

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Συστηματών Μεταδοσής Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών

Φωτονικά Συστήματα Μεταγωγής και Αποθήκευσης Δεδομένων για Ευρυζωνικά Δίκτυα Μεταγωγής Πακέτων

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Δημήτριος Β. Αποστολόπουλος

Αθήνα, Νοέμβριος 2009



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Συστηματών Μεταδοσής Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών

Φωτονικά Συστήματα Μεταγωγής και Αποθήκευσης Δεδομένων για Ευρυζωνικά Δίκτυα Μεταγωγής Πακέτων

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Δημήτριος Β. Αποστολόπουλος

Συμβουλευτική Επιτροπή : Ηρακλής Αβραμόπουλος

Νικόλαος Ουζούνογλου

Εμμανουήλ Βαρβαρίγος

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 2^α Νοεμβρίου 2009.

Η. Αβραμόπουλος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Φ. Κωνσταντίνου

Ν. Ουζούνογλου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

.....

Κ. Δέρβος Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

.....

Ε. Βαρβαρίγος

Καθηγητής Παν. Πατρών

•••••

Κ. Βλάχος

Επικ. Καθηγητής Παν. Πατρών

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ν. Πλέρος Λέκτορας Α.Π.Θ. Αθήνα, Νοέμβριος 2009

Δημήτριος Β. Αποστολόπουλος

Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Δημήτριος Β. Αποστολόπουλος, 2009. Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Ο κύριος σκοπός της παρούσας διατριβής είναι η ανάπτυξη αμιγώς οπτικών κυκλωμάτων, βασισμένων σε ολοκληρωμένα στοιχεία, για την επεξεργασία, τη μεταγωγή και την αποθήκευση δεδομένων. Το βασικό δομικό στοιχείο όλων των κυκλωμάτων που υλοποιήθηκαν ήταν το συμβολόμετρο Mach-Zehnder (MZI). Οι διατάξεις που υλοποιήθηκαν εκμεταλλεύονται πλήρως τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των φωτονικών στοιχείων από τα οποία αποτελούνται, προφέροντας διαφάνεια στο ρυθμό μορφή του εισερχόμενου σήματος δεδομένων. και την Ακόμα, σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι παρουσιάζουν των αντίστοιχων ηλεκτρονικών υλοποιήσεων, όπως υψηλή ταχύτητα επεξεργασίας, ανεξαρτησία της κατανάλωσης ισχύος από το ρυθμό μετάδοσης και απουσία ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής στην περίπτωση ολοκλήρωσης τους σε συστήματα στο δίκτυο. Η ανάπτυξη τέτοιου είδους κυκλωμάτων συντελεί σε μεγάλο βαθμό στην ώθηση των τεχνολογικών εξελίξεων προς την υλοποίηση αμιγώς οπτικών δικτύων.

Το πρώτο σημαντικό πρόβλημα, που αντιμετωπίστηκε στα πλαίσια αυτής της διατριβής ήταν η αμιγώς οπτική αναγέννηση του σήματος δεδομένων κατά την μετάδοση του. Η υποβάθμιση της ποιότητας του σήματος αποτελεί σημαντικό περιοριστικό παράγοντα για την μέγιστη απόσταση διάδοσής του και περιορίζει ταυτόχρονα και τον μέγιστο ρυθμό λειτουργίας του δικτύου. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύξαμε ένα 2R κύκλωμα αναγέννησης το οποίο δοκιμάστηκε επιτυχώς σε ρυθμό λειτουργίας 10 Gb/s, παρουσιάζοντας αξιοσημείωτα καλύτερες επιδόσεις από τις προϋπάρχουσες συνδεσμολογίες. Το δεύτερο σημαντικό πρόβλημα στο οποίο εστιάσαμε ήταν η εξαγωγή της επικεφαλίδας και ο διαχωρισμός της από το φορτίο του πακέτου καθώς και η 3R αναγέννησή του τελευταίου κατά την είσοδό του στον κόμβο δρομολόγησης, έτσι ώστε το περιεχόμενό της επικεφαλίδας να μπορεί να επεξεργαστεί από το επόμενο υποσύστημα του κόμβου και να αναγνωριστεί ο τελικός προορισμού του πακέτου. Τέλος, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής παρουσιάσαμε την πρώτη αμιγώς οπτική μονάδα μνήμης άμεσης προσπέλασης.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Δίκτυα οπτικών ινών, αμιγώς οπτική επεξεργασία σήματος, συμβολόμετρο Mach Zehnder, οπτικός ενισχυτής ημιαγωγού, διαχωρισμός επικεφαλίδας, αμιγώς οπτική αναγέννηση, οπτική ανάκτηση ρολογιού, οπτική μνήμη, ολοκληρωμένο συμβολόμετρο Mach-Zehnder – MZI, φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα – PIC, οπτική ολοκλήρωση

Abstract

The main objective of this PhD thesis is the development of all-optical systems, based on integrated components, for processing, switching and storing of optical data. The fundamental building block of all the systems/sub-systems that were developed in this study, was the Mach-Zehnder Interferometer. The developed systems, take full advantage of the benefits of all-optical processing, offering attractive attributes such as transparency in the data format and the data rate. Moreover, compared to the respective electronic circuits, they present much faster processing speeds, independency of the energy consumption from the operating rate and absence of electromagnetic interference. The development of such devices contributes greatly to the future adaptation of all-optical networks, in which, the use of electronic circuits will be avoided and all the functional processes will be handled in the optical layer.

The first major issue that was studied in this thesis was the all-optical regeneration of a data signal during its transmission through the fiber. The various quality degradations that the signal exhibits are major constrains to the maximum transmission distance that can be reach and also to the maximum bit rate of the whole network. In this study, we designed and experimental evaluated a novel 2R regeneration concept based on SOA-MZIs for 10 Gb/s NRZ data. The ability for successive cascading of this circuit was tested in transmission loop experiments and proved that this regenerator design is capable of 4 times more cascades than the previously proposed designs. Moreover, we presented in this study the first experimental results obtained with a quadruple array of hybrid Mach-Zehnder Interferometer (MZI) switches. The processing power and multi-functionality of this array was demonstrated by implementing the front-end unit of an All-Optical Label Switching (AOLS) node that performs Clock and Data Recovery (CDR) and label/payload separation for 40Gb/s packet-mode traffic. Finally, within the frames of this thesis, we developed what we believe to be the first all-optical RAM cell with true Read and Write functionalities. The circuit operated error free at 5 Gb/s.

Key Words

Optical networks, all-optical signal processing, Mach Zehnder interferometer (MZI), semiconductor optical amplifier (SOA), label separation, optical regeneration, all-optical clock recovery, optical memory, integrated Mach Zehnder interferometer, photonic integrated circuits – PIC, photonic integration

Πρόλογος

Πριν από λίγο καιρό είχα μια συζήτηση με ένα φοιτητή της ΣΗΜΜΥ σχετικά με τις δραστηριότητες του Εργαστηρίου Φωτονικών Επικοινωνιών. Ξεκίνησα να του περιγράφω λοιπόν τις δραστηριότητες του εργαστηρίου, λέγοντας του για το ερευνητικό του αντικείμενο, τον τρόπο δουλειάς, του ανέφερα τον μεγάλο αριθμό των δημοσιεύσεων του εργαστηρίου, τις συμμετοχές των υποψηφίων διδακτόρων σε διεθνή συνέδρια, τις συνεργασίες μας με ερευνητικές ομάδες του εξωτερικού και τέλος φρόντισα να του δείξω τους χώρους του εργαστηρίου και τα στοιχεία που χρησιμοποιούμε στα πειράματά μας. Ομολογώ ότι μόλις έφυγε ο φοιτητής μου γεννήθηκε ένα συναίσθημα νοσταλγίας για εκείνον τον Σεπτέμβρη του 2003, όταν πρωτοπήγα στο εργαστήριο σαν διπλωματικός φοιτητής. Θυμάμαι σαν τώρα τον Γιώργο (Κανέλλο) κυριολεκτικά να χοροπηδάει προσπαθώντας να μου εξηγήσει διάφορες έννοιες που δεν καλοκαταλάβαινα. Μου έλεγε για κάποια τζιτεριασμένα κλόκια, συνέχιζε με κάτι παλμούς που βαρούσαν ο ένας τον άλλο, κι εγώ προσπαθούσα να βγάλω άκρη μέσα από όλα αυτά για το τι θα χρειαστώ για την ολοκλήρωση της εργασίας μου. Από τις τότε συζητήσεις μας πάντως έφευγα πάντα σίγουρος για ένα πράγμα. Αυτό ήταν, ότι η λύση σε όλα τα προβλήματα της φωτονικής είναι να πάει το κέρδος των SOAs στον πάτο με ένα CW σήμα. Δεν καταλάβαινα και πολλά τότε, άλλα έτσι όπως το έλεγε ο Γιώργος, μου φαινόταν σαν την πιο σημαντική ανακάλυψη στις τηλεπικοινωνίες μετά το τηλέφωνο.

Επιστρέφοντας πάλι στο σήμερα και σκεφτόμενος την κουβέντα που είχα με τον φοιτητή, συνειδητοποιώ ότι παρόλη την περιγραφή του εργαστηρίου που του έκανα, παρέλειψα να του αναφέρω αυτό που για μένα είναι το πιο σημαντικότερο κέρδος που έχει κάποιος στο εργαστήριο. Το ότι αν έχει όρεξη, μέσα από το εργαστήριο μπορεί πραγματικά να κάνει τα πάντα. Μπορεί να αισθανθεί ότι διανύει μία από τις πιο παραγωγικές περιόδους της ζωή του και πράγματι, αυτό είναι που αισθάνομαι κι εγώ τώρα σκεφτόμενος όλα αυτά τα χρόνια που περάσανε από την πρώτη φορά που μπήκα στο εργαστήριο μέχρι και τώρα που γράφω τις τελευταίες γραμμές της διατριβής μου.

Ο λόγος που το εργαστήριο έχει καταφέρει τόσα πολλά, είναι χωρίς αμφιβολία η ομάδα που βρίσκεται πίσω από αυτό. Αρχηγός αυτής της ομάδας είναι ο Καθηγητής Ηρακλής Αβραμόπουλος. Δεν θα ήθελα σε αυτό το κείμενο να αναφερθώ στα επιστημονικά του επιτεύγματα. Δεν χρειάζεται να το κάνω αυτό άλλωστε. Ο κ. Αβραμόπουλος είναι ένας επιστήμονας με όλη την σημασία της λέξης, διεθνώς αναγνωρισμένος και από τους πιο καταξιωμένους στο χώρο του. Αυτό όμως που έχει μεγαλύτερη σημασία για μένα, είναι ότι είναι πραγματικός δάσκαλος. Δεν είναι πολύ αυτοί που έχουν την ικανότητα να μεταδίδουν στους μαθητές τους το πάθος τους, την επιμονή τους, την όρεξή τους για δουλειά, την θέληση για την πρωτιά και την μεθοδικότητά τους. Ο κ. Αβραμόπουλος είναι ένας τέτοιος δάσκαλος και θα ήθελα να τον ευχαριστήσω πολύ για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε όλα αυτά τα χρόνια. Θέλω να τον ευχαριστήσω για την καθοδήγησή του και για τις ευκαιρίες που μου έδωσε. Θέλω να του πω ένα μεγάλο ευχαριστώ γιατί με έκανε για κάποια χρόνια να αισθανθώ πειρατής.

Θα ήθελα επίσης να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους ανθρώπους που ζήσαμε μαζί στο εργαστήριο αυτά τα χρόνια ξεκινώντας από τους πιο παλιούς, τον Δρ. Γιώργο Θεοφιλόπουλο, τον Δρ. Χρήστο Μπίντζα και τον Δρ. Κώστα Γιαννόπουλο. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον φίλο μου, λέκτορα του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, Δρ. Νίκο Πλέρο. Με τον Νίκο είχα πάντα μια ιδιαίτερη σχέση στο εργαστήριο. Όταν έκανα κάτι στραβό, αμέσως με κατσάδιαζε. Όταν δεν έκανα κάτι που έπρεπε, το ίδιο. Όταν έκανα κάτι καλά, πάλι με κατσάδιαζε γιατί όπως έλεγε θα μπορούσα να το είχα κάνει και καλύτερα. Ο Νίκος συνέβαλε τα μέγιστα στην πορεία μου στο εργαστήριο μαθαίνοντας με να είμαι πιο προσεκτικός και μεθοδικός στην δουλεία μου. Του εύχομαι ότι καλύτερο για εκείνον και την οικογένεια του.

Περνώντας στην επόμενη γενιά, θα ήθελα να ευχαριστήσω για την συνεργασία μας τους συναδέλφους μου Δρ. Γιώργο Κανέλλο και Δρ. Δημήτρη Τσιώκο. Ξέρω ότι τα πάνε μια χαρά με τις τωρινές τους δραστηριότητες και τους εύχομαι να συνεχίσουν έτσι. Ακόμα, θα ήθελα να πω πολλά ευχαριστώ στον Δρ. Κωνσταντίνο Βυρσωκινό για την συνεργασία μας και την πολύτιμη συνεισφορά του στην διατριβή μου. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους τρείς σωματοφύλακες τους εργαστηρίου, τον Δρ. Στράτο Κεχαγιά, τον Δρ. Λεόντη Σταμπουλίδη και τον Δρ. Παρασκευά Μπακόπουλο. Χαίρομαι πολύ που τους γνώρισα, τους θεωρώ φίλους μου και θέλω να τους πω ότι έχοντας δει τον χαρακτήρα τους και τον τρόπο που δουλεύουν, είμαι σίγουρος ότι θα καταφέρουν πολλά πράγματα στη ζωή τους.

Θα ήθελα ακόμα να πω ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στα παιδιά της γενιάς μου, τους φίλους μου Δημήτρη Πετραντωνάκη και Πάνο Ζακυνθινό, άλλα και στο μοναδικό κορίτσι του εργαστηρίου έως σήμερα, την Όλγα. Με τον Δημήτρη και τον Πάνο ζήσαμε πραγματικά παρά πολλά πράγματα μαζί στο εργαστήριο. Δύσκολες αλλά και πολύ ευχάριστες στιγμές. Ξενυχτίσαμε μαζί, μοχθήσαμε μαζί και καταφέραμε πολλά πράγματα μαζί. Τους οφείλω πολλά για το πειραματικό κομμάτι της διατριβής μου, αφού ήταν οι μόνιμοι πειραματικοί μου συνεργάτες όλα αυτά τα χρόνια. Ξέρω ότι ξεκινάνε και εκείνοι τώρα την συγγραφή του διδακτορικού τους και θα ήθελα να τους ευχηθώ καλή δύναμη και καλά τελειώματα.

Από την επόμενη γενιά του εργαστηρίου θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Χρήστο Κουλουμέντα και τον Χρήστο Σταματιάδη και να τους ευχηθώ καλή συνέχεια στην πορεία τους στο εργαστήριο. Στα πιο νέα παιδιά, τον Μάριο Μπουγιούκο και τον Αλέξανδρο Μαζιώτη, θα ήθελα να τους ευχαριστήσω για την έως τώρα συνεργασία μας και να τους προτρέψω να συνεχίσουν την προσπάθεια που κάνουν στο εργαστήριο και να είναι σίγουροι ότι θα ανταμειφθούν.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους αυτούς που ήταν δίπλα μου τόσα χρόνια και με στήριζαν, τους φίλους μου και τους δικούς μου ανθρώπους. Το μεγαλύτερο ευχαριστώ όμως, θα ήθελα να το πω στην οικογένεια μου, στους γονείς μου και στην αδερφή μου. Σε 'κείνους χρωστάω τα πάντα που έχω καταφέρει έως σήμερα και εύχομαι να αισθάνονται υπερήφανοι για μένα για την έως τώρα πορεία μου, γιατί πραγματικά το αξίζουν και με το παραπάνω.

Με τιμή,

Δημήτρης Αποστολόπουλος

Στους γονείς μου Βασίλη και Ευαγγελία και στην αδερφή μου Σταυρούλα

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 116			
ειΣΑΓΩΓΗ	ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	16	
1.1 Hz <i>1.1.1</i>	ΗΤΗΣΗ ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΕΥΡΟΥΣ ΖΩΝΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΛΥΨΗ ΤΩΝ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ Η εξέλιξη της ζήτησης εύρους ζώνης έως σήμερα	18 <i>18</i>	
1.1.2	Η ανάγκη για επιπλέον εύρος ζώνης	21	
1.2 ΣΥΓ	ΧΡΟΝΑ ΔΙΚΤΥΑ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ	25	
1.2.1	Η οπτική ίνα στο δίκτυο πρόσβασης	25	
1.2.2	Οπτικό δίκτυο κορμού	28	
1.3 Оп	ΤΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΗΜΑΤΟΣ	31	
1.3.1	Ήλεκτρο-οπτικά συστήματα επεξεργασίας σήματος	31	
1.3.2	Αμιγώς οπτικά κυκλώματα επεξεργασία σήματος	33	
1.4 Kin	ΗΤΡΑ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	35	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ) 2	43	
ΑΜΙΓΩΣ Ο	ΠΤΙΚΕΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΜΕ ΗΜΙΑΓΩΓΙΜΟ ΟΠΤΙΚΟ ΕΝΙΣΧ	YTH	
•••••		43	
2.1 H∧	ιαγογιμός Οπτικός Ενισχύτης	45	
2.1.1	Αρχή λειτουργίας και βασικά χαρακτηριστικά	45	
2.1.2	Ενίσχυση οπτικού σήματος και κέρδος του ενισχυτή	46	
2.1.3	Κέρδος ασθενούς σήματος	47	
2.1.4	Κορεσμός του SOA από βραχύ οπτικό παλμό	48	
2.1.5	Χρονική σταθερά ανάκαμψης φορέων	49	
2.1.6	Κορεσμένο κέρδος του SOA υπό την επίδραση CW σήματος	51	
2.1.7	Δείκτης διάθλασης του SOA – Μη Γραμμική Στροφή Φάσης Σήματος	54	
2.2 ΣΥΝ	иволометро Mach-Zehnder (Mach-Zehnder Interferometer – MZI)	55	
2.2.1	Αρχή λειτουργίας του συμβολόμετρου ΜΖΙ	56	
2.2.2	Μελέτη της Συνάρτησης Μεταφοράς Ισχύος του συμβολομέτρου Mach-Zehnder σ	την	
περιο	χή ασθενούς σήματος του SOA	60	
2.2.3	Λειτουργία στην περιοχή κορεσμού του SOA υπό την επίδραση CW σήματος – Το		
οπτικά	ό κύκλωμα ψαλιδισμού	65	
2.3 OA	ΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΙ ΔΙΑΚΟΠΤΕΣ ΜΖΙ	68	
2.3.1	Τεχνολογία υβριδικής ολοκλήρωσης ΜΖΙ	70	
2.3.2	Συστοιχίες ολοκληρωμένων διακοπτών ΜΖΙ	74	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ	D 3	80	
ΑΜΙΓΩΣ Ο	ΠΤΙΚΗ 2R ΑΝΑΓΕΝΝΗΣΗ NRZ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝ	IΩN	
ΔΙΑΚΟΠΤΩ	2N MZI	80	
3.1 AM	ιγΩς οπτική 2R αναγεννήση	83	
3.1.1	Εισανωνή	83	
3.1.2	Βελτίωση των χαρακτηριστικών μετάδοσης του σήματος με χρήση αμιγώς οπτικής	; 2R	
αναγέ	ννησης	85	
3.1.3	Μετατροπή μήκους κύματος	87	
3.2 AM	ΙΓΩΣ ΟΠΤΙΚΗ ΑΝΑΓΕΝΝΗΣΗ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΕ SOAs	88	
3.3 2R	Αναγεννητές/Μετατροπείς μηκούς κύματος βασισμένοι σε SOA-MZI	90	
3.4 Mo	ΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΟΥ MZI	95	
3.4.1	Μοντελοποίηση των Οπτικών Ενισχυτών Ημιαγωγού	95	
3.4.2	Μέθοδος προσομοίωσης του SOA στο πρόγραμμα VPI	97	
3.4.3	Παράμετροι των SOAs που χρησιμοποιήθηκαν	99	
3.4.4	Δομή των Οπτικών Ενισχυτών Ημιαγωγού της CIP	101	
3.5 AEI	ολογήση του μοντελού του Οπτικού Ενισχύτη Ημιαγώγου	103	

3.5.1	Καμπύλες Κέρδους		
3.5.2	Χρονική απόκριση του κέρδους		
3.6 Προσδιορισμός του βελτιστού σημείου λειτουργίας των 2R SOA-MZI αναγεννητών1			
3.7 Bea	τιώση της ποιότητας του μεταδιδομένου σηματός δεδομένων με χρήση 2R αναγεννήτα	ом 113	
3.8 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑ ΤΗΝ 2R ΑΜΙΓΩΣ ΟΠΤΙΚΗ ΑΝΑΓΕΝΝΗΣΗ ΤΟΥ			
3.9 Про	οσδιορισμός της επιδόσης των SOA-MZI 2R αναγεννητών στα 40 Gb/s		
3.10			
3.11	Μέλετη της λια-συνλεσιμοτήτας του 2R SOA-M7Ι μετατροπέον μηκούς κυματός		
3 12	Σνωπερασματα	132	
		127	
ΑΜΠ ΩΣ Ο	ΙΠΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΆ ΑΝΑΙ ΕΝΝΗΣΗΣ ΠΑΚΕΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΕΞΑΤΩ ΙΛΔΣ	21 ΗΣ 127	
	10A2	15/	
4.1 On	τικο δικτύο μεταγωγής ετικετάς (AOLS network)	141	
4.2 To	(ΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΑΝΑΓΕΝΝΗΣΗΣ ΠΑΚΕΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ΕΠΙΚΕΦΑΛΙΔΑΣ	143	
4.3 ME	ΓΑΤΡΟΠΗ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ RZ ΠΑΛΜΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ		
4.4 AM	ΓΩΣ ΟΠΤΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΡΟΛΟΓΙΟΥ ΑΠΟ ΠΑΚΕΤΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ		
4.4.1	Εισανωνή		
442	Το φίλτρο Fabry-Perot	148	
443	Το Mach-Zehnder στο κύκλωμα ανάκτησης ορλογιού – Ανάκτηση οπτικών πακ	έτων	
οολογ	ού	154	
45 ΔM	ίος Οπτική 3Β Δναγεννήση με χρήση του συμβολομετρού Μ7Ι	155	
4.5 AN	$A_{0}\chi_{0}^{\prime}$ λ_{0} strong χ_{0} χ_{0	155	
4.5.1	Αμχή λειτουργιας των 5λ αναγεννητών	155	
4.J.2	Αμεγώς υπετογρατίος ΔΝΟ αναμ. Διαγορισμός εσιμεσταμίας (πορτίου οστικός)	150	
4.0 AP		150	
4./ IIEI			
4.7.1	Πειραματική οιαταξή		
4.7.2	Πειραματικά αποτελεσματά		
4.8 ZYN	ΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		
ΚΕΦΑΛΑΙΟ) 5	171	
ΔΜΙΓΟΣ Ο	ΠΤΙΚΗ ΜΟΝΔΛΔ ΜΝΗΜΗΣ ΤΔΧΕΊΔΣ ΠΡΟΣΠΕΛΔΣΗΣ	171	
5.1 Про	ΣΠΑΘΕΙΕΣ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΜΙΓΩΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	174	
5.2 Apx	ιτεκτονική της αμιγώς οπτικής μονάδας RAM	175	
5.2.1	Αμιγώς οπτικό flip-flop		
5.2.2	Αρχιτεκτονική και λειτουργία της αμιγώς οπτικής μονάδας μνήμης ταχείας		
προσπ	έλασης	182	
5.3 NEI	ΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΑΜΙΓΩΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΜΝΗΜΗΣ		
5.4 Σγιν	ΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		
ΚΕΦΑΛΑΙΟ	9 6		
6.1 ΣΥN	ΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ		
6.1.1	Αμιγώς οπτική 2R αναγέννηση NRZ δεδομένων		
6.1.2	Αμιγώς οπτικό κύκλωμα αναγέννησης πακέτων δεδομένων και εξαγωγής		
επικεφαλίδας2			
6.1.3	Αμιγώς οπτική μονάδα μνήμης ταχείας προσπέλασης		
6.2 Προτάζεις για περαιτέρω ερεύνα			
6.2.1 Σχεδίαση αμιγώς οπτικών συστημάτων επεξεργασίας και αποθήκευσης δεδομένων.			
6.2.2	Φωτονική ολοκλήρωση		

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή και σκοπός έρευνας

Η εδραίωση της οπτικής ίνας ως το κύριο μέσο ενσύρματης μετάδοσης στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα είναι συνυφασμένη με την γιγάντωση του διαδικτύου αλλά και του δια-δραστικού τρόπου επικοινωνίας γενικότερα. Η οπτική ίνα προσφέρει μοναδικά χαρακτηριστικά μετάδοσης της πληροφορίας όπως τεράστιο διαθέσιμο εύρος ζώνης και υψηλή αξιοπιστία, επιτυγχάνοντας συνολική χωρητικότητα της τάξης των δεκάδων Tbps με χαμηλούς ρυθμούς σφαλμάτων. Επιπλέον οι χαμηλές απώλειες μετάδοσης που εισάγει το οπτικό μέσο μετάδοσης καθιστούν δυνατή τη μετάδοση του οπτικού σήματος σε αποστάσεις χιλιάδων χιλιομέτρων, με αποτέλεσμα την εγκατάσταση δικτύων οπτικών ινών που καλύπτουν τεράστιες γεωγραφικές περιοχές. Και από οικονομική πλευράς, τα δίκτυα οπτικών ινών υπερτερούν των υπολοίπων ενσύρματων δικτύων, καθώς λόγω της χαμηλής εξασθένησης και διασποράς των ινών, ελαχιστοποιείται ο απαιτούμενος αριθμός ενισχυτών και αναμεταδοτών. Κατά συνέπεια τα οπτικά δίκτυα παρουσιάζουν χαμηλό κόστος, υψηλή αξιοπιστία, ευρυζωνικότητα και εκτεταμένη γεωγραφική κάλυψη. Τα πλεονεκτήματα βέβαια των οπτικών δικτύων, είναι και η αιτία για την ευρύτατη εγκατάστασή ευρυζωνικών δικτύων οπτικών ινών, η οποία άρχισε την προηγούμενη δεκαετία και συνεχίζεται μέχρι και σήμερα με αυξημένους ρυθμούς.

