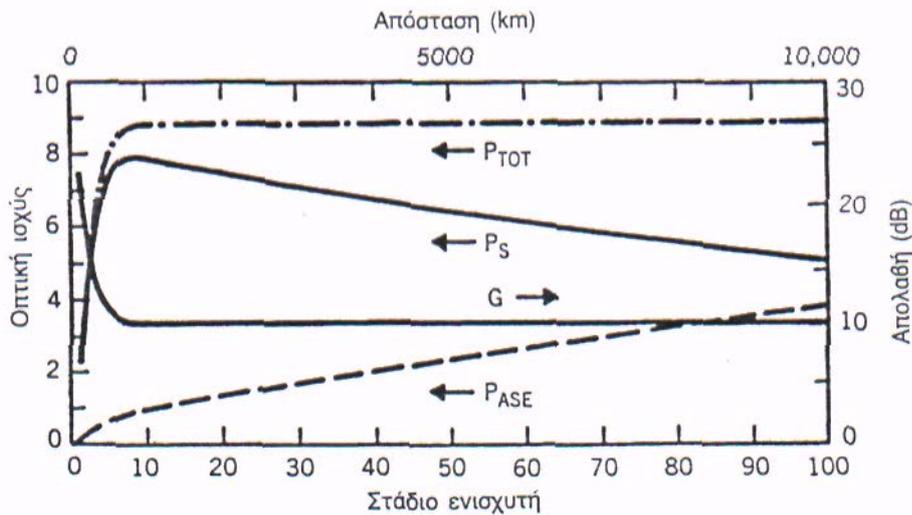
5.4.1 Θόρυβος του Ενισχυτή

Ο θόρυβος του ενισχυτή επηρεάζει την απόδοση του συστήματος με δύο τρόπους. Πρώτον, η *ενισχυμένη αυθόρμητη εκπομπή* (ASE) συσσωρεύεται σε πολλούς ενισχυτές. Δεύτερον, καθώς αυξάνεται η στάθμη της ASE, αρχίζει να επιφέρει κόρο στους οπτικούς ενισχυτές και να μειώνει την απολαβή σήματος. Το καθαρό αποτέλεσμα είναι ότι η στάθμη σήματος πέφτει και η στάθμη ASE αυξάνεται κατά μήκος της γραμμής μετάδοσης, υποβαθμίζοντας σημαντικά τον SNR στον δέκτη. Αριθμητικές προσομοιώσεις δείχνουν πως το σύστημα αυτορυθμίζεται, αφού η ολική ισχύς, που επιτυγχάνεται προσθέτοντας την ισχύ σήματος και την ισχύ ASE, παραμένει σχετικά σταθερή. Το Σχήμα 5.2 δείχνει αυτή την αυτορυθμιστική συμπεριφορά μίας αλυσίδας 100 διαδοχικών ενισχυτών με μεταξύ τους απόσταση 100km και απολαβή μικρού-σήματος 35dB. Οι ισχύεις που εκπέμπονται από τον πομπό είναι 1mW. Οι άλλες παράμετροι είναι $P^s_{out} = 8mW$, $n_{sp} = 1.3$ και $G0 \exp(-\alpha LA) = 3$, όπου LA είναι η απόσταση μεταξύ των ενισχυτών. Η ισχύς σήματος και ASE γίνονται συγκρίσιμες μετά τα 10.000km, δείχνοντας το πρόβλημα του SNR στον δέκτη.

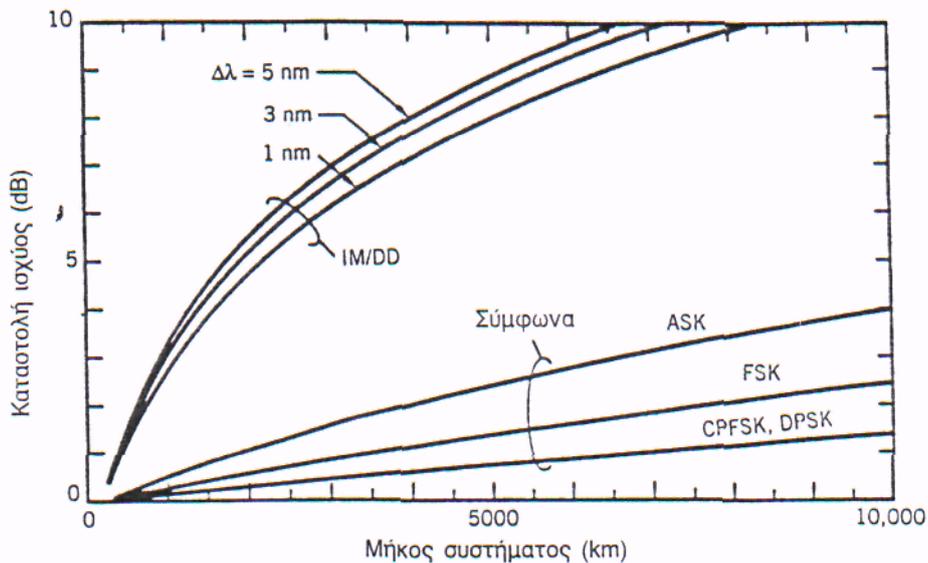
Ο ενεργός δείκτης θορύβου για μία αλυσίδα k διαδοχικών ενισχυτών μπορεί να αποκτηθεί αν εξετάσουμε τη διάδοση της ASE και δίνεται από την

$$F_n^{eff} = F_{n1} + \frac{F_{n2}}{G_1} + \frac{F_{n3}}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_{nk}}{G_1 G_2 \dots G_{k-1}} \quad (5.4.1)$$

όπου F_{nj} και G_j είναι ο δείκτης θορύβου και η απολαβή του j° ενισχυτή ($j=1, \dots, k$), αντίστοιχα.



Σχήμα 5.2 Η μεταβολή της ισχύος σήματος P_s και της ισχύος ASE P_{ASE} κατά μήκος μίας αλυσίδας διαδοχικών οπτικών ενισχυτών. Η ολική ισχύς P_{TOT} γίνεται σχεδόν σταθερή μετά από μερικούς ενισχυτές. (©1991 IEEE. Ανατύπωση κατόπιν αδείας.)



Σχήμα 5.3 Η καταστολή ισχύος σαν συνάρτηση του μήκους ίου συστήματος για ένα οπτικό σύστημα 2.5Gb/s, με διαδοχικούς ενισχυτές με μεταξύ τους απόσταση 100km για αντιστάθμιση της απώλειας στις οπτικές ίνες. Οι επάνω τρεις καμπύλες δείχνουν την αποδοτικότητα των συστημάτων IM/DD για τρεις τιμές του οπτικού φίλτρου του εύρους ζώνης $\Delta\lambda$. Οι κάτω τρεις καμπύλες δείχνουν την αποδοτικότητα των σύμφωνων συστημάτων με διαφορετικούς τρόπους διαμόρφωσης. (©1991 IEEE. Ανατύπωση κατόπιν αδείας.)

Από την άποψη της σχεδίασης του συστήματος, μας ενδιαφέρει να υπολογίσουμε την καταστολή ισχύος, η οποία ορίζεται σαν η αύξηση της οπτικής ισχύος που λαμβάνεται παρουσία μιας αλυσίδας ενισχυτών. Το Σχήμα 5.3 δείχνει την καταστολή ισχύος που υπολογίζεται σαν συνάρτηση του μήκους του συστήματος LT για την περίπτωση στην οποία οι ενισχυτές τοποθετούνται με μεταξύ τους απόσταση 100km για να αντισταθμίσουν επακριβώς την απώλεια οπτικών ινών της τάξης των 20dB. Η εκτοξευμένη ισχύς είναι 1mW, έτσι ώστε κάθε ενισχυτής δέχεται $10\mu\text{W}$ (-20dBm) στην είσοδο του. Ο κόρος της απολαβής από την ASE δεν λαμβάνεται υπόψη. Το σύστημα λειτουργεί στα 2.5Gb/s και υποθέτουμε πως κάθε ενισχυτής έχει δείκτη θορύβου ίσο με 5dB. Στην περίπτωση της απευθείας ανίχνευσης (IM/DD), η καταστολή ισχύος είναι αρκετά μεγάλη και υπερβαίνει τα 5dB για $LT > 2000\text{km}$, ακόμη κι όταν χρησιμοποιούμε ένα οπτικό φίλτρο για να μειώσουμε την ASE. Αντίθετα, η καταστολή ισχύος παραμένει μικρή για τα σύμφωνα οπτικά συστήματα.

5.4.2 Διασπορά και Μη-γραμμικότητα στις οπτικές ίνες

Πολλά πειράματα που έγιναν τη δεκαετία του 1990 παρουσίασαν τα πλεονεκτήματα των ενισχυτών σε-σειρά όσον αφορά την αύξηση της απόστασης μετάδοσης της ζεύξης οπτικών ινών σημείο-προς- σημείο. Ένα πείραμα του 1990 έδειξε μετάδοση σε απόσταση 904km στα 1.2Gb/s χρησιμοποιώντας 12 EDFA.

Σ' ένα πείραμα σύμφωνης μετάδοσης, το σήμα των 2.5Gb/s μεταδόθηκε σε απόσταση 2223km χρησιμοποιώντας 25 EDFA τοποθετημένους ανά 80km, οι οποίοι προσφέρουν ολική απολαβή πάνω από 440dB. Στο πείραμα αυτό, το ενεργό γινόμενο BL υπερβαίνει τα 5.5(Tb/s)-km. Όπως ήταν αναμενόμενο, η διασπορά στις οπτικές ίνες αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για τα οπτικά συστήματα με ενισχυτές σε-σειρά. Πράγματι, το πείραμα ήταν εφικτό μόνο επειδή χρησιμοποιήθηκαν ίνες ολισθημένης διασποράς σε όλη τη ζεύξη. Επιπλέον, το μήκος κύματος μηδενικής διασποράς μεταβαλλόταν σε διαφορετικά τμήματα της οπτικής ίνας με τέτοιο τρόπο ώστε η ολική διασπορά σε όλο το μήκος των 2223km να φτάνει μόλις τα -43ps/nm στο λειτουργικό μήκος κύματος των 1.55 μm .

Ακόμη και τότε, παρατηρήθηκε στο πείραμα καταστολή ισχύος 4.2dB. Μέχρι το 1992, η ολική απόσταση μετάδοσης μπόρεσε να αυξηθεί πάνω από τα 10.000km. Σ' ένα πείραμα, ένα σήμα των 2.5Gb/s μεταδόθηκε σε απόσταση 10.073km χρησιμοποιώντας 199 EDFA. Ο ρυθμός μετάδοσης bit επεκτάθηκε στα 10Gb/s σε ένα παρόμοιο πείραμα, αλλά η ολική απόσταση περιορίστηκε στα 6.000km. Η απόδοση μπορεί να βελτιωθεί ακόμη περισσότερο, αν προσέξουμε και μειώσουμε την επίδραση της διασποράς στις οπτικές ίνες λειτουργώντας πολύ κοντά στο μήκος κύματος μηδενικής διασποράς. Πράγματι, παρουσιάστηκε ενεργός απόσταση μετάδοσης 21.000km σε ένα ρυθμό μετάδοσης bit 2.5Gb/s και 14.300km στα 5Gb/s σε εργαστηριακό πείραμα, που χρησιμοποιεί τη διάταξη κυκλικών βρόχων οπτικών ινών.

Στην πράξη, είναι δύσκολο να πραγματοποιήσουμε μία ολική απόσταση μετάδοσης LT πάνω από μερικές χιλιάδες χιλιόμετρα. Ο λόγος είναι πως και η διασπορά και η μη-γραμμικότητα στις οπτικές ίνες περιορίζουν την LT εξαιτίας των συσσωρευμένων επιδράσεων τους [1]. Ένας χονδρικός υπολογισμός του L_T μπορεί να αποκτηθεί αν αγνοήσουμε τις μη γραμμικές επιδράσεις κατά την μετάδοση του σήματος. Αφού οι ενισχυτές αντισταθμίζουν μόνο την απώλεια στις οπτικές ίνες, οι περιορισμοί της διασποράς εφαρμόζονται στα οπτικά συστήματα με διαδοχικούς ενισχυτές εντός γραμμής αν η L , αντικατασταθεί από την LT . Από την Εξίσωση

$$B^2L < (16|\beta_2|)^{-1}$$

ο περιορισμός της διασποράς στα συστήματα που χρησιμοποιούν συνηθισμένες οπτικές ίνες ($\beta_2 = 20\text{ps}^2/\text{km}$ στα 1.55 μm) είναι $B^2L_T < 3000(\text{Gb/s})^2\text{-km}$, αλλά μπορεί

να αυξηθεί κατά 20 ή και περισσότερο για τα οπτικά συστήματα με οπτικές ίνες ολισθημένης διασποράς. Για παράδειγμα, ένα οπτικό σύστημα 10Gb/s περιορίζεται σε $L_T < 6000 \text{ km}$ ακόμη κι όταν χρησιμοποιούμε οπτικές ίνες ολισθημένης διασποράς με μέση διασπορά τέτοια ώστε $\beta_2 = -1 \text{ ps}^2/\text{km}$.