Τα προτερήματα των οπτικών ινών σε σχέση με τα προηγούμενης γενιάς ενσύρματα μέσα μετάδοσης, και κυρίως το πολύ μεγάλο εύρος ζώνης που διαθέτουν, άλλαξε τον τρόπο λειτουργίας της σύγχρονης κοινωνίας τόσο, ώστε αυτή να ονομαστεί «Κοινωνία της Πληροφορίας». Μέσα σε λίγα χρόνια το διαδίκτυο γιγαντώθηκε και οι υπηρεσίες που προσφέρονταν μέσω αυτού πολλαπλασιάστηκαν. Κρατικές υπηρεσίες, εταιρίες και απλοί εκμεταλλεύτηκαν άμεσα τις εξελίξεις πολίτες στον χώρο των τηλεπικοινωνιών, βλέποντας τα μεγάλα οφέλη που αυτές μπορούσαν να προσφέρουν. Οι κρατικές υπηρεσίας αναβάθμισαν τις υπηρεσίες τους και ήταν σε θέση να εξυπηρετήσουν τόσο τις δικές τους ανάγκες όσο και τον πολιτών σε ελάχιστο χρόνο και καταναλώνοντας ελάχιστους πόρους. Οι εταιρίες από την μεριά τους είδαν να αλλάζουν οι παλιοί μέθοδοι εμπορίου και νέες υπηρεσίες, όπως το ηλεκτρονικό εμπόριο και η διαδικτυακή διαφήμιση, έκαναν την εμφάνιση τους. Σημαντικά κέρδη από τις εξελίξεις αυτές αποκόμισε και ο πολίτης με το σημαντικότερο ίσως όλων την πρόσβαση στην πληροφόρηση που του παρείχε το διαδίκτυο.

Η διασύνδεση ηλεκτρονικών υπολογιστών και τηλεπικοινωνιακών δικτύων, έχει υλοποιηθεί εδώ και σχεδόν τέσσερεις δεκαετίες. Αυτό όμως που οδήγησε μέχρι σήμερα και θα εξακολουθεί να οδηγεί την εξέλιξη της τεχνολογίας στις τηλεπικοινωνίες είναι η ανάπτυξη νέων ευρυζωνικών υπηρεσιών σε χαμηλό κόστος, με σκοπό τη διείσδυση της πληροφορίας σε μεγαλύτερες ομάδες πληθυσμού. Αναμφισβήτητα, η μείωση του κόστους πρόσβασης του τελικού χρήστη οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στα τωρινά οπτικά δίκτυα, ενώ η ελαχιστοποίησή του, θα είναι το βασικό αίτιο για την ανάπτυξη μελλοντικών οπτικών δικτύων με υψηλότερη χωρητικότητα, δεδομένου ότι όσο μειώνεται το κόστος πρόσβασης, τόσο θα αυξάνεται ο αριθμός των τελικών χρηστών που χρησιμοποιούν τους πόρους του δικτύου. Φυσικά δεν είναι μόνο ο αριθμός των χρηστών που θα καθορίσει την αύξηση χωρητικότητας των δικτύων, αλλά και ο τρόπος χρήσης των πόρων αυτών. Για παράδειγμα, οι τηλεφωνικές κλήσεις έχουν μικρή μέση διάρκεια, μερικά λεπτά ενώ καταλαμβάνουν εύρος ζώνης ίσο με 64 Kbps. Αντίθετα, η πλοήγηση των χρηστών στο διαδίκτυο διαρκεί πολύ περισσότερο, δεκάδες λεπτά ή και ώρες, ενώ απαιτεί κυμαινόμενο εύρος ζώνης ανάλογα με τη δραστηριότητα που πραγματοποιείται. Πέραν όμως των παραδοσιακών υπηρεσιών τηλεφωνίας και διαδικτύου, αναδυόμενες υπηρεσίες όπως ψηφιακή τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας, video on demand, και μελλοντικές υπηρεσίες όπως τηλε-ιατρική, τηλε-συνδιάσκεψη και κάθε τύπου τηλε-εργασία πραγματικού χρόνου και υψηλής ποιότητας, αναμένεται να ενισχύσουν σημαντικά την ανάγκη για δίκτυα αυξημένης χωρητικότητας.

Οι παραπάνω τεχνολογικές εφαρμογές και απαιτήσεις, θα προκαλέσουν σημαντική αύξηση της ζήτησης εύρους ζώνης. Τα μελλοντικά δίκτυα όμως, πέραν της αυξημένης χωρητικότητας που θα είναι επιθυμητό να παρέχουν, θα

πρέπει να είναι σε θέση να υποστηρίζουν αποδοτικά τη μετάδοση, αλλά και την μεταγωγή και την αποθήκευση της πληροφορίας, σε υψηλές ταχύτητες, ενώ παράλληλα να αποδίδουν όλες τις παραπάνω υπηρεσίες σε χαμηλό κόστος και με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Η ανάπτυξη κατάλληλων τεχνολογιών, οι οποίες θα είναι σε θέση να ικανοποιήσουν τις παραπάνω προϋποθέσεις, αποτελεί σημαντικό πεδίο έρευνας στο χώρο των τηλεπικοινωνιών.

Στο πλαίσιο αυτό, στο παρών κεφάλαιο επιχειρείται μια ανασκόπηση των οπτικών δικτύων και περιγράφεται η τωρινή τους μορφή. Συγχρόνως, τεκμηριώνεται με απλό τρόπο η μελλοντική ανάγκη για μεγαλύτερο εύρος ζώνης από αυτό που διατίθεται σήμερα. Ακόμα, στις παραγράφους που ακλουθούν περιγράφεται η ερευνητική προσπάθεια προς την υλοποίηση συστημάτων ικανών να ανταπεξέλθουν στις προδιαγραφές των δικτύων νέας γενιάς και επιχειρείται μια αντιπαραβολή μεταξύ των ήλεκτρο-οπτικών και των αμιγώς οπτικών τεχνολογιών. Τέλος, στην τελευταία παράγραφο του κεφαλαίου αποκαλύπτεται το πεδίο δραστηριοτήτων και η συνεισφορά της παρούσας διατριβής προς την ανάπτυξη αμιγώς οπτικών τηλεπικοινωνιακών δικτύων, και με βάση αυτών, η εξέλιξη και η δομή της διατριβής.

1.1 Η ζήτηση επιπλέον εύρους ζώνης για την κάλυψη των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών αναγκών

1.1.1 Η εξέλιξη της ζήτησης εύρους ζώνης έως σήμερα

Δεν είναι πολύ μακριά τα χρόνια που ευρυζωνική σύνδεση για τον απλό χρήστη του διαδικτύου σήμαινε ISDN γραμμή στα 64 Kbps ή στην καλύτερη περίπτωση στα 128 Kbps. Οι κύριες εφαρμογές του διαδικτύου τότε ήταν η ηλεκτρονική αλληλογραφία και η απλή ανάγνωση ιστοσελίδων. Εφαρμογές που απαιτούσαν μεγάλο εύρος ζώνης άρχισαν εκείνη την εποχή να κάνουν δειλά δειλά την εμφάνισή τους, αλλά δεν είχαν ακόμα μεγάλη απήχηση, μιας και η τότε τεχνολογία περιόριζε την χρηστικότητα τους. Στον τομέα των επιχειρήσεων αλλά και των κρατικών υπηρεσιών, η χρήση του διαδικτύου περιοριζόταν σε ανάρτηση ιστοσελίδων που γινόταν περιγραφή προϊόντων ή υπηρεσιών και ανακοινώσεων αντίστοιχα.

Πολύ σύντομα η κατάσταση άλλαξε δραματικά [1.1]. Οι κύριοι λόγοι της αλλαγής αυτής ήταν οι νέες υπηρεσίες που άρχισαν να εμφανίζονται στο διαδίκτυο, οι ανάγκες των εταιριών που είδαν ένα πολλά υποσχόμενο μέσω για την ανάπτυξη και λειτουργία τους και κυρίως, η μεγάλη στροφή που πραγματοποιήθηκε στον τύπο της μεταδιδόμενης πληροφορίας, με το βίντεο να αναδεικνύεται πλέον η κυρίαρχη μορφή μεταδιδόμενης πληροφορίας στο διαδικτύου [1.2]. Η απλή συζήτηση μέσω χρηστών στο διαδίκτυο αντικαταστάθηκε με την συζήτηση μέσω βίντεο (video-chat) κάνοντας παράλληλα δημοφιλή προγράμματα όπως το Skype και το MSN. Μεγάλη δημοσιότητα απέκτησαν ιστοσελίδες βίντεο-προβολής όπως το YouTube [1.3] και το σύνολο πλέον τις πληροφορίας που παλαιότερα ήταν δομημένη στις ιστοσελίδες μόνο για ανάγνωση, συνοδευόταν από αντίστοιχο οπτικό υλικό. Σε αυτά τα χρόνια οι επιχειρήσεις που εκμεταλλεύονταν το διαδίκτυο πολλαπλασιάστηκαν και οι μορφές τους παρουσίαζαν μεγάλη ποικιλία. Εταιρίες δημιουργίας ιστοσελίδων, σελίδες κοινωνικής δικτύωσης με συνδρομή, εταιρίες ενοικίασης ταινιών και άλλες, συνέθεταν το πολύχρωμο πάζλ των νέων κολοσσών του διαδικτύου. Οι παραδοσιακές εταιρίες δεν έμειναν πίσω σε αυτές τις αλλαγές και προχώρησαν στην αξιοποίηση του διαδικτύου τόσο για την προσφορά προϊόντων και την διαφήμισή τους μέσω αυτού, αλλά και για οργανωτικές διαμόρφωσαν νέους κανόνες αλλαγές που στην εργασία με χαρακτηριστικότερα παραδείγματα την τηλε-εργασία και τις τηλεσυσκέψεις. Σαρωτικές ήταν και οι αλλαγές στον τομέα της δημοσίας διοίκησης όπου το διαδίκτυο αποτέλεσε ένα πολύτιμο εργαλείο για την σχέση τους με τον πολίτη. Πιστοποιητικά, εφορία, διαγωνισμοί, προκηρύξεις θέσεων, ενημέρωση των πολιτών κτλ, είναι κάποιες μόνο από τις γραφειοκρατικές διαδικασίες του κράτους που αξιοποίησαν άμεσα τις ευκολίες που παρείχε η νέα διαδικτυακή εποχή.

Οι δραστικές αλλαγές στον τύπο των υπηρεσιών γίνονταν πάντα συναρτήσει της αύξησης του εύρους ζώνης που ήταν διαθέσιμο στους οικιακούς ή εμπορικούς χρήστες. Η αύξηση αυτή ήταν στενά συνδεδεμένη με την αυξανόμενη χρήση οπτικών ινών στο δίκτυο κορμού, αλλά και στο μητροπολιτικό δίκτυο των μεγάλων πόλεων. Σε πολύ μικρό χρόνο οι ταχύτητες των 64 Kbps αποτελούσαν μακρινό παρελθόν και η τεχνολογία DSL ήταν συνώνυμο με την ευρυζωνική σύνδεση, όσον αφορούσε τουλάχιστον τους οικιακούς χρήστες. Υπηρεσίες όπως η παρακολούθηση ταινιών ή και τηλεόρασης μέσω του διαδικτύου (Video-on-demand, IPTV) απέκτησαν πλέον ικανοποιητική ποιότητα λειτουργίας και άλλοι τομείς διαδικτυακών δραστηριοτήτων, όπως τα παιχνίδια μέσω του διαδικτύου, ακολούθησαν σταθερά αυξητικές τάσεις. Η τελευταία τάση στον χώρο τον ευρυζωνικών υπηρεσιών ήταν η ενοποίηση των υπηρεσιών προς τον χρήστη, προσφέροντας ταυτόχρονα τηλεφωνία, γρήγορη πλοήγηση στο διαδίκτυο και τηλεόραση, μέσω μίας και μόνο σύνδεσης (triple play). Μέχρι στιγμής, με τα τωρινά δεδομένα, το προσφερόμενο εύρος ζώνης της γραμμής ADSL 2+ (24 Mb/s) μοιάζει αρκετό για να υποστηρίξει αυτές τις υπηρεσίες.







Σχήμα 1.1. (α) Ρυθμός εγκατάστασης νέων ευρυζωνικών συνδέσεων και **(β)** ποσοστό ευρυζωνικών συνδέσεων επί τοις % του πληθυσμού για τις 25 υψηλότερες σε ποσοστό πόλεις.

Η ανάπτυξη του διαδικτύου και οι πληθώρα των εφαρμογών που την συνόδευσαν, καθώς και οι ανταγωνιστικές τιμές των ευρυζωνικών πακέτων που παρουσιάστηκαν τα τελευταία χρόνια, οδήγησε σε έναν μεγάλο αριθμό εγκατάστασης νέων ευρυζωνικών συνδέσεων. Το σχήμα 1.1(α) δείχνει των ρυθμό εγκατάστασης νέων ευρυζωνικών συνδέσεων για τις 25 υψηλότερες σε ρυθμό πόλεις. Στο σχήμα φαίνεται έντονα η ανοδική τάση που κυριαρχεί στο σύνολο των χωρών, με τα μεγαλύτερα ποσοστά να εμφανίζονται στην νότια Κορέα, στην Ιαπωνία, στις χώρες της Βόρειας Ευρώπης και στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Στο σχήμα 1.1(β) φαίνεται ότι η διείσδυση των ευρυζωνικών συνδέσεων στον συνολικό πληθυσμό της χώρας έχει αγγίξει το 30 με 35 %. Το σημαντικότερο συμπέρασμα που προκύπτει από τα παραπάνω διαγράμματα είναι ότι η τάση για αύξηση των συνδέσεων εμφανίζεται σταθερά αυξητική τα τελευταία χρόνια [1.4]. Παρόλα αυτά, όλοι συμφωνούν ότι το εύρος ζώνης που παρέχεται σήμερα δεν είναι σε θέση να καλύψει τις ανάγκες των νέων υπηρεσιών που ήδη προταθεί από τις εταιρίες κολοσσούς του χώρου έχουν των τηλεπικοινωνιών και διαδικτυακών εφαρμογών.

1.1.2 Η ανάγκη για επιπλέον εύρος ζώνης

Παρόλη την εκρηκτική αύξηση του διαθέσιμού εύρους ζώνης και της ταχύτητας των δια-δικτυακών υπηρεσιών που προσφέρονται αυτή την στιγμή, όλες οι μετρήσεις και οι στατιστικές αποδεικνύουν πως η ζήτηση για επιπλέον εύρος ζώνης συνεχίζει να μεγαλώνει. Για να κατανοήσουμε καλύτερα αυτήν την διαπίστωση, αρκεί η μελέτη της συμπεριφορά των χρηστών/αγοραστών αλλά και η περιληπτική περιγραφή των εφαρμογών που έχουν αναγγείλει οι μεγάλες τηλεπικοινωνιακές εταιρίες.

Μια πολύ απλοϊκή εξήγηση στο που οφείλεται αυτή η μεγάλη ζήτηση για επιπλέον εύρος ζώνης, προκύπτει από μια γρήγορη ματιά στα διαφημιστικά φυλλάδια των Κυριακάτικων εφημερίδων. Μεταξύ των προϊόντων που διαφημίζονται εκεί, μπορεί κάποιος να παρατηρήσει ότι υπάρχει μια μεγάλη γκάμα ηλεκτρονικών συσκευών όπως φορητοί και σταθεροί υπολογιστές, ψηφιακές κάμερες, αποκωδικοποιητές ψηφιακού σήματος, smart phones και iPhones, iPod mp3 players, HDTVs, συστήματα BluRay DVD, Xbox 360s και Playstations κ.α. Ο λόγος φυσικά που αυτά τα προϊόντα διαφημίζονται τόσο πολύ είναι γιατί τα περισσότερα νοικοκυριά έχουν στην κατοχή τους και χρησιμοποιούν καθημερινά πολλές από αυτές τις συσκευές.

Έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί σε διάφορες χώρες του κόσμου[1.5], έχουν παρουσιάσει εντυπωσιακά στοιχεία. Στις Ηνωμένες

Πολιτείες, η μέση οικογένεια έχει περισσότερα από 25 ηλεκτρονικά προϊόντα νέας τεχνολογίας. Στην περίπτωση δε που στην οικογένεια υπάρχουν μικρά παιδιά ή έφηβοι, το νούμερο αυτό μεγαλώνει ακόμα περισσότερο. Η τελευταία περίπτωση είναι ίσως και η πιο ενδιαφέρουσα, μιας και τα παιδιά και οι νέοι είναι οι μελλοντικοί βασικοί χρήστες των εκάστοτε ηλεκτρονικών υπηρεσιών.

Σε μια οικογένεια λοιπόν, η οποία διαθέτει όλες αυτές τις συσκευές που αναφέραμε προηγουμένως, η εποχή που όλη η οικογένεια μαζευόταν μπροστά από μια τηλεόραση να παρακολουθήσει το αγαπημένο της πρόγραμμα, θα φαντάζει εξαιρετικά μακρινή. Τώρα, το κάθε μέλος της οικογένειας παρακολουθεί το δικό του αγαπημένο πρόγραμμα το οποίο μπορεί να είναι σε υψηλή ευκρίνεια (HD), κάποιος άλλος μπορεί να παίζει ένα διαδικτυακό παιχνίδι ενώ ταυτόχρονα «κατεβάζει» μια νέα ταινία και ακούει την αγαπημένη του μουσική από το διαδίκτυο. Η κατάσταση που περιγράψαμε αποτυπώνει αυτό που ονομάζεται πολύ-πραγμοσύνη (multitasking) και σε αυτή, οι χρήστες απαιτούν μεγάλο όγκο δεδομένων σε πολύ μικρό χρόνο, εκτινάσσοντας τις απαιτήσεις σε εύρος ζώνης του δικτύου.

Ταυτόχρονα με την αλλαγή στον τρόπο χρήσης των ηλεκτρονικών μέσων που παρέχουν πρόσβαση σε ευρυζωνικές υπηρεσίες, οι τηλεπικοινωνιακοί κολοσσοί και οι μεγάλες εταιρίες διαδικτυακών εφαρμογών έχουν παρουσιάσει μια σειρά υπηρεσιών οι οποίες έχουν ήδη τύχει θερμής υποδοχής από το καταναλωτικό κοινό. Κοινό στοιχείο όλων αυτών, είναι οι πολύ υψηλές απαιτήσεις σε εύρο ζώνης [1.6]. Οι σημαντικότερες από αυτές τις υπηρεσίες είναι:

- Τηλεόραση Υψηλής Ευκρίνειας (HDTV): Έπειτα από ένα μεγάλο χρονικό διάστημα ανακοινώσεων, η τηλεόραση (τηλεοπτικά προγράμματα) υψηλής ευκρίνειας (HDTV) έγινε πραγματικότητα. Πάροχοι από όλες τις χώρες σπεύδουν να μεταδώσουν HD προγράμματα που σε κάποιες περιπτώσεις μπορούν να φτάσουν και τα 26 (HBO, H.Π.Α.). Οι εκτιμήσεις λένε ότι 40% των νοικοκυριών διαθέτουν HDTV, ποσοστό το οποίο αναμένεται να φτάσει το 60% τα επόμενα χρόνια Ακόμα, το ποσοστό των χρηστών HDTV τεχνολογίας στην Ευρώπη, αναμένεται να φτάσει το 70% το έτος 2012. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι η HDTV απαιτεί 6 φορές μεγαλύτερο εύρος ζώνης από την SDTV (Standard Definition TV), κερδίζοντας έτσι τον τίτλο της πιο απαιτητικής εφαρμογής όσων αφορά το εύρος ζώνης.

- Ψηφιακή Εγγραφή (DVR): Οι σημερινοί τελικοί χρήστες δεν αρκούνται στο να παρακολουθούν κάποιο πρόγραμμα την ώρα που είναι προκαθορισμένη από τον πάροχο της υπηρεσίας. Η λύση σε αυτό είναι η ψηφιακή εγγραφή (digital video recorders - DVR). Ενώ η αλλαγή ώρας, ή και ημέρας, καθώς και η εγγραφή ενός HD προγράμματος ενώ προβάλλεται κάποιο άλλο είναι βολική για τους καταναλωτές, το αποτέλεσμα είναι η ταυτόχρονη μετάδοση δύο HD σημάτων που απαιτεί και διπλασιασμό του ζητούμενου εύρους ζώνης.

- Προβολή βίντεο κατά απαίτηση (Streaming Video): Καθώς οι πάροχοι HD εφαρμογών βρίσκουν νέους τρόπους να παρέχουν βίντεο στους καταναλωτές, το παραδοσιακό διαδικτυακό περιεχόμενο όπως το κείμενο και οι εικόνες περνούν σε δεύτερη μοίρα. Σύμφωνα με ένα άρθρο του GIGAOM [], "Η άμεση προβολή βίντεο και ήχου από υπηρεσίες όπως το YouTube, αυτή την στιγμή αναλογούν στο 50% της συνολικής κίνησης του δικτύου."

- Διαδικτυακά Παιχνίδια (Networked Gaming): Το διαδικτυακό παιχνίδι και το παράγωγό του διαδικτυακό παιχνίδι πολλαπλών χρηστών (Massively Multiplayer Online Game - MMO) είναι εφαρμογές υψηλού κέρδους. Στο σχήμα 1.2 βλέπουμε ότι σύμφωνα με τις εκτιμήσεις, το έτος 2012 το μέγεθος της αγοράς των διαδικτυακών παιχνιδιών θα είναι μεγαλύτερο από \$13 εκατομμύρια. Αξίζει να αναφέρουμε πως μόνο το έτος 2008 η αγορά της Κίνας παρουσίασε αύξηση μεγαλύτερη από 63% [1.7], ενώ ο συνολικός αριθμός των παικτών, αυτή την στιγμή ξεπερνά τα 50 εκατομμύρια. Οι εφαρμογές αυτές απαιτούν σημαντικό εύρος ζώνης από την πλευρά του δικτύου και πολύ μικρή καθυστέρηση (latency). Η απαίτηση αυτή αναμένεται να γιγαντωθεί με την εισαγωγή της HD τεχνολογίας στα διαδικτυακά παιχνίδια νέας γενιάς.



Total Worldwide Online Game Revenue 2006-2012

Σχήμα 1.2. Εκτίμηση του οικονομικού μεγέθους της αγοράς διαδικτυακών παιχνιδιών για τα έτη 2006-12.

- Αύξηση της ταχύτητας: Ίσως η πιο ταχέως αναδυόμενη εφαρμογή με υψηλές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, είναι το «κατέβασμα» ταινιών, είτε μέσω αγοράς τους είτε με ενοικίαση. Οι ταινίες αποτελούνται από εξαιρετικά μεγάλα αρχεία τα οποία απαιτούν μεγάλες ταχύτητες για να τα «κατεβάσει» στον υπολογιστή του ο χρήστης. Ακόμα, σημαντική αύξηση παρατηρείται και στις εφαρμογές όπου απαιτείται το «ανέβασμα» αρχείων από τον Οι χρήστες απαιτούν όλο μεγαλύτερες χρήστη. και ταχύτητες «ανεβάσματος» peer-to-peer για εφαρμογές, για πρόσβαση απομακρυσμένων υπολογιστικών πόρων, για δημιουργία αντιγράφων ασφαλείας σε απομακρυσμένους διακομιστές, video chatting και conferencing, κ.α.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, μπορούμε να κάνουμε μία πρόχειρη εκτίμηση για το μέγιστο εύρος ζώνης που θα απαιτήσει ένας οικιακός χρήστης τα επόμενα χρόνια [1.6]. Ας υποθέσουμε λοιπόν ότι οι απαιτήσεις του σε υπηρεσίες είναι οι ακόλουθες:

- Βίντεο: 3 HDTVs οι οποίες προσφέρουν άμεση προβολή HD προγραμμάτων ενώ δύο ψηφιακοί εγγραφείς (DVRs) αποθηκεύουν την πληροφορία δύο ακόμα HD σημάτων, με κάθε HD πρόγραμμα να απαιτεί περίπου 8 Mbps (για ποιότητα 1080p).
- Διαδίκτυο: Ταυτόχρονα, στο σπίτι κάποιος/κάποιοι χρησιμοποιούν το διαδίκτυο — ας υπολογίσουμε 10Mbps downstream και 10Mbps upstream.
- Φωνή: Οι απαιτήσεις της ΙΡ τηλεφωνίας είναι ελάχιστες και γι' αυτό το λόγο δεν θα τις λάβουμε υπόψη μας.

Με έναν απλό υπολογισμό βλέπουμε ότι οι ανάγκες σε εύρος ζώνης της παραπάνω οικογένειας αγγίζουν τα 50 Mbps downstream και 10 Mbps upstream, νούμερο το οποίο είναι πολύ πάνω από τα όρια της ADSL 2+ τεχνολογίας. Αν τώρα στο παραπάνω σενάριο λάβουμε υπόψη μας ότι κάποιος μπορεί να κατεβάζει μια HD ταινία ή να παίζει ένα 3D δια-δραστικό παιχνίδι νέας γενιάς, οι ανάγκες σε εύρος ζώνης που υπολογίσαμε θα πρέπει να αυξηθούν περαιτέρω. Στο προσεχές μέλλον επίσης, αναμένεται σημαντική αύξηση στις HD βίντεο-αναλύσεις, πράγμα που σημαίνει ότι για το κάθε HD κανάλι, το απαιτούμενο εύρος ζώνης θα είναι πολύ μεγαλύτερο από 8 Mbps. Εκτιμήσεις της αγοράς μάλιστα, κάνουν λόγω για την ανάγκη συνδέσεων 100 Mbps μέχρι και το έτος 2012 για την κάλυψη των παραπάνω αναγκών [1.6].

1.2 Σύγχρονα δίκτυα οπτικών ινών

Οι διαρκώς αυξανόμενες ανάγκες σε εύρος ζώνης έχουν οδηγήσει σε μεγάλες αλλαγές στις τωρινές τηλεπικοινωνιακές υποδομές. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι η αντικατάσταση του χαλκού στο δίκτυο πρόσβασης με οπτική ίνα και η μετεξέλιξη του δικτύου κορμού από σταθερού κυκλώματος σε IP over WDM δίκτυο.

1.2.1 Η οπτική ίνα στο δίκτυο πρόσβασης

Η σταδιακή αντικατάσταση όλων των χάλκινων καλωδίων του τηλεπικοινωνιακού δικτύου, ήταν ένα εγχείρημα που οι τηλεπικοινωνιακοί οργανισμοί σχεδίαζαν να υλοποιήσουν σε βάθος χρόνου. Τα νέα δεδομένα όμως στον χώρο των ευρυζωνικών υπηρεσιών, που οδήγησαν στην απαίτηση επιπλέον εύρους ζώνης από αυτό που μπορούσε να προσφέρει η χάλκινη καλωδίωση, επιτάχυναν τις εξελίξεις. Για την κάλυψη λοιπόν αυτών των αναγκών, η οπτική ίνα έπρεπε να φτάσει πιο κοντά στον τελικό χρήστη, ιδανικά έξω από την πόρτα του σπιτιού του.

Τα δίκτυα πρόσβασης οπτικών ινών (FTTx solutions) είναι υλοποιήσεις που στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση του μήκους του χάλκινου βρόχου, φέρνοντας το ευρυζωνικό μέσο μετάδοσης (οπτική ίνα) κοντά στο συνδρομητή[1.8]. Τα τελευταία χρόνια, η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει παρουσιάσει αλματώδεις ρυθμούς ανάπτυξης λόγω του πολύ μεγάλου εύρους ζώνης που μπορεί να διαθέσει στους χρήστες, αλλά και της μακροπρόθεσμης αντοχής της τεχνολογίας σε αυξανόμενες απαιτήσεις εύρους ζώνης.