Τα παραπάνω αποτελούν χονδρικό υπολογισμό, αφού δεν συμπεριλαμβάνει τις μη γραμμικές επιδράσεις των οπτικών ινών. Οι οπτικοί παλμοί διαδίδονται σε απόσταση χιλιάδων χιλιομέτρων στα ενισχυμένα οπτικά συστήματα. Παρά τις σχετικά μετριοπαθείς στάθμες ισχύος, οι μη-γραμμικές επιδράσεις γίνονται σημαντικές λόγω της συσσώρευσης τους σε μεγάλες αποστάσεις. Στα μονοκαναλικά οπτικά συστήματα, το επικρατέστερο μη-γραμμικό φαινόμενο που περιορίζει την απόδοση του συστήματος είναι η *διαμόρφωση αυτόματης φάσης* (SPM).

Μία αριθμητική προσέγγιση της απόστασης υιοθετήθηκε κατά τη δεκαετία του 1990 για να δώσει ποσοτικά την επίδραση της SPM στην απόδοση των περιοδικά ενισχυμένων οπτικών συστημάτων [1]. Οι επιδράσεις του θορύβου του ενισχυτή θα πρέπει επίσης να συμπεριληφθούν στις αριθμητικές προσομοιώσεις για τη ρεαλιστική προσέγγιση των οπτικών συστημάτων.

Θα πρέπει να είναι ολοφάνερο ότι η σχεδίαση των οπτικών συστημάτων επικοινωνίας με μεγάλο αριθμό ενισχυτών σε σειρά απαιτεί τον έλεγχο πολλών παραμέτρων του συστήματος. Ένας τρόπος για να αποφύγουμε τις καταστρεπτικές επιδράσεις της διασποράς στις οπτικές ίνες και της μη-γραμμικότητας τους είναι να χρησιμοποιήσουμε σολιτόνια. Τα σολιτόνια εξισορροπούν τις δύο καταστρεπτικές επιδράσεις με τέτοιο τρόπο ώστε η μορφή του παλμού να διατηρείται καθώς το οπτικό σήμα διαδίδεται μέσω της ζεύξης οπτικών ινών.

Πειραματική επαλήθευση

Για την παροχή μιας πειραματικής επαλήθευσης του προτύπου crosstalk, σχεδιάστηκε ένα σύστημα WDM δύο-καναλιών με τη χρησιμοποίηση μιας εμπορικά διαθέσιμης broad-band GaAlAs LED που εξέπεμπε στο μέγιστο μήκος κύματος των 875 nm με ένα φασματικό εύρος ζώνης 80 nm. Προβλέφθηκε ότι θα απαιτούνταν ένας χωρισμός καναλιών 50 nm συνδεδεμένων με τα φασματικά εύροι ζώνης καναλιών 20 nm ώστε να επιτευχθεί ένα επίπεδο crosstalk -37.6 dB . Τα κεντρικά μήκη κύματος καναλιών επιλέχθηκαν να είναι 850 nm και 900 nm έτσι ώστε ο “φασματικός-τεμαχισμός” να παράγει παρόμοια οπτικά επίπεδα ισχύος μέσα στα αποσταγμένα κανάλια μήκους κύματος-ζώνης όταν τοποθετούνται κατ’έναν ίσο χωρισμό 25 nm από το μέγιστο μήκος κύματος LED. Το σύστημα κατασκευάστηκε έπειτα χρησιμοποιώντας καθορισμένα οπτικά φίλτρα bandpass ως στοιχεία από-σύμπλεξης μήκους κύματος. Ένα οπτικό σήμα συνεχούς-κύματος από τον LED συνδέθηκε σε ένα μήκος 10 m ενός πολυτρόπου καλωδίου οπτικών ινών και διαβιβάστηκε στη συσκευή αποσύμπλεξης μήκους κύματος που περιείχε τα οπτικά ευθυγραμμισμένης ακτίνας και τα οπτικά φίλτρα bandpass. Για αυτήν την σύνθεση WDM, crosstalk οφείλεται μόνο σε μια συσκευή WDDx και επομένως χρησιμοποιήθηκε για να λάβει μια βελτιωμένη εκτίμηση crosstalk των $-36,8 \text{ dB}$.

Άμεσες οπτικές μετρήσεις επιπέδων ισχύος εκτελέστηκαν και για τα δύο κανάλια, και τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα I. Τα φασματικά χαρακτηριστικά των καναλιών που προκύπτουν από τη συσκευή WDDx παρατηρήθηκαν να είναι ελαφρώς διαφορετικά, και τα δύο κανάλια παρουσίασαν μια σαφή εξάρτηση στο φασματικό προφίλ LED. Η παρατηρούμενη διαφορά στα προφίλ καναλιών που εκπέμπονται προκύπτει από το γεγονός ότι οι τιμές της μέγιστης μετάδοσης, του κεντρικού μήκους

κύματος, και του φασματικού εύρους ζώνης ήταν επίσης διαφορετικές για τα δύο φίλτρα bandpass (βλ. τον πίνακα I). Μπορεί να σημειωθεί ότι μια χαμηλότερη μετάδοση και στενότερη passband οδηγούν σε μια μεγαλύτερη απώλεια στη ζώνη μήκους κύματος 853 nm: οι συνδυασμένες απώλειες φασματικού-τεμαχισμού και εισαγωγής μετρήθηκαν να είναι -8.2 και -7.2 dB για το στοιχείο στα 853 και 900 nm, αντίστοιχα. Ως εκ τούτου, τα αντίστοιχα διακαναλικά επίπεδα crosstalk για τα χαμηλότερα και ανώτερα κανάλια μήκους κύματος βρέθηκαν να είναι -35.0 και -36.0 dB, τα οποία απεικονίζουν τη διαφορά στις απώλειες εισαγωγής τους.

MEASURED LED CHARACTERISTICS				
Peak Wavelength	875 nm			
Spectral Bandwidth	80 nm			
Fibre-Coupled Optical Power	5 dB μ			
CHARACTERISTICS OF THE DUAL CHANNEL WDM SYSTEM				
TYPE QUANTITY	DESIGN PARAMETER		MEASURED PARAMETER	
	Lower Wavelength Channel	Upper Wavelength Channel	Lower Wavelength Channel	Upper Wavelength Channel
Interchannel Separation / nm	50		47	
Channel Centre Wavelength / nm	850	900	853	900
Channel Spectral Bandwidth / nm	20	20	18	20
Peak Transmission at Channel / %	100	100	78	88
Transmitted Channel Power / dB μ			-3.2	-2.2
Interchannel Leakage / dB μ			-38.2	
Spectral Slicing Loss / dB			-8.2	-7.2
Interchannel Crosstalk / dB	-36.8		-35.0	-36.0

Πίνακας I. Φασματικά χαρακτηριστικά και απόδοση crosstalk του πειραματικού φασματικά-τεμαχισμένου LED δύο-καναλιών συστήματος WDM

ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα φίλτρα Fabry-Perot επιδεικνύουν ουσιαστική μετάδοση στις περιοχές των άκρων [2] που μπορούν να προκαλέσουν μεγαλύτερη διακαναλική crosstalk από το αναμενόμενο, αλλά οι αναλυτικές προβλέψεις μπορούν στη συνέχεια να αντιμετωπιστούν ως lowerbound (μέγιστη απόδοση crosstalk). Εντούτοις, απροσδόκητα υψηλά επίπεδα crosstalk μπορούν επίσης να προκληθούν μέσω των αντανάκλασεων Fresnel, της χρωματικής παρέκκλισης και διασποράς, των δομικών ατελειών στα συστατικά, της διασποράς, του επιπέδου εκτός ζώνης απόρριψης στα φίλτρα παρέμβασης, και τα second-order άκρα μετάδοσης με διαθλαστικά στοιχεία. Παραδείγματος χάριν, με ένα κιγκλίδωμα-βασισμένο σε σχέδιο, το αναφερόμενο επίπεδο crosstalk ήταν < -41 dB με passbands 3.65 nm που κεντροθετήθηκαν 20 nm χώρια [1], ενώ η ίδια απόδοση πρέπει να ληφθεί με κανάλια μόνο 10 nm χώρια. Εντούτοις, για μια συσκευή κιγκλιδωμάτων Littrow, το αναφερόμενο χειρότερο επίπεδο crosstalk ήταν -25.9 dB για passbands 6 nm τοποθετημένα 14 nm χώρια [3], το οποίο συγκρίνεται ευνοϊκότερα με μια αναλυτική πρόβλεψη -31.3 dB, εντεύθεν υποδεικνύοντας μια ανώτερη κατασκευή συσκευών. Αντιθέτως, για τις περισσότερες πρακτικές περιπτώσεις, το λάθος, στο προβλεπθέν επίπεδο

crosstalk λόγω της ανεπάρκειας της Gaussian προσέγγισης αναμένεται να είναι λιγότερο σημαντικό από αυτό λόγω των δυσμενών παραγόντων. Επιπλέον, το αναλυτικό πρότυπο το καθιστά πιθανό να κάνει μια αξιολόγηση της προσδοκώμενης απόδοσης crosstalk, η οποία, εάν δεν επιτευχθεί, δείχνει την ύπαρξη των δυσμενών αποτελεσμάτων λόγω των πιθανών ανεπαρκειών στο σχέδιο συστημάτων.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Η ανάλυση δύο σύνθετων φασματικών-τεμαχισμένων συστημάτων WDM (δηλ. με ή χωρίς μια συσκευή πολυπλεξίας μήκους κύματος) κατέδειξε ότι διακαναλική crosstalk είναι άμεσα ανάλογη προς την αναλογία διαχωρισμού καναλιών/εύρος ζώνης καναλιών (καλούμενη ως ο ομαλοποιημένος διαχωρισμός καναλιών). Αποδείχθηκε ότι το επίπεδο crosstalk που εκφράζεται σε decibels θα είναι περίπου έξι φορές το τετράγωνο του ομαλοποιημένου χωρισμού καναλιών αυτή η πρόβλεψη βρέθηκε να είναι σε καλή συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις που λήφθηκαν για ένα σύστημα WDM δύο-καναλιών χρησιμοποιώντας το φασματικό-τεμαχισμό LED. Είναι άξιο να σημειωθεί, εντούτοις, ότι στην πράξη τα φασματικά χαρακτηριστικά των φίλτρων LED και των οπτικών φίλτρων bandpass θα μπορούσαν να διαφέρουν στα tail-ends των προσεγγίσεων Gauss: ένας παράγοντας που θα μπορούσε να οδηγήσει σε μια υπερεκτίμηση στις προβλέψεις επιπέδων crosstalk για μεγάλες τιμές του ομαλοποιημένου χωρισμού καναλιών. Εντούτοις, ένα σημαντικό όφελος του αναφερόμενου προτύπου είναι η απλότητά του και η δυνατότητά του να λειτουργήσει ως εργαλείο “πρόβλεψης” σχεδίου.

5.5 Οπτικά Συστήματα WDM

Η ικανότητα πολυκάναλης ενίσχυσης των EDFA παρουσιάστηκε σε πολλά πειραματικά συστήματα [2],[3]. Σ' ένα αρχικό πείραμα, τέσσερα κανάλια των 2.5Gb/s με απόσταση μεταξύ τους 2nm μεταδόθηκαν σε απόσταση 459km χρησιμοποιώντας έξι EDFA σαν ενισχυτές σε-σειρά. Η καταστολή λόγω διαφωνίας μεταξύ καναλιών θεωρήθηκε ασήμαντη. Έγινε επίσης κι ένα πείραμα μεταδίδοντας τέσσερα κανάλια που λειτουργούσαν στα 1.7Gb/s μέσω οπτικής ίνας μήκους 70km. Το πείραμα χρησιμοποίησε σύμφωνη ανίχνευση με ασύγχρονο δέκτη FSK. Σε πείραμα του 1993, τέσσερα κανάλια μεταδόθηκαν σε απόσταση 1500km χρησιμοποιώντας 22 διαδοχικούς ενισχυτές. Μέχρι το 1996, 55 κανάλια, με απόσταση μεταξύ τους 0.8nm και το καθένα λειτουργώντας στα 20Gb/s, μεταδόθηκαν σε απόσταση 150km χρησιμοποιώντας δύο ενισχυτές σε-σειρά, με αποτέλεσμα ολικό ρυθμό μετάδοσης bit 1.1Tb/s και γινόμενο BL 165(Tb/s)-km [2]. Για εφαρμογές μακρινής απόστασης, σκοπός μας είναι να μεταδώσουμε έναν μεγάλο αριθμό καναλιών σε απόσταση πάνω από 1000km [3]. Σ' ένα εργαστηριακό πείραμα, πραγματοποιήθηκε απόσταση μετάδοσης 6000km στα 20Gb/s (8 κανάλια στα 2.5Gb/s) με απόσταση μεταξύ ενισχυτών 75km. Στο άκρο υψηλού ρυθμού μετάδοσης bit, το 1996 ένα πείραμα πολυπλεξε δεκαέξι κανάλια των 10Gb/s για να πραγματοποιήσει μετάδοση στα 160Gb/s, αλλά το μήκος της ζεύξης ήταν μόλις 531km. Αντίθετα, ένα πείραμα βρόχου-ινών έδειξε πως η μετάδοση 100Gb/s (20 κανάλια στα 5Gb/s) σε υπερωκεάνια μετάδοση 9100km.

Οι απαιτήσεις απόδοσης των EDFA είναι αρκετά αυστηρές για τις εφαρμογές WDM. Ο λόγος είναι ότι οι μικρές μεταβολές της απολαβής του ενισχυτή για τα επιμέρους κανάλια αυξάνονται εκθετικά σε μία αλυσίδα ενισχυτών σε-σειρά, αφού

το φάσμα της απολαβής είναι το ίδιο για όλους τους ενισχυτές. Ακόμη και μία διαφορά απολαβής ενισχυτή 0.2dB αυξάνεται στα 20dB σε μία αλυσίδα 100 ενισχυτών σε-σειρά, επιφέροντας μεταβολές στην ισχύ των καναλιών της τάξης του 100, μεταβολή πρακτικά μη αποδεκτή. Σαν συνέπεια, ο αριθμός των καναλιών περιορίζεται όχι μόνο από το εύρος ζώνης του ενισχυτή. Για να ενισχύσουμε όλα τα κανάλια με την ίδια σχεδόν ποσότητα, το φάσμα διπλής-κορυφής της απολαβής των EDFA μας υποχρεώνει να ασφαλίσουμε όλα τα κανάλια κοντά σε μία από τις κορυφές απολαβής. Μία τέτοια προσέγγιση περιορίζει δραστικά τον αριθμό των καναλιών.

Το ολικό εύρος ζώνης των 30-40nm μπορεί να χρησιμοποιηθεί αν το φάσμα απολαβής του EDFA γίνει επίπεδη. Διάφορες τεχνικές *επίπεδης-απολαβής* έχουν αναπτυχθεί για τον σκοπό αυτό [2], [3]. Σε μία προσέγγιση, χρησιμοποιείται είτε ένα φίλτρο απόρριψης ζώνης συχνοτήτων ή ένα φίλτρο Mach-Zehnder [3] για να εξισορροπήσουμε την απολαβή διάφορων καναλιών. Πράγματι, μέχρι 128 κανάλια μεταδόθηκαν σε απόσταση 480km χρησιμοποιώντας πολλούς EDFA, των οποίων η απολαβή εξισορροπήθηκε μέσω συντονισμένων φίλτρων. Μπορούμε επίσης να χρησιμοποιήσουμε έναν συνδυασμό φραγμάτων διάθλασης οπτικών ινών μεγάλης περιόδου για τον σκοπό αυτό, αφού λειτουργεί σαν οπτικό φίλτρο του οποίου το φάσμα μετάδοσης μπορεί να διαμορφωθεί κατάλληλα ώστε να αντισταθμίσει τις ανομοιομορφίες της απολαβής του EDFA. Πράγματι, ένας EDFA του οποίου η απολαβή είναι επίπεδη σε 1dB και σε εύρος ζώνης 40nm δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας ένα φίλτρο φράγματος διάθλασης.

Σε μία διαφορετική προσέγγιση, η ισχύς εισόδου καναλιών ρυθμίζεται ώστε να μειώνει τις μεταβολές της ισχύος στον δέκτη σε μια αποδεκτή στάθμη. Μία άλλη προσέγγιση, χρησιμοποιεί την διεύρυνση της ανομοιογένειας του φάσματος απολαβής για να εξισορροπήσουμε τις απολαβές των καναλιών, είτε ψύχοντας κάθε ενισχυτή εντός γραμμής, είτε με την περιοδική εισαγωγή τέτοιων ενισχυτών με διευρυμένη ανομοιογένεια σε μία μεγάλη αλυσίδα ενισχυτών [4]. Σε μία παρόμοια προσέγγιση, οι ενισχυτές οπτικών ινών σχεδιάζονται έτσι ώστε να παρέχουν μια στάθμη φάσματος απολαβής εμπλουτίζοντας ταυτόχρονα με υλικά όπως το αλουμίνιο ή χρησιμοποιώντας ίνες *φθορίου* αντί πυριτίου σαν μέσο-ξενιστή όπου εμπλουτίζονται ιόντα ερβίου. Έχει επιτευχθεί επίπεδη απολαβή εντός 1.5dB και σε εύρος ζώνης 75nm εμπλουτίζοντας οπτική ίνα με ιόντα έρβιου. Η τεχνολογία έχει εξελιχθεί αρκετά μέχρι το 1996, όταν και διατέθηκαν στο εμπόριο EDFA με σχετικά επίπεδη απολαβή σε εύρος ζώνης 30nm.

5.5.1 Γιατί χρησιμοποιούνται τα WDM;

Με την εκθετική αύξηση των επικοινωνιών, που προκαλείται κυρίως από την ευρεία αποδοχή του διαδικτύου, πολλοί κομιστές διαπιστώνουν ότι οι εκτιμήσεις τους για τις ανάγκες ινών έχουν υποτιμηθεί ιδιαίτερα. Αν και τα περισσότερα καλώδια περιέλαβαν πολλές εφεδρικές ίνες όταν εγκαθίσταντο, αυτή η αύξηση έχει χρησιμοποιήσει πολλές από αυτές τις εφεδρικές ίνες και επομένως απαιτείται νέα χωρητικότητα. Τρεις μέθοδοι υπάρχουν για την επέκταση της χωρητικότητας: 1) την εγκατάσταση περισσότερων καλωδίων, 2) την αύξηση του system bitrate για την πολυπλεξία περισσότερων σημάτων ή 3) την πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος.

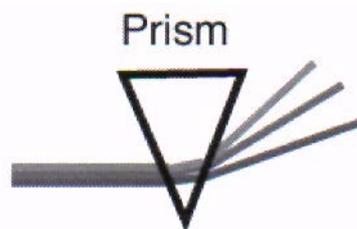
Η εγκατάσταση περισσότερων καλωδίων θα είναι η συνιστώμενη μέθοδος σε πολλές περιπτώσεις, ειδικά στις μητροπολιτικές περιοχές, δεδομένου ότι η ίνα έχει γίνει εξαιρετικά ανέξοδη και οι μέθοδοι εγκατάστασης αποδοτικότερες (όπως η συγκόλληση μαζικής τήξης.) Αλλά εάν το διάστημα αγωγών δεν είναι διαθέσιμο ή είναι απαραίτητη κάποια τεράστια κατασκευή, μπορεί και να μην είναι ό,τι πιο

αποδοτικό οικονομικώς.

Η αύξηση του system bitrate μπορεί επίσης να μην αποδειχθεί οικονομικώς αποτελεσματική. Πολλά συστήματα τρέχουν ήδη σε αναλογία SONET OC- 48 (2,5 GB/s) και η αναβάθμιση σε OC -192.(10 GB/s) είναι ακριβή, απαιτεί την αλλαγή όλης της ηλεκτρονικής σε ένα δίκτυο, και προσθέτει 4 φορές την χωρητικότητα, πολύ περισσότερο από το απαραίτητο. Η τρίτη εναλλακτική λύση WDM έχει αποδειχθεί οικονομικώς πιο αποδοτική σε πολλές περιπτώσεις. Επιτρέπει την χρησιμοποίηση της τρέχουσας ηλεκτρονικής και των τρεχουσών ινών, αλλά απλά μοιράζει τις ίνες εκπέμποντας διαφορετικά κανάλια σε διαφορετικά μήκη κύματος (χρώματα) του φωτός. Τα συστήματα που χρησιμοποιούν ήδη τους οπτικούς ενισχυτές ινών ως επαναλήπτες δεν απαιτούν επίσης αναβάθμιση για τα περισσότερα συστήματα WDM

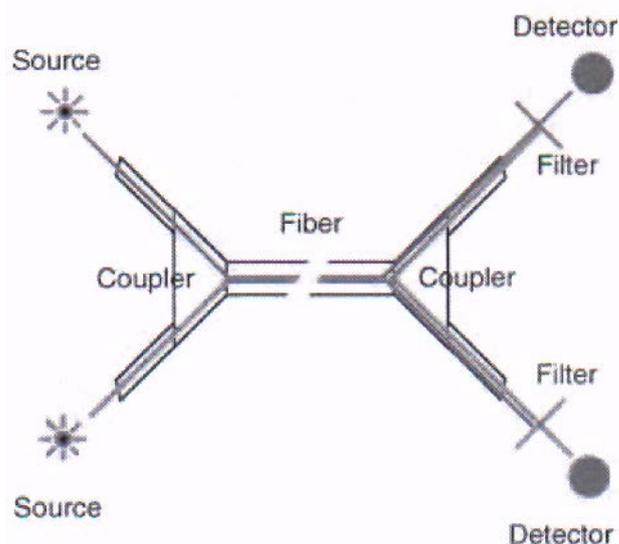
5.5.2 Πώς λειτουργεί το WDM;

Είναι εύκολο να καταλάβει κανείς το WDM. Ας υποθέσουμε ότι μπορούμε να δούμε πολλά διαφορετικά χρώματα του φωτός - κόκκινο, πράσινο, κίτρινο, μπλε, κλπ. εντελώς ξεφηνικά. Τα χρώματα μεταδίδονται μέσω του αέρα μαζί και μπορεί να αναμειχθούν, αλλά μπορεί και να χωριστούν εύκολα χρησιμοποιώντας μια απλή συσκευή όπως ένα πρίσμα, ακριβώς όπως χωρίζουμε το "άσπρο" φως από τον ήλιο σε ένα φάσμα χρωμάτων με το πρίσμα.



Σχήμα 5.4 Διαχωρίζοντας μια ακτίνα φωτός στα χρώματά της

Αυτή η τεχνική καταδείχθηκε αρχικά με την οπτική ίνα στις αρχές της δεκαετίας του '80 όταν οι οπτικές συνδέσεις ινών telco χρησιμοποιούσαν ακόμη την multimode ίνα. Το φως στα 850 nm και 1300 nm εισήχθηκε στην ίνα από το ένα άκρο χρησιμοποιώντας έναν απλό τηγμένο συζευκτήρα. Στο απόμακρο άκρο της ίνας, ένας άλλος συζευκτήρας χώρισε το φως σε δύο ίνες, εκ των οποίων ή μια στάλθηκε σε έναν ανιχνευτή πυριτίου πιο ευαίσθητο στα 850 nm και η άλλη σε ένα ανιχνευτή γερμάνιο ή InGaAs πιο ευαίσθητο στα 1300 nm. Τα φίλτρα αφαίρεσαν τα ανεπιθύμητα μήκη κύματος, έτσι κάθε ανιχνευτής ήταν σε θέση να λάβει μόνο το σήμα προοριζόμενο για αυτόν.

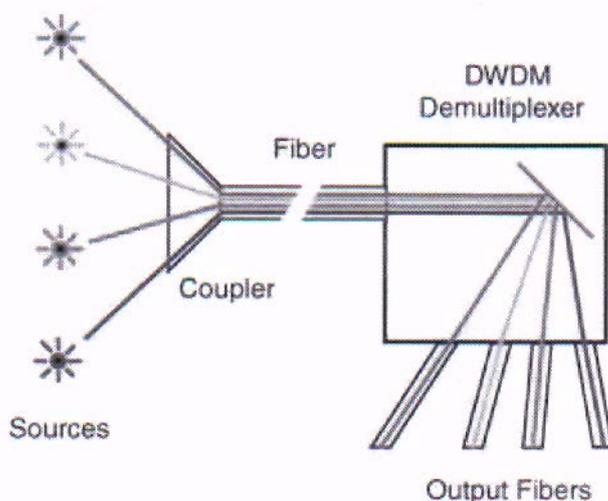


Σχήμα 5.5 WDM με τους συζευκτήρες και τα φίλτρα

Μέχρι την δεκαετία του '80, όλες οι συνδέσεις τηλεπικοινωνιών ήταν μονότροπης ίνας, και οι κατασκευαστές συζευκτών έμαθαν πώς να φτιάχνουν τηγμένους συζευκτές που να μπορούν να χωρίζουν τα 1300nm και 1550nm σήματα επαρκώς ώστε να είναι εφικτά WDM με τα απλά, ανέξοδα συστατικά. Εντούτοις, αυτό είχε περιορίσει τη χρησιμότητα, καθώς η ίνα σχεδιάστηκε διαφορετικά για τα 1300nm και 1550 nm, λόγω των χαρακτηριστικών διασποράς του γυαλιού. Η ίνα που βελτιστοποιήθηκε στα 1300nm χρησιμοποιήθηκε για τις τοπικές συνδέσεις βρόχων, ενώ μεγάλης απόστασης και υποβρύχια καλώδια χρησιμοποίησαν διασποράς-μετατοπισμένη ίνα που βελτιστοποιήθηκε για την απόδοση στα 1550nm

Με την εμφάνιση των οπτικών ενισχυτών ινών για τους επαναλήπτες προς το τέλος της δεκαετίας του '80, η έμφαση μετατοπίστηκε στη 1550nm ζώνη μετάδοσης. Τα WDM είχαν μόνο νόημα εάν τα πολυπλεγμένα μήκη κύματος ήταν στην περιοχή της λειτουργούσας σειράς ενισχυτών ινών 1520 έως 1560nm. Δεν ήθελε πολύ μέχρι ο εξοπλισμός WDM να είναι σε θέση να βάλει 4 σήματα σε αυτήν την ζώνη, με μήκη κύματος περίπου 10nm χώρια. Το άκρο εισαγωγής ενός συστήματος WDM είναι πραγματικά αρκετά απλό. Είναι ένας απλός συζευκτήρας που συνδυάζει όλες τις εισαγωγές σε μια ίνα παραγωγής. Αυτοί είναι διαθέσιμοι εδώ και πολλά έτη, προσφέροντας 2 ..4 ..8 ..16 ..32 ή ακόμα και 64 εισαγωγές. Το δύσκολο συστατικό για να φτιαχτεί είναι ο αποπολυπλέκτης.