Ανάλογα με το βαθμό προσέγγισης του συνδρομητή με ίνα, οι λύσεις που υπάρχουν χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες (**σχήμα 1.3**):

Οπτική Ίνα στην Καμπίνα - Fiber To The Node (FTTN) ή Fiber To The Cabin (FTTCab): Στην περίπτωση αυτή, η οπτική ίνα φτάνει μέχρι μία καμπίνα του πεζοδρομίου και εξυπηρετεί τους χρήστες της γύρω περιοχής μέσω δικτύου χαλκού, συνήθως του υπάρχοντος τοπικού βρόχου. Η περίπτωση αυτή περιορίζει το μήκος του χαλκού μέχρι μερικές εκατοντάδες μέτρα, επιτρέποντας ταχύτητες πρόσβασης μέχρι μερικές δεκάδες Mb/s, π.χ. χρησιμοποιώντας συστήματα VDSL. Η λύση αυτή έχει θεωρηθεί κατάλληλη για την εξυπηρέτηση μεγάλου αριθμού συνδρομητών, οι οποίοι είναι συγκεντρωμένοι σε μία μικρή περιοχή (π.χ. οικοδομικό τετράγωνο), και έχουν σχετικά μικρές απαιτήσεις ταχύτητας πρόσβασης. **Οπτική Ίνα στον βρόγχο - Fiber To The Curve (FTTC):** Σε αυτήν την τοπολογία, η οπτική ίνα φτάνει μέχρι τον τελευταίο βρόγχο/κατανεμητή δίπλα από τα σπίτια των συνδρομητών (καφάο). Τα τελευταία δεκάδες μέτρα της ζεύξης μεταξύ κτιρίων και κατανεμητή καλύπτονται είτε από ομοαξονικά καλώδια είτε από συνεστραμμένα ζεύγη καλωδίων. Στους συνδρομητές του δικτύου παρέχεται ευρυζωνική κάλυψη με χρήση της τεχνολογίας ADSL 2+ και η μέγιστη ταχύτητα τις υπηρεσίας εξαρτάται από την απόσταση του συνδρομητή από τον κατανεμητή και την παλαιότητα των καλωδίων. Τυπικές τιμές είναι από 24 έως 50 Mbps.



Σχήμα 1.3. Τεχνολογίες FTT-X.

Οπτική Ίνα στο Κτίριο - Fiber To The Building (FTTB): Η οπτική ίνα φτάνει μέχρι και το κτίριο των συνδρομητών (συγκρότημα γραφείων, πολυκατοικία) και οι ενεργός εξοπλισμός δικτύου τοποθετείται εσωτερικά μέσα στο κτίριο εξυπηρετώντας τους συνδρομητές του κτιρίου. Το μήκος του χαλκού περιορίζεται σε αυτό της δομημένης καλωδίωσης του κτιρίου, επιτρέποντας πρακτικά οποιαδήποτε ταχύτητα πρόσβασης. Η λύση αυτή θεωρείται κατάλληλη για την εξυπηρέτηση μεμονωμένων μεγάλων επιχειρήσεων με μεγάλες απαιτήσεις ταχύτητας ή κτιρίων με μεγάλη συγκέντρωση συνδρομητών σχετικά μικρών απαιτήσεων (π.χ. εμπορικά και επαγγελματικά κέντρα).

Οπτική Ίνα στο Σπίτι - Fiber To The Home (FTTH): Σε αυτή την τεχνολογική λύση, η οπτική ίνα φτάνει σε κάθε χρήστη, γεγονός που σημαίνει μέγιστη παροχή εύρους ζώνης και εκμηδένιση της απόστασης του χαλκού. Η οπτική ίνα φτάνει έως και την είσοδο του σπιτιού, όπου με χρήση οπτό-ηλεκτρονικού εξοπλισμού, το σήμα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό και ενώνεται με το εσωτερικό δίκτυο του σπιτιού, που μπορεί να είναι το τηλεφωνικό ή ακόμα και CAT5, CAT6 δομημένη καλωδίωση.

Οι FTTH αρχιτεκτονικές μπορούν να ταξινομηθούν με τη σειρά τους σε ενεργές και παθητικές τοπολογίες, όπως φαίνεται στο **σχήμα 1.4**. Οι ενεργές τοπολογίες δικτύων FTTH είναι περαιτέρω ταξινομημένες σε point to point ή point-to-multipoint. Κάθε τοπολογία έχει τα δικά της μοναδικά χαρακτηριστικά γνωρίσματά και η βέλτιστη επιλογή εξαρτάται από το υπάρχον δίκτυο, τις δαπάνες επέκτασης και τον αριθμό πιθανών συνδρομητών σε κάθε περίπτωση.

Η εγκατάσταση FTTH τοπολογιών έχει παρουσιάσει σημαντική αύξηση τα τελευταία χρόνια, δείχνοντας ότι η πλήρης αντικατάσταση του χαλκού σε όλα τα μέρη του δικτύου είναι αναγκαία για την περαιτέρω αύξηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης στους καταναλωτές [1.9]. Μέχρι στιγμής, πρωτοπόρες στον τομέα της εγκατάστασης FTTΗ δικτύων αναδεικνύονται η χώρες της ανατολικής Ασίας και πιο συγκεκριμένα, η Ιαπωνία, η Νότια Κορέα και η Κίνα. Στην Ιαπωνία, η FTTΗ αγορά αριθμούσε περισσότερους από 1.6 εκατομμύριο συνδρομητές το 2004, με τον αριθμό αυτό να έχει αυξηθεί σε περίπου 3 εκατομμύρια μέσα στο 2006. Στόχος της κυβέρνησης της Ιαπωνίας είναι η σύνδεση συνολικά 30 εκατομμυρίων σπιτιών με ίνα μέχρι το 2010. Στατιστικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν το 2005 στην Κίνα και την Νότια Κορέα έδειξαν ότι περισσότερο από 1/4 και 1/8 των συνολικών ευρυζωνικών συνδέσεων αντίστοιχα, ακολουθούν FTTx και Ethernet LAN αρχιτεκτονικές. Μάλιστα, η Νότια Κορέα πρόσφατα ανακοίνωσε την συνέχιση του αναπτυξιακού της σχεδίου για εκσυγχρονισμό των τηλεπικοινωνιακών της υποδομών, επιδιώκοντας επέκταση των FTTH συνδέσεων και την παροχή 100 Mb/s ανά συνδρομητή. Οι FTTx τεχνολογίες έχουν αρχίσει να κερδίζουν μερίδιο της αγοράς και των Η.Π.Α., με την Verizon να είναι η πρωτοπόρος στην αξιοποίηση-διασύνδεση FTTΗ τεχνολογιών παρέχοντας μέχρι 50 Mb/s σε κάθε συνδρομητή. Αξίζει να σημειώσουμε ότι στις Η.Π.Α., ο αριθμός των FTTH συνδρομητών υπερέβη το ένα εκατομμύριο το τελευταίο τρίμηνο του 2006.



Σχήμα 1.4. Τοπολογίες FTTH.

1.2.2 Οπτικό δίκτυο κορμού

Το σημερινό οπτικό δίκτυο κορμού βασίζεται στην πολυπλεξία μηκών κύματος (Wavelength Division Multiplexing – WDM) για την μετάδοση της πληροφορίας. Η τεχνική WDM χρησιμοποιείται στα οπτικά δίκτυα σε πλήρη αντιστοιχία με την πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Multiplexing-FDM) στα δίκτυα ραδιοεπικοινωνιών. Σύμφωνα με την τεχνική WDM, η μετάδοση των δεδομένων γίνεται με ταυτόχρονη μετάδοση πολλών μηκών κύματος μέσα από την ίδια ίνα [1.10], όπως παραστατικά αποδίδεται με τη βοήθεια του **σχήματος 1.5**.

Η συνολική χωρητικότητα και η απόδοση ενός WDM συστήματος εξαρτάται από τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων μηκών κύματος (καναλιών), από τη φασματική τους απόσταση, από το ρυθμό

μετάδοσης κάθε καναλιού, από τον τύπο της χρησιμοποιούμενης οπτικής ίνας, από την ισχύ κάθε καναλιού και από το αποδοτικό φάσμα ενίσχυσης των οπτικών ενισχυτών της ζεύξης. Οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν σημαντικά τη μετάδοση, καθώς είναι καθοριστικοί για τη διέγερση των γραμμικών και μη γραμμικών φαινομένων μέσα στην ίνα. Τα κυριότερα από τα μη γραμμικά φαινόμενα με καθοριστική επίδραση στην συνολική επίδοση μίας WDM ζεύξης [1.11] είναι η μίξη τεσσάρων φωτονίων (Four Wave Mixing-FWM), η ετεροδιαμόρφωση φάσης (Cross Phase Modulation-XPM) και η εξαναγκασμένη σκέδαση Raman (Stimulated Raman Scattering-SRS), ενώ από τα γραμμικά φαινόμενα σημαντικότερα είναι η χρωματική διασπορά (chromatic dispersion) της ίνας και η διασπορά τρόπων πόλωσης (Polarization Mode Dispersion-PMD).



Σχήμα 1.5. Αρχή λειτουργίας της WDM πολυπλεξίας.

Τα εμπορικά διαθέσιμα WDM δίκτυα, που έχουν ανακοινωθεί από μεγάλες τηλεπικοινωνιακές εταιρίες, περιλαμβάνουν ως και 160 κανάλια σε ρυθμό μετάδοσης 2.5–10 Gb/s το καθένα ή 80 κανάλια με ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s ανά κανάλι [1.12]. Σε εργαστηριακό/ερευνητικό επίπεδο οι επιδόσεις των WDM συστημάτων μετάδοσης είναι πολύ πιο εντυπωσιακές, υποδεικνύοντας τις τεράστιες δυνατότητες και τη δυναμική τους. Έτσι, "ηρωικά" πειράματα έχουν επιδείξει επιτυχή μετάδοση συνολικής διέλευσης 10.92 Tb/s (273×40 Gb/s) σε απόσταση 117 Km [1.13], 6.4 Tb/s (159×42.7 Gb/s) σε απόσταση 2.100 Km [1.14], 3.65 Tb/s (365×11.6 Gb/s) σε απόσταση

6.850 Km [1.15], 3.2 Tb/s (80×42.7 Gb/s) σε απόσταση 5.200 Km [1.16]. Για τη μετάβαση της τεχνολογίας από το εργαστήριο στην αγορά έχει δειχθεί από θεωρητικές και στατιστικές μελέτες ότι απαιτούνται περίπου 2-3 χρόνια. Λόγω της ταχύτατης αύξησης του αριθμού των χρησιμοποιούμενων καναλιών η τεχνική WDM πολύ συχνά αναφέρεται, πλέον, και ως πυκνή πολυπλεξία κατά μήκος κύματος (Dense Wavelength Division Multiplexing-DWDM) [1.17].

Η συνεχής αύξηση του ζητούμενου εύρους ζώνης από τα άκρα του δικτύου, έχει επιφέρει σημαντικές τροποποιήσεις στο υπάρχον WDM δίκτυο κορμού. Η αρχική λύση των τηλεπικοινωνιακών οργανισμών στην επιπλέον ζήτηση εύρους ζώνης, ήταν η αύξηση των μηκών κύματος στο δίκτυο. Η λύση αυτή όμως δεν αποδεικνύεται η βέλτιστη δυνατή μιας και αυξάνει το κόστος του δικτύου, ειδικά στην περίπτωση που θα χρειαστεί νέα εγκατάσταση ή αναβάθμιση υπάρχουσας υποδομής, αλλά επίσις, δεν φαίνεται να μπορεί από μόνη της να καλύψει τις μακροπρόθεσμες ανάγκες σε εύρος ζώνης. Οι προσπάθειες έχουν τώρα στραφεί στην εγκατάλειψη του παλιού δικτύου στρωμάτων ATM και στην υιοθέτηση του IP πρωτοκόλλου απ' ευθείας πάνω στο φυσικό WDM στρώμα (IP over WDM) [1.18]. Το **σχήμα**



Σχήμα 1.6. Δομικό διάγραμμα της παραδοσιακής δομής του δικτύου και της νέας IP over WDM αρχιτεκτονικής.

Ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της προηγούμενης δικτυακής αρχιτεκτονικής ήταν ότι κάθε στρώμα λειτουργούσε στην «δική» του ταχύτητα. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τα μεγάλα πλεονεκτήματα που προσφέρει η ίνα, να χάνονται από αργά ηλεκτρονικά κυκλώματα που χρησιμοποιούνταν από τα υψηλότερα λειτουργικά στρώματα. Η IP over WDM αρχιτεκτονική καταργεί αυτούς τους περιορισμούς και βασίζεται απ' ευθείας στο φυσικό στρώμα και το στρώμα δικτύου για την μετάδοση των δεδομένων. Σημαντική αλλαγή που υιοθετείται σε αυτό το σχήμα, είναι ότι η μετάδοση της πληροφορίας από ένα σημείο σε κάποιο άλλο δεν γίνεται πλέον με την εκ προοιμίου δημιουργία ενός φυσικού κυκλώματος [1.18]. Αντιθέτως, η μετάδοση των ΙΡ πακέτων γίνεται μέσω νοητών οπτικών μονοπατιών που δημιουργούνται την στιγμή της μεταγωγής των πακέτων από τους ενδιάμεσους κόμβους.

Η νέα δικτυακή αρχιτεκτονική βελτιώνει κατά ένα σημαντικό ποσοστό την επίδοση του δικτύου, αφαιρώντας όλες τις καθυστερήσεις που προσέθεταν τα αργά ηλεκτρονικά κυκλώματα του ΑΤΜ πρωτοκόλλου. Δημιουργεί όμως παράλληλα και νέα δεδομένα στην κυκλωματική αρχιτεκτονική των κόμβων και των στοιχείων αναγέννησης και επίβλεψης του δικτύου. Ακόμα, επιβεβλημένη γίνεται η εισαγωγή νέων στοιχείων στο δίκτυο όπως οι μετατροπείς μήκους κύματος, έτσι ώστε να ικανοποιηθούν οι ανάγκες της νέας αρχιτεκτονικής.

1.3 Οπτικά κυκλώματα επεξεργασία σήματος

Τα νέα δεδομένα στην σχεδίαση οπτικών κόμβων που φέρνει η αλλαγή της δικτυακής αρχιτεκτονικής, αναμένεται να οδηγήσουν και σε αντίστοιχες αλλαγές στα συστήματα μετάδοσης και επεξεργασίας των δεδομένων. Κυκλωματικά χαρακτηριστικά όπως το εύρος ζώνης λειτουργίας, η διαφάνεια στον τύπο της πληροφορίας, η ενεργειακή κατανάλωση, το μέγεθος των κυκλωμάτων και η αξιοπιστία τους, θα παίξουν βασικό ρόλο στην επιλογή της τεχνολογίας που θα υιοθετηθεί για την επεξεργασία των δεδομένων τα επόμενα χρόνια. Βραχυπρόθεσμα, η πιο αξιόπιστη λύση φαίνεται να είναι η χρήση εξελιγμένων ήλεκτρο-οπτικών κυκλωμάτων τόσο για την κάλυψη των αναγκών μεταγωγής και αναγέννησης, όσο και για την αποθήκευση των δεδομένων. Μακροπρόθεσμα όμως, η αμιγώς οπτική τεχνολογία δείχνει να ξεπερνά τα αρχικά της προβλήματα και εκμεταλλευόμενη την εκρηκτική ανάπτυξη της φωτονικής τεχνολογίας ολοκλήρωσης, προβάλει εκείνη ως η επικρατέστερη λύση.

1.3.1 Ηλεκτρο-οπτικά συστήματα επεξεργασίας σήματος

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα των ηλεκτρονικών διατάξεων που χρησιμοποιούνταν στα οπτικά δίκτυα παλαιότερης γενιάς, ήταν ότι λειτουργούσαν σε πολύ αργούς ρυθμούς σε σχέση με αυτό που μπορούσε να προσφέρει η οπτική ίνα. Τα πλεονεκτήματα τους ήταν το χαμηλό κόστος, η αξιοπιστία και το μικρό τους μέγεθος, όλα απόρροια της εξαιρετικά αναπτυγμένης τεχνολογίας κατασκευής και ολοκλήρωσης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Για να μπορέσουν όμως τα ηλεκτρονικά κυκλώματα να ανταπεξέλθουν στις νέες υψηλές απαιτήσεις των δικτύων σε ταχύτητα και εύρος ζώνης, χρειάστηκε αρκετό διάστημα επανασχεδιασμού και υλοποίησης τους. Τα νέα κυκλώματα που προέκυψαν από αυτό το εξελικτικό στάδιο, δεν εμφάνιζαν πλέον τα προτερήματα της προηγούμενης γενιάς, μιας και το κόστος τους έγινε σημαντικά υψηλότερο, η ενεργειακή τους κατανάλωση αυξήθηκε και το εύρος ζώνης λειτουργίας τους δεν αυξήθηκε αρκετά.

Τα μειονεκτήματα όμως των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων αντιμετωπίστηκαν από τα νέας γενιάς ήλεκτρο-οπτικά κυκλώματα. Οι εταιρίες ανάπτυξης και παραγωγής τους, συνδύασαν τα καλύτερα χαρακτηριστικά της ηλεκτρονικής και της φωτονικής τεχνολογίας και παρουσίασαν διατάξεις αυξημένων δυνατοτήτων, υψηλής αξιοπιστίας και σχετικά μικρού κόστους. Το πιο αντιπροσωπευτικό παράδειγμα τέτοιων υλοποιήσεων αποτελούν οι διατάξεις της Αμερικανικής εταιρίας Infinera [1.19].





Η Infinera, αξιοποιώντας γνώσεις ηλεκτρονικής ολοκλήρωσης, προχώρησε σε μονολιθική ολοκλήρωση μεγάλου αριθμού οπτικών στοιχείων πάνω σε ένα υπόστρωμα από InP. Συγκεκριμένα, κατάφερε να ολοκληρώσει περισσότερα από 40 οπτικά στοιχεία παραγωγής και ανίχνευσης WDM σημάτων σε ένα chip εξαιρετικά μικρών διαστάσεων, υλοποιώντας έναν WDM πομπό και έναν WDM δέκτη μέγιστης ταχύτητας 100 Gbps (10 κανάλια x 10 Gbps/κανάλι). Στο **σχήμα 1.7(α)** φαίνεται το δομικό διάγραμμα μίας γεννήτριας 10 WDM καναλιών που κατόπιν πολυπλέκονται και ενός αντίστοιχου δέκτη, ενώ το **σχήμα 1.7(β)** δείχνει τρία chip, το κάθε ένα από τα οποία προσομοιώνει την λειτουργία του προηγούμενου κυκλώματος.

Η παραπάνω υλοποίηση σηματοδότησε μια σημαντική στροφή στην έως τότε τεχνολογία που βασιζόταν στον συνδυασμό μεμονωμένων ηλεκτρονικών και οπτικών στοιχείων για τις απαραίτητες ήλεκτρο-οπτικές μετατροπές του σήματος. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της είναι το μεγάλο εύρος ζώνης που διαθέτει και η χρηστικότητά της, η οποία αδιαμφισβήτητα την καθιστά την βέλτιστη λύση στο χώρο των οπτικών κυκλωμάτων για την κάλυψη των άμεσων τηλεπικοινωνιακών αναγκών των σύγχρονων δικτύων, αλλά και αυτών του κοντινού μέλλοντος.

Η υλοποίηση αυτή όμως δεν παύει να εμφανίζει και μειονεκτήματα. Ενώ σαν σύνολο το κύκλωμα λειτουργεί στα 100 Gbps, η κάθε γραμμή παραγωγής σήματος σε αυτό λειτουργεί στα 10 Gbps. Μια αναβάθμιση της συσκευής σε υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης θα σημάνει ταυτόχρονα και την χρησιμοποίηση πιο ακριβών στοιχείων με αποτέλεσμα την συνολική αύξηση της τιμής του chip. Επιπλέον, ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης που μπορεί να επιτευχθεί από το παραπάνω κύκλωμα ανά κανάλι, περιορίζεται και πάλι σε ρυθμούς μετάδοσης χαμηλότερους από τα 40 Gb/s. Επίσης, δεδομένο ότι τόσο ο πομπός όσο και ο δέκτης αποτελούνται από μεμονωμένα στοιχεία περιορισμένων δυνατοτήτων, το κύκλωμα δεν μπορεί να αναβαθμιστεί παρά μόνο να αντικατασταθεί σε περίπτωση συνολικής αναβάθμισης του δικτύου, αυξάνοντας το συνολικό κόστος της αναβάθμισης. Ακόμα, η τεχνολογία αυτή στηρίζεται σε σχεδιαστικές αρχές τέτοιες, που δεν υποστηρίζουν την διαφάνεια στον τύπο των δεδομένων. Τέλος, σημαντική παράμετρο αποτελεί και η ενεργειακή κατανάλωση του κυκλώματος η οποία είναι σαφώς μεγαλύτερη από αυτή που θα είχε μια αμιγώς οπτική υλοποίηση.

1.3.2 Αμιγώς οπτικά κυκλώματα επεξεργασία σήματος

Αν και από πολύ νωρίς οι αμιγώς οπτικές υλοποιήσεις επεξεργασίας σήματος είχαν δείξει την μεγάλη δυναμική που διέθεταν, δεν υπήρχε αντίστοιχα μεγάλο ενδιαφέρων για την μετάβαση τους από τους πάγκους των εργαστηρίων σε ένα πραγματικό δίκτυο. Μία εξήγηση σε αυτό ίσως αποτελεί το κόστος υλοποίησης τους, που ξεπερνούσε κατά πολύ αυτό των αντίστοιχων ηλεκτρονικών. Επίσης, υπήρχε μεγάλη επιφυλακτικότητα για την αξιοπιστία τους, μιας και οι πειραματικές επιδείξεις που είχαν λάβει χώρα έως τότε, είχαν όλες πραγματοποιηθεί στο αυστηρά ελεγχόμενο περιβάλλον του εργαστηρίου. Ακόμα, διατάξεις αυξημένης πολυπλοκότητας δεν ήταν δυνατόν να υλοποιηθούν λόγο της απουσίας αμιγώς οπτικής μνήμης ταχείας προσπέλασης (RAM). Το σημαντικότερο όμως μειονέκτημα που εμφάνιζαν, ήταν ότι στη συντριπτική τους πλειοψηφία, το μέγεθός τους ήταν κατά πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από το αντίστοιχο μέγεθος πολύ πιο σύνθετων ηλεκτρονικών ή ήλεκτρο-οπτικών κυκλωμάτων. Αμιγώς οπτικές διατάξεις σε ολοκληρωμένη μορφή δεν υπήρχαν μέχρι πριν από λίγα χρόνια, πάρα μόνο μεμονωμένα στοιχεία μικρής λειτουργικότητας.

Η κατάσταση αυτή έχει σήμερα αλλάξει δραματικά. Η τεχνολογία της φωτονικής ολοκλήρωσης έχει κάνει αλματώδεις προόδους και είναι σε θέση να παράγει πλέον ολοκληρωμένα συστήματα πάνω σε ένα πλινθίο (chip). Η εξέλιξη αυτή πραγματοποιήθηκε μέσα σε λίγα μόνο χρόνια και ξεκίνησε με την ολοκλήρωση συστοιχιών ενός μόνο μεμονωμένου στοιχείο [1.20], συνέχισε με την ολοκλήρωση πιο πολύπλοκών αλλά και πάλι μεμονωμένων δομών [1.21] και αυτή την στιγμή έχουν παρουσιαστεί chip πάνω στα οποία έχουν ολοκληρωθεί και διασυνδεθεί περισσότερα από 200 στοιχεία και τα οποία επιτελούν προηγμένες λειτουργίες επεξεργασίας σήματος [1.22].

Ο κατάλληλος λογικός σχεδιασμός κυκλωμάτων και η χρήση προηγμένης φωτονικής τεχνολογίας ολοκλήρωσης μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία οπτικών συστημάτων με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Υψηλή ταχύτητα λειτουργίας: Τα οπτικά υπο-συστήματα χρησιμοποιούν μη-γραμμικά στοιχεία τα οποία να έχουν αρκετά μικρό χρόνο απόκρισης της τάξης των ps, και επομένως έχουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης από τα αντίστοιχα ηλεκτρονικά συστήματα. Τελευταία ερευνητικά αποτελέσματα αναφέρουν οπτική επεξεργασία σήματος σε ταχύτητες μεγαλύτερες από 320 Gb/s [1.23].

Χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος από αντίστοιχες ηλεκτρονικές διατάξεις: Η κατανάλωση ισχύος κάθε τμήματος ενός δικτύου είναι ίσως από τις πιο σημαντικές παραμέτρους σχεδιασμού του. Ακόμα, καθώς η ταχύτητα λειτουργίας των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων αυξάνει, η κατανάλωση ισχύος και ψύξης αυξάνεται δραματικά. Η κατάσταση είναι εντελώς διαφορετική σε οπτικές διατάξεις επεξεργασίας σήματος, καθώς η ηλεκτρική κατανάλωση ισχύος παραμένει σταθερή και ανεξάρτητη του ρυθμού λειτουργίας του υπο-συστήματος.

Δυνατότητα φωτονικής ολοκλήρωσης σε συμπαγής συσκευασίες: Η φωτονική ολοκλήρωση οδηγεί στη σμίκρυνση των ανεπτυγμένων υπο-
συστημάτων και στη μείωση της ευαισθησίας των υπο-συστημάτων στις αλλαγές της πολωτικής κατάστασης του φωτός.

Διαφάνεια στο είδος πληροφορίας και το ρυθμό μετάδοσης: Η οπτική τεχνολογία επιτρέπει την υλοποίηση δικτυακών εφαρμογών κατευθείαν στο οπτικό επίπεδο ανεξάρτητα από το είδος των επεξεργαζόμενων πακέτων, ή του πρωτοκόλλου που χρησιμοποιείται στο δίκτυο, ενώ έχουν την ικανότητα να λειτουργούν αποδοτικά ανεξαρτήτως ρυθμού μετάδοσης λόγω επεξεργασίας δυφίο-προς-δυφίο.

1.4 Κίνητρα και δομή της διατριβής

Από την ανάλυση των παραγράφων που προηγήθηκαν, γίνεται σαφές ότι υπάρχουν ακόμη βασικές ελλείψεις στην τεχνολογία, που απαιτείται για την υλοποίηση των αμιγώς οπτικών δικτύων μεταγωγής πακέτων, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη, ίσως, για αρκετά χρόνια ακόμη η χρήση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και η οπτό-ηλεκτρονική μετατροπή του σήματος σε διάφορα στάδια του δικτύου. Σε τέτοια περίπτωση, όμως, η εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης των οπτικών δικτύων δεν είναι βέλτιστη, καθώς αναπόφευκτα τα χαμηλότερης ταχύτητας ηλεκτρονικά κυκλώματα θα προκαλούν συμφόρηση στους κόμβους του δικτύου.