Ο αποπολυπλέκτης παίρνει την ίνα εισαγωγής και ευθυγραμμίζει το φως σε μια στενή, παράλληλη ακτίνα φωτός. Λάμπει σε μια σχάρα διάθλασης (ένας καθρέφτης σαν μια συσκευή που λειτουργεί όπως ένα πρίσμα, παρόμοιο με την πλευρά στοιχείων του CD) που χωρίζει το φως στα διαφορετικά μήκη κύματος στέλνοντας τα μακριά σε διαφορετικές γωνίες. Η οπτική συλλαμβάνει κάθε μήκος κύματος και το εστιάζει σε μια ίνα, δημιουργώντας χωριστές εξόδους για κάθε χωριστό μήκος κύματος του φωτός.



Σχήμα 5.6 Αποπολυπλέκτης WDM

5.5.3 WDM σε DWDM

Τα υπάρχοντα συστήματα προσφέρουν από 4 έως 32 κανάλια μήκους κύματος. Οι υψηλότεροι αριθμοί μηκών κύματος έχουν οδηγήσει στην ονομασία DWDM. Η τεχνική απαίτηση είναι μόνο ότι τα laser πρέπει να είναι

πολύ συγκεκριμένων μηκών κύματος και τα μήκη κύματος να είναι πολύ σταθερά, και οι αποπολυπλέκτες DWDM ικανοί να ξεχωρίζουν κάθε μήκος κύματος χωρίς ανεπιθύμητη παρεμβολή.

5.5.4 Πλεονεκτήματα των WDM

Ένα σύστημα WDM έχει μερικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα που τα καθιστά πολύ εύχρηστα. Κάθε μήκος κύματος μπορεί να είναι από μια κανονική σύνδεση, παραδείγματος χάριν σύνδεση OC-48, οπότε το μεγαλύτερο μέρος του υπάρχοντος εξοπλισμού δεν καθίσταται απαρχαιωμένος. Χρειάζονται μόνο πομποί laser που επιλέγονται για μήκη κύματος που ταιριάζουν με τον αποπολυπλέκτη WDM ώστε να είναι σίγουρο ότι κάθε κανάλι αποκωδικοποιείται κατάλληλα στο λαμβάνον άκρο. Εάν χρησιμοποιείται μια εισαγωγή OC- 48 SONET, μπορούμε να έχουμε $4 \times 2.5 \text{ GB/s} = 10 \text{ GB/s}$ μέχρι και $32 \times 2,5 \text{ GB/s} = 80 \text{ GB/s}$. Ενώ 32 κανάλια είναι το μέγιστο σήμερα, οι μελλοντικές αυξήσεις αναμένονται να προσφέρουν 80-128 κανάλια! Και δεν περιοριζόμαστε σε SONET, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε παραδείγματος χάριν Gigabit Ethernet, ή μπορούμε να αναμίξουμε και να ταιριάξουμε SONET και Gigabit Ethernet ή οποιαδήποτε άλλα ψηφιακά σήματα! Το μόνο πράγμα που δεν μπορούμε να κάνουμε είναι μίγμα στα αναλογικά κανάλια όπως το CATV.

5.5.5 Επαναλήπτες

Μια άλλη τεχνολογία που διευκολύνει τα DWDM είναι η ανάπτυξη των οπτικών ενισχυτών ινών για χρήση ως επαναλήπτες. Μπορούν να ενισχύσουν πολυάριθμα μήκη κύματος του φωτός ταυτόχρονα, εφ' όσον είναι όλα στη σειρά μήκους κύματος του ενισχυτή των FO. Λειτουργούν καλύτερα στην απόσταση των 1520-1560 nm, έτσι τα περισσότερα συστήματα DWDM σχεδιάζονται για αυτή την απόσταση. Τώρα που έχει φτιαχτεί ένα με λιγότερη επίδραση από τις ζώνες απορρόφησης OH στα 1400 nm και 1600 nm, η πιθανή απόσταση των DWDM έχει διευρυνθεί αρκετά. Η τεχνολογία χρειάζεται ανάπτυξη για ενισχυτές ινών ευρύτερου φάσματος ώστε να εκμεταλλευθεί τις νέες ίνες.

5.5.6 Εφαρμογές

Δύο προφανείς εφαρμογές είναι ήδη σε χρήση, τα υποβρύχια καλώδια και η επέκταση της “διάρκειας ζωής” των καλωδίων όπου όλες οι ίνες χρησιμοποιούνται. Για τα υποβρύχια καλώδια, το DWDM ενισχύει την χωρητικότητα χωρίς προσθήκη των ινών, οι οποίες δημιουργούν μεγαλύτερα καλώδια και ογκωδέστερους και πιο περίπλοκους επαναλήπτες. Η προσθήκη της υπηρεσίας στις περιοχές όπου τα καλώδια είναι τώρα πλήρη είναι μια άλλη καλή εφαρμογή. Αλλά αυτή η τεχνολογία μπορεί επίσης να μειώσει το κόστος σε όλες τις μεγάλης απόστασης επίγειες συνδέσεις επικοινωνιών και η νέα τεχνολογία μπορεί να οδηγήσει σε εντελώς νέες δικτυακές αρχιτεκτονικές.

5.5.7 Περαιτέρω εμπλουτισμός

Φανταστείτε ένα ολικό-οπτικό δίκτυο που χρησιμοποιεί DWDM, να αλλάζει σήματα στην οπτική περιοχή χωρίς μετατροπή των σημάτων σε ηλεκτρονική μορφή, και να μπορεί να προσθέτει ή να αφήνει σήματα με την εισαγωγή ή την απομάκρυνση του μήκους κύματος κατά βούληση. Όλο αυτό ερευνάται τώρα, και δεδομένης της ταχύτητας με την οποία η τεχνολογία οπτικής αναπτύσσεται, ένα ολικό-οπτικό δίκτυο μπορεί να μην είναι πολύ μακριά στο μέλλον!

5.6 Νέα γενεά ενισχυτών φθάνει στην οπτική δικτύωση

Η πρώτη γενεά των συστημάτων επικοινωνιών fiber-optic εξέπεμψε φως στα 1310nm- η διασπορά μηδέν του μήκους κύματος της ίνας πυριτίου. Μόλις διατέθηκαν τα laser τύπου μονότροπης κατανεμημένης ανάδρασης (DFB), ο περιορισμός διασποράς έγινε λιγότερο σημαντικός από την απώλεια στην ίνα. Το παράθυρο μετάδοσης για τις μεγάλης απόστασης επικοινωνίες κινήθηκε έπειτα στα 1550nm για να εκμεταλλευθεί τη χαμηλότερη απώλεια της ίνας σε αυτό το παράθυρο.

Η εμφάνιση έπειτα, όπως έχουμε ήδη αναφέρει του ενισχυτή ιών εμπλουτισμένου με έρβιο (EDFA) έκανε πιθανή την ύπαρξη συστημάτων που διαβιβάζουν τα σήματα πέρα από χιλιάδες χιλιόμετρα στο παράθυρο των 1550nm χωρίς αναγέννηση. Τα EDFAs είχαν μια κυρίαρχη επιρροή στην ανάπτυξη της τεχνολογίας μετάδοσης ιών, συμπεριλαμβανομένης της επιλογής μήκους κύματος laser, των σχημάτων πολυπλεξίας μήκους κύματος (WDM), του σχεδίου ιών μετάδοσης, και των τεχνικών κατασκευής. Αν και ο αντίκτυπος των EDFAs στα fiber-optic συστήματα επικοινωνιών ήταν απίστευτα θετικός, αρχίζουμε τώρα να προσκρούουμε πάνω στον κεντρικό περιορισμό αυτού του εξοπλισμού: έχουν γενικά ένα εύρος ζώνης το πολύ-πολύ 35nm (1530 έως 1565nm)- το αποκαλούμενο "συμβατικό" ή C band. Διάφορες πρόσφατες εξελίξεις, όπως τα συμπαγής-ανθεκτικότητας laser DFB, οι πολυπλέκτες/αποπολυπλέκτες διαίρεσης συμπαγούς διαστήματος μήκους κύματος, νέες ίνες όπως η ίνα μη-μηδενικής μετατοπισμένης-διασποράς και ομαλοποιημένης-διασποράς, όλα συσχετίζονται με το περιορισμένο εύρος ζώνης των EDFAs σε έναν κόσμο με μια ανεξάντλητη δίνα για εύρος ζώνης.

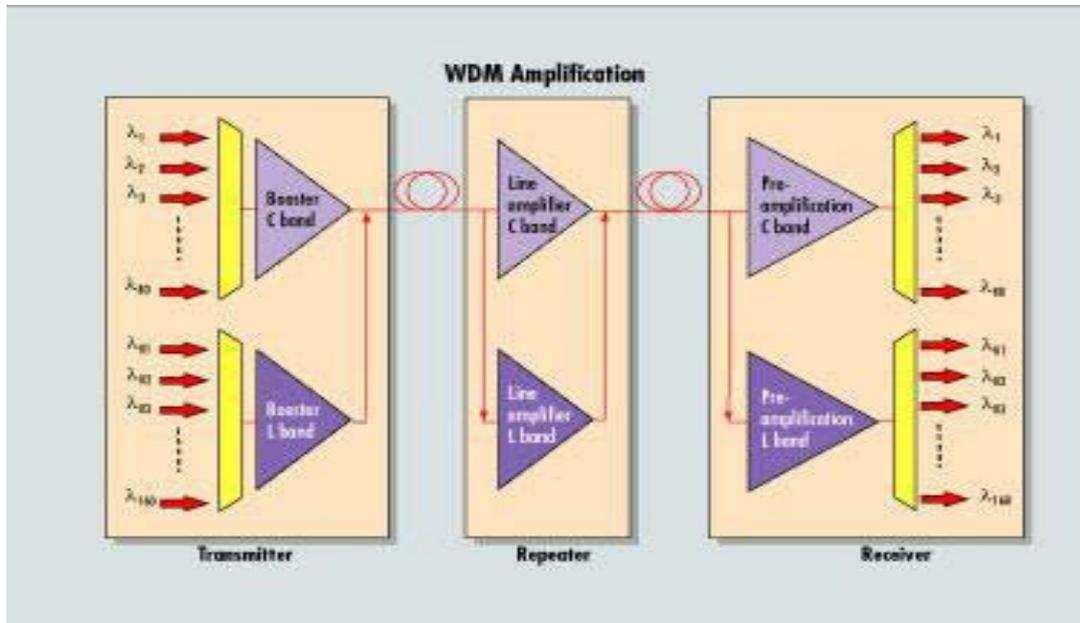
Κατά συνέπεια, υπάρχει μεγάλη ώθηση για την ανάπτυξη των EDFAs με μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Η ενισχυτή ιών εκτεταμένης-ζώνης (L-band) (βλ. Lightwave, το Σεπτέμβριο 1998, σελίδα 71) έσπασε το βασικό εμπόδιο των EDFA και άνοιξε ένα νέο παράθυρο στα 1590nm. Αυτός ο νέος ενισχυτής βοηθάει στην ανακούφιση του προβλήματος της μετάδοσης WDM στην ίνα μεταβαλλόμενης-διασποράς, όπου προκύπτει crosstalk μεγάλου-καναλιού λόγω μηδενικής διασποράς και διάταξης στενού καναλιού περίπου στα 1550nm. Επιτρέπει επίσης άλλα 80 κανάλια στα 50GHz διάταξης να προστεθούν στην τρέχουσα WDM τοπολογία.

Συστήματα WDM εκατό-καναλιών έχουν αναγγελθεί και θα διατεθούν σύντομα στο εμπόριο. Με το πρωτόκολλο διαδικτύου (IP) για τα WDM, την οπτική δικτύωση, και τη σύνδεση μέσω δικτύων, οι απαιτήσεις των συστημάτων WDM αλλάζουν γρήγορα. Πώς διατηρούνται οι ενισχυτές ιών;

5.6.1 Από SONET στα WDM

Τα EDFAs άρχισαν τη σταδιοδρομία τους στα μονοκάναλα συστήματα Σύγχρονα Οπτικά Δικτύου (SONET). Χρησιμοποιήθηκαν πρώτιστα για να επεκτείνουν την προσιτότητα των οπτικών σημάτων με είτε την αντικατάσταση ή/και την αποφυγή των αναγεννητών στις υπάρχουσες ή προγραμματισμένες μονάδες μετάδοσης. Κατά συνέπεια, οι απαιτήσεις για EDFAs εξαρτήθηκαν από λιγότερος από δύο παραμέτρους: βαθμός απολαβής και θορύβου. Οι ενισχυτές χρησιμοποιούνται για να ωθήσουν τη ισχύ σημάτων. Κατά συνέπεια, το ποσό ενίσχυσης, δηλ., απολαβής σημάτων, ενός EDFA πρέπει να προσδιοριστεί καλά κατά τη διάρκεια του σχεδίου συστημάτων για να αντισταθμίσει την απώλεια ιών. Σαν ανεπιθύμητη παρενέργεια, οι ενισχυτές προσθέτουν επίσης το θόρυβο στο σήμα εισαγωγής.

Ο βαθμός της αναλογίας υποβάθμισης σήματος προς θόρυβο (SNR) που εισάγεται από τον ενισχυτή είναι μια βασική παράμετρος, ειδικά όταν ενισχύονται αδύναμα σήματα. Ένας ενισχυτής με βαθμό θορύβου (NF) στα 4 dB εισάγει τη μισή υποβάθμιση στο SNR ενός ενισχυτή με ένα NF 7dB. Δεδομένου ότι η ζήτηση για εύρος ζώνης συνεχίζει να αυξάνεται, η οπτικά ενισχυμένη τεχνολογία των WDM διαπερνά γρήγορα και στα τοπικά και interexchange δίκτυα των κομιστών ως πολύ ελκυστική εναλλακτική λύση στην πολυπλεξία διαίρεσης υψηλής-ταχύτητας χρόνου.



Σχήμα 5.7 Φαίνεται σχηματικά ένα τυπικό WDM 160-καναλιών που χρησιμοποιεί τόσο C- όσο και L- band ενισχυτές για ενίσχυση, ευθυγράμμιση και προενίσχυση.

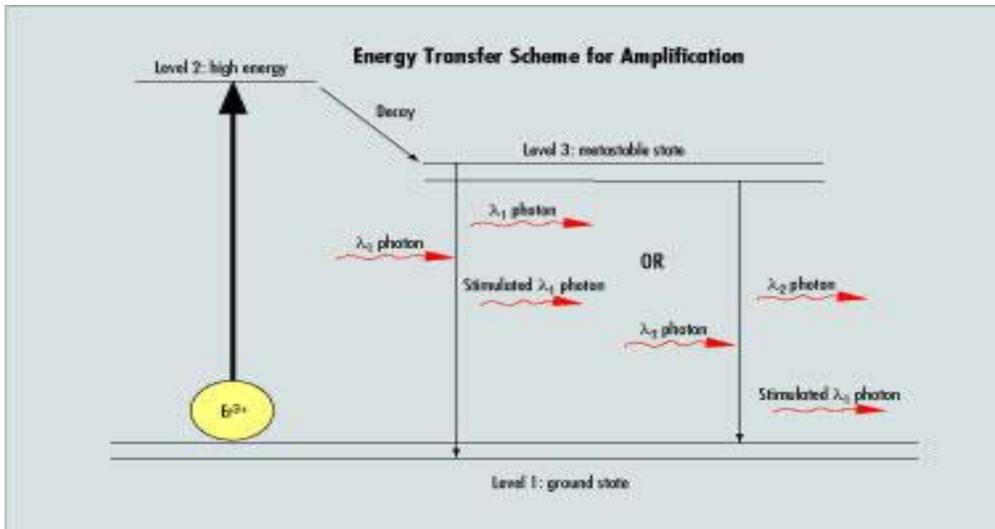
Τώρα, κάθε ενισχυτής πρέπει να ενισχύει και να εξετάζει τα ανεξάρτητα οπτικά σήματα που προσδιορίζονται από τα συγκεκριμένα μήκη κύματός τους μέσα στο εύρος ζώνης απολαβής της ενεργού εμπλουτισμένης με έρβιο ίνας. Καθώς ο φορέας απολαβής- μέρος της ίνας ερβίου- χρησιμοποιείται όχι μόνο για να επεκτείνει την προσιτότητα σημάτων αλλά και για να αντισταθμίσει την έμφυτη απώλεια που συνδέεται με το διαχωρισμό και επανασυνδιασμό των σημάτων WDM, υπάρχουν σημαντικές εκτιμήσεις σχεδίου που εξετάζονται από φυσική άποψη. Επιπλέον, οι ενισχυτές WDM απαιτούνται για να ολοκληρώσουν περισσότερο από μια απλή ενίσχυση του σήματος. Ένα πρότυπο ενισχυτή για μετάδοση WDM μπορεί εύκολα να περιέχει συστατικά όπως η διασπορά-αντιστάθμιση των στοιχείων ή να προσθέτει/ρίχνει τους πολυπλέκτες. Η απολαβή του ενισχυτή είναι φυσικά ακόμα σημαντική, αλλά δεν είναι και τα πάντα.

5.6.2 "Η διανομή" είναι ένα πρόβλημα

Οι οπτικοί ενισχυτές είναι ταξινομημένοι ως ενισχυτής, ευθυγραμμιστής, ή προενισχυτής για να απεικονίσουν τη χρήση τους σε ένα σύστημα μετάδοσης (βλ. Σχήμα 5.7). Δεν έχει σημασία σε ποια κατηγορία περιέρχεται ένας ενισχυτής, αυτό που είναι ουσιαστικό είναι να αναγνωριστεί ότι αντί της κατοχής ενός σήματος στον ενισχυτή, όπως συμβαίνει σε ένα σύστημα SONET, ο ίδιος φορέας απολαβής- μέρος της ίνας ερβίου- μοιράζεται τώρα

από όλα τα WDM κανάλια. Αυτά τα κανάλια είναι-και πρέπει να παραμείνουν ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Ωστόσο, η ανεξαρτησία των καναλιών συμβιβάζεται λόγω του ανταγωνισμού μεταξύ των καναλιών για τον περιορισμένο αριθμό φωτονίων άντλησης που είναι διαθέσιμα στον ενισχυτή.

Το χαρακτηριστικό σχέδιο ενεργειακής μεταφοράς μέσα στην ίνα ερβίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.8. Ένα ιόν ερβίου είναι διεγερμένο από την επίγεια (low energy) κατάσταση στο διεγερμένο επίπεδο 2 από ένα φωτόνιο άντλησης laser (πιθανότητα με ένα μήκος κύματος περίπου στα 980nm).



Σχήμα 5.8 Τα επίπεδα 1 και 2 περιέχουν υπο-επίπεδα που ταιριάζουν σε διάφορα μήκη κύματος ενίσχυση. Ο αριθμός των υπο-επιπέδων έχει άμεση επίδραση στο εύρος ζώνης του ενισχυτή απολαβής.

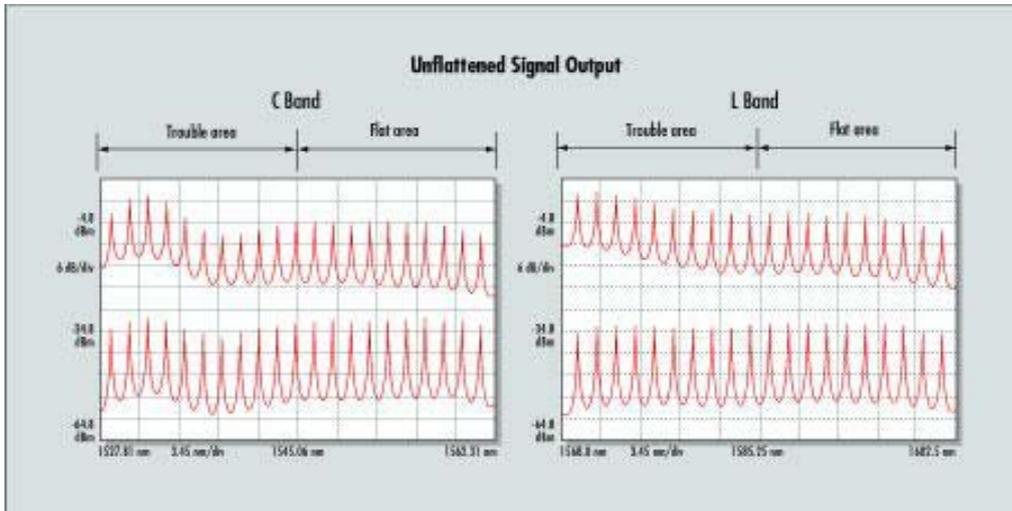
Καθώς το επίπεδο 2 δεν είναι σταθερό, το ιόν χαλαρώνει γρήγορα μέσω μιας μη-ακτινοβόλου διαδικασίας στο επίπεδο 3, όπου μπορεί να μείνει μερικές δεκάδες των milliseconds. Τώρα, λόγω της άμορφης φύσης του εμπλουτισμένου πυριτίου, η ενέργεια του επιπέδου 3 είναι διαφορετική για κάθε ιόν, ανάλογα με το τοπικό περιβάλλον της. Τα ιόντα, εντούτοις, ανταλλάσσουν εύκολα την ενέργεια θερμικά, με συνέπεια τους κατά προσέγγιση ίσους πληθυσμούς σε κάθε ένα από αυτά τα επίπεδα.

Σε ένα σύστημα SONET, όλα τα φωτόνια σημάτων είναι ενός μήκους κύματος, με συνέπεια την διεγερμένη εκπομπή άλλων φωτονίων σε εκείνο το ίδιο μήκος κύματος. Αλλά σε ένα WDM σύστημα, κάθε σήμα αποτελείται από φωτόνια σε ένα διαφορετικό μήκος κύματος. Κατά συνέπεια, υπάρχει ένας ανταγωνισμός μεταξύ των καναλιών ως προς τα οποία κάποιο θα διεγείρει τα περισσότερα ιόντα κάτω από την διεγερμένη κατάστασή τους, και ως εκ τούτου θα λάβει την περισσότερη απολαβή. Ο νικητής του ανταγωνισμού αποφασίζεται από μια σύνθετη αλληλεπίδραση που εξαρτάται από την εκπομπή εμπλεκόμενων τμημάτων- η πιθανότητα διέγερσης ενός φωτονίου- στα διαφορετικά μήκη κύματος καναλιών, το βαθμό αντιστροφής πληθυσμών, τις εντάσεις σημάτων, και το μήκος της ίνας. Η βελτιστοποίηση αυτών των παραμέτρων είναι δύσκολη, αλλά το να κρατηθούν βελτιστοποιημένοι κάτω από ποικίλες συνθήκες σημάτων είναι η αληθινή πρόκληση.

Είναι προφανές ότι για εφαρμογές WDM, όλα τα κανάλια που περνούν από τον ίδιο φορέα απολαβής ενισχυτή πρέπει να έχουν ως χαμηλό έναν NF και ως υψηλό μια απολαβή κατά το δυνατό. Επιπλέον, οι ενισχυτές WDM πρέπει να σχεδιαστούν έτσι ώστε η απόκριση ενισχυτών για ένα δεδομένο κανάλι να μην επηρεάζεται σημαντικά από τις εισαγωγές (ισχύς ή μήκους κύματος) των

άλλων καναλιών ομο-διάδοσης. Διαφορετικά, εάν μια τέτοια αλληλεπίδραση υπάρξει, η πτώση ή η αλλαγή ενός καναλιού θα είχε επιπτώσεις στην απολαβή και τον NF όλων των άλλων καναλιών, και η λειτουργία του συστήματος θα συμβιβαστεί.

Με άλλα λόγια, όλα τα κανάλια πρέπει να ενισχυθούν ανεξάρτητα και ομοιόμορφα. Κατά συνέπεια, εκτός από τις απαιτήσεις του βαθμού απολαβής και θορύβου, οι ενισχυτές WDM πρέπει επίσης να προσαρμοστούν στις



Σχήμα 5.9 Μη ομαλοποιημένη απόδοση σημάτων (άνω άκρα) των C- και L- band ενισχυτών. Σε σύγκριση με την εισαγωγή σημάτων (χαμηλότερες καμπύλες), όχι μόνο δεν αλλάζουν τα σχετικά πλάτη των καναλιών εξαιτίας της άνισης απόκρισης απολαβής, αλλά η αναλογία σήμα-θορύβου υποβαθμίζεται.

σφιχτές προδιαγραφές όσον αφορά την ομοιόμορφη πολυκαναλική απολαβή, την επιβάρυνση απολαβής, και την απόκριση της προσθήκης/ρίψης καναλιού.