Από την άλλη πλευρά οι υλοποιήσεις των λειτουργικών διαδικασιών με αμιγώς οπτικό τρόπο, οι οποίες έλαβαν χώρα στο πρόσφατο παρελθόν, αναδεικνύουν τη δυναμική του χώρου και συνιστούν ευοίωνες προοπτικές για τα οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων. Ταυτόχρονα, δείχνουν ότι αναγνωρίζονται τα σημαντικά πλεονεκτήματα, που μπορούν να προσφέρουν οι υλοποιήσεις αυτές στην προσπάθεια για βέλτιστη εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης των οπτικών δικτύων και στην κατ' απαίτηση ευρυζωνική παροχή υπηρεσιών στο χρήση. Σίγουρα, όμως, σε πολλά σημαντικά λειτουργικά στάδια αυτών των δικτύων δεν υπάρχουν ακόμη αξιόπιστες λύσεις, οι οποίες θα επιτρέψουν την αμιγώς οπτική υλοποίηση υψηλής χωρητικότητας δικτύων μεταγωγής πακέτων.

Το παραπάνω πλαίσιο αποτέλεσε και το βασικό κίνητρο της παρούσας διατριβής. Ο κύριος σκοπός αυτής της διατριβής ήταν η σχεδίαση και η ανάπτυξη αμιγώς οπτικών κυκλωμάτων, βασισμένων σε ολοκληρωμένα στοιχεία, για την επεξεργασία, τη μεταγωγή και την αποθήκευση δεδομένων. Το βασικό δομικό στοιχείο όλων των κυκλωμάτων που υλοποιήθηκαν ήταν το συμβολόμετρο Mach-Zehnder (Mach-Zehnder Interferometer – MZI). Οι διατάξεις που υλοποιήθηκαν εκμεταλλεύονται πλήρως τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των φωτονικών στοιχείων από τα οποία αποτελούνται, προφέροντας διαφάνεια στο ρυθμό και την μορφή του εισερχόμενου σήματος δεδομένων. Ακόμα, παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των αντίστοιχων ηλεκτρονικών υλοποιήσεων, όπως υψηλή ταχύτητα επεξεργασίας, ανεξαρτησία της κατανάλωσης ισχύος από το ρυθμό μετάδοσης και απουσία ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής στην περίπτωση ολοκλήρωσης τους σε συστήματα στο δίκτυο. Η ανάπτυξη τέτοιου είδους κυκλωμάτων συντελεί σε μεγάλο βαθμό στην ώθηση των τεχνολογικών εξελίξεων προς την υλοποίηση αμιγώς οπτικών δικτύων, στα οποία θα αποφεύγεται η χρήση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και όλες οι λειτουργικές διαδικασίες θα επιτελούνται στο οπτικό επίπεδο.

Το πρώτο σημαντικό πρόβλημα, που αντιμετωπίστηκε στα πλαίσια αυτής της διατριβής ήταν η αμιγώς οπτική αναγέννηση του σήματος δεδομένων κατά την μετάδοση του. Η υποβάθμιση της ποιότητας του σήματος αποτελεί σημαντικό περιοριστικό παράγοντα για την μέγιστη απόσταση διάδοσής του και περιορίζει ταυτόχρονα και τον μέγιστο ρυθμό λειτουργίας του δικτύου. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται έως σήμερα με χρήση ηλεκτρονικών αναγεννητών, οι οποίοι όμως δεν είναι σε θέση να καλύψουν τις σύγχρονες τηλεπικοινωνιακές ανάγκες. Το δεύτερο σημαντικό πρόβλημα, στο οποίο εστιάσαμε ήταν η εξαγωγή της επικεφαλίδας και ο διαχωρισμός της από το φορτίο του πακέτου καθώς και η 3R αναγέννησή του τελευταίου κατά την είσοδό του στον κόμβο δρομολόγησης, έτσι ώστε το περιεχόμενό της επικεφαλίδας να μπορεί να επεξεργαστεί από το επόμενο υποσύστημα του κόμβου και να αναγνωριστεί ο τελικός προορισμού του πακέτου. Τέλος, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής παρουσιάσαμε την πρώτη αμιγώς οπτική μονάδα μνήμης άμεσης προσπέλασης.

Στην πορεία για την επίλυση αυτών των προβλημάτων αναπτύχθηκαν πρωτοποριακά κυκλώματα οπτικής επεξεργασίας σήματος για την υλοποίηση επιμέρους δομικών υποσυστημάτων. Η λειτουργία αυτών των συστημάτων ανέδειξε, επίσης, νέες εφαρμογές αυτών στο γενικότερο πεδίο της οπτικής μεταγωγής και επεξεργασίας δεδομένων.

Πιο συγκεκριμένα, με δεδομένο το παραπάνω πλαίσιο αναφοράς, και αφού υλοποιήθηκαν οι κατάλληλες γεννήτριες των οπτικών σημάτων, η έρευνα επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη των παρακάτω υποσυστημάτων:

- ενός αμιγώς οπτικού 2R αναγεννητή/μετατροπέα μήκους
 κύματος βασισμένο στο συμβολόμετρο SOA-MZI.
- ενός κυκλώματος αναγέννησης πακέτων δεδομένων και διαχωρισμού του φορτίου από την επικεφαλίδα τους.
- μίας **αμιγώς οπτικής μονάδας μνήμης ταχείας προσπέλασης**.

Η πορεία και η δομή της διατριβής έχει ως εξής:

Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται μια αναλυτική παρουσίαση του συμβολομετρικού διακόπτη Mach-Zehnder (MZI), ο οποίος αποτελεί το βασικό δομικό στοιχείο των κυκλωμάτων που υλοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της διατριβής. Το κεφάλαιο ξεκινάει με την περιγραφή της λειτουργίας του ημιαγώγιμου οπτικού ενισχυτή (Semiconductor Optical Amplifier – SOA), οποίος χρησιμοποιείται ως μη γραμμικό μέσω στο MZI. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η λειτουργία του συμβολόμετρου και η συνάρτηση μεταφοράς του. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση της υβριδική τεχνολογίας ολοκλήρωσης των MZI διακοπτών.

Το Κεφάλαιο 3 παρουσιάζει τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάπτυξη ενός αμιγώς οπτικού 2R αναγεννητή/μετατροπέα μήκους κύματος βασισμένο στο συμβολόμετρο SOA-MZI [1.24]. Στο πρώτο στάδιο μελέτης αναπτύχθηκε ένα θεωρητικό μοντέλο του οπτικού της συμβολόμετρου Mach-Zehnder (MZI). Το μοντέλο του MZI βασίστηκε σ' ένα εμπορικά διαθέσιμο, υβριδικά ολοκληρωμένο οπτικό διακόπτη MZI που ως μη-γραμμικό στοιχείο του χρησιμοποιεί τον Ημιαγώγιμο Οπτικό Ενισχυτή (SOA). Με χρήση του εμπορικά διαθέσιμου περιβάλλοντος προσομοιώσεων VPI, διεξήχθη σειρά προσομοιώσεων με σκοπό την εκτίμηση της ακρίβειας μοντέλου. συνέχεια ακολούθησε του Στην αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με πειραματικές μετρήσεις η οποία και έδειξε την απόλυτη συμφωνία θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων.

Την ανάπτυξη του μοντέλου ακολούθησε η προσομοίωση αμιγώς οπτικών μετατροπέων μήκους κύματος βασισμένων σε SOA-MZI. Η μελέτη περιελάμβανε την αξιολόγηση τους για Non Return to Zero (NRZ) δεδομένα για ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s. Αρχικά η μελέτη εστιάστηκε στην εξακρίβωση του ιδανικού σημείου λειτουργίας της κάθε συνδεσμολογίας και στην συνέχεια περιελάμβανε μελέτη της συμπεριφοράς των συνδεσμολογιών σε διάφορα σενάρια μετάδοσης. Δεδομένου ότι οι μετατροπείς μήκους κύματος βασισμένοι σε SOA-MZI παρουσιάζουν 2R αναγεννητικές ιδιότητες, μελετήθηκε η επίδρασή τους στην ποιότητα της πληροφορίας όταν χρησιμοποιούνται μετά από διάφορά μήκη μετάδοσης. Επίσης μελετήθηκε η επίπτωση που έχουν στην μέγιστη επιτρεπτή απόσταση μετάδοσης.

Η παραπάνω μελέτη οδήγησε στον σχεδιασμό μιας καινούργιας συνδεσμολογίας για μετατροπή μήκους κύματος NRZ δεδομένων [1.24]. Η νέα διάταξη βασίστηκε στην συνδεσμολογία αντίρροπων σημάτων ελέγχου, όπου με την προσθήκη ενός επιπλέον συνεχούς σήματος (continuous wave – WC) επετεύχθη καλύτερος έλεγχος της απόκρισης των SOAs του MZI, τόσο ως προς τα κέρδη όσο και ως προς τη φάση, με αποτέλεσμα το σήμα εξόδου να παρουσιάζει βελτιωμένα χαρακτηριστικά σε σχέση με παλαιότερες συνδεσμολογίες. Η καλύτερη επίδοση της νέας συνδεσμολογίας επιβεβαιώθηκε μετά την επανάληψη των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν για τις άλλες συνδεσμολογίας και σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Την προσομοιωτική μελέτη ακολούθησε ο πειραματικός χαρακτηρισμός των διατάξεων αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος για NRZ δεδομένα στα 10 Gb/s. Στην πειραματική διαδικασία εκτός από την νέα συνδεσμολογία εξετάστηκαν και δύο ακόμα λύσεις με σκοπό την σύγκριση των αποτελεσμάτων όλων των συνδεσμολογιών. Σε απόλυτη συμφωνία με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, η νέα διάταξη εμφάνισε αισθητά καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τις άλλες δύο λύσεις. Επίσης, η νέα διάταξη παρουσίασε σημαντικές αναγεννητικές ιδιότητες και έδειξε να επηρεάζεται ελάχιστα από τον μορφή του σήματος εισόδου.

Το επόμενο στάδιο της μελέτης αφορούσε τον προσδιορισμό της διασυνδεσιμότητας των αμιγώς οπτικών μετατροπέων μήκους κύματος βασισμένων σε SOA-MZI που μελετήθηκαν στα προηγούμενα στάδια. Για τον σκοπό αυτό σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένας οπτικός βρόγχος μετάδοσης μήκους 160 km. Στον βρόγχο τοποθετήθηκαν δύο MZI, κάθε 80 km, καθώς και οι κατάλληλοι ενισχυτές ερβίου μεταξύ των ινών για την εξισορρόπηση της ισχύος μέσα στον βρόγχο. Η πειραματική μελέτη της διασυνδεσιμότητας των αμιγώς οπτικών μετατροπέων μήκους κύματος έγινε για NRZ δεδομένα στα 10 Gb/s. Στην πειραματική διαδικασία εκτός από την νέα συνδεσμολογία εξετάστηκαν και δύο ακόμα λύσεις με σκοπό την αποτελεσμάτων συνδεσμολογιών. σύγκριση των όλων των Τα αποτελέσματα φανέρωσαν και σε αυτόν τον τομέα την σημαντικά καλύτερη επίδοση του νέου σχήματος σε σχέση με τις άλλες δύο λύσεις. Συγκεκριμένα, το σήμα δεδομένων αναγνωρίστηκε από τον δέκτη χωρίς λάθη μετά από 8 διελεύσεις από SOA-MZI βασισμένο στην νέα συνδεσμολογία, ενώ για τα άλλα σχήματα ο αντίστοιχος αριθμός ήταν το περισσότερο 4 [1.25].

Το **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζει την λειτουργία του συμβολόμετρου MZI ως διακόπτη και ενίοτε ως λογική πύλη, με σκοπό τον σχεδιασμό και την υλοποίηση υπό-συστημάτων που συντελούν βασικές λειτουργίες ενός οπτικού κόμβου μεταγωγής πακέτων. Οι λειτουργίες που συντελέστηκαν επιτυχώς με αμιγώς οπτικό τρόπο ήταν η μετατροπή μήκους κύματος, η οπτική ανάκτηση ρολογιού, η 3R αναγέννηση δεδομένων και ο διαχωρισμός φορτίου/επικεφαλίδας οπτικών πακέτων [1.26]. Την αρχική υλοποίηση των επιμέρους κυκλωμάτων ακολούθησε η διασύνδεση τους σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα για τον δέκτη ενός οπτικού κόμβου μεταγωγής πακέτων. Για την υλοποίηση των παραπάνω διατάξεων έγινε για πρώτη φορά χρήση μιας ολοκληρωμένης συστοιχίας τεσσάρων διακοπτών MZI, η οποία και ανταποκρίθηκε επιτυχώς σε ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 40 Gb/s.

Το Κεφάλαιο 5 περιγράφει την προσπάθεια δημιουργίας της πρώτης αμιγώς οπτικής μονάδας μνήμης ταχείας προσπέλασης (all-optical RAM cell) με χρήση ημιαγώγιμων ενισχυτών και συζευγμένων MZIs [1.27]. Συγκεκριμένα, για την υλοποίηση του κυκλώματος χρησιμοποιήθηκε ένα υβριδικά ολοκληρωμένο flip-flop, το οποίο αποτελούν δύο συζευγμένα Επιπλέον, συμβολόμετρα MZI. δύο ημιαγώγιμοι ενισχυτές χρησιμοποιήθηκαν ως πύλες ελέγχου του flip-flop επιτρέποντας έτσι την αλλαγή κατάστασης του τελευταίου μόνο με την εφαρμογή κατάλληλου σήματος ελέγχου. Η αμιγώς οπτική μονάδα μνήμης αξιολογήθηκε πειραματικά για NRZ δεδομένα στα 5 Gb/s όπου και αποκρίθηκε επιτυχώς τόσο κατά την λειτουργία εγγραφής όσο κατά την λειτουργία ανάγνωσης.

Στο **Κεφάλαιο 6** συνοψίζονται όλα τα αποτελέσματα της διατριβής, γίνεται μία αποτίμηση αυτών και προτείνονται περαιτέρω ερευνητικές δραστηριότητες για την υλοποίηση αμιγώς οπτικών υποσυστημάτων και δικτύων στο επίπεδο του συστήματος και στο επίπεδο της φωτονικής τεχνολογίας.

Τέλος, στο Παράρτημα Α αναφέρονται οι δημοσιεύσεις σε διεθνή έγκριτα επιστημονικά περιοδικά και οι παρουσιάσεις σε διεθνή έγκριτα συνέδρια, που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της διατριβής.

Αναφορές

- [1.1] International Engineering Consortium, "The Evolution of Broadband", White paper.
- [1.2] Saul Hansell, "Video Is Dominating Internet Traffic, Pushing Prices Up", The New York Times, 2009.
- [1.3] <u>www.ellacoya.com</u>
- [1.4] The Berkman Center for Internet & Sosiety at Harvard University, "Next Generation Connectivity: A review of broadband Internet transitions and policy from around the world", October 2009.
- [1.5] <u>www.marketsearch.com</u>
- [1.6] <u>http://www.ciscovni.com/</u>
- [1.7] China Economic Network, <u>http://en.ce.cn/</u>
- [1.8] A. Tompkins and J. R. Jacobs, "Bridging The Last Mile, Access Network Wireline Architectures" Corning White Paper, WP6300, January 2001
- [1.9] <u>www.ftth.org</u>
- [1.10] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, "Optical networks: A practical perspective", Academic Press Inc., NY, 2nd Ed., 2002.
- [1.11] G. P. Agrawal, "Fiber-Optic Communication Systems", 2nd Ed., John Wiley & Sons Inc., NY, 1997.
- [1.12] Στα <u>http://www.photonex.com/news_events/newsentry_view.cfm?post=35</u> και

http://www.alcatel.com/submarine/products/un_and_repeatered.htm

- [1.13] K. Fukuchi et al., "10.92 Tbps (273x40 Gbps) triple-band/ultra-dense WDM optical-repeatered transmission experiment", Optical Fiber Communication (OFC) Conference 2001, Anaheim, CA, USA, PD24.
- [1.14] G. Charlet et al., "6.4 Tb/s (159 x42.7 Gb/s) capacity over 21x100 Km using bandwidth-limited phase-shaped binary transmission", 28th European Conference on Optical Communication (ECOC) 2002, Copenhagen, Denmark, PD4.1.
- [1.15] G. Vareille et al., "3.65 Tbit/s (365x11.6 Gbit/s) transmission experiment over 6850 km using 22.2 GHz channel spacing in NRZ format", 27th European Conference on Optical Communication (ECOC) 2001, Amsterdam, The Netherlands, vol. 6, pp. 14-15.
- [1.16] B. Zhu et al., "Transmission of 3.2 Tb/s (80×42.7 Gb/s) over 5200 Km of Ultrawave[™] fiber with 100-Km dispersion-managed spans using RZ-DPSK format", 28th European Conference on Optical Communication (ECOC) 2002, Copenhagen, Denmark, PD4.2.
- [1.17] S. V. Kartalopoulos, "Introduction to DWDM Technology: Data in a rainbow", Wiley-IEEE Press, Inc., 2000.
- [1.18] K. H. Liu, "IP over WDM", Wiley, October 15, 2002.

- [1.19] <u>www.infinera.com</u>
- I. Ogawa, F. Ebisawa, F. Hanawa, T. Hashimoto, M. Yanagisawa,
 K. Shuto, T. Ohyama, Y. Yamada, Y. Akahori, A. Himeno, K. Kato,
 N. Yoshimoto and Y. Tohmori, "Hybrid integrated four-channel SS SOA array module using planarlightwave circuit platform", Elect. Lett.,
 Vol. 34, No 4, pp. 361-363, Feb. 1998
- [1.21] D. Petrantonakis, P. Zakynthinos, D. Apostolopoulos, A. Poustie, G. Maxwell, and H. Avramopoulos, "All-Optical Four-Wavelength Burst Mode Regeneration Using Integrated Quad SOA-MZI Arrays", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 20, No. 23, pp. 1953-1955, Dec. 2008.
- [1.22] Steven C. Nicholes, Milan L. Mašanović, Member, IEEE, Biljana Jevremović, Erica Lively, Student Member, IEEE, Larry A. Coldren, Fellow, IEEE, and Daniel J. Blumenthal, "An 8x8 InP Monolithic Tunable Optical Router (MOTOR) Packet Forwarding Chip", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 27, No. 24, 2009.
- [1.23] Y. Liu, E. Tangdiongga, Z. Li, H. de Waardt, A. M. J. Koonen, G.D. Khoe, , X. Shu, I. Bennion and H.J.S. Dorren, "Error-free 320 Gb/s SOA-based Wavelength Conversion using Optical Filtering", post-deadline paper PDP28, OFC 2006, Anaheim, USA.
- [1.24] D. Apostolopoulos, K. Vyrsokinos, P. Zakynthinos, N. Pleros and H. Avramopoulos, "A SOA-MZI NRZ Wavelength Conversion Scheme with Enhanced 2R Regeneration Characteristics", IEEE Photonic Technology Letters, Vol. 21, No. 19, Oct. 1, 2009.
- [1.25] D. Apostolopoulos, D. Klonidis, P. Zakynthinos, K. Vyrsokinos, N. Pleros, I. Tomkos and H. Avramopoulos, "Cascadability Performance Evaluation of a new NRZ SOA-MZI Wavelength Converter", IEEE Photonic Technology Letters, Vol. 21, No. 18, Sept. 15, 2009.
- [1.26] P. Zakynthinos, D.Apostolopoulos, O. Zouraraki, D. Petrantonakis, G. Theophilopoulos, A. Poustie, G. Maxwell and H. Avramopoulos, "Single Chip Quad MZI array in a 40 Gb/s AOLS Front-end", OFC 2007, Tech. Dig. OWH7, Anaheim, USA, 2007.
- [1.27] Nikos Pleros, Dimitrios Apostolopoulos, Dimitrios Petrantonakis, Christos Stamatiadis, and Hercules Avramopoulos, "Optical Static RAM Cell", IEEE Photonic Technology Letters, Vol. 21, No. 2, January 15, 2009.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Αμιγώς οπτικές συμβολομετρικές διατάξεις με ημιαγώγιμο οπτικό ενισχυτή

Τα συμβολόμετρα [2.1], [2.2] είναι διατάξεις, στις οποίες μέσω μιας διαφοράς φάσης, επιτυγχάνεται διαφοροποίηση του πλάτους του σήματος εξόδου. Η λειτουργία τους βασίζεται στο φαινόμενο της συμβολής κυμάτων. Συγκεκριμένα, όταν η διαφορά φάσης μεταξύ των συμβαλλόμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι μηδέν ή ακέραιο πολλαπλάσιο του 2π, παρουσιάζεται μεγιστοποίηση του πλάτους του συνολικού κύματος (ενισχυτική συμβολή), ενώ όταν η διαφορά φάσης είναι περιττό πολλαπλάσιο του π, παρατηρείται μηδενισμός του συνολικού πλάτους (αναιρετική συμβολή).

Στις παραγράφους που ακολουθούν, γίνεται μια σύντομη παρουσίαση του συμβολόμετρου Mach-Zehnder (Mach-Zehnder Interferometer – MZI). Κύριο γνώρισμα της παραπάνω διάταξης είναι ότι αποτελείται από δύο οπτικούς δρόμους στους οποίους διαδίδεται το σήμα εισόδου της διάταξης, μετά τον διαχωρισμό του στον συζεύκτη εισόδου. Τα δύο σήματα (ένα σε κάθε οπτικό δρόμο) συμβάλλουν στην έξοδο του συμβολόμετρου και επομένως, η ισχύς εξόδου εξαρτάται από τη διαφορά φάσης μεταξύ των δύο αυτών οπτικών σημάτων.

Το σήμα σε κάθε οπτικό δρόμο δέχεται την επίδραση ενός μη γραμμικού στοιχείο. Το στοιχείο αυτό είναι ένας ημιαγώγιμος οπτικός ενισχυτής (Semiconductor Optical Amplifier – SOA) [2.3], [2.4], η λειτουργία του οποίου περιγράφεται αναλυτικά σε επόμενη παράγραφο του κεφαλαίου. Στη θέση του ενισχυτή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε μη γραμμικό στοιχείο, όπως μια οπτική ίνα. Μια τέτοια υλοποίηση, όμως, θα χρειαζόταν πολύ μεγάλο μήκος ίνας (~km), καθώς και σήμα ελέγχου πολύ μεγάλης ισχύος (~W) ώστε να επιτευχθεί το απαιτούμενο αποτέλεσμα [2.5].

Н γραμμική επίδραση βασίζεται στο φαινόμενο μŋ της ετεροδιαμόρφωσης φάσης [2.6]. Με βάση το φαινόμενο αυτό, ένα ισχυρό σήμα που κυματοδηγείται μαζί με ένα ασθενές, επηρεάζει τη στροφή στη φάση του ασθενούς σήματος, λόγω της εξάρτησης του δείκτη διάθλασης του υλικού του κυματοδηγού από τη συνολική ισχύ που κυματοδηγείται. Το υλικό του κυματοδηγού μπορεί να είναι είτε διηλεκτρικό, όπως στην περίπτωση μιας οπτικής ίνας, είτε ημιαγωγός, όπως στην περίπτωση του ημιαγώγιμου οπτικού ενισχυτή. Καθώς λοιπόν, μεταβάλλεται ο δείκτης διάθλασης, συναρτήσει της συνολικής κυματοδηγούμενης ισχύος, μεταβάλλεται η σταθερά διάδοσης, κι επομένως και η φάση του κυματοδηγούμενου ασθενούς σήματος.

Το ισχυρό σήμα αναφέρεται ως σήμα ελέγχου επειδή, μέσω της ισχύος του, ελέγχεται η στροφή της φάσης του ασθενούς σήματος, το οποίο αναφέρεται ως σήμα εισόδου. Μέσω, λοιπόν, της μη γραμμικής επίδρασης του ενισχυτή στα σήματα των δύο οπτικών δρόμων, επιτυγχάνεται κάποια διαφορά στις φάσεις τους, από την οποία εξαρτάται η συμβολή τους στην έξοδο του συμβολόμετρου.

Στην διάταξη του συμβολόμετρου Mach-Zehnder που περιγράφεται στην παράγραφο 2.2, θεωρείται ότι η κατεύθυνση διάδοσης του σήματος ελέγχου είναι ίδια με αυτή του σήματος εισόδου. Αυτό δημιουργεί την ανάγκη ύπαρξης ενός φίλτρου στην έξοδο του συμβολομέτρου, ώστε να διαχωρίζονται τα δύο σήματα. Για την αποφυγή χρήσης φίλτρου στην έξοδο, οι διατάξεις μπορούν να μετατραπούν, έτσι ώστε η κατεύθυνση των δύο σημάτων (εισόδου και ελέγχου) να είναι αντίθετη, κάτι το οποίο επιτρέπει και το ενδεχόμενο τα σήματα να έχουν το ίδιο μήκος κύματος [2.7].

Στην παράγραφο 2.1 παρουσιάζεται αναλυτικά ο ημιαγώγιμος οπτικός ενισχυτής. Η ανάλυση αυτή κρίνεται απαραίτητη για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του συμβολομέτρου MZI. Στην παράγραφο 2.3

παρουσιάζεται η συνάρτηση μεταφοράς της παραπάνω διάταξης και εξηγείται ο τρόπος με τον οποίο είναι δυνατή η 2R αναγέννηση ενός οπτικού σήματος με χρήση ενός συμβολομέτρου MZI. Στην παράγραφο 2.4 τέλος, γίνεται μια περιγραφή των ολοκληρωμένων διακοπτών MZI που μελετήθηκαν στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών (ΕΦΕ). Αναλυτικότερα ή ενότητα αυτή παρουσιάζει τη διαδικασία κατασκευής των διακοπτών αυτών με την μέθοδο της υβριδικής ολοκλήρωσης όπως πραγματοποιήθηκε από την εταιρεία CIP.

2.1 Ημιαγώγιμος Οπτικός Ενισχυτής

Ο ημιαγώγιμος οπτικός ενισχυτής (Semiconductor Optical Amplifier – SOA) είναι το πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενο μη γραμμικό στοιχείο των συμβολομετρικών διατάξεων. Στην παράγραφο αυτή επιχειρείται μια λεπτομερής ανάλυση του ενισχυτή αυτού, με σκοπό τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του κατά τις συνήθεις συνθήκες λειτουργίας του. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, δεν θα γίνει αναφορά στην δομή των ημιαγώγιμων οπτικών ενισχυτών, μιας και το θέμα αυτό καλύπτεται εξαντλητικά στην υπάρχουσα βιβλιογραφία [2.8]-[2.10].

2.1.1 Αρχή λειτουργίας και βασικά χαρακτηριστικά

Η αρχή λειτουργίας ενός SOA βασίζεται στη θεωρία επανασύνδεσης ηλεκτρονίων και οπών στην ενεργό περιοχή του ημιαγωγού. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, θερμικές, ηλεκτρικές ή οπτικές διεγέρσεις των ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας συντελούν στη δημιουργία ζεύγων ηλεκτρονίων και οπών στην ενεργό περιοχή του ημιαγωγού. Η διαδικασία αυτή καλείται αναστροφή πληθυσμού. Το κάθε ζεύγος ηλεκτρονίου και οπής ονομάζεται φορέας. Η αντίστροφη διαδικασία της επανασύνδεσης ηλεκτρονίων και οπών μπορεί να είναι μη ακτινοβολούσα (δημιουργία φωνονίου ή επανασύνδεση Auger) ή ακτινοβολούσα (δημιουργία φωτονίου). Η ακτινοβολούσα επανασύνδεση συνίσταται στην αυθόρμητη αποδιέγερση των ηλεκτρονίων ή στην εξαναγκασμένη αποδιέγερση των φορέων λόγω εισερχόμενου φωτονίου. Η πρώτη διαδικασία προκαλεί την αυθόρμητη εκπομπή φωτός, ενώ η δεύτερη προκαλεί την εξαναγκασμένη εκπομπή φωτός. Η εξαναγκασμένη εκπομπή φωτός παράγει φωτόνια, τα οποία έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με τα εισερχόμενα φωτόνια, και είναι η διαδικασία, που αξιοποιείται για τη λειτουργία του SOA ως ενισχυτή.