Η απόκλιση απολαβής είναι ο πρώτος πονοκέφαλος για όλους τους σχεδιαστές ενισχυτών. Η φυσική του εμπλουτισμένου με έρβιο πυριτίου υπαγορεύει ότι στον ανταγωνισμό για τα διεγερμένα φωτόνια, όλα τα κανάλια δεν είναι ίσα. Το Σχήμα 5.9 παρουσιάζει μια χαρακτηριστική απόκλιση απολαβής για διαφορετικά κανάλια διαμέσου τόσο των συμβατικών όσο και των εκτεταμένων-band EDFAs, από 1525 έως 1605nm.

Εξαιτίας της απόκλισης απολαβής, η πρώτη γενεά των συστημάτων WDM όλα λειτούργησαν στο κόκκινο τμήμα της C-band, κάπου μεταξύ 1540 και 1565nm. Οι αυξήσεις των καταμετρήσεων των καναλιών έχουν αναγκάσει τους σχεδιαστές συστημάτων να βάλουν τα κανάλια στην "προβληματική περιοχή" περίπου στα 1532nm, όπου όχι μόνο είναι το NF χειρότερο (λόγω της χαμηλότερης αναλογίας της εκπομπής στα διαγώνια τμήματα απορρόφησης), αλλά και η απόκλιση απολαβής είναι πολύ μεγαλύτερη από ό,τι πέρα από το υπόλοιπο της ζώνης.

Εκπληκτικά, η L-band (1565 έως 1605nm) μπορεί να χωριστεί σε δύο υπο-ζώνες με ακριβώς τον ίδιο τρόπο με αυτόν της C-band, με μια προβληματική περιοχή που αντιστοιχεί στην μέγιστη ενισχυμένη αυθόρμητη εκπομπή περίπου στα 1570nm.

Επειδή όλα τα σήματα που εισάγονται σε έναν ενισχυτή θα εκπέμπουν γενικά μέσω της ίδιας σύνδεσης ινών, δεν είναι δύσκολο να φανταστούμε ότι εκείνα τα σήματα που ενισχύονται λιγότερο θα έχουν περισσότερο πρόβλημα, το οποίο θα φθάνει στον προορισμό τους χωρίς ένα σοβαρό πρόβλημα SNR. Κατά συνέπεια, στο GR.1312, οι "Generic Requirements for Optical Fiber Amplifiers," Telcordia Technologies (στο παρελθόν Bellcore) έχουν καθορίσει +1-dB απόκλιση απολαβής για όλα τα κανάλια στην απόδοση του ενισχυτή.

5.6.3 Περισσότερη ισχύς

Για να επιτύχουν την ομοιομορφία απολαβής, έχουν προωθηθεί στην αγορά οι παθητικά και ενεργά ομαλοποιημένης-απολαβής ενισχυτές WDM. Ένας παθητικά ομαλοποιημένης-απολαβής ενισχυτής WDM χρησιμοποιεί τυπικά ένα ομαλοποιημένης-απολαβής φίλτρο, το οποίο εισάγει μεγαλύτερη απώλεια στα ισχυρότερα κανάλια για να επιτύχει την εξίσωση απολαβής. Αλλά λόγω της μείωσης που εισάγεται από το ομαλοποιημένης-απολαβής φίλτρο, απαιτείται περισσότερη ισχύς άντλησης για να επιτευχθεί η ομαλοποίηση και τα αποδεκτά επίπεδα απολαβής.

Η state-of-the-art ομαλοποιημένη-απολαβή του ενισχυτή WDM συνήθως δεν έχει ένα φίλτρο στην απόδοση του ενισχυτή, που η κατοχή ενός φίλτρου εκεί θα έκοβε την ισχύ καναλιών σε σημείο όπου μια δεδομένη κλασματική απώλεια θα οδηγούσε στη μέγιστη απόλυτη απώλεια ισχύς. Παραδείγματος χάριν, μια απώλεια 3-dB στην απόδοση ενός ενισχυτή που έχει μια ισχύ απόδοσης 40-mW οδηγεί στην απώλεια των 20mW της ενδεχομένως χρήσιμης ισχύς σημάτων.

Η μετακίνηση του φίλτρου προς την εισαγωγή θα ανακούφιζε πολύ αυτό το πρόβλημα. Εάν η απολαβή αυτού του ίδιου ενισχυτή είναι 20 dB, κατόπιν η ισχύς εισαγωγής είναι μόνο 0,4 mW. Ως εκ τούτου, μια απώλεια 3-dB στην εισαγωγή θα οδηγούσε μόνο στην απώλεια του 0,2 mW της ισχύς σημάτων. Αυτή η ελάχιστη απώλεια θα μείωνε πολύ την απαιτούμενη ισχύ άντλησης. Αλλά η τοποθέτηση του flattening filter στην εισαγωγή είναι μια φτωχή επιλογή για έναν διαφορετικό λόγο: Μια απώλεια στην εισαγωγή προσθέτει άμεσα στον ενισχυτή NF μια απώλεια 3-dB, στην εισαγωγή δίνει μια αύξηση 3-dB στον NF. Κατά συνέπεια, το flattening filter τοποθετείται καλύτερα κάπου στη μέση του ενισχυτή. Η τοποθέτηση του φίλτρου σε έναν καλά σχεδιασμένο ενισχυτή είναι πάντα μια ανταλλαγή μεταξύ της μεγιστοποίησης της ισχύς απόδοσης και της ελαχιστοποίησης του NF.

Οι παθητικά ομαλοποιημένης-απολαβής ενισχυτές WDM σχεδιάζονται συνήθως για μια συγκεκριμένη απαίτηση απολαβής- με άλλα λόγια, ένα καθορισμένο με σαφήνεια επίπεδο απόδοσης για ένα καθορισμένο με σαφήνεια επίπεδο εισαγωγής. Λειτουργούν συχνά υπό αυτόματο έλεγχο απολαβής στο σύστημα, που σημαίνει ότι όταν αλλάζει η εισαγωγή, η απόδοση θα αλλάξει επίσης αναλογικά, με την απολαβή να παραμένει σταθερή.

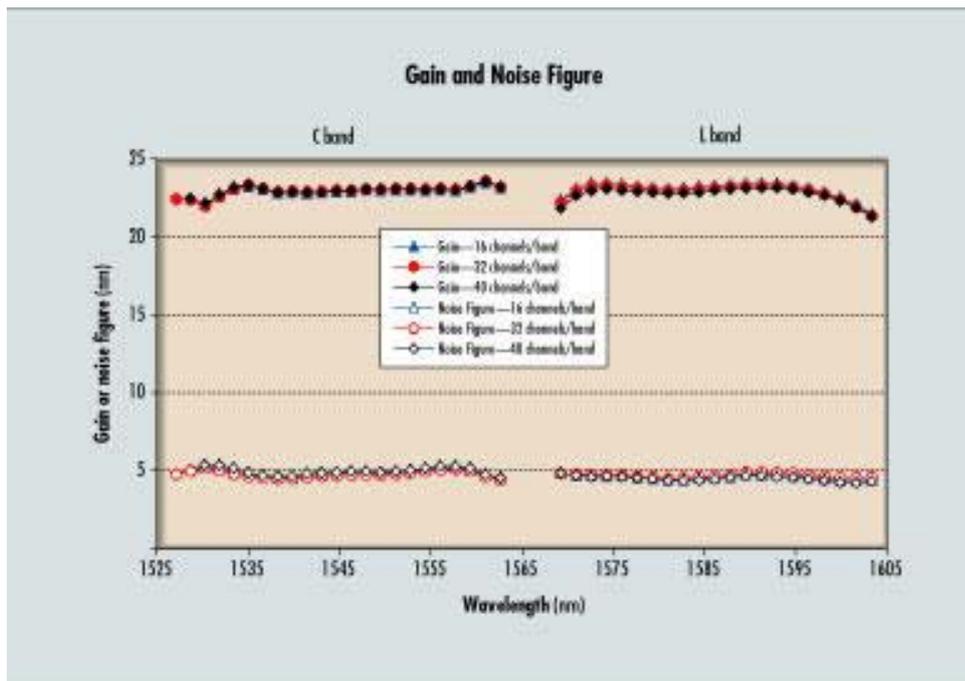
Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό γνώρισμα της απόκρισης ενισχυτών είναι ότι εάν η απολαβή ενός δεδομένου καναλιού στερεώνεται, κατόπιν η απολαβή όλων των καναλιών θα στερεωθεί σε μια καλή προσέγγιση. Αυτό το χαρακτηριστικό γνώρισμα ταιριάζει καλά στα συστήματα όπου καθορίζεται το επίπεδο ισχύς όλων των καναλιών, αλλά όπου τα κανάλια μπορούν να προστεθούν ή να παραλειφθούν από ένα ενισχυμένο σύστημα. Για παράδειγμα, ας εξετάσουμε ένα σύστημα που έχει αρχικά 16 κανάλια, με κάθε κανάλι να έχει ένα επίπεδο ισχύς 23-dBm. Όταν τα κανάλια περνούν μέσω ενός ενισχυτή WDM με μια ονομαστική απολαβή 23-dB, κάθε κανάλι θα έχει 0 dBm στην απόδοση ενισχυτή. Κατά συνέπεια, η συνολική απόδοση ενισχυτών θα είναι 12 dBm.

Τώρα, ας υποθέσουμε ότι άλλα 16 κανάλια με ισχύ εισαγωγής 23-dBm προστίθενται στο σύστημα. Συνολικά 32 κανάλια περνούν μέσω του ίδιου ενισχυτή WDM. Επειδή η απολαβή ενισχυτών σχεδιάζεται και στερεώνεται στα 23 dB, κάθε κανάλι θα έχει ακόμα απόδοση 0-dBm, εκτός από το ότι η συνολική απόδοση ενισχυτών θα είναι τώρα 15 dBm. Για να επιτευχθεί αυτή η απόδοση, η εισαγωγή ισχύς άντλησης στον ενισχυτή θα πρέπει να αυξηθεί. Αν και χρησιμοποιείται περισσότερη ισχύς άντλησης στην ενίσχυση 32 καναλιών, κάθε κανάλι εξακολουθεί να ενισχύεται ανεξάρτητα από την παρουσία άλλων

σημάτων. Το Σχήμα 5.10 επεξηγεί ένα παράδειγμα του σταθερού προφίλ απολαβής ανεξάρτητα από τον αριθμό των καναλιών.

Σε πολλές περιπτώσεις, η εισαγωγή ισχύς-καναλιού σε έναν ενισχυτή WDM δεν είναι σταθερή. Εάν τα κανάλια πρέπει να αλλαχτούν, να επανακαθοδηγηθούν, ή να μεταφερθούν από ένα σημείο σε πολλαπλά σημεία, τότε η ισχύς καναλιών που φθάνει στην είσοδο ενός ενισχυτή WDM δεν θα είναι ποτέ σταθερή. Εάν δεν υπάρξει καμία υποβάθμιση στην απόδοση συστήματος, τότε όλα τα κανάλια πρέπει να είναι περίπου στο ίδιο επίπεδο ισχύς απόδοση του ενισχυτή WDM, ανεξάρτητα από την ισχύ εισαγωγής. Κατά συνέπεια, ένας ενισχυτής WDM πρέπει να είναι σε θέση να παρέχει μια μεταβλητή απολαβή, χωρίς επιρροή της ομοιομορφίας ενίσχυσης σε όλα τα κανάλια. Εναλλακτικά, μπορεί να υπάρξουν καταστάσεις όπου τα επίπεδα εισαγωγής δεν αλλάζουν, αλλά μπορεί να επιθυμήσουμε να καθοδηγήσουμε τα κανάλια κατά μήκος μιας διαφορετικής πορείας με μια μεγαλύτερη απώλεια. Σε τέτοιες περιπτώσεις, θα ευχόμασταν να έχουμε την ευελιξία αύξησης της απολαβής ενισχυτών, πάλι χωρίς τον συμβιβασμό της ομοιομορφίας της απολαβής.

Ας εξετάσουμε πάλι το ανωτέρω παράδειγμα, αλλά τώρα ας υποθέσουμε ότι παρά την προσθήκη 16 καναλιών, η ισχύς εισαγωγής των υπάρχοντων καναλιών αλλάζει από -23 dBm σε -20 dBm. Εάν θέλουμε ακόμα να έχουμε 0 dBm για κάθε κανάλι στην απόδοση, η απολαβή ενισχυτών πρέπει να προσαρμοστεί στα 20 dB αντί της κράτησης του στα 23 dB. Το πρόβλημα είναι ότι για έναν παθητικά gain-flattened ενισχυτή WDM, εάν η απολαβή αλλάξει, η μορφή απολαβής θα αλλάξει επίσης (βλ. το Σχέδιο 5). Αυτό είναι το ακανθώδες ζήτημα της επιβάρυνσης της απολαβής.



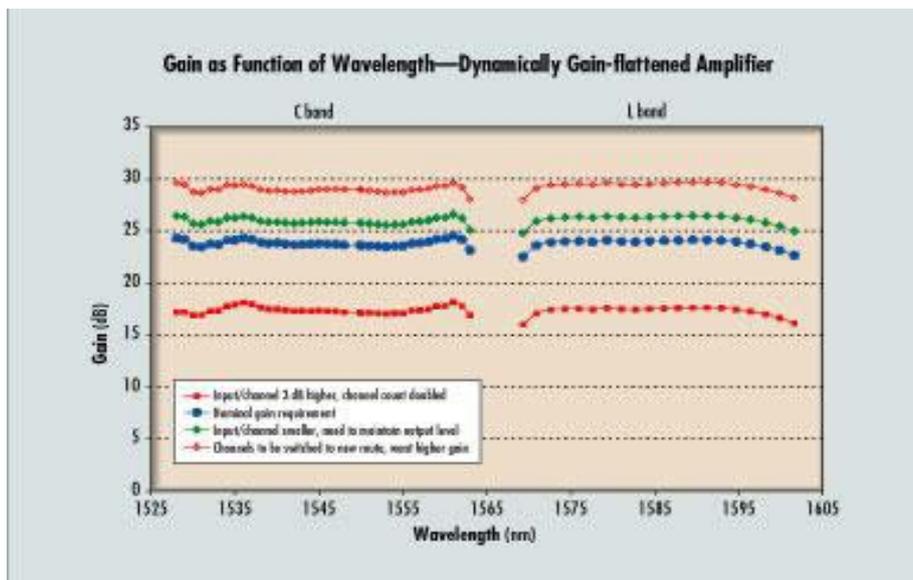
Σχήμα 5.10 Βαθμός απολαβής και θορύβου για ενισχυτή με C- και L-band για διαφορετικό αριθμό καναλιών. Προσέξτε πως όταν αλλάζει η ισχύς των καναλιών, η απολαβή και ο θόρυβος κάθε καναλιού παραμένουν ανεπηρέαστα

5.6.4 Τα WDM απαιτούν ενισχυτές ελεύθερους από επιβάρυνση

Προφανώς, ένας παθητικά ομαλοποιημένης-απολαβής ενισχυτής είναι ανεπαρκής στο μεταβλητό και απαιτητικό WDM περιβάλλον. Ένας ενισχυτής WDM πρέπει να είναι ενεργά ομαλοποιημένης απολαβής, ανεξάρτητα από την απολαβή ή την εισαγωγή. Δηλαδή πρέπει να παρέχει οποιαδήποτε επιθυμητή απόδοση ανεξάρτητα από την εισαγωγή. Ο ενισχυτής WDM πρέπει να αυτοπροσαρμόζεται, ανταποκρινόμενος γρήγορα στους μεταβαλλόμενους όρους εισαγωγής και τις απαιτήσεις απολαβής, οι οποίοι μπορούν να επιτευχθούν μέσω του ενσωματωμένου λογισμικού που υπολογίζει την απαραίτητη διαμόρφωση ενισχυτών και ρυθμίζει τις παραμέτρους ενισχυτών στον πραγματικό χρόνο.

Το λογισμικό είναι κρίσιμο για τα συστήματα ενισχυτών WDM, γιατί μόνο μέσω του περίπλοκου λογισμικού μπορούν να ελεγχθούν χωριστά το καθένα τα διάφορα στοιχεία στον ενισχυτή. Το Σχήμα 5.11 παρουσιάζει ένα παράδειγμα εκτέλεσης ενισχυτών WDM ελευθέρων επιβάρυνσης (tilt-free). Σε αυτό το σχήμα, σχεδιάζουμε την απόκριση απολαβής ενός ενισχυτή με C- και L-band υπό διαφορετικούς όρους. Οι ενισχυτές έχουν βελτιστοποιηθεί για 16 κανάλια με 23dBm ανά κανάλι. Όταν αλλάζουν ο αριθμός καναλιών ή/και η ισχύς εισαγωγής καναλιών, η απόδοση ενισχυτών παραμένει αμετάβλητη. Όταν αλλάζει η απαραίτητη απολαβή, το προφίλ απολαβής παραμένει ομαλό. Όλα αυτά επιτυγχάνονται μέσω του ενσωματωμένου λογισμικού.

Όταν όλα τα κανάλια είναι τα ίδια, το ενσωματωμένο λογισμικό του ενισχυτή WDM θα παραγάγει ένα σχέδιο ελέγχου για να επιτύχει σταθερά “κλειδωμένη” απολαβή. Όταν αλλάζει η κατάσταση και απαιτείται άλλη απολαβή, το λογισμικό θα “διατάξει” τον ενισχυτή να παράγει ένα διαφορετικό σχέδιο ελέγχου προκειμένου να αυτό-προσαρμοστεί. Στη απόδοση ενισχυτών WDM, αν και η απολαβή αλλάζει, η απόκριση σε κάθε κανάλι παραμένει η ίδια, και έτσι κάθε κανάλι θα έχει την απαραίτητη οπτική ισχύ να συνεχίσει τη διασπορά του.



Σχήμα 5.11 Η απολαβή σε συνάρτηση του μήκους κύματος για διαφορετικά επίπεδα απολαβής για έναν παθητικά ομαλοποιημένης-απολαβής ενισχυτή των C- και L-band. Όταν η απολαβή αλλάζει λόγω αλλαγής στην εισαγωγή του επιθυμητού επιπέδου απόδοσης, όπως στην περίπτωση που τα κανάλια επανα-κατευθύνονται, τότε θα συμβεί τεράστια μεταβολή απολαβής στα κανάλια. Αυτή η μεταβολή ονομάζεται “δυναμική επιβάρυνση ενισχυτή”.

Οι ενισχυτές που σχεδιάζονται για την οπτική δικτύωση πρέπει να είναι υψηλής απολαβής, χαμηλού θορύβου, και αυτορρυθμιζόμενοι με ομαλή απόκριση μήκους κύματος ανεξάρτητα από τον αριθμό καναλιών ή το επίπεδο καναλιών. Τα συστήματα WDM γίνονται όλο και περισσότερο σύνθετα, με όλο και περισσότερα κανάλια και στοιχεία. Γίνεται έτσι όλο και περισσότερο σημαντικό για τους σχεδιαστές ενισχυτών να εργαστούν στενά με τους ολοκληρωτές συστημάτων για να εξασφαλίσουν ότι η επόμενη γενιά των ενισχυτών θα καλύψει τις αυστηρές απαιτήσεις της οπτικής δικτύωσης WDM.

Αντιθέτως, οι ολοκληρωτές συστημάτων πρέπει να καταλάβουν τις λεπτομέρειες της σχεδίασης και του ελέγχου ενισχυτών στα πλαίσια του γενικού σχεδιασμού και ελέγχου των συστημάτων. Μια προσέγγιση “μαύρου κουτιού” για τον ενισχυτή έχει περισσότερο νόημα, ειδικά δεδομένου ότι αυτό το ζήτημα πιθανό να ασκήσει σημαντική επίδραση στην αγορά για όλη τη νέα ανάπτυξη ενισχυμένων προϊόντων WDM στην όλο και περισσότερο ανταγωνιστική αγορά για το εύρος ζώνης.

Η νέα γενιά οπτικών ενισχυτών για τα ενισχυμένα συστήματα WDM, η οπτική δικτύωση, και η IP των ινών δεν ενσωματώνουν την πολυπλοκότητα ενός δικτυωμένου συστήματος, αλλά είναι βεβαίως όχι πια απλά παθητικοί φραγμοί απολαβής.

Πρόσφατα επιτεύγματα στους οπτικούς ενισχυτές έχουν αναζωογονήσει την πρακτικότητα των συστημάτων WDM [1]. Τώρα προβλέπεται πως τα συστήματα ενίσχυσης WDM θα μπορούσαν να αυξήσουν την δυνατότητα μετάδοσης των υπαρχόντων μονότροπων συστημάτων ίνας μέσω πολλών τρόπων στο κοντινό μέλλον. Ωστόσο, τα συστήματα WDM θα απαιτούσαν αυστηρό φασματικό έλεγχο των laser μετάδοσης προκειμένου να διατηρήσουν σταθερή διάταξη των καναλιών και να αποφύγουν crosstalk. Έτσι, κάθε laser λειτουργεί σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος προς το τέλος ζωής του συστήματος. Προηγουμένως, δηλώθηκε πως τα WDM laser μετάδοσης θα μπορούσαν να σταθεροποιηθούν σε έναν οπτικό αναγεννητή [2]-[4]. Ωστόσο, αυτή η διαδικασία αυξάνει το κόστος και την περιπλοκότητα. Επομένως, θα ήταν επιθυμητό εάν τα εμπορικά laser DFB μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν χωρίς δέκτη ελέγχου συχνότητας. Ωστόσο, αυτό απαιτεί οι μακροπρόθεσμες αστάθειες μηκών κύματος των laser DFB να είναι πολύ μικρότερες από την διάταξη καναλιών. Υπάρχουν μόνο λίγες εκθέσεις πάνω στις μακροπρόθεσμες αστάθειες μηκών κύματος των 1.5- μm DFB laser [5]-[9]. Παραδείγματος χάριν, ο FUKUDA ανέφερε ότι τα μήκη κύματος των laser DFB μετατοπίστηκαν μέχρι και 5 \AA μετά από γήρανση 20 ωρών στους 200 mA και 70°C [5]. Από την άλλη, ο Sessa και οι συνεργάτες του ανέφεραν ότι οι μετατοπίσεις φέρων-γήρανση μηκών κύματος έξι πακεταρισμένων 1.5- μm DFB laser για μια περίοδο 16 μηνών ήταν αμελητέες (<0.03 \AA) [6]. Ωστόσο, αυτά τα αποτελέσματα είναι περιορισμένα σε ένα μικρό αριθμό laser και για μια σχετικά μικρή περίοδο χρόνου σε σύγκριση με την αναμενόμενη διάρκεια ζωής (25 ετών) του συστήματος [5]-[8]. Σε αυτήν την εργασία, παρουσιάζεται εκτεταμένη έρευνα των μετατοπίσεων μηκών κύματος που φέρουν γήρανση στους 1.5- μm laser. Στόχος αυτού του πειράματος ήταν να εκτιμήσει τα μεγέθη των μετατοπίσεων μήκους κύματος φέρων-γήρανση με την μέτρηση πάνω από

εκατό laser μετά από γήρανση κάτω από τρεις διαφορετικές συνθήκες επιταχυνόμενης γήρανσης για την περίοδο που αντιστοιχεί στην αναμενόμενη διάρκεια ζωής του συστήματος.

5.6.5 Τα WDM απαιτούν ενισχυτές διαχείρισης

Οι κατασκευαστές εξοπλισμού έχουν αναγγείλει πρόσφατα τα συστήματα WDM μέχρι και 160 καναλιών. Η ίνα που χρησιμοποιείται είναι ακόμα η ίδια ίνα μονής-μετάδοσης. Η μόνη αλλαγή είναι ότι όλο και περισσότερα κανάλια πρέπει να περάσουν μέσω των ενισχυτών WDM. Κατά συνέπεια, όλο και περισσότερες αντλήσεις θα απαιτηθούν για να παράγουν αρκετή ενίσχυση για τον αυξανόμενο αριθμό καναλιών.

Κάθε αντλία πρέπει να ελεγχθεί για το ρεύμα και τη θερμοκρασία. Η ισχύς άντλησης πρέπει επίσης να ρυθμιστεί είτε για να επιτύχει τη σταθερή απολαβή είτε την ελεύθερη από επιβάρυνση λειτουργία. Η ταχύτητα ελέγχου είναι μια άλλη παράμετρος που προστίθεται σε ολόκληρο τον πάγκο, δεδομένου ότι ο αργός έλεγχος μπορεί να οδηγήσει στην οπτική μεταβατικότητα κατά τη διάρκεια πρόσθεσης/μείωσης καναλιών, το οποίο διαποτίζει τους δέκτες και οδηγεί σε εκρήξεις λαθών. Όλοι αυτοί οι παράγοντες μεταφράζονται με μια λέξη: διαχείριση. Κάποιος πρέπει να διαχειριστεί την εκτροπή απόδοσης ενισχυτών, την επιβάρυνση απολαβής, την απόκριση στη μεταβαλλόμενη εισαγωγή, και τον αυξανόμενο αριθμό άντλησης laser. Πάνω από αυτά, άλλα πρόσφατα στοιχεία δικτύων πρέπει επίσης να ρυθμιστούν, όπως οι αντισταθμιστές διασποράς, φίλτρα προσθήκης/ρίψης, διακόπτες, και δρομολογητές. Ο WDM δίνει στους οπτικούς ενισχυτές μια ολόκληρη νέα διάσταση.

5.6.6 Νέα γενεά

Σε ένα οπτικό δίκτυο, τα σήματα διαβιβάζονται από ένα σημείο σε πολλά διαφορετικά σημεία. Το εύρος ζώνης ή η δυναμικότητα αυξάνεται με την προσθήκη ενισχυτών αντί της αντικατάστασης των υπαρχόντων συστατικών. Τα κανάλια καθοδηγούνται μέσω των φυσικών στρωμάτων κατά τρόπο ανάλογο με τα σημεία προσθήκης/ρίψης που καθοδηγούν τα υποτελή στη χρονική περιοχή. Η δυνατότητα να αλλαχτούν δυναμικά τα σημεία προέλευσης και προορισμού ενός καναλιού σε ένα σύντομο χρονικό διάστημα θα απαιτηθεί από όλους τους φορείς παροχής υπηρεσιών.