Ενίσχυση του εισερχόμενου οπτικού σήματος μπορεί να επιτευχθεί αν ο ρυθμός εξαναγκασμένης εκπομπής υπερτερεί του ρυθμού απορρόφησης. Συνήθης τρόπος για την απαιτούμενη αναστροφή πληθυσμού είναι η ηλεκτρική διέγερση, δηλαδή η έγχυση ηλεκτρικού ρεύματος στην ενεργό περιοχή. Βέβαια, η αυθόρμητη και η εξαναγκασμένη εκπομπή δρουν αντίθετα με την έγχυση φορέων, αφού μειώνουν την συγκέντρωση των φορέων στη ζώνη αγωγιμότητας (πυκνότητα φορέων Ν). Η σύνδεση των πιο πάνω διαδικασιών περιγράφεται από την εξίσωση ροής, η οποία εκφράζει τη μεταβολή της πυκνότητας των φορέων στο χωρικό σημείο z, κατά μήκος του διαμήκους άξονα του ενισχυτή και κατά τη χρονική στιγμή t:

$$\frac{\mathrm{dN}(z,t)}{\mathrm{dt}} = \frac{\mathrm{I}}{\mathrm{eV}} - \frac{N(z,t)}{\tau_c} - \frac{\Gamma \cdot \mathbf{g} \cdot [N(z,t) - N_T] \cdot P(z,t)}{A\hbar\omega_0}$$
(2.1)

Στην προηγούμενη σχέση, I είναι το ρεύμα έγχυσης, e το φορτίο ηλεκτρονίου, V ο όγκος της ενεργού περιοχής, τ_c ο χρόνος ζωής των φορέων, Γ ο οπτικός παράγοντας σύμπτυξης οπτικής ισχύος (optical confinement factor), g ο παράγοντας κέρδους, N_T η πυκνότητα των φορέων στην περιοχή διαφάνειας του ενισχυτή, A το εμβαδό διατομής της ενεργούς περιοχής του ημιαγωγού, \hbar η σταθερά Planck, ω_0 η φέρουσα συχνότητα του εισερχόμενου οπτικού πεδίου, και P(z,t) η ισχύς του εισερχόμενου οπτικού πο όρος του δεξιού σκέλους της σχέσης, I_{eV} , αποδίδει τη διέγερση φορέων λόγω έγχυσης ρεύματος, ενώ ο δεύτερος και τρίτος όρος αποδίδουν την αποδιέγερση και, επομένως, τη μείωση των φορέων λόγω της αυθόρμητης και της εξαναγκασμένης επανασύνδεσης, αντίστοιχα.

2.1.2 Ενίσχυση οπτικού σήματος και κέρδος του ενισχυτή

Η διάδοση ενός οπτικού σήματος κατά τη διεύθυνση του z-άξονα (διαμήκης άξονας) του ημιαγωγού περιγράφεται από τη σχέση:

$$\frac{\mathrm{dP}(z,t)}{\mathrm{d}z} = \left[\Gamma \cdot g \cdot \left[N(z,t) - N_T\right] - a_s\right] \cdot P(z,t)$$
(2.2)

Η σταθερά as εκφράζει τις εσωτερικές απώλειες ισχύος του ενισχυτή λόγω σκέδασης του κυματοδηγούμενου πεδίου.

Οι εξισώσεις (2.1) και (2.2) αποτελούν τις δύο κλασικές εξισώσεις ροής του ενισχυτή. Στις δύο εξισώσεις ροής αγνοούνται τα ενδοζωνικά

φαινόμενα (intraband effects) των φορέων, όπως δημιουργία φασματικής οπής (spectral hole burning), θέρμανση φορέων (carrier heating) και απορρόφηση ελεύθερων φορέων-απορρόφηση δύο φωτονίων (free carrier absorption – two photon absorption). Αυτά τα ενδοζωνικά φαινόμενα έχουν πολύ μικρούς χαρακτηριστικούς χρόνους απόκρισης, που κυμαίνονται από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες fsec [2.11]-[2.13]. Αποτέλεσμα των μικρών χρονικών σταθερών απόκρισης αυτών των φαινομένων στην περίπτωση των οπτικών σημάτων διάρκειας μερικών psec είναι τα ενδοζωνικά φαινόμενα να επέρχονται σε σταθερή κατάσταση και να μην επηρεάζουν την απόκριση του ενισχυτή [2.14].

Το κέρδος ενίσχυσης ενός SOA, θεωρώντας την περίπτωση ενίσχυσης οπτικού σήματος συνεχούς (CW) κύματος, ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος εξόδου από τον ενισχυτή προς την ισχύ εισόδου σε αυτόν. Αν θεωρήσουμε την ισχύ εισόδου ίση με $P(0) = P_{in}$ και την ισχύ εξόδου ίση με $P(L) = P_{out}$, όπου L το μήκος του κυματοδηγού, το κέρδος περιγράφεται από την σχέση

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P(L)}{P(0)}$$
(2.3)

Για τον αναλυτικό υπολογισμό του κέρδους του ημιαγωγού θα πρέπει να εξετάσουμε δύο διαφορετικές περιπτώσεις, ανάλογα με την περιοχή λειτουργίας του SOA. Έτσι αναφερόμαστε στην ακόρεστη (unsaturated) και στην κορεσμένη (saturated) περιοχή, όπου έχουμε αντίστοιχα το κέρδος ασθενούς σήματος (small signal gain) και το κορεσμένο κέρδος (saturated gain) του ενισχυτή.

2.1.3 Κέρδος ασθενούς σήματος

Το κέρδος ασθενούς σήματος του ενισχυτή είναι το κέρδος, που αποδίδει ο SOA, όταν το εισερχόμενο οπτικό σήμα έχει πολύ μικρή οπτική ισχύ. Στην περίπτωση αυτή, η πυκνότητα φορέων N(z,t) καθίσταται ανεξάρτητη από τη χωρική μεταβλητή z, αφού η μικρή ισχύς του οπτικού σήματος εισόδου θεωρούμε ότι δεν επηρεάζει τη συμπεριφορά του ενισχυτή. Θέτοντας στη σχέση (2.1) $P(z,t) \cong 0$, η πυκνότητα φορέων στη μόνιμη κατάσταση βρίσκεται ότι είναι ίση με:

$$N_{ss} = \frac{I \cdot \tau_c}{eV}$$
 [2.14].

Ορίζουμε το κέρδος ασθενούς σήματος ως

$$G_0 = \frac{P(L,t)}{P(0,t)} = \exp\left[\Gamma \cdot \mathbf{g} \cdot \left[N_{ss} - N_T\right] \cdot L - \mathbf{a}_s \cdot L\right]$$
(2.4)

Επιπλέον, ορίζουμε το συνολικό αριθμό φορέων ανά διατομή, που είναι διαθέσιμοι προς ενίσχυση [2.14]

$$N_{tot}(t) = \int_{z=0}^{z=L} [N(z,t) - N_T] \cdot dz$$
(2.5)

Με ολοκλήρωση της σχέσης (2.2) και αντικαθιστώντας το συνολικό αριθμό φορέων από την σχέση (2.5), προκύπτει ότι το κέρδος του ενισχυτή σε κάθε χρονική στιγμή δίνεται από την σχέση

$$G(t) = \exp[\Gamma \cdot \mathbf{g} \cdot N_{tot}(t) - \mathbf{a}_{s} \cdot L]$$
(2.6)

2.1.4 Κορεσμός του SOA από βραχύ οπτικό παλμό

Θεωρούμε ότι ο ενισχυτής δέχεται ως είσοδο στενό οπτικό παλμό μη μηδενικής ισχύος, ενώ λειτουργεί στην περιοχή ασθενούς σήματος. Σε αυτήν την περίπτωση το κυρίαρχο φαινόμενο, για όση χρονική διάρκεια διαδίδεται ο παλμός μέσα από τον ενισχυτή, είναι η αποδιέγερση των φορέων λόγω εξαναγκασμένης εκπομπής, δεδομένου ότι στο μικρό αυτό χρονικό διάστημα, που χρειάζεται για να διαδοθεί ο παλμός μέσα από το SOA, η διέγερση φορέων λόγω έγχυσης ρεύματος και η αυθόρμητη εκπομπή φορέων συμβάλλουν σε πολύ μικρό βαθμό στη μεταβολή της πυκνότητας φορέων. Κατά συνέπεια, αγνοούμε τους δύο πρώτους όρους του δεξιού σκέλους της σχέσης (2.1). Με ολοκλήρωση της σχέσης (2.1) έχουμε

$$\frac{d}{dt}N_{tot}(t) = -\frac{1}{h\omega_0 A} \int_{z=0}^{z=L} P(z,t) \cdot \Gamma \cdot g \cdot [N(z,t) - N_T] \cdot dz$$

$$\stackrel{(2)}{\longrightarrow} \frac{d}{dt} N_{tot}(t) = -\frac{1}{h\omega_0 A} \int_{z=0}^{z=L} \frac{\partial P(z,t)}{\partial z} dz = -\frac{1}{h\omega_0 A} [P(L,t) - P(0,t)]$$

Από την σχέση (2.3) όμως έχουμε

$$G(t) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \Longrightarrow P(L,t) = G(t) \cdot P(0,t)$$

Επομένως

$$\frac{d}{dt}N_{tot}(t) = -\frac{1}{h\omega_0 A}P(0,t)[G(t)-1] \xrightarrow{\Gamma \cdot g}$$

$$\frac{\Gamma \cdot g}{G(t)-1}\frac{d}{dt}N_{tot}(t) = -\frac{\Gamma \cdot g}{h\omega_0 A}P(0,t)$$
(2.7)

Παραγωγίζοντας την σχέση (2.6) βρίσκουμε ότι

$$\frac{dG(t)}{dt} = \Gamma \cdot g \cdot \frac{dN_{tot}(t)}{dt} \cdot G(t) \Longrightarrow$$
$$\frac{\Gamma \cdot g}{G(t) - 1} \frac{dN_{tot}(t)}{dt} = \frac{1}{G(t) - 1} \frac{dG(t)}{dt} \frac{1}{G(t)}$$

Με αντικατάσταση της παραπάνω σχέσης στην σχέση (2.7) και λύνοντας ως προς G(t), βρίσκουμε ότι το **κέρδος κορεσμού του SOA από βραχύ οπτικό παλμό** προκύπτει από την έκφραση [2.5], [2.14] :

$$G(t) = \left[1 - \left(1 - \frac{1}{G_0}\right) \cdot \exp\left(-\frac{U_{in}(t)}{U_{sat}}\right)\right]^{-1}$$
(2.8)

Στην παραπάνω σχέση, U_{in}(t) είναι η ενέργεια του παλμού, που βρίσκεται μέσα στον ενισχυτή τη χρονική στιγμή t. Αν θεωρήσουμε ως χρονική στιγμή 0 τη στιγμή, που ο παλμός με κυματομορφή ισχύος P_{in}(t) αρχίζει να εισέρχεται στο SOA, τότε η U_{in}(t) εκφράζεται ως $U_{in}(t) = \int_{0}^{t} P_{in}(t')dt'$

. Η παράμετρος U_{sat}, κατά αντιστοιχία με την P_{sat}, είναι η ενέργεια κορεσμού του SOA και σχετίζεται με την P_{sat} μέσω της σχέσης $U_{sat} = P_{sat} \cdot \tau_c$ [2.5], [2.14].

Η σχέση (2.8) δείχνει ότι το κέρδος του ημιαγωγού μειώνεται, για όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η διάδοση του στενού παλμού μέσα από τον ημιαγωγό. Επομένως, ο χρόνος κορεσμού του SOA μπορεί να είναι αρκετά μικρός και να μην υπερβαίνει τα μερικά psec.

2.1.5 Χρονική σταθερά ανάκαμψης φορέων

Αμέσως μετά την έξοδο του στενού οπτικού παλμού από τον ενισχυτή, το κέρδος του ενισχυτή αρχίζει να ανακάμπτει, λόγω της διέγερσης φορέων

από την έγχυση ρεύματος προς την αρχική του τιμή, η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η τιμή του κέρδους ασθενούς σήματος. Ως χρόνος ανάκαμψης του κέρδους του ενισχυτή ορίζεται το χρονικό διάστημα, που απαιτείται για να ανακάμψει το κέρδος από το 10% στο 90% της μέγιστης τιμής του G₀.

Κατά την χρονική περίοδο της ανάκαμψης του κέρδους δεν υπάρχει οπτικό σήμα μέσα στο SOA, οπότε στη σχέση (2.1) μπορούμε να αγνοήσουμε τον τρίτο όρο του δεξιού σκέλους, ο οποίος είναι ο όρος εξαναγκασμένης εκπομπής. Από την σχέση (2.1) λοιπόν έχουμε:

$$\frac{\partial N(z,t)}{\partial t} = \frac{I}{eV} - \frac{N(z,t)}{\tau_c} = \frac{I}{eV} - \frac{N_T}{\tau_c} - \frac{N(z,t) - N_T}{\tau_c} \stackrel{\text{f}}{\Rightarrow}$$

$$\frac{d}{dt} N_{tot}(t) = \left(\frac{I}{eV} - \frac{N_T}{\tau_c}\right) L - \frac{N_{tot}(t)}{\tau_c} = \left(\frac{N_{ss} - N_T}{\tau_c}\right) L - \frac{N_{tot}(t)}{\tau_c} \Rightarrow$$

$$\Gamma \cdot g \cdot \frac{d}{dt} N_{tot}(t) = \Gamma \cdot g \cdot \left(\frac{N_{ss} - N_T}{\tau_c}\right) L - \Gamma \cdot g \cdot \frac{N_{tot}(t)}{\tau_c} \Rightarrow$$

$$\frac{1}{G(t)} \frac{dG(t)}{dt} = \frac{\ln G_0}{\tau_c} - \frac{\ln G(t)}{\tau_c}$$

Λύνοντας την παραπάνω διαφορική εξίσωση ως προς G(t), προκύπτει η έκφραση του κέρδους για τη χρονική διάρκεια της ανάκαμψης, η οποία δίνεται από τη σχέση [2.5], [2.14] :

$$G(t) = G_0 \cdot \left[\frac{G(t_s)}{G_0}\right]^{\exp\left[-(t-t_s)/\tau_c\right]}, t \ge t_s$$
(2.9)

Με βάση αυτή την αναλυτική έκφραση ανάκαμψης του κέρδους, προκύπτει ότι η χρονική σταθερά ανάκαμψης από το 10% στο 90% του G₀ συνδέεται με το χρόνο ζωής των φορέων μέσω της σχέσης $\tau_r = \tau_c \cdot \ln \left(\frac{\ln 0.1}{\ln 0.9} \right) \cong 3.13 \cdot \tau_c$. Τυπικές τιμές χρονικών σταθερών ανάκαμψης κέρδους για τους ημιαγωγούς είναι από μερικές δεκάδες ως μερικές εκατοντάδες psec [2.8], [2.15], [2.16].

Η συμπεριφορά του κέρδους ενός ενισχυτή, κατά τον κορεσμό του από στενό οπτικό παλμό και κατά την ανάκαμψή του μέχρι την αρχική του κατάσταση, αποδίδεται γραφικά στο **σχήμα 2.1**.



Σχήμα 2.1 Κορεσμός από στενό οπτικό παλμό και ανάκαμψη του κέρδους ενός SOA.

Η χρονική σταθερά ανάκαμψης του SOA είναι πολύ σημαντική παράμετρος για τη χρήση του ενισχυτή σε οπτικές μεταγωγικές διατάξεις, καθώς αυτή καθορίζει τη μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας του ενισχυτή. Για αύξηση της ταχύτητας λειτουργίας, είναι απαραίτητη η μείωση του χρόνου ανάκαμψης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες τεχνικές επιτάχυνσης της χρονικής απόκρισης, όπως είναι η εφαρμογή ισχυρού CW σήματος στον ενισχυτή, με μήκος κύματος του σήματος στην περιοχή κέρδους [2.17], [2.18] ή στην περιοχή διαφάνειας του ενισχυτή [2.19]-[2.21].

2.1.6 Κορεσμένο κέρδος του SOA υπό την επίδραση CW σήματος

Αν ως είσοδος στον ενισχυτή θεωρηθεί οπτικό CW σήμα με σταθερή οπτική ισχύ P_{CW} στην είσοδο, τότε η πυκνότητα φορέων διαμορφώνεται πάλι σε μια μόνιμη σταθερή κατάσταση, διαφορετική όμως από αυτήν της περιοχής ασθενούς σήματος. Η τιμή N(z) της πυκνότητας φορέων σε αυτήν την κατάσταση, σε κάθε z, βρίσκεται από τη σχέση (2.1), μηδενίζοντας τη χρονική παράγωγο της πυκνότητας φορέων και αγνοώντας, πλέον, τη χρονική εξάρτηση των υπολοίπων μεγεθών, οπότε προκύπτει

$$N(z) - N_T = \frac{(N_{ss} - N_T)}{1 + \frac{P(z)}{P_{sat}}}$$
(2.10)

όπου P(z) η ισχύς του CW σήματος σε κάθε σημείο z του ημιαγωγού και $P_{sat} = \frac{\hbar \omega_0 A}{\Gamma g \tau_c}$ η ισχύς κορεσμού του SOA, η οποία εκφράζει το ποσό της ισχύος του σήματος που απαιτείται για να μειωθεί η συνολική πυκνότητα

ισχύος του σήματος, που απαιτείται για να μειωθεί η συνολική πυκνότητα των φορέων στο μισό της αντίστοιχης τιμής της στην περιοχή ασθενούς σήματος.

Αγνοώντας τις εσωτερικές απώλειες, a_s, του ενισχυτή στη σχέση (2.6), καθώς αυτές θεωρούνται αμελητέες, ως προς το κέρδος του ενισχυτή, και χρησιμοποιώντας τις εκφράσεις των σχέσεων (2.4) και (2.10) στην (2.6), η (2.6) δίνει, τελικά, το **κέρδος G**_{CW} στη μόνιμη κατάσταση, το οποίο γράφεται ως [2.14]:

$$G_{CW} = G_0 \cdot \exp[-(G_{CW} - 1)P_{CW}/P_{sat}]$$
(2.11)

Εφαρμόζοντας στον SOA ένα βραχύ αλλά ισχυρό οπτικό παλμό μαζί με το CW, το κέρδος του θα αρχίσει να μεταβάλλεται όπως προηγουμένως, με αλλαγμένο όμως πλέον το G_0 . Αν επαναλάβουμε την ανάλυση για τον κορεσμό του ενισχυτή, έχοντας όμως κατά νου ότι ο αριθμός των φορέων N_{tot} και to G_0 έχουν μειωθεί, το κέρδος του προκύπτει ίσο με [2.14] :

$$G(t) = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{1}{G_{CW}}\right) \exp\left(-\frac{U_{in}}{U_{sat}}\right)}$$
(2.12)

Όταν παρέλθει ο παλμός, ο SOA θα ξαναρχίσει τη διαδικασία ανάκαμψης κέρδους, παρά την ύπαρξη του CW σήματος. Το πέρασμα του παλμού, μετέβαλε τον αριθμό των φορέων μέχρι την τιμή N_{tot}(0), που είναι η τιμή από την οποία αρχίζει η ανάκαμψη κέρδους. Η διαφορική εξίσωση που δίνει τη χρονική μεταβολή του N_{tot} είναι:

$$\frac{dN_{tot}}{dt} + \frac{N_{tot}}{\tau_c} + \frac{\Gamma g N_{tot} P_{in}}{Ah\omega_0} - \frac{(N_{ss} - N_T)L}{\tau_c} = 0$$

Με χρήση κατάλληλων μετασχηματισμών προκύπτει

$$N_{tot}(t) = \left[N_{tot}(0) - \frac{(N_{ss} - N_T)L}{1 + \frac{P_{in}}{P_{sat}}}\right] \exp\left[-\frac{t\left(1 + \frac{P_{in}}{P_{sat}}\right)}{\tau_c}\right] + \frac{(N_{ss} - N_0)L}{1 + \frac{P_{in}}{P_{sat}}}$$
(2.13)

Επομένως, κατά την ανάκαμψη του κέρδους θα έχουμε [2.5] :

$$(6) \xrightarrow[a_s=0]{(13)} G(t) = G_0 \left[\frac{G(t_s)}{G_0} \right]^{\exp\left(-\frac{t-t_s}{\tau_c/(1+P_{in}/P_{sat})}\right)}$$
(2.14)

Από την σχέση (2.14) παρατηρούμε ότι η σταθερά ανάκαμψης χρόνου είναι μικρότερη, σε σχέση με την περίπτωση που δεν είχαμε CW σήμα. Αυτό σημαίνει ότι ο ενισχυτής φτάνει πιο γρήγορα τη μέγιστη τιμή του κέρδους (G_{CW}). Οπότε, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η εφαρμογή ενός CW σήματος στον ενισχυτή οδηγεί σε μείωση του μέγιστου κέρδους,ενώ επιπλέον το κέρδος ανακάμπτει πιο γρήγορα.

Τα παραπάνω συμπεράσματα μπορούν να φανούν καλύτερα μέσω γραφικών παραστάσεων για το κέρδος του ενισχυτή. Συγκεκριμένα, στο **σχήμα 2.2** αναπαρίσταται η μεταβολή του κέρδους, με ή χωρίς CW, για παλμό εισόδου γκαουσιανής μορφής με εύρος 20 ps.



Σχήμα 2.2(α) Παλμός εισόδου



Σχήμα 2.2(β) Κέρδος ενισχυτή χωρίς CW σήμα



Σχήμα 2.2(γ) Κέρδος ενισχυτή με CW σήμα.

2.1.7 Δείκτης διάθλασης του SOA – Μη Γραμμική Στροφή Φάσης Σήματος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο SOA είναι ένα μη γραμμικό στοιχείο, το οποίο προκαλεί στροφή φάσης στα σήματα που διαδίδονται σε αυτόν. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην μεταβολή του κέρδους του ενισχυτή, που οδηγεί σε μεταβολή του δείκτη διάθλασης του ημιαγωγού, ο οποίος εξαρτάται από τη συγκέντρωση φορέων μέσα στον ενισχυτή.

Ο δείκτης διάθλασης των SOA είναι ένα μιγαδικό μέγεθος, του οποίου το πραγματικό μέρος περιγράφει την συμπεριφορά της φάσης του εισερχόμενου οπτικού πεδίου, ενώ το φανταστικό του μέρος περιγράφει το κέρδος του υλικού:

$$\underline{n} = n' - jn'' \tag{2.15}$$

Έτσι, το πλάτος και η φάση ενός οπτικού πεδίου αφού διαδοθεί μέσα από τον ενισχυτή, περιγράφεται ως

$$\frac{\underline{E_{out}}}{\underline{E_{in}}} = \exp\left(-j\frac{2\pi\underline{n}L}{\lambda}\right) = \exp\left(-j\frac{2\pi\underline{n}'L}{\lambda}\right) \cdot \exp\left(-j\frac{2\pi\underline{n}''L}{\lambda}\right) = e^{-j\Delta\varphi} \cdot \sqrt{G} \quad (2.16)$$

όπου φ η μη γραμμική στροφή φάσης, G το κέρδος ισχύος του υλικού, L το μήκος του μέσου και λ το μήκος κύματος του φωτός.

Η παράμετρος, που συσχετίζει τη μεταβολή στη φάση με το κέρδος του υλικού, είναι ο παράγοντας επαύξησης ή διεύρυνσης φασματικής γραμμής-α (linewidth enhancement factor) [2.22], και ισχύει:

$$\frac{dn'}{dN} = \alpha \, \frac{dn''}{dN} \tag{2.17}$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι η στροφή φάσης και το κέρδος ισχύος του ενισχυτή συνδέονται με τη σχέση

$$\varphi(t) = -\frac{\alpha}{2} \ln G(t) + \varphi_{in}$$
(2.18)

Αποτέλεσμα της εξάρτησης της φάσης του πεδίου από το κέρδος, όταν το πεδίο, που διαδίδεται, είναι ένας στενός οπτικός παλμός, είναι η εμφάνιση ολίσθησης συχνότητας (chirp), κατά μήκος του παλμού [2.8], [2.14]. Η μη γραμμική απόκριση κέρδους του ενισχυτή, κατά τον κορεσμό του, έχει ως αποτέλεσμα το προπορευόμενο χρονικά τμήμα του παλμού να αντιλαμβάνεται μεγαλύτερο κέρδος από το πίσω τμήμα του παλμού. Κατά συνέπεια, κάθε χρονικό τμήμα του παλμού αποκτά διαφορετική φάση, κατά τη διάδοσή του, και αντιλαμβάνεται διαφορετική συχνότητα ως φέρουσα. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας, είναι η αλλοίωση του σχήματος του παλμού, όπως επίσης και η αλλοίωση του φασματικού του περιεχομένου, το μάλιστα, διευρύνεται. То φαινόμενο αυτό οποίο, ονομάζεται αυτοδιαμόρφωση φάσης (Self-Phase Modulation) [2.14].

Αν ο ενισχυτής χρησιμοποιηθεί ως μη γραμμικό μέσο ενός συμβολόμετρου και θεωρήσουμε ότι G₁, G₂ είναι τα κέρδη που «βλέπουν» τα δύο σήματα στους οπτικούς δρόμους του συμβολόμετρου, η διαφορά φάσης θα δίνεται από την σχέση

$$\Delta \varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{\alpha}{2} \ln \left(\frac{G_1}{G_2}\right)$$
(2.19)

2.2 Συμβολόμετρο Mach-Zehnder (Mach-Zehnder Interferometer – MZI)

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή του παρόντος κεφαλαίου, η πιο ευρέος χρησιμοποιούμενη συμβολομετρική διάταξη είναι το συμβολόμετρο Mach-Zehnder (Mach-Zehnder Interferometer – MZI). Κύριο γνώρισμα της παραπάνω διάταξης είναι ότι αποτελείται από δύο οπτικούς δρόμους στους οποίους διαδίδεται το σήμα εισόδου της διάταξης, μετά τον διαχωρισμό

του στον συζεύκτη εισόδου. Τα δύο σήματα (ένα σε κάθε οπτικό δρόμο) συμβάλλουν στην έξοδο του συμβολόμετρου και επομένως, η ισχύς εξόδου εξαρτάται από τη διαφορά φάσης μεταξύ των δύο αυτών οπτικών σημάτων. Στις παραγράφους που περιγράφεται αναλυτικά η αρχή λειτουργίας του συμβολομέτρου MZI και εξετάζεται η συμπεριφορά του στις περιοχές ασθενούς σήματος και κόρου των ημιαγώγιμων οπτικών ενισχυτών που αποτελούν το μη-γραμμικό του στοιχείο.

2.2.1 Αρχή λειτουργίας του συμβολόμετρου MZI

Η διάταξη του συμβολόμετρου Mach-Zehnder εικονίζεται στο **σχήμα 2.3**. Αποτελείται από τέσσερις συζεύκτες και δύο ημιαγώγιμους οπτικούς ενισχυτές. Θεωρώντας συζεύκτες 3dB, το σήμα εισόδου (E_{in}) χωρίζεται σε δύο ίσης ισχύος σήματα. Ο συζεύκτης προκαλεί μια διαφορική στροφή φάσης $\frac{\pi}{2}$ ακτινίων ανάμεσα στα σήματα των δύο βραχιόνων του συμβολόμετρου. Με τον όρο διαφορική στροφή φάσης, εννοείται η διαφορά στη στροφή της φάσης των δύο σημάτων.



Σχήμα 2.3 Συμβολόμετρο Mach-Zehnder

Στην περίπτωση που τα σήματα ελέγχου (E_{control}) είναι ίδια (στην περίπτωση αυτή εμπίπτει και το ενδεχόμενο να μην υπάρχουν σήματα

ελέγχου) και δοθέντος ότι οι δύο ενισχυτές έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά, τα οπτικά σήματα στους δύο βραχίονες υφίστανται την ίδια επίδραση από τους ενισχυτές, δηλαδή την ίδια μη γραμμική ενίσχυση και στροφή φάσης.

Στο συζεύκτη εξόδου προκαλείται ξανά μια διαφορική στροφή φάσης $\frac{\pi}{2}$,

έτσι ώστε η συνολική διαφορική στροφή φάσης στην θύρα μεταγωγής (switched ή transmission port) να είναι ίση με π ακτίνια, ενώ στην θύρα ανάκλασης (unswitched ή reflection port) ίση με μηδέν ακτίνια. Συνεπώς, στην θύρα μεταγωγής παρουσιάζεται αναιρετική συμβολή, ενώ στη θύρα ανάκλασης ενισχυτική συμβολή, με αποτέλεσμα η ισχύς εξόδου να εξέρχεται από την θύρα ανάκλασης.

Αν όμως χρησιμοποιηθούν διαφορετικά σήματα ελέγχου, είναι δυνατόν οι ενισχυτές να προκαλέσουν διαφορετική στροφή φάσης σε κάθε σήμα .Στην περίπτωση που αυτή η διαφορική στροφή φάσης γίνει ίση με π ακτίνια (ιδανικά), η ισχύς εισόδου τελικά εξέρχεται από την θύρα μεταγωγής. Φυσικά, υπό την παρουσία θορύβου και δεδομένου ότι η διαφορική στροφή φάσης, που οφείλεται στους ενισχυτές, δεν είναι στη πράξη ακριβώς ίση με π ακτίνια, θα υπάρχει και κάποια μικρή ποσότητα ισχύος στην θύρα ανάκλασης.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι δύο βραχίονες θεωρούνται ίσου μήκους. Αν δεν ισχύει κάτι τέτοιο, στη συνολική διαφορική στροφή φάσης προστίθεται κι η φάση που οφείλεται στη διαφορά των δύο οπτικών δρόμων. Αν δηλαδή L₁ και L₂ είναι τα μήκη των δύο βραχιόνων και β η σταθερά διάδοσης, τότε προκύπτει μια διαφορά φάσης ίση με β(L1 - L2).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικά όσα προαναφέρθηκαν, λαμβάνοντας υπόψη βραχίονες ίσου μήκους και αγνοώντας τις απώλειες στις ίνες και τους συζεύκτες. Έστω το σήμα εισόδου

$$E_{in}(t) = E_{in}e^{-j\omega t}$$

Ακριβώς μετά το συζεύκτη εισόδου, το σήμα διαιρείται σε δύο ίσης ισχύος σήματα. Στον επάνω βραχίονα διαδίδεται το σήμα $E_1(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{in} e^{-j\omega t}$ και στον κάτω βραχίονα το σήμα $E_2(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{in} e^{-j\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)}$. Αφού τα σήματα αυτά περάσουν από τους ενισχυτές γίνονται $E_1(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{G_1} E_{in} e^{-j(\omega t + \varphi_1)}$ και

$$E_{2}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{G_{2}} E_{in} e^{-j\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \varphi_{2}\right)}$$
αντιστοίχως, όπου G₁ = G₁(t), G₂ = G₂(t) τα

αντίστοιχα κέρδη ισχύος και φ₁ = φ₁(t), φ₂ = φ₂(t) οι αντίστοιχες στροφές φάσης είναι συναρτήσεις του χρόνου. Μετά το συζεύκτη εξόδου,τα δύο σήματα στις θύρες εξόδου του συμβολόμετρου Mach-Zehnder είναι τα

$$\begin{split} E_{tran}(t) &= \frac{1}{2}\sqrt{G_1}E_{in}e^{-j(\omega t + \varphi_1)} + \frac{1}{2}\sqrt{G_2}E_{in}e^{-j(\omega t + \pi + \varphi_2)}\\ E_{refl}(t) &= \frac{1}{2}\sqrt{G_1}E_{in}e^{-j\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \varphi_1\right)} + \frac{1}{2}\sqrt{G_2}E_{in}e^{-j\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \varphi_2\right)} \end{split}$$

Η ισχύς στην θύρα μεταγωγής είναι [2.26] :

$$\begin{split} P_{tran}(t) &= E_{tran}(t)E_{tran}^{*}(t) = \\ &= \left(\frac{1}{2}\sqrt{G_{1}}E_{in}e^{-j(\omega t + \varphi_{1})} + \frac{1}{2}\sqrt{G_{2}}E_{in}e^{-j(\omega t + \pi + \varphi_{2})}\right) \left(\frac{1}{2}\sqrt{G_{1}}E_{in}e^{j(\omega t + \varphi_{1})} + \frac{1}{2}\sqrt{G_{2}}E_{in}e^{j(\omega t + \pi + \varphi_{2})}\right) = \\ &= \frac{1}{4}E_{in}^{2}\left(\sqrt{G_{1}}e^{-j\varphi_{1}} + \sqrt{G_{2}}e^{-j(\pi + \varphi_{2})}\right) \left(\sqrt{G_{1}}e^{j\varphi_{1}} + \sqrt{G_{2}}e^{j(\pi + \varphi_{2})}\right) = \\ &= \frac{1}{2}P_{in}\left(G_{1} + \sqrt{G_{1}}\sqrt{G_{2}}e^{-j\varphi_{1}}e^{j\varphi_{2}}e^{j\pi} + \sqrt{G_{1}}\sqrt{G_{2}}e^{j\varphi_{1}}e^{-j\varphi_{2}}e^{-j\pi} + G_{2}\right) = \\ &= \frac{1}{4}P_{in}\left(G_{1} + G_{2} - \sqrt{G_{1}}\sqrt{G_{2}}e^{j(\varphi_{2} - \varphi_{1})} - \sqrt{G_{1}}\sqrt{G_{2}}e^{-j(\varphi_{2} - \varphi_{1})}\right) = \\ &= \frac{1}{4}P_{in}\left(G_{1} + G_{2} - 2\sqrt{G_{1}}\sqrt{G_{2}}\cos(\Delta\varphi)\right) \end{split}$$

Η ισχύς στην θύρα ανάκλασης είναι :

$$\begin{split} P_{refl}(t) &= E_{refl}(t)E_{refl}^{*}(t) = \\ &= \left(\frac{1}{2}\sqrt{G_{1}}E_{in}e^{-j\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \varphi_{1}\right)} + \frac{1}{2}\sqrt{G_{2}}E_{in}e^{-j\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \varphi_{2}\right)}\right) \left(\frac{1}{2}\sqrt{G_{1}}E_{in}e^{j\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \varphi_{1}\right)} + \frac{1}{2}\sqrt{G_{2}}E_{in}e^{j\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \varphi_{2}\right)}\right) \\ &= \frac{1}{4}E_{in}^{2}\left(\sqrt{G_{1}}e^{-j\left(\frac{\pi}{2} + \varphi_{1}\right)} + \sqrt{G_{2}}e^{-j\left(\frac{\pi}{2} + \varphi_{2}\right)}\right) \left(\sqrt{G_{1}}e^{j\left(\frac{\pi}{2} + \varphi_{1}\right)} + \sqrt{G_{2}}e^{j\left(\frac{\pi}{2} + \varphi_{2}\right)}\right) \\ &= \frac{1}{2}P_{in}\left(G_{1} + \sqrt{G_{1}}\sqrt{G_{2}}e^{-j\varphi_{2}} + \sqrt{G_{1}}\sqrt{G_{2}}e^{j\varphi_{2}} + \sqrt{G_{1}}\sqrt{G_{2}}e^{-j(\varphi_{2} - \varphi_{1})}\right) \\ &= \frac{1}{4}P_{in}\left(G_{1} + G_{2} + \sqrt{G_{1}}\sqrt{G_{2}}e^{j(\varphi_{2} - \varphi_{1})} + \sqrt{G_{1}}\sqrt{G_{2}}e^{-j(\varphi_{2} - \varphi_{1})}\right) \\ &= \frac{1}{4}P_{in}\left(G_{1} + G_{2} + 2\sqrt{G_{1}}\sqrt{G_{2}}\cos(\Delta\varphi)\right) \end{split}$$

Όπου $P_{in} = E_{in}^2$, $\Delta \phi = \phi_2 - \phi_1$ και όπως έχει ήδη αναφερθεί $G_1 = G_1(t)$, $G_2 = G_2(t)$, $\phi_1 = \phi_1(t)$ και $\phi_2 = \phi_2(t)$ είναι συναρτήσεις του χρόνου.

Συνεπώς, η ισχύς στις θύρες εξόδου του Mach-Zehnder είναι

$$P_{tran}(t) = \frac{1}{4} E_{in}^{2} \left(G_{1} + G_{2} - 2\sqrt{G_{1}} \sqrt{G_{2}} \cos(\Delta \varphi) \right)$$
(2.20)

και

$$P_{refl}(t) = \frac{1}{4} E_{in}^2 \left(G_1 + G_2 + 2\sqrt{G_1} \sqrt{G_2} \cos(\Delta \varphi) \right)$$
(2.21)

Από τις δύο τελευταίες σχέσεις φαίνεται ότι η ισχύς στις εξόδους εξαρτάται από τη διαφορά φάσης των δύο συμβαλλόμενων σημάτων, καθώς κι από τα κέρδη ισχύος. Στην αρχή της παραγράφου αυτής έγινε λόγος για την εξάρτηση από την διαφορά φάσης.

Όσον αφορά τα κέρδη ισχύος, πρέπει να γίνει η ακόλουθη παρατήρηση. Αναφέρθηκε ότι αν τα δύο σήματα ελέγχου είναι ίδια, τότε το σήμα εισόδου μετάγεται στη θύρα ανάκλασης. Πράγματι από τις σχέσεις (2.20) και (2.21), για Δφ = 0 έπεται ότι $P_{tran}(t) = \frac{1}{4} E_{in}^2 \left(G_1 + G_2 - 2\sqrt{G_1}\sqrt{G_2}\right)$ και $P_{refl}(t) = \frac{1}{4} E_{in}^2 \left(G_1 + G_2 + 2\sqrt{G_1}\sqrt{G_2}\right)$. Στην περίπτωση που τα κέρδη ισχύος είναι ίσα, δηλαδή G₁ = G₂ = G συνεπάγεται ότι $P_{tran}(t) = 0$ και $P_{refl}(t) = E_{in}^2 G$. Επομένως τη χρονική στιγμή που Δφ = 0, το σήμα εξέρχεται αποκλειστικά από τη θύρα ανάκλασης, ενισχυμένο κατά το κοινό κέρδος ισχύος G. Στην περίπτωση, όμως, που G₁ ≠ G₂, τότε η εξερχόμενη ισχύς μοιράζεται και στις δύο θύρες εξόδου. Το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος εξέρχεται από τη θύρα ανάκλασης και το μικρότερο από τη θύρα μεταγωγής. Αντίστοιχα και για την περίπτωση που Δφ = π.

Η καλή λειτουργία ενός συμβολόμετρου, ως οπτικού διακόπτη, εστιάζεται κυρίως στην επίτευξη διαφοράς φάσης ίσης με π ακτίνια. Στο **σχήμα 2.4** παρουσιάζονται τα συνολικά κέρδη για τις δύο θύρες του συμβολόμετρου Mach-Zehnder, όπως προκύπτουν από τις σχέσεις (2.20) και (2.21). Στην ουσία αναπαρίστανται οι λόγοι $\frac{P_{refl}}{P_{in}}$ και $\frac{P_{tran}}{P_{in}}$ συναρτήσει της διαφοράς φάσης Δφ. Η συνεχής καμπύλη αφορά τη θύρα μεταγωγής κι η καμπύλη με τις κουκίδες αναφέρεται στην θύρα ανάκλασης. Όσον αφορά τα κέρδη ισχύος, έχουμε υποθέσει ότι $G_1 = G_2 = G = 100$, κάτι που εν γένει δεν

ισχύει (όχι αναφορικά με την τιμή 100), αφού τα κέρδη είναι συναρτήσεις του χρόνου και η μεταβολή τους εξαρτάται από τη συνολική ισχύ, που διέρχεται από τον ενισχυτή. Στην παράγραφο 2.4 γίνεται λεπτομερέστερη αναφορά στο συγκεκριμένο ζήτημα. Από το παρακάτω σχήμα, γίνεται φανερή η έντονη εξάρτηση της εξόδου του συμβολομέτρου από τη διαφορά φάσης.

Αξίζει να αναφερθεί ότι ένα βασικό, θετικό χαρακτηριστικό του συμβολομέτρου Mach-Zehnder, είναι το γεγονός ότι μπορεί να ολοκληρωθεί. Το κύριο μειονέκτημά του είναι η ασυμμετρία, που μπορεί να προκύψει από τα διαφορετικά μήκη των δύο οπτικών μονοπατιών και κυρίως από την πιθανή διαφορά στα χαρακτηριστικά των δύο οπτικών ενισχυτών.



Σχήμα 2.4 Συνολικά κέρδη ισχύος για τις δύο θύρες εξόδου του συμβολόμετρου Mach-Zehnder συναρτήσει του Δφ.

2.2.2 Μελέτη της Συνάρτησης Μεταφοράς Ισχύος του συμβολομέτρου Mach-Zehnder στην περιοχή ασθενούς σήματος του SOA

Μελετώντας την συνάρτηση μεταφοράς του συμβολομέτρου MZI που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο, μπορούμε να καταλήξουμε σε σημαντικά συμπεράσματα για την λειτουργία του. Ακόμη, από την ανάλυση αυτή θα γίνει κατανοητός και ο τρόπος που το συμβολόμετρο MZI μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως 2R αναγεννητής.

Οι εκφράσεις για την οπτική ισχύ στις δύο θύρες εξόδου του MZI, που υπολογίστηκαν στην παράγραφο 2.2 και παρατίθενται εδώ για ευκολία, είναι :

$$Ps = \frac{1}{4} E_{in}^{2} \Big[G_{1} + G_{2} - 2\sqrt{G_{1}G_{2}} \cos(\varphi_{1} - \varphi_{2}) \Big] =$$

$$= \frac{1}{4} E_{in}^{2} \Big[\Big(\sqrt{G_{1}} - \sqrt{G_{2}} \Big)^{2} + 4\sqrt{G_{1}G_{2}} \sin^{2} \Big(\frac{\Delta \varphi}{2} \Big) \Big]$$
(2.22)

$$P_{U} = \frac{1}{4} E_{in}^{2} \left[G_{1} + G_{2} + 2\sqrt{G_{1}G_{2}} \cos(\varphi_{1} - \varphi_{2}) \right] =$$

$$= \frac{1}{4} E_{in}^{2} \left[\left(\sqrt{G_{1}} - \sqrt{G_{2}} \right)^{2} + 4\sqrt{G_{1}G_{2}} \cos^{2} \left(\frac{\Delta \varphi}{2} \right) \right]$$
(2.23)

Η γραφική παράσταση των παραπάνω σχέσεων παρουσιάζεται στο **σχήμα 2.4** της ίδιας παραγράφου. Από το σχήμα αυτό, παρατηρούμε ότι οι συναρτήσεις (2.22) και (2.23) έχουν μια καθαρά συνημιτονοειδή μορφή. Η οπτική ισχύς, η οποία αποδίδεται από τις δύο θύρες εξόδου, εναλλάσσεται μεταξύ μεγίστων και ελαχίστων τιμών και μάλιστα με συμπληρωματικό τρόπο. Σε εκείνες τις τιμές ενέργειας παλμού εισόδου, όπου η θύρα S εμφανίζει μέγιστη κορυφή μετάδοσης, η θύρα U εμφανίζει ελάχιστη τιμή ισχύος εξόδου, και το αντίστροφο. Η θύρα S εμφανίζει μέγιστα για ενέργειες παλμού ελέγχου, οι οποίες προκαλούν στροφή φάσης μέσα στον ενισχυτή, ίση με ακέραιο περιττό πολλαπλάσιο του π, δήλ. π, 3π κ.ο.κ., ενώ εμφανίζει ελάχιστα σε ενέργειες παλμού ελέγχου, που προκαλούν στροφή φάσης ίση με άρτιο πολλαπλάσιο του π, δηλ. 0, 2π, 4π κ.ο.κ. Το αντίθετο, για τις ίδιες ακριβώς τιμές, συμβαίνει για τη θύρα U.



Σχήμα 2.5 (α) συνάρτηση μεταφοράς ενός οπτικού συμβολομετρικού διακόπτη (β) τμήμα της συνάρτησης μεταφοράς σε βέλτιστη μεταγωγική λειτουργία του διακόπτη.

Εύκολα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η βέλτιστη περιοχή λειτουργίας του οπτικού διακόπτη βρίσκεται στην πρώτη κορυφή μετάδοσης και για ενέργειες παλμού ελέγχου, οι οποίες αντιστοιχούν σε μεταβολές φάσης γύρω από την τιμή Δφ=π. Στην περιοχή εκείνη μεγιστοποιείται η μετάδοση από τη θύρα S και ελαχιστοποιείται η μετάδοση στη θύρα U, με αποτέλεσμα να μεγιστοποιείται ο λόγος αντίθεσης ON-OFF του διακόπτη. Στο **σχήμα 2.5** φαίνεται γραφικά η λειτουργία του συμβολόμετρου στην επιθυμητή περιοχή λειτουργίας. Με την διακεκομμένη γραμμή στο **σχήμα 2.5(α)** αναπαρίσταται η ιδανική βηματική συνάρτηση μεταφοράς για συγκριτικούς λόγους, ενώ οι σκιασμένες περιοχές A και B δείχνουν τις περιοχές όπου επιδιώκεται να λειτουργεί ο διακόπτης για λογικές εισόδους '0' και '1', αντίστοιχα.

Λόγω της μορφής της συνάρτησης μεταφοράς γύρω από την περιοχή βέλτιστης λειτουργίας, όπως αυτή εικονίζεται στο **σχήμα 2.5(β)**, γίνεται εξίσωση του πλάτους των παλμών στην έξοδο. Αντίστοιχα, στην περιοχή λειτουργίας, που αντιστοιχεί σε λογική είσοδο μηδέν, γίνεται μηδενισμός της ισχύος εισόδου, η ύπαρξη της οποίας οφείλεται στις διάφορες πηγές θορύβου. Το εύρος αυτών των περιοχών καθορίζει τα όρια λειτουργίας του οπτικού διακόπτη, ως αναγεννητή σήματος.

Στο **σχήμα 2.4** παρατηρούμε ότι, για μεταβολή φάσης γύρω από την τιμή Δφ=π, η έξοδος της θύρας μη μεταγωγής U μηδενίζεται. Σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας όμως, η έξοδος U δεν μηδενίζεται ποτέ, κάτι το οποίο φαίνεται να διαφωνεί με την ανάλυση της γενικής αρχής λειτουργίας του συμβολομετρικού διακόπτη, η οποία έγινε στην ενότητα 2.2. Πρέπει να σημειωθεί, όμως, ότι η ανάλυση της ενότητας 2.2 αφορούσε σε λειτουργία του διακόπτη σε ιδανικές συνθήκες, όπου οι παράγοντες κέρδους ή απωλειών για τους δύο βραχίονες του συμβολόμετρου είχαν θεωρηθεί ίδιοι, ακόμα κι όταν μεταβαλόταν η φάση μέσα στο μη γραμμικό μέσο. Στις πραγματικές συνθήκες, όμως, τα κέρδη των δύο SOAs απαιτείται να είναι διαφορετικά, για να υπάρξει ολίσθηση στη φάση, λόγω εξωτερικού παλμού ελέγχου, και για να επιτευχθεί μεταγωγή. Αποτέλεσμα αυτής της διαφοράς είναι ότι ποτέ ο όρος $\left(\sqrt{G_1} - \sqrt{G_2}\right)^2$, που περιέχεται στις σχέσεις 2.22 και 2.23, δε μπορεί να είναι μηδενικός, όταν υπάρχει μεταγωγή. Κατά συνέπεια, ένα ποσοστό ισχύος του σήματος εξέρχεται από τη θύρα U, ακόμα και στην κατάσταση πλήρους μεταγωγής του διακόπτη, αναγκάζοντας το λόγο αντίθεσης ON-OFF, για τη θύρα U, να μην απειρίζεται ποτέ. Αντίθετα, τουλάχιστον σε θεωρητικό επίπεδο, ο λόγος αντίθεσης ON-OFF της θύρας μεταγωγής S μπορεί να τείνει στο άπειρο, καθώς σε κατάσταση μη μεταγωγής η ισχύς εξόδου της θύρας S είναι, θεωρητικά, μηδενική. Στην πραγματικότητα, βέβαια, ο λόγος ON-OFF της θύρα S δεν είναι ποτέ άπειρος, καθώς η ισχύς εξόδου της θύρας μεταγωγής δεν είναι ποτέ μηδενική, λόγω του θορύβου, που εκπέμπει ο οπτικός ενισχυτής.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει, επίσης, η μορφή του μεταγόμενου παλμού, ο οποίος εξέρχεται από τη θύρα S. Η μορφή αυτού του παλμού αποτελεί, ουσιαστικά, το παράθυρο μεταγωγής του συμβολόμετρου. Για τη μελέτη της μορφής του μεταγόμενου παλμού, απαιτείται ο υπολογισμός της ισχύος εξόδου της θύρας S του διακόπτη για κάθε χρονική στιγμή, μεταξύ της χρονικής στιγμής εισόδου του παλμού ελέγχου στον ενισχυτή και της χρονικής στιγμής, κατά την οποία ο ενισχυτής του διακόπτη έχει ανακάμψει πλήρως και έχει επανέλθει στην αρχική του κατάσταση. Κατά συνέπεια, χρειάζεται να λάβουμε υπόψη τη χρονική εξάρτηση της συνάρτησης μεταφοράς ισχύος του συμβολομέτρου, την οποία αμελήσαμε κατά την προηγούμενη ανάλυση.

Καθώς ο παλμός ελέγχου εισέρχεται στον ενισχυτή του διακόπτη, το κέρδος του ενισχυτή κοραίνεται μέχρι μια ελάχιστη τιμή, η οποία αντιστοιχεί στο χρονικό σημείο, που το σύνολο της ενέργειας του παλμού ελέγχου βρίσκεται μέσα στον SOA. Για όλο αυτό το χρονικό διάστημα κορεσμού του ενισχυτή, η έξοδος του διακόπτη αποδίδεται πλήρως από τις σχέσεις (2.8), (2.18), (2.22) και (2.23). Μετά την έξοδο του παλμού ελέγχου από τον ενισχυτή, το κέρδος του ενισχυτή αρχίζει να ανακάμπτει με εκθετική μορφή, από την ελάχιστη τιμή του προς την αρχική τιμή κέρδους στη μόνιμη κατάσταση. Αν η διαφορά μεταξύ της ελαχίστης τιμής του κέρδους και του αρχικού κέρδους του ενισχυτή αντιστοιχεί σε ολίσθηση φάσης ίση ή μικρότερη από π, τότε από τη σχέση 2.22 προκύπτει ότι η κυματομορφή του μεταγόμενου παλμού έχει ένα μοναδικό μέγιστο. Αντίθετα, στην περίπτωση που η διαφορά μεταξύ ελαχίστης και αρχικής τιμής του κέρδους του ενισχυτή μεταφράζεται σε ολίσθηση φάσης μεγαλύτερης του π, τότε η κυματομορφή του μεταγόμενου παλμού έχει δύο μέγιστα, με αποτέλεσμα να αλλοιώνεται το σχήμα του παλμού στην έξοδο του διακόπτη. Το πρώτο μέγιστο της μορφής του παλμού εξόδου αντιστοιχεί στη διαφορά φάσης π, που επιτυγχάνεται κατά τον κορεσμό του ενισχυτή, ενώ το δεύτερο μέγιστο της μορφής του μεταγόμενου παλμού αντιστοιχεί στη διαφορά φάσης π, η οποία επιτυγχάνεται κατά το χρονικό διάστημα ανάκαμψης του κέρδους του ενισχυτή.

Η προηγούμενη περιγραφή της χρονικής απόκρισης του ενισχυτή και της δημιουργούμενης κυματομορφής εξόδου γίνεται καλύτερα κατανοητή με τη βοήθεια του **σχήματος 2.6**. Η στήλη **(Ι)** του **σχήματος 2.6** περιγράφει την περίπτωση, όπου η προκαλούμενη ολίσθηση φάσης είναι μικρότερη ή ίση με π, ενώ στη στήλη **(ΙΙ)** περιγράφεται η περίπτωση, που η ολίσθηση φάσης είναι μεγαλύτερη από π. Στα **σχήματα 2.6(Ι)(α) και 2.6(ΙΙ)(α)** απεικονίζεται ο αρχικός παλμός ελέγχου. Η μεταβολή του κέρδους του ενισχυτή για τις αντίστοιχες περιπτώσεις αποδίδεται στα **σχήματα 2.6(Ι)(β)** και **2.6(ΙΙ)(β)**, θεωρώντας αρχικό κέρδος ασθενούς σήματος του SOA ίσο με

140 (γραμμική κλίμακα). Με τη διακεκομμένη γραμμή στα δύο αυτά σχήματα δείχνεται η τιμή του κέρδους του ενισχυτή, η οποία αντιστοιχεί σε ολίσθηση φάσης ίση με π και είναι ίση με ~49 (γραμμική κλίμακα). Το κέρδος του ενισχυτή στη στήλη (I) του σχήματος είναι πάντα μεγαλύτερο αυτής της τιμής, ενώ το κέρδος του ενισχυτή στη στήλη (ΙΙ) λαμβάνει τιμές μικρότερες από αυτήν την τιμή για ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα. Η αντίστοιχη μεταβολή στη φάση του σήματος εισόδου, που συνδιαδίδεται μέσα στον ενισχυτή με τον παλμό ελέγχου, απεικονίζεται στα σχήματα 2.6(I)(γ) και 2.6(II)(γ), αντίστοιχα, όπου η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στην τιμή φάσης, η οποία είναι μικρότερη κατά π από την αρχική φάση φο (θεωρώντας φ₀=0). Τέλος, με χρήση της σχέσης 2.22, απεικονίζεται στα σχήματα 2.6(I)(δ) και 2.6(II)(δ) η αντίστοιχη έξοδος της θύρας S του διακόπτη για τις δύο περιπτώσεις, αντίστοιχα. Η μορφή του παλμού στο σχήμα 2.6(I)(δ) εμφανίζει μία μοναδική κορυφή, ενώ η μορφή του παλμού στο σχήμα 2.6(II)(δ) έχει δύο κορυφές. Για όλες τις περιπτώσεις ο παράγοντας διεύρυνσης φασματικής γραμμής α του ενισχυτή θεωρείται ίσος με 6.