Περίληψη έρευνας

Έχουμε μετρήσει τις μετατοπίσεις μήκους κύματος σε πάνω από εκατό 1.5-μm laser DFB κάτω από τρεις διαφορετικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα “γερασμένα” laser σε χαμηλότερη θερμοκρασία (επομένως υψηλότερη οπτική ισχύς) έχουν ευρύτερη εκπομπή φασματικής μετατόπισης μήκους κύματος από τα “γερασμένα” laser σε μεγαλύτερη θερμοκρασία. Αυτό υποδεικνύει ότι το ισχυρό οπτικό πεδίο εντός της κοιλότητας του laser μπορεί να επηρεάσει τον μηχανισμό γήρανσης. Το μήκος κύματος laser δεν μετατοπίστηκε απαραίτητως βαθμιαία με την περίοδο γήρανσης. Παραδείγματος χάριν, μερικά laser μετατοπίστηκαν προς πιο σύντομο μήκος κύματος πρώτα, και έπειτα σε μακρύτερο μήκος κύματος, και αντίστροφα. Κατά συνέπεια είναι δύσκολο να προβλεφθεί η διανομή των μετατοπίσεων μήκους κύματος στο τέλος της ζωής του συστήματος. Επιπλέον, δεν θα μπορούσαμε να συσχετίσουμε τις μετατοπίσεις μήκους κύματος είτε με τα ποσοστά γήρανσης είτε με τις φέρουσες-γήρανση αλλαγές στα ρεύματα κατώτατων ορίων. Κατά συνέπεια, πρέπει ακόμα να αναπτύξουμε μια αποτελεσματική μέθοδο για μερικά laser, τα οποία μπορούν να παρουσιάσουν μεγάλες μετατοπίσεις μήκους κύματος σε ένα πρώιμο στάδιο της γήρανσης.

Οι φέρουσες-γήρανση μετατοπίσεις μήκους κύματος ήταν σχετικά μικρές ($< \pm 1 \text{ \AA}$) για 90% των laser. Εντούτοις, περίπου 5% των laser παρουσιάζουν μετατοπίσεις μήκους κύματος μεγαλύτερες από $\pm 2 \text{ \AA}$ (μέχρι περίπου $\pm 4 \text{ \AA}$) ως αποτέλεσμα γήρανσης, και αυτό το κλάσμα αυξάνεται με την περίοδο γήρανσης. Κατά συνέπεια, υπάρχει η υποψία ότι μια σημαντική μερίδα των laser DFB θα μπορούσε να παρουσιάσει μεγάλες μετατοπίσεις μήκους κύματος κατά τη διάρκεια της ζωής του συστήματος, η οποία μπορεί να μην είναι αποδεκτή σε μερικές εφαρμογές WDM. Εντούτοις, αυτό το πρόβλημα θα μπορούσε να λυθεί με τη σταθεροποίηση των μηκών κύματος των laser πομπών WDM σε μια εξωτερική συχνότητα αναφοράς.

6. ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΑΓΟΡΑ

Η παγκόσμια αγορά οπτικών ενισχυτών για τις εφαρμογές τηλεπικοινωνιών προβλέπεται να αυξηθεί πάνω από 3\$ δισεκατομμύρια το 2000, πάνω από 7\$ δισεκατομμύρια το 2004, μια σύνθετη αύξηση 22 τοις εκατό ετησίως, σύμφωνα με μια έκθεση που δημοσιεύθηκε πρόσφατα από την Strategies Unlimited, μια εταιρία έρευνας αγοράς για την βιομηχανία οπτικό ηλεκτρονικής. Η έκθεση αναλύει την αγορά για τους οπτικούς ενισχυτές και τα αντίστοιχα laser αντλιών για διαφορετικές εφαρμογές, τους τύπους συσκευών, τα μήκη κύματος, και τα ποσοστά στοιχείων.

Οι οπτικοί ενισχυτές είναι ένα βασικό συστατικό στα μεγάλης απόστασης δίκτυα τηλεπικοινωνιών και τα συστήματα διανομής καλωδιακών τηλεοράσεων. Οι ενισχυτές χρησιμοποιούνται σε αυτά τα συστήματα για να επεκτείνουν το μήκος των οπτικών συνδέσεων και για να ωθήσουν τα σήματα που εισάγουν τις μεγάλης απόστασης διαδρομές των υπερυψωμένων οπτικό ηλεκτρονικών ανιχνευτών. Οι οπτικοί ενισχυτές έχουν επιτρέψει τη μεταπήδηση στα συστήματα DWDM που έχουν τώρα ικανότητα να μεταφέρουν 10 εκατομμύρια τηλεφωνικές συνομιλίες, ή 10.000 τηλεοπτικά κανάλια, με μία μόνο ίνα. Η λειτουργία και ο σχεδιασμός αυτών των συστημάτων, και των οπτικών ενισχυτών και των συστατικών τους θεωρούνται εξαιρετικά περίπλοκες και εξεζητημένες διαδικασίες, και οι αξιώσεις απόδοσης στα συστατικά είναι ιδιαίτερα απαιτητικές. Ο οπτικός ενισχυτής προέκυψε ως εμπορικό προϊόν στις αρχές της δεκαετίας του '90 και τώρα χρησιμοποιείται ευρέως, αλλά η αγορά περνάει σε μια νέα φάση. Στο υψηλής απόδοσης τέλος της αγοράς, οι ενισχυμένοι με έρβιο ενισχυτές ινών (EDFAs) θα συμπληρωθούν από τους νέους φραγμούς αντλιών Raman. Ενώ οι EDFAs θα συνεχίσουν να ακμάζουν σε ποικίλες εφαρμογές, η εμφάνιση της ενίσχυσης Raman θα αλλάξει ουσιαστικά το σχεδιασμό των EDFAs, καθώς επίσης και το μίγμα των προϊόντων laser αντλιών που απαιτούνται για να οδηγήσουν τους ενισχυτές.

Στο χαμηλότερο όριο απόδοσης, οι όγκοι πωλήσεων των οπτικών ενισχυτών είναι τώρα επαρκείς για να επιτρέψουν τη χρήση των νεώτερων, χαμηλότερου κόστους τεχνολογιών για ένα ευρύ σύνολο εφαρμογών. Οι νέες τεχνολογίες όπως οι ενισχυμένοι με έρβιο ενισχυτές κυματοδηγού (EDWAs) υπόσχονται να γίνουν η φυσική επέκταση των EDFAs στη χαμηλού κόστους αγορά. Οι ενισχυτές διόδου laser (SOAs) έχουν μελετηθεί για δεκαετίες και τώρα εμφανίζονται επίσης συγκροτημένοι για να φθάσουν την εμπορική επιτυχία σε αυτήν την χαμηλού κόστους αγορά. Χαμηλού κόστους EDFAs υπόσχονται επίσης να ανταγωνιστούν έντονα.

Σχεδόν 1,6\$ δισεκατομμύρια laser κατασκευάστηκαν για να αντλήσουν τους οπτικούς ενισχυτές. Σχεδόν όλα τα laser αντλιών είναι laser διόδου, αλλά τα laser ινών χρησιμοποιούνται επίσης για τις εφαρμογές των EDFA και Raman. Όπως, η αγορά οπτικών ενισχυτών, έτσι και η αγορά laser αντλιών είναι επίσης πολύ δυναμική, με πολλούς νέους προμηθευτές που υπόσχονται να πάρουν το μερίδιο αγοράς από τους καθιερωμένους φορείς. Νέες τεχνολογίες, όπως τα laser κάθετης-κοιλότητας, υπόσχονται πως έχουμε να αναμένουμε ακόμη πολλές καινοτομίες. Η έρευνα παρουσιάζει το προφίλ 29 προμηθευτών των οπτικών ενισχυτών και 30 προμηθευτών των laser αντλιών σε όλο τον κόσμο, συμπεριλαμβανομένων των εκτιμήσεων μεριδίου αγοράς για κάθε τομέα. Η Βόρεια Αμερική ηγείται αυτήν την περίοδο στον κόσμο τόσο στον ανεφοδιασμό όσο και στην κατανάλωση οπτικών ενισχυτών για τις εφαρμογές τηλεπικοινωνιών, με πάνω από 75 τοις εκατό τόσο στα εισοδήματα όσο και στις αγορές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] A. R. Chraplyvy and R.W. Tkach, "What is the actual capacity of single-mode fibers in amplified lightwave systems?", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.5, pp. 666-668, June 1993.

[2] A.R. Chraplyvy and P.S. Henry, "Performance degradation due to stimulated Raman scattering in wavelength-division-multiplexed optical-fibre systems", *Electron. Lett.*, vol.19, pp. 641-643, Aug. 1983.

[3] A.R. Chraplyvy, "Optical power limits in multi-channel wavelength-division-multiplexed systems due to stimulated Raman scattering", *Electron. Lett.*, vol. 20, pp. 58-59, Jan. 1984.

[4] "Limitations on lightwave communications imposed by optical-fiber nonlinearities", *J. Lightwave Technol.*, vol. 8, pp. 1548-1557, Oct. 1990.

[5] A. Papoulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, New York: McGraw-Hill, 1984.

[6] C.R. Rao, *Linear Statistical Inference and its Applications*, 2nd ed., New York: Wiley, 1973.

[7] D. Marcuse, "Derivation of analytical expression for the bit-error probability in lightwave systems with optical amplifiers", *J. Lightwave Technol.*, vol. 8, pp. 1816-1823, Dec. 1990.

[8] F. Forghieri, R.W. Tkach, and A.R. Chraplyvy, "Effect of modulation statistics on Raman crosstalk in WDM systems", in *Proc. OAA '94*, Breckenridge, CO., paper FA4, Aug. 1994.

[9] D. Cotter and A.M. Hill, "Stimulated Raman crosstalk in optical transmission: Effects of group velocity dispersion", *Electron. Lett.*, vol. 20, pp. 185-187, Feb. 1984.

[10] Aging-Induced Wavelength Shifts in 1.5- μm DFB Lasers – Y. C. Chung, Μέλος, *IEEE*, Jichai Jeong, και L. S. Cheng, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 6, No. 7, Ιούλιος 1994.

[11] A. R. Chraplyvy, "Optical power limits in multichannel wavelength-division-multiplexed systems due to stimulated Raman scattering", *Electronic Letters*, vol. 20, no. 2, 19 Ιανουαρίου 1984.

[12] Fabrizio Forghieri, Μέλος, *IEEE*, R. W. Tkach, Μέλος, *IEEE*, και A. R. Chraplyvy, "Effect of modulation statistics on Raman crosstalk in WDM systems", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 7, no. 1, Ιανουάριος 1995.

- [13] Govind P. Agrawal, *Οπτικοί ενισχυτές στο “Συστήματα επικοινωνιών με οπτικές ίνες”*, εκδ. Τζιόλα, 2^η εκδ., Θεσ/νικη, 2001.
- [14] Murtaza και J. M. Senior, “WDM crosstalk analysis for systems employing spectrally-sliced LED sources”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 8, no. 3, Μάρτιος 1996.
- [15] Jeff Hecht, “The evolution of optical amplifiers”, *Optics & Photonics News*, Αύγουστος 2002, www.osa-opn.org
- [16] Jean-Jacques Bernard και Monique Renaud, “Semiconductor optical amplifiers: SOAs offer a key technology for amplification, switching, wavelength conversion, and regeneration in optical networks”, Alcatel Research and Innovation, *spie`s oemagazine*, Σεπτέμβριος 2001, www.oemagazine.com
- [17] The Fiber Optic Association – Tech Topics, 2003, www.fiber-optics.info
- [18] Y. C. Chung, Μέλος, *IEEE*, Jichai Jeong, και L. S. Cheng, “Aging-Induced Wavelength Shifts in 1.5- μm DFB Lasers”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 6, no. 7, Ιούλιος 1994.
- [19] an applications: longer, wider, faster, cheaper, Rick Schaffer and Jim Jungjohann, *cibc Wordmarkets* March 2001, iw.pennnet.com
- [20] The worldwide market for optical amplifiers, www.strategies.com
- [21] Απόσπασμα από το άρθρο “WDM crosstalk analysis for systems employing spectrally-sliced LED sources” – G. Murtaza και J. M. Senior, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 8, No. 3, Μάρτιος 1996.
- [23] Οπτικά Όρια Ισχύς στο πολυκαναλικό σύστημα WDM λόγω εξαναγκασμένης σκέδασης Raman – A. R. Chraplyvy, *Electronics Letters*, vol. 20, No.2, 19 Ιανουαρίου 1984
- [24] *lightwave march*, 2001
- [25] <http://www.strategies-u.com>
- [26] info@strategies-u.com