Σχήμα 2.6 Στροφή φάσης μέσα στο SOA (Ι) μικρότερη από π (ΙΙ) μεγαλύτερη από π. Σε κάθε στήλη δείχνονται (α) αρχικός παλμός ελέγχου (β) κέρδος του SOA (γραμμική κλίμακα) (γ) μεταβολή της φάσης του CW σήματος εισόδου (rad) (δ) παλμός εξόδου. Χρονικό παράθυρο 0-100 psec.

2.2.3 Λειτουργία στην περιοχή κορεσμού του SOA υπό την επίδραση CW σήματος – Το οπτικό κύκλωμα ψαλιδισμού

Όπως είδαμε στην παράγραφο 2.1.6, η εφαρμογή ενός CW σήματος στον ημιαγώγιμο οπτικό ενισχυτή οδηγεί σε μείωση του μέγιστου κέρδους αλλά και σε πιο γρήγορη ανάκαμψη του κέρδους του. Για μεγάλες τιμές του σήματος αυτού, το κέρδος G_{CW} γίνεται μικρότερο από 10 dB. Σε αυτή την περιοχή λειτουργίας του SOA, η συνάρτηση μεταφοράς εξόδου του MZI διαφέρει από την γνωστή συνημιτονική μορφή.



Σχήμα 2.7 Συνάρτηση μεταφοράς της θύρας μεταγωγής S για κέρδος αρχικής κατάστασης (α) $G_{CW} = 6$ (7,78 dB) και (β) $G_{CW} = 3,5$ (5,44 dB).

Το **σχήμα 2.7** εικονίζει την συνάρτηση μεταφοράς της θύρας S για τιμές G_{CW} κέρδους 7,78 και 5,44 dB. Παρατηρούμε ότι, η καμπύλη του **σχήματος 2.7(β)** εμφανίζει πάλι ένα μέγιστο σημείο, το οποίο αντιστοιχεί σε ολίσθηση φάσης ίση με π. Στη συνέχεια, όμως, και καθώς αυξάνει η ενέργεια του παλμού ελέγχου, η καμπύλη της συνάρτησης μεταφοράς φθίνει και τείνει γρήγορα να παραλληλιστεί με τον οριζόντιο άξονα τιμών.

Η μορφή της συνάρτησης μεταφοράς του κορεσμένου οπτικού διακόπτη εξυπηρετεί στο να χρησιμοποιήσουμε αυτή την διάταξη ως κύκλωμα ψαλιδισμού (hard limiter) [2.23]. Η βασική λειτουργία ενός κυκλώματος ψαλιδισμού συνίσταται στον περιορισμό της ισχύος εξόδου της διάταξης σε μια ανώτατη στάθμη, ανεξάρτητα από τη στάθμη ισχύος του εισερχόμενου σήματος. Σχηματικά, η συνάρτηση μεταφοράς και η λειτουργία του κυκλώματος ψαλιδισμού φαίνονται στο **σχήμα 2.8**.



Σχήμα 2.8 Συνάρτηση μεταφοράς ενός κυκλώματος ψαλιδισμού και η έξοδος του κυκλώματος για ημιτονοειδή είσοδο μεταβαλλόμενου πλάτους.

Τα κυκλώματα ψαλιδισμού επιφέρουν σημαντική μείωση στη διαμόρφωση πλάτους του εισερχόμενου σήματος. Αυτό διακρίνεται στο **σχήμα 2.8**, με σύγκριση της κυματομορφής εξόδου με την κυματομορφή εισόδου στο κύκλωμα. Η μείωση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι, όλοι οι παλμοί, των οποίων το πλάτος ξεπερνά το κατώφλι ισχύος του κυκλώματος, «ψαλιδίζονται» και εξέρχονται της διάταξης με την ανώτατη δυνατή στάθμη ισχύος, που μπορεί να παρέχει το κύκλωμα, και η οποία είναι ίδια για όλους τους παλμούς εισόδου.

Για τη λειτουργία του κορεσμένου οπτικού διακόπτη με ημιαγώγιμο οπτικό ενισχυτή, ως κύκλωμα ψαλιδισμού, βασιζόμαστε στα παρακάτω δύο χαρακτηριστικά:

- στο γεγονός ότι το σημείο διαφάνειας του ενισχυτή, όπου το κέρδος του ισούται με τη μονάδα, είναι ένα οριακό σημείο λειτουργίας του ενισχυτή, οπότε η λειτουργία του ενισχυτή με τιμές κέρδους μικρότερες της μονάδας είναι αδύνατη, και
- στον κορεσμό του ενισχυτή στο κατάλληλο σημείο, ούτως ώστε να μπορεί μεν να επιτευχθεί ολίσθηση φάσης του σήματος εισόδου του διακόπτη κατά π, με την εισαγωγή παλμού ελέγχου κατάλληλης ενέργειας, αλλά σε καμία περίπτωση να μην είναι εφικτή η ολίσθηση φάσης του σήματος εισόδου κατά περισσότερο από π.

Ο προσδιορισμός του κατάλληλου σημείου λειτουργίας, βρίσκεται θέτοντας στη σχέση (2.19) ως μέγιστη επιτρεπτή τιμή της διαφοράς φάσης την τιμή Δφ=π, από όπου προκύπτει ότι [2.23]:

$$G_x^{\min} = G_{CW} \cdot \exp(-2\pi/\alpha)$$
(2.24)

Στη συνέχεια, εισάγοντας αυτήν την τιμή στη σχέση (2.12), υπολογίζεται η ενέργεια του παλμού ελέγχου, που απαιτείται σε αυτήν την περίπτωση για να υπάρξει ολίσθηση φάσης κατά π, και η ενέργεια αυτή προκύπτει ότι είναι [2.23]:

$$\frac{U_{in}}{U_{sat}} = \frac{P_p \cdot A}{U_{sat}} = \ell n \frac{1 - \frac{1}{G_{CW}}}{1 - \frac{1}{G_{CW}} \cdot \exp\left(\frac{2\pi}{\alpha}\right)}$$
(2.25)

Λαμβάνοντας υπόψη τον φυσικό περιορισμό $G_x^{\min} \ge 1$, από την σχέση (2.24) προκύπτει η ελάχιστη τιμή κορεσμένου κέρδους G_{CW}, στην οποία επιτρέπεται να λειτουργεί ο ενισχυτής υπό την επίδραση του CW σήματος, ώστε να είναι εξακολουθεί να είναι εφικτή η λειτουργία του διακόπτη στη βέλτιστη περιοχή μεταγωγής. Αυτή η ελάχιστη επιτρεπτή τιμή του κέρδους GCW υπολογίζεται ότι είναι :

$$G_{CW} = \exp(2\pi / \alpha) \tag{2.26}$$

Η τιμή αυτή εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από τον παράγοντα διεύρυνσης φασματικής γραμμής α. Στα πλαίσιο της εργασίας αυτής, οι SOAs που χρησιμοποιήθηκαν παρουσίαζαν α ίσο με 6, οπότε η ελάχιστη τιμή του κέρδους GCW είναι περίπου ίση με 2,848, σε γραμμική κλίμακα. Στο **σχήμα 2.9** απεικονίζεται η συνάρτηση μεταφοράς της θύρας S του διακόπτη, όταν το αρχικό κέρδος G_{CW} είναι ίσο με 2,85 [2.23]-[2.25]:



Σχήμα 2.9 Συνάρτηση μεταφοράς της θύρας μεταγωγής S για κέρδος αρχικής κατάστασης GCW= 2,85 (4,55 dB).

Η μορφή αυτής της καμπύλης παραπέμπει στη γνωστή μορφή της συνάρτησης μεταφοράς ενός κυκλώματος ψαλιδισμού, όπως αυτή απεικονίζεται στο σχήμα 2.8. Πιο συγκεκριμένα, η καμπύλη της συνάρτησης μεταφοράς του σχήματος 2.9 αυξάνει με συνημιτονοειδή μορφή, μέχρι μια μέγιστη τιμή, και στη συνέχεια διατηρείται σε αυτή τη σταθερή τιμή, διαγράφοντας ευθεία παράλληλη με τον οριζόντιο άξονα τιμών της ενέργειας παλμού ελέγχου. Η τιμή της ενέργειας Uin, μετά από την οποία η συνάρτηση μεταφοράς αρχίζει να παραλληλίζεται με τον οριζόντιο άξονα τιμών, αποτελεί το αντίστοιχο κατώφλι ενέργειας ή ισχύος, το οποίο χαρακτηρίζει τη λειτουργία των κυκλωμάτων ψαλιδισμού. Άξιο παρατήρησης είναι, επίσης, το γεγονός ότι οι τιμές ενέργειας του παλμού ελέγχου, που απαιτούνται για τη λειτουργία του διακόπτη στο σχήμα 2.9, είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές των διαγραμμάτων του σχήματος 2.7. Αυτή η αύξηση οφείλεται στο γεγονός ότι ο ενισχυτής λειτουργεί βαθύτερα στον κόρο.

2.3 Ολοκληρωμένοι διακόπτες MZI

Από την ανάλυση της λειτουργία του συμβολόμετρου MZI που προηγήθηκε γίνονται εμφανή τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρήση αυτών των διακοπτών σε αμιγώς οπτικά συστήματα επεξεργασίας και αναγέννησης δεδομένων. Τα πλεονεκτήματα αυτά αποτέλεσαν τον βασικό λόγο υιοθέτησης των συμβολόμετρων MZI στην κατασκευή οπτικών κυκλωμάτων αυξημένης ευφυΐας και πολυπλοκότητας. Κομβικό σημείο για την όλο και αυξανόμενη χρήση τους αποτέλεσε η υβριδική ολοκλήρωσή τους σε μικρού μεγέθους και μικρής κατανάλωσης πλινθία (chip).

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας ολοκλήρωσης των οπτικών διακοπτών, βρίσκεται αυτή τη στιγμή σε πλήρη εξέλιξη. Ένα τέτοιο φαινόμενο δεν μπορεί παρά να δίνει πολλές ελπίδες για την χρήση της φωτονικής επιστήμης στις τηλεπικοινωνίες του μέλλοντος. Οι προσπάθεια αλλά και τα χρήματα που έχουν επενδυθεί και εξακολουθούν να επενδύονται για την ανάπτυξη της φωτονικής ολοκλήρωσης, αποδεικνύουν την πίστη των επενδυτών στο δυναμικό των οπτικών συστημάτων επικοινωνιών. Σημαντικό κομμάτι αυτής της προσπάθειας καθίσταται και ένα μεγάλο μέρος της εργασίας που παρουσιάζεται σε αυτή τη διατριβή η οποία βασίστηκε στη χρήση ολοκληρωμένων διακοπτών MZI για την ανάπτυξη αμιγώς οπτικών κυκλωμάτων για τηλεπικοινωνίες. Σε αυτό το πλαίσιο, σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζεται η τεχνολογία ολοκλήρωσης των διακοπτών η οποία πραγματοποιήθηκε από την εταιρεία CIP σε στενή συνεργασία με το EΦΕ. Ο διακόπτης Mach-Zehnder είναι ο πρώτος, και μέχρι πριν λίγο καιρό ήταν και ο μοναδικός οπτικός διακόπτης ο οποίος έχει ολοκληρωθεί σε ένα και μόνο πλινθίο (chip). Πλέον, μάλιστα, είναι και εμπορικά διαθέσιμος [2.26], κυρίως για εφαρμογές μετατροπής μήκους κύματος και αναγέννησης. Αυτό είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό πλεονέκτημα της διάταξης του MZI, καθώς βελτιώνει τη σταθερότητα, διευκολύνει τη χρήση του, και επιτρέπει εν γένει, την κατασκευή πιο πολύπλοκων διατάξεων με χρήση πολλαπλών διακοπτών.

Το γεγονός, ότι η λειτουργία του διακόπτη Mach-Zehnder βασίζεται στο χωρικό διαχωρισμό του σήματος εισόδου και, επομένως, απαιτεί τη χρήση δύο ημιαγώγιμων οπτικών ενισχυτών, αποτελεί, ταυτόχρονα, μειονέκτημα και πλεονέκτημα της διάταξης. Αποτελεί μειονέκτημα, γιατί οι δύο ενισχυτές σημαίνουν αύξηση του κόστους της διάταξης, συγκριτικά τουλάχιστον με τα συμβολόμετρα μονού βραχίονα και τα συμβολόμετρα κλειστού βρόχου. Επίσης, η διάταξη απαιτεί ακριβή ρύθμιση σε μια σειρά σημαντικών παραμέτρων, όπως μήκη των δύο βραχιόνων, κέρδη των δύο ενισχυτών και πολωτικές καταστάσεις των χωρικά διαχωρισμένων συνιστωσών εισόδου, για να είναι εφικτή η βέλτιστη απόδοσή της και η μεγιστοποίηση του λόγου σβέσης στην έξοδο. Εύλογα, επομένως, συγκριτικά πάλι με τα συμβολόμετρα μονού βραχίονα ή, ακόμα, και τα συμβολόμετρα κλειστού βρόχου ο διακόπτης Mach-Zehnder έχει μεγαλύτερο βαθμό δυσκολίας στη ρύθμισή του και στην αρχική ρύθμισή του κατά την πειραματική διαδικασία.

Ταυτόχρονα, όμως, η συνδεσμολογία του προσφέρει και σημαντικά πλεονεκτήματα, το κυριότερο από τα οποία είναι η δυνατότητα ολοκλήρωσής του. Επίσης, η χρήση δύο ενισχυτών επιτρέπει την ανεξάρτητη επέμβαση σε κάθε συνιστώσα του σήματος εισόδου, προσφέροντας ευκολία στη δυνατότητα εναλλακτικών συνδεσμολογιών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η συνδεσμολογία ασύμμετρου διακόπτη Mach-Zehnder (asymmetric MZI) [2.27], η οποία βασίζεται στην τοποθέτηση των δύο ημιαγωγών σε μη συμμετρικές θέσεις πάνω στους αντίστοιχους βραχίονες και επιτρέπει τον κατά βούληση καθορισμό του παραθύρου μεταγωγής και, επομένως, τη λειτουργία σε υψηλές ταχύτητες μετάδοσης.

Ο διακόπτης Mach-Zehnder έχει χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα δικτυακών εφαρμογών, με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Πολύ συνοπτικά, οι εφαρμογές αυτές περιλαμβάνουν την από-πολυπλεξία οπτικού καναλιού σε OTDM οπτικούς κόμβους [2.28], την αναγέννηση οπτικού σήματος [2.29], [2.30], [2.31], [2.28], τη μετατροπή μήκους κύματος [2.32], [2.28] καθώς και την υλοποίηση αμιγώς οπτικών πυλών, που επιτελούν λογικές Boolean συναρτήσεις σε υψηλές ταχύτητες λειτουργίας [2.33].

2.3.1 Τεχνολογία υβριδικής ολοκλήρωσης ΜΖΙ

Οι ολοκληρωμένοι διακόπτες ΜΖΙ που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την διατριβή, ολοκληρώθηκαν από την εταιρεία Centre for Integrated Photonics (CIP), στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος IST-MUFINS [2.34] σε στενή συνεργασία με το ΕΦΕ. Για την κατασκευή των ολοκληρωμένων MZI, η CIP χρησιμοποίησε υβριδική τεχνολογία. Η υβριδική ολοκλήρωση (hybrid integration) [2.35] περιλαμβάνει αφενός την κατασκευή των επιμέρους στοιχείων (παθητικών και ενεργητικών) σε αντίστοιχες πλατφόρμες, και αφετέρου την συναρμολόγηση των ξεχωριστών πλατφορμών για την κατασκευή του τελικού διακόπτη MZI. Οι πλατφόρμες στις οποίες κατασκευάζονται τα ενεργά στοιχεία – δηλαδή οι ενισχυτές SOA, παράγονται από διαφορετικά υλικά σε σχέση με αυτά από τα οποία παράγονται οι πλατφόρμες των παθητικών στοιχείων (συζεύκτες, κυματοδηγοί). Στην διαφορά αυτή έγκειται και η ονομασία της υβριδικής ολοκλήρωσης, σε αντίθεση με την μονολιθική ολοκλήρωση (monolithic integration) σύμφωνα με την οποία όλα τα στοιχεία της συσκευής ολοκληρώνονται από κοινά υλικά και στην ίδια πλατφόρμα [2.36].



Σχήμα 2.10. Απεικόνιση της διαδικασίας ολοκλήρωσης του υβριδικού διακόπτη ΜΖΙ με τη μέθοδο 'flip-chip'.

Η διαδικασία ολοκλήρωσης των υβριδικών MZI, αποτελείται από τέσσερα βασικά στάδια. Τα πρώτα τρία στάδια περιλαμβάνουν κατά σειρά
τις κατασκευές των ενισχυτών SOA, της πλατφόρμας στην οποία τοποθετούνται οι ενισχυτές -ονομαζόμενη και ως daughterboard και της μητρικής πλατφόρμας με την οποία παρέχονται οι απαραίτητοι κυματοδηγοί και συζεύκτες ενός συμβολόμετρου MZI. Το τέταρτο στάδιο της ολοκλήρωσης αφορά στην συναρμολόγηση των επιμέρους πλατφορμών σε μία τελική συσκευή όπως φαίνεται στο **σχήμα 2.10**.



Σχήμα 2.11. Μέρος της μάσκας που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή ζευγών ενισχυτών SOA. Το ένθετο πλαίσιο απεικονίζει ένα ενδεικτικό ζεύγος.

Συγκεκριμένα, το ζεύγος ενισχυτών αφού πρώτα περιστραφεί κατά 1800 ως προς τον οριζόντιο άξονά του, τοποθετείτε στην πλατφόρμα daughterboard. Η τεχνική που περιλαμβάνει την περιστροφή και την τοποθέτηση της πλατφόρμας σε μία άλλη, ονομάζεται τεχνική 'flipchip' [2.35]. Στη συνέχεια η πλατφόρμα daughterboard τοποθετείτε με την τεχνική flipchip στην μητρική πλατφόρμα (motherboard) η οποία περιλαμβάνει τους κυματοδηγούς, τους συζεύκτες, καθώς και ήλεκτρο-οπτικά στοιχεία μεταβολής της φάσης (γνωστά και ως phase shifters) εκατέρωθεν του κάθε ενισχυτή. Οι phase shifters τροφοδοτούνται με μία DC τάση και χρησιμοποιούνται για την ακριβή ρύθμιση της φάσης και συνεπώς για την βελτιστοποίηση της συμβολομετρικής λειτουργίας. Παρακάτω δίδονται επιπλέον περιγραφές για την κατασκευή των συστοιχιών των ενισχυτών και των πλατφορμών daughterboard και motherboard.

Πλατφόρμα ζεύγους ενισχυτών SOA

Οι SOA κατασκευάζονται σε μορφή συστοιχιών σε πλατφόρμες από GaAs/InP. Στο σχήμα 2.11 φαίνεται μέρος της μάσκας που χρησιμοποιήθηκε για τον σχεδιασμό συστοιχιών με δύο SOA. Τα ζεύγη των ενισχυτών κόβονται με μηχανισμούς ακριβείας (dicing) [2.35], και κατόπιν σε κάθε ένα από αυτά τοποθετούνται αντι-ανακλαστικές επιστρώσεις (anti-reflection

coating), για να αποφευχθούν πιθανές ανακλάσεις μέσα στην τελική συσκευή.

Πλατφόρμα daughterboard

Μετά το πέρας της τοποθέτησης των αντί-ανακλαστικών επιφανειών, το ζεύγος των ενισχυτών SOA τοποθετούνται στην πλατφόρμα daughterboard με την μέθοδο flip-chip. Το daughterboard κατασκευάζεται από πυρίτιο (silicon – Si), και χρησιμοποιείται για την μετέπειτα κατακόρυφη ευθυγράμμιση των SOA στους κυματοδηγούς της μητρικής πλατφόρμας. Η μάσκα που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή του daughterboard και η τελική πλατφόρμα με τους τοποθετημένους ενισχυτές, φαίνονται στο **σχήμα 2.12**. Από την φωτογραφία στο **σχήμα 2.12 (β)** δεν διακρίνεται το ζεύγος του ενισχυτών καθώς είναι τοποθετημένοι ανάστροφα λόγω της τεχνικής flip-chip. Αντίθετα, στην μάσκα που απεικονίζεται στο **σχήμα 2.12** (α), φαίνονται οι θέσεις επάνω στις οποίες τοποθετούνται οι ενισχυτές. Επιπλέον, και στις δύο εικόνες διακρίνονται οι ηλεκτρικές επαφές στα δύο άκρα της πλατφόρμας, για την τροφοδοσία ρεύματος των ημιαγωγών.



Σχήμα 2.12. (α) Μάσκας της πλατφόρμας daughterboard, (β) φωτογραφία του daughterboard με το ζεύγος των τοποθετημένων ενισχυτών. Οι χρωματισμένες επιφάνειες στα δύο άκρα της πλατφόρμας, αντιπροσωπεύουν της ηλεκτρικές επαφές για την τροφοδοσία των ενισχυτών ημιαγωγού.



Σχήμα 2.13 Μάσκα της μητρικής πλατφόρμας του ολοκληρωμένου MZI στην οποία επιδεικνύονται τα βασικότερα λειτουργικά στοιχεία του διακόπτη.

Μητρική πλατφόρμα (motherboard)

Το τελευταίο στάδιο της βασικής συναρμολόγησης περιλαμβάνει την τοποθέτηση της πλατφόρμας daughterboard στην μητρική πλατφόρμα με τη μέθοδο flip-chip. To motherboard, είναι ένα επίπεδο φωτο-κυματικό κύκλωμα (planar lightwave circuit – PLC) [2.37] το οποίο κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε, οι κυματοδηγοί με τις κατάλληλες προσθήκες συζευκτών, να σχηματίζουν όλο το παθητικό μέρος της διάταξης του συμβολόμετρου MZI το οποίο ολοκληρώνεται με την προσθήκη της πλατφόρμας daughterboard. Η κυματοδηγοί παράγονται από διοξείδιο του πυριτίου (SiO2) σε υπόστρωμα πυριτίου (silica on silicon). Η πλήρης διάταξη της μητρικής πλατφόρμας απεικονίζεται στο **σχήμα 2.13**.

Η διαδικασία ένωσης των θυρών εισόδου/εξόδου του διακόπτη με εξωτερικές ίνες ονομάζεται pigtailing. Οι εξωτερικές οπτικές ίνες (τέσσερις για κάθε πλευρά του διακόπτη), τοποθετούνται σε μία βάση σιλικόνης με συστοιχία κατάλληλων υποδοχών για τις ίνες σε σχήμα τόξου όπως φαίνεται στο **σχήμα 2.14**. Στη συνέχεια, η βάση με την συστοιχία των οπτικών ινών τοποθετείτε επάνω σε μία αντίστοιχη συστοιχία υποδοχών σε σχήμα τόξου στη μητρική πλατφόρμα με τη μέθοδο flip-chip. Η συγκεκριμένη τεχνική απαιτεί υψηλής ακρίβειας συναρμολόγηση έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι οπτικές απώλειες κατά την σύζευξη του φωτός από την οπτική ίνα στον κυματοδηγό και αντίστροφα.



Σχήμα 2.14 Απεικόνιση της διαδικασίας pigtailing με τη μέθοδο flip-chip

Η συναρμολογημένη συσκευή (**σχήμα 2.15 (α)**), μετά από εξονυχιστικό έλεγχο για την επιβεβαίωση της ομαλής λειτουργίας της, τοποθετείτε σε κατάλληλα σχεδιασμένη συσκευασία, όπως φαίνεται στις φωτογραφίες **(β)**, **(γ)** στο **σχήμα 2.15**.



Σχήμα 2.15 Φωτογραφίες του υβριδικά ολοκληρωμένου διακόπτη MZI, (α) μετά το πέρας της συναρμολόγησης, (β) τοποθετημένο σε ανοιχτή συσκευασία και (γ) τοποθετημένο στην κλειστή, τελική συσκευασία.

2.3.2 Συστοιχίες ολοκληρωμένων διακοπτών MZI

Το πρώτο βήμα στην ανάπτυξη αμιγώς οπτικών υποσυστημάτων επεξεργασίας σήματος επετεύχθη με την πραγματοποίηση και επιτυχή λειτουργία πολύπλοκων και απαιτητικών οπτικών συστημάτων επεξεργασίας σήματος με την χρήση διακριτών, ολοκληρωμένων, αμιγώς οπτικών πυλών [2.30]. Το επόμενο λογικό βήμα ήταν η ολοκλήρωση οπτικών πυλών γενικής χρήσης πάνω στην ίδια υβριδική πλατφόρμα, με σκοπό την μείωση του κόστους συσκευασίας καθώς και την αύξηση του βαθμού φωτονικής ολοκλήρωσης. Στα πλαίσια του ερευνητικού έργου

MUFINS [2.34] επετεύχθη και αυτός ο στόχος με την ολοκλήρωση μιας συστοιχίας τεσσάρων διακοπτών MZI σε ένα πλινθίο με χρήση της υβριδικής τεχνολογίας που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες παραγράφους.



Σχήμα 2.16 Φωτογραφίες (α) της υβριδικά ολοκληρωμένης συστοιχίας διακοπτών MZI τοποθετημένη στην κλειστή, τελική συσκευασία, (β) της μητρικής πλατφόρμας της συστοιχίας και (γ) της συστοιχίας των ημιαγώγιμων οπτικών ενισχυτών (SOAs).

Το **σχήμα 2.16(α)** απεικονίζει την ολοκληρωμένη συστοιχία διακοπτών MZI, ενώ η **εικόνα 2.16(β)** δείχνει την μητρική πλατφόρμα της συστοιχίας με τις δύο οπές στο κέντρο της να αποτελούν τα σημεία υποδοχής της συστοιχίας SOAs που με τη σειρά της εικονίζεται στο **σχήμα 2.16(γ)**.

Το επόμενο λογικό βήμα σε αυτή την εξελικτική πορεία, σχετίζεται με τον βαθμό της φωτονικής ολοκλήρωσης. Η επόμενη γενιά ολοκληρωμένων φωτονικών διατάξεων θα πρέπει να περιλαμβάνει την διασύνδεση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων καθώς και την ολοκλήρωση διαφόρων οπτικών στοιχείων σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα. Τα στοιχεία αυτά θα ανοίξουν τον δρόμο στην υλοποίηση αμιγώς οπτικών ολοκληρωμένων συστημάτων, μειώνοντας το κόστος κατασκευής και συσκευασίας χρησιμοποιώντας μια κοινή υβριδική πλατφόρμα ολοκλήρωσης για μια μεγάλη γκάμα οπτικών διατάξεων. Το Ε.Φ.Ε κινούμενο προς αυτή την κατεύθυνση συμμετέχει ήδη σε ευρωπαϊκά ερευνητικά προγράμματα με σκοπό την υλοποίηση τέτοιων ολοκληρωμένων διατάξεων.

Αναφορές

- [2.1] G. O. Toptchiyski, "Analysis of All-Optical Interferometric Switches Based on Semiconductor Oprtical Amplifiers", Dissertation, Techn. Univ., Berlin, 2002.
- [2.2] K. Tajima, S. Nakamura and Y. Ueno, "Ultrafast All-Optical Signal Processing with Symmetric Mach-Zehnder type All-Optical Switches", Opt. Quantum Electron., pp. 875-897, Vol. 33, 2001.
- [2.3] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, "Optical Networks: A Practical Perspective", Academic Press Inc., 2nd Ed., New York, 2002.
- [2.4] G. O. Toptchiyski, "Analysis of All-Optical Interferometric Switches Based on Semiconductor Oprtical Amplifiers", Dissertation, Techn. Univ., Berlin, 2002.
- [2.5] M. Eiselt et al., *"SLALOM: Semiconductor laser amplifier in a loop mirror"*, J. Lightwave Technol., vol. 13, No. 10, pp. 2099-2112, 1995.
- [2.6] Η. Αβραμόπουλος, "Φωτονική Τεχνολογία για Τηλεπικοινωνίες", Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- [2.7] S. Bischoff, A. Buxens, St. Fischer, M. Dülk, A. T. Clausen, H.N. Poulsen and Mørk, "Comparison of All-Optical co- and counter-propagating high-speed signal processing in SOA-based Mach-Zehnder interferometers", Opt. Quantum Electron., pp. 907-926, Vol. 33, 2001.
- [2.8] G. Guekos, "Photonic devices for telecommunications: How to model and measure", Springer-Verlag, Berlin, 1999.
- [2.9] T. Saitoh et al., "Theoretical-analysis and fabrication of antireflection coatings on laser-diode facets", J. Lightwave Technol., vol. 3, No. 2, pp. 288-293, 1985.
- [2.10] C. Vassallo, "Rigorous and approximate calculations of antireflection layer parameters for traveling-wave diode-laser amplifiers", Electron. Lett., vol. 21, No. 8, pp. 333-334, 1985.
- [2.11] M. J. Adams et al., "Nonlinearities in semiconductor laser amplifiers", Opt. Quantum Electron., vol. 27, No. 1, pp. 1-13, 1995.
- [2.12] J. L. Oudar et al., "Subpicosecond spectral hole burning due to nonthermalized photoexcited carriers in GaAs", Phys. Rev. Lett., vol. 55, No. 19, pp. 2074-2077, 1985.
- [2.13] K. L. Hall et al., "Sub-picosecond gain and index nonlinearities in InGaAsP diode lasers", Opt. Commun., vol. 111, No. 5-6, pp. 589-612, 1994.
- [2.14] G. P. Agrawal et al., "Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers", IEEE J. Quantum Electron., vol. 25, No. 11, pp. 2297-2306, 1989.
- [2.15] G. Eisenstein et al., "Gain recovery time of traveling-wave semiconductor optical amplifiers", Appl. Phys. Lett., vol. 54, No. 5, pp. 454-456, 1989.

- [2.16] F. Girardin et al., "Gain recovery of bulk semiconductor optical amplifiers", IEEE Photon. Technol. Lett., vol.10, No. 6, pp. 784-786, 1998.
- [2.17] R. J. Manning et al., *"Three-Wavelength device for all-optical signal-processing"*, Opt. Lett., vol. 19, No. 12, pp. 889-891, 1994.
- [2.18] R. J. Manning et al., "Enhanced recovery rates in semiconductor-laser amplifiers using optical-pumping", Electron. Lett., vol. 30, No. 10, pp. 787-788, 1994.
- [2.19] M. Usami et al., "Mechanism for reducing recovery time of optical nonlinearity in semiconductor laser amplifier", Appl. Phys. Lett., vol. 72, No. 21, pp. 2657-2659, 1998.
- [2.20] J. L. Pleumeekers et al, "Acceleration of gain recovery in semiconductor optical amplifiers by optical injection near transparency wavelength", IEEE Photon. Technol., vol. 14, pp. 12–14, Jan. 2002.
- [2.21] J. L. Pleumeekers et al, "Acceleration of gain recovery in semiconductor optical amplifiers by optical injection near transparency wavelength", IEEE Photon. Technol., vol. 14, pp. 12–14, Jan. 2002.
- [2.22] C. H. Henry, "Theory of the linewidth of semiconductor lasers", IEEE J. Quantum Electron., vol. 18, No. 2, pp. 259-264, 1982.
- [2.23] N. Pleros, G. T. Kanellos, C. Bintjas, A. Hatziefremidis, and H. Avramopoulos, "Optical Power Limiter Using a Saturated SOA-Based Interferometric Switch", Photonics Technology Letters, Vol. 16, No. 10, October 2004.
- [2.24] G. T. Kanellos et al., "SOA-based interferometric optical hard-limiter", to be presented in Optical Amplifiers and their Applications (OAA) Conference 2004, San Francisco, USA, June 2004.
- [2.25] N. Pleros et al., "Recipe for amplitude modulation reduction in SOAbased interferometric switches", submitted to J. of Lightwave Technol.
- [2.26] <u>http://www.ciphotonics.com/</u>
- [2.27] R.P. Webb, R.J. Manning, G.D. Maxwell, A.J. Poustie, "40 Gbit/s alloptical XOR gate based on hybrid-integrated Mach-Zehnder interferometer", Electron. Lett. Vol. 39, No. 1, pp. 79–81, 2003.
- [2.28] D. Wolfson et al., "40-Gb/s all-optical wavelength conversion, regeneration and demultiplexing in a SOA-based all-active Mach-Zehnder interferometer", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 12, No. 3, pp. 332-334, 2000.
- [2.29] O. Leclerc et al., "Optical regeneration at 40 Gb/s and beyond", J. Lightwave Technol., Vol. 21, No. 11, pp. 2779-2790, 2003.
- [2.30] D. Tsiokos, P. Bakopoulos, A. Poustie, G. Maxwell and H. Avramopoulos, "Jitter Reduction in a 40 Gb/s All-Optical 3R Regenerator Using Integrated MZI-SOA Switches", Electron. Lett., Vol. 42, No.14, pp. 817-819, 2006.

- [2.31] K. L. Hall et al., "100 Gbit/s bitwise logic", Opt. Lett., Vol. 23, No. 16, pp. 1271-1273, 1998.
- [2.32] M. L. Masanovic et al., "Monolithically integrated Mach Zehnder interferometer wavelength converter and widely tunable laser in InP", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 15, No. 8, pp. 1117–1119, 2003.
- [2.33] J. Y. Kim, J.M. Kang, T. Y. Kim, S. K. Han, "All-Optical Multiple Logic Gates With XOR, NOR, OR, and NAND Functions Using Parallel SOA-MZI Structures: Theory and Experiment", IEEE J. Lightwave. Technol. Vol. 24, pp. 3392-3399, 2006.
- [2.34] <u>http://mufins.cti.gr</u>
- [2.35] G. Maxwell et al., "Very low coupling loss, hybrid-integrated alloptical regenerator with passive assembly", Europ. Conf. on Opt. Comm. (ECOC) 2002, Tech. Dig., PD3.5, Copenhagen, Denmark, 2002.
- [2.36] Y. Du et al., "A novel monolithically integrated Mach-Zehnder wavelength converter using cross modulation in electro-absorber", Europ. Conf. on Opt. Comm. (ECOC) 2005, Tech. Dig., Th 1.4.1., Glasgow, UK, 2005.
- [2.37] S. J. Park, K. T. Jeong, S. H. Park, H. K. Sung, "A novel method for fabrication of a PLC platform for hybrid integration of an optical module by passive alignment", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 14, No. 4, pp.486-488, 2002.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΜΙΓΩΣ ΟΠΤΙΚΗ 2R ΑΝΑΓΕΝΝΗΣΗ NRZ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ ΜΖΙ

Η μετάβαση από τα τωρινά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα στα αμιγώς οπτικά δίκτυα τρίτης γενιάς, με διαφάνεια στον τύπο πληροφορίας και πλήρη απομάκρυνση οποιασδήποτε ηλεκτρικής αναγεννητικής διάταξης στους ενδιάμεσους κόμβους του δικτύου, απαιτεί την υλοποίηση διατάξεων με τη δυνατότητα να πραγματοποιούν βασικές λειτουργίες επεξεργασίας δεδομένων απ' ευθείας στο οπτικό επίπεδο. Οι κυριότερες από αυτές τις λειτουργίες είναι η αναγέννηση και η αλλαγή μήκους κύματος της μεταδιδόμενης πληροφορίας.

Η αναγέννηση του σήματος πληροφορίας είναι μια κομβικής σημασίας λειτουργία για ένα δίκτυο μετάδοσης πληροφορίας. Στα οπτικά δίκτυα, τα οποία χρησιμοποιούν πολυπλεξία μηκών κύματος (Wavelength Division Multiplexing – WDM), υπάρχουν αρκετά φυσικά φαινόμενα τα οποία θέτουν περιορισμούς στην μετάδοση της πληροφορίας. Σ΄ ένα τέτοιας μορφής δίκτυο, σημαντικοί περιοριστικοί παράγοντες της επίδοσης του είναι ο συσσωρευμένος θόρυβος από την χρήση οπτικών ενισχυτών, η χρωματική διασπορά, διάφορα μη γραμμικά φαινόμενα, η χρονική ολίσθηση και διάφορες άλλες ατέλειες της μετάδοσης και των παρεμβαλλομένων υποσυστημάτων. Όλα τα παραπάνω φαινόμενα υποβαθμίζουν σημαντικά το σηματοθορυβικό λόγο (Optical Signal to Noise Ratio – OSNR) του σήματος δεδομένων, θέτοντας με αυτό τον τρόπο ένα περιορισμό στον μέγιστο αριθμό των κόμβων που μπορεί να περάσει το σήμα. Μάλιστα, ο μέγιστος αριθμός οπτικών κόμβων τους οποίους μπορεί να ταξιδέψει ένα σήμα δεδομένων δεν ξεπερνά τους δέκα, γεγονός το οποίο αποτελεί σημαντικό περιορισμό στην επεκτασιμότητα και την λειτουργική ευελιξία του δικτύου. Συνεπώς, η αναγέννηση του σήματος δεδομένων αποτελεί

Οι αναγεννητές δεδομένων χωρίζονται σε 2R και 3R. Η 2R αναγέννηση αφορά την επανενίσχυση (Re-amplify) και την αναμόρφωση (Reshape) του υποβαθμισμένου σε ποιότητα μεταδιδόμενου σήματος. Κατά την μετάδοση του σήματος πληροφορίας όμως, εκτός από την υποβάθμιση της μορφής των παλμών δεδομένων, παρατηρείται και ολίσθηση της φάσης τους. Για το λόγο αυτό είναι αναγκαία η χρήση 3R αναγεννητών που πέρα από τις λειτουργίες των 2R διατάξεων, πραγματοποιούν επανασυγχρονισμό των παλμών πληροφορίας (Re-timing). Παρόλο που ένας 3R αναγεννητής παρουσιάζει όλα τα πλεονεκτήματα ενός αντίστοιχου 2R και επιπλέον επανασυγχρονίζει το μεταδιδόμενο σήμα, παρουσιάζει επίσης και ένα σημαντικό μειονέκτημα σχέση με τον τελευταίο που δεν είναι άλλο από την εξαγωγή ρολογιού για τον επανασυχρονισμό. Η ανάγκη αυτή οδηγεί σε διάταξη αυξημένης πολυπλοκότητας σε σχέση με μια 2R υλοποίηση, αυξάνοντας επίσης σημαντικά και το κόστος του αναγεννητή. Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε λοιπόν πως από πλευράς κόστους, η βέλτιστη λύση για την αναγέννηση των διαδιδόμενων σημάτων είναι η χρήση 2R αναγεννητών ως επί το πλείστον και η χρήση 3R διατάξεων σε κομβικά σημεία του δικτύου όπου ο επανασυγχρονισμός του σήματος είναι απολύτως αναγκαίος.

παρών κεφάλαιο θα μελετήσουμε αμιγώς οπτικές 2R Στο αναγεννητικές διατάξεις για NRZ δεδομένα, τα οποία αποτελούν και την πιο διαδεδομένη μορφή δεδομένων για τη μετάδοση οπτικής πληροφορίας αυτή την στιγμή. Οι διατάξεις που θα μελετηθούν βασίζονται στο συμβολόμετρο MZI που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η 2R αναγέννηση με χρήση MZI συμβολομέτρων γίνεται μέσω της λειτουργίας μετατροπής κύματος του εισερχόμενου σήματος δεδομένων, όπως θα δούμε αναλυτικά σε επόμενη παράγραφο. Η μελέτη μας θα εστιαστεί στα δύο πιο γνωστά σχήματα 2R αναγέννησης με χρήση διακοπτών SOA-MZI και σε ένα καινούργιο σχήμα το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια της

παρούσας διατριβής. Στόχος μας είναι όχι μόνο να εκτιμήσουμε και να συγκρίνουμε την απόδοση των διαφόρων αναγεννητικών διατάξεων, αλλά κυρίως να καθορίσουμε και τα οφέλη τα που προκύπτουν από την χρήση αμιγώς οπτικώς διατάξεων αναγέννησης και μετατροπής μήκους κύματος στη συνολική επίδοση του δικτύου.

Η μελέτη των 2R αναγεννητικών διατάξεων πραγματοποιήθηκε αρχικά με την χρήση προσομοιωτικών εργαλείων. Συγκεκριμένα, αρχικά αναπτύχθηκε ένα προσωμοιοτικό μοντέλο ενός εμπορικά διαθέσιμου διακόπτη MZI και ελέγχθηκε η ακρίβεια του με πειραματικά δεδομένα. Στην συνέχεια ακολούθησε η προσομοιωτική μελέτη των τριών αναγεννητικών διατάξεων για ψευδοτυχαίες (Pseudo-Random Bit Sequences – PRBS) ροές NRZ δεδομένων τάξης έως 2³¹-1 στα 10 και 40 Gbps, με σκοπό την εκτίμηση της επίδοσης τους. Η πρώτη διάταξη που ελέγχθηκε ήταν ο απλός 2R SOA-MZI αναγεννητής, στον οποίο γίνεται χρήση ενός μόνο σήματος ελέγχου [3.1]. Σημαντικό πλεονέκτημα της συνδεσμολογίας αυτής αποτελεί η απλή της υλοποίηση ενώ μεταξύ των μεγαλυτέρων μειονεκτημάτων της είναι η χρονική διεύρυνση των παλμών εξόδου και η εξάρτηση της επίδοσης της από την μορφή της ακολουθίας των δεδομένων. Στην δεύτερη συνδεσμολογία που μελετήθηκε συναντάμε μια βελτιωμένη έκδοση του κλασσικού 2R SOA-MZI αναγεννητή όπου αντί για ένα σήμα ελέγχου χρησιμοποιείται ένα σε κάθε SOA του MZI, τα οποία διαδίδονται στο συμβολόμετρο σε αντίθετες κατευθύνσεις [3.1]. Η χρήση των δύο σημάτων ελέγχου οδηγεί σε μια διαρκή ισορροπία μεταξύ των κερδών των δύο SOAs του συμβολόμετρου και κατ' επέκταση σε μια βελτιωμένη λειτουργία μετατροπής μήκους κύματος με έντονα 2R αναγεννητικά χαρακτηριστικά. Παρόλα αυτά, η τεχνική αυτή δεν επιτρέπει τον έλεγχο της διαφοράς φάσης μεταξύ των δύο ημιαγώγιμων ενισχυτών του συμβολόμετρου με αποτέλεσμα την μη ιδανική μεταγωγή του σήματος δεδομένων και την εμφάνιση ενός υποβάθρου θορύβου στην έξοδο. Το ανεπιθύμητο υπόβαθρο μπορεί να εξαλειφτεί με την χρήση της τρίτης συνδεσμολογίας που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής [3.2]. Η νέα συνδεσμολογία βασίζεται στον αναγεννητή με τα δύο σήματα ελέγχου και βελτιώνει την λειτουργία του κάνοντας χρήση ενός εξωτερικού συνεχούς κύματος (continuous wave- CW) για τον έλεγχο της διαφορικής φάσης των SOAs του MZI, με αποτέλεσμα την ιδανική μεταγωγή του σήματος δεδομένων στο διακόπτη. Τα βελτιωμένα αναγεννητικά χαρακτηριστικά της παραπάνω συνδεσμολογίας επιβεβαιώθηκαν τόσο σε προσομοιώσεις όσο και σε πειράματα, με τις δύο μεθόδους να είναι σε απόλυτη συμφωνία.

Ένας από τους βασικούς στόχους της ανάπτυξης και της μελέτης της επίδοσης του 2R αναγεννητή είναι ο καθορισμός των πλεονεκτημάτων που μπορεί να επιφέρει η χρήση αυτών των διατάξεων στην μετάδοση της πληροφορίας. Τα αποτελέσματα των προσημειώσεων όσον αφορά των

ρυθμό ελέγχου λαθών (Bit Error Rate – BER) στον δέκτη, έδειξαν ότι η ποιότητα του μεταδιδόμενου σήματος βελτιώνεται με την χρήση αναγεννητικών διατάξεων και ότι το νέο σχήμα υπερτερεί σε επιδόσεις των άλλων δύο συνδεσμολογίων.

Ακόμα, ένας από τους κύριους παράγοντες που χαρακτηρίζουν την ποιότητα ενός αναγεννητή είναι η δια-συνδεσιμότητα του. Δυστυχώς, οι κλασσικές υλοποιήσεις 2R αναγεννητών βασισμένες σε SOA-MZI έχουν δείξει ότι έχουν περιορισμένες ικανότητες διασύνδεσης, πράγμα που περιορίζει την χρήση τους στις γραμμές μετάδοσης της πληροφορίας. Η βελτίωση της δια-συνδεσιμότητας αυτών των διατάξεων θα μπορούσε να αυξήσει τις πιθανότητες καθιέρωσης τους ως αξιόπιστη λύση για την αμιγώς οπτική αναγέννηση του σήματος και πιθανός και την λύση συγκρούσεων μέσω της αλλαγής μήκους κύματος που πραγματοποιούν. Στην μελέτη που πραγματοποιήσαμε και παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο, εξετάσαμε πειραματικά την δια-συνδεσιμότητα των υπό μελέτη 2R αναγεννητικών διατάξεων με τη χρήση ενός οπτικού επαναληπτικού βρόγχου. Τα αποτελέσματα της μελέτης επιβεβαίωσαν για μία ακόμα φορά την ανωτερότητα της νέας 2R αναγεννητικής συνδεσμολογίας [3.3].

Στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται μια εισαγωγή στην αμιγώς οπτική 2R αναγέννηση και εξηγείται πως αυτή επιτυγχάνεται με χρήση του συμβολόμετρου MZI. Στην συνέχεια γίνεται μια αναλυτική περιγραφή του μοντέλου του MZI που αναπτύχθηκε και των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν. Το κεφάλαιο συνεχίζεται με την παρουσίαση της προσομοιωτικής μελέτης των 2R αναγεννητικών διατάξεων σε διάφορα σενάρια μετάδοσης και ολοκληρώνεται με την πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων και την μελέτη δια-συνδεσιμότητας των συνδεσμολογιών.

3.1 Αμιγώς οπτική 2R αναγέννηση

3.1.1 Εισαγωγή

Στα τωρινά δίκτυα οπτικών επικοινωνιών, όπου ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων είναι ίσος ή μικρότερος από 10 Gb/s ανά κανάλι, η λύση που ακολουθείτε όταν απαιτείται αναγέννηση του σήματος είναι η χρήση οπτό-ήλεκτρο-οπτικών αναγεννητών (OEO - Optical/Electronic/Optical). Αν και η λύση αυτή είναι εμπορικά βιώσιμη σε αυτούς τους ρυθμούς μετάδοσης, το κόστος των αναγεννητών παραμένει σχετικά υψηλό και η ενεργειακή τους κατανάλωση αυξημένη (έως ~60 W ανά μήκος κύματος/κανάλι) [3.4], με αποτελέσματα οι σχεδιαστές του δικτύου να προσπαθούν να παρακάμψουν την αναγέννηση των δεδομένων όπου αυτό είναι εφικτό. Νέες, βελτιωμένες ΟΕΟ υλοποιήσεις αναγεννητών έχουν έρθει στο προσκήνιο τα τελευταία χρόνια [3.5] οι οποίες υπόσχονται μικρότερα κόστη κατασκευής και λειτουργίας, παρουσιάζουν όμως και αρκετά μειονεκτήματα με κυριότερο όλων την αδυναμία τους να λειτουργήσουν για δεδομένα με διαφορετική διαμόρφωση ή ρυθμό μετάδοσης.

Η κατάσταση για τις ΟΕΟ υλοποιήσεις γίνεται ακόμα πιο δύσκολη καθώς οι ρυθμοί μετάδοσης της πληροφορίας αυξάνουν στα 40 Gb/s ή και ακόμα υψηλότερα. Το κόστος των δεκτών, των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων αλλά και των διαμορφωτών αυξάνεται γεωμετρικά σε σχέση με τα αντίστοιχα στοιχεία που λειτουργούν σε ρυθμούς μικρότερους των 10 Gb/s και επιπλέον, αυξάνονται σημαντικά οι τεχνικές δυσκολίες στην υλοποίηση αυτών των στοιχείων όπως η συσκευασία τους και η θερμική τους συμπεριφορά. Επιπλέον το προβλεπόμενο κόστος για 40 Gb/s OEO στοιχεία είναι τις τάξεως των \$25k-30k, το οποίο δεν προσφέρει την επιθυμητή 40% μείωση του κόστους για 4x των ρυθμό μετάδοσης (σε σχέση με 10 Gb/s OEO στοιχεία).

Το σημαντικό αυτό μειονέκτημα των ΟΕΟ διατάξεων έρχονται να εκμεταλλευτούν οι αμιγώς οπτικές υλοποιήσεις. Η αμιγώς οπτική 2R αναγέννηση αναμένεται να παίξει σημαντικό ρόλο στην μετάβαση από τα τωρινά δίκτυα επικοινωνιών σε διαφανή δίκτυα, επιτρέποντας την αποκατάσταση του σήματος και την βελτίωση των χαρακτηριστικών μετάδοσης του. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των αμιγώς οπτικάν υλοποιήσεων είναι ότι τα σήματα δεν μετατρέπονται σε ηλεκτρικά για να επεξεργαστούν αλλά παραμένουν οπτικά: δεν καθίσταται αναγκαία η χρήση ευρυζωνικών ηλεκτρικών διατάξεων παρά μόνο απλών DC τροφοδοτικών. Επιπλέον, οι αμιγώς οπτικές διατάξεις έχουν την δυνατότητα να επεξεργαστούν σήματα με μεγάλη διαφορά στο εύρος ζώνης τους, ξεκινώντας από τα 2.5 Gb/s και φτάνοντας έως και >40 Gb/s με χρήση της ίδιας διάταξης.

Η βασική τεχνική για την αμιγώς οπτική αναγέννηση είναι η χρήση μηγραμμικών υλικών με σκοπό την επίδραση μιας δέσμης φωτός σε μία άλλη χωρίς την χρήση ηλεκτρονικών διατάξεων [3.6]. Μια από τις πιο υποσχόμενες τεχνικές που εφαρμόζεται σε υψίρυθμα σήματα δεδομένων στα 10, 40 Gb/s και παραπάνω, είναι η χρήση μη-γραμμικών ημιαγώγιμων οπτικών ενισχυτών (Semiconductor Optical Amplifier – SOA) ως πυρήνα αμιγώς οπτικών αναγεννητικών διατάξεων βασισμένων σε συμβολομετρικούς διακόπτες [3.7]. Οι SOAs που βασίζονται σε indium phosphide (InP) οπτοηλεκτρονικά ημιαγώγιμα υλικά [3.8] είναι πρακτικά στοιχεία μιας και προσφέρουν σημαντικό οπτικό κέρδος ενίσχυσης (μηκορεσμένο κέρδος >30 dB στα 1550 nm), έχουν μικρό μέγεθος (<2 mm), απαιτούν πολύ χαμηλή οπτική ισχύ μεταγωγής (<100fJ), παρουσιάζουν μικρή ευαισθησία στην πόλωση και μπορούν να ολοκληρωθούν σχηματίζοντας μεγαλύτερες διατάξεις [3.9].

3.1.2 Βελτίωση των χαρακτηριστικών μετάδοσης του σήματος με χρήση αμιγώς οπτικής 2R αναγέννησης

Στην 2R αναγέννηση το οπτικό σήμα ενισχύεται και αναμορφώνεται, μειώνοντας τον θόρυβο τόσο στο επίπεδο του λογικού «μηδέν» όσο και σε αυτό του λογικού «ένα». Η 2R αναγέννηση είναι μια απλούστερης μορφής αναγεννητική διαδικασία σε σχέση με την 3R όπου απαιτείται και η εξαγωγή ρολογιού χρονισμού. Το γεγονός αυτό, την καθιστά μια ιδιαίτερα ελκυστική λύση για συστήματα που λειτουργούν σε ρυθμούς μετάδοσης μεγαλύτερους ή ίσους με 40 Gb/s λόγο του σημαντικά μικρότερου κόστους της. Αυτή η μορφή αναγέννησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα υψίρυθμα δίκτυα κορμού για την διατήρηση υψηλού σηματοθορυβικού λόγου (OSNR) και την αποφυγή συσσώρευσης θορύβου από τα διάφορα στάδια οπτικής ενίσχυσης. Επιπλέον, με χρήση 2R αναγέννηση, μπορεί να αποφευχθεί και η υποβάθμιση της ποιότητας του σήματος από μη γραμμικά φαινόμενα κατά την διάδοση του στην ίνα όπως η μίξη τεσσάρων φωτονίων (Four Wave Mixing - FWM). Στην περίπτωση αναγέννησης με χρήση συμβολόμετρων MZI, η μη-γραμμική απόκριση της διάταξης είναι αυτή που οφείλεται για την αναμόρφωση του σήματος, όπως θα δούμε σε επόμενη παράγραφο [3.10].

Τα ποσοτικά οφέλη της 2R οπτικής αναγέννησης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την σχεδίαση της αναγεννητικής διάταξης αλλά τυπικά, μια βελτίωση του OSNR μεγαλύτερη των 20 dB μπορεί εύκολα να επιτευχθεί. Η 2R αναγέννηση δεν βελτιώνει αναγκαία και των ρυθμό λαθών (Bit-Error-Rate - BER) της συνολικής μετάδοσης. Παρόλα αυτά, με κατάλληλη χρήση της είναι δυνατή η μείωση της συσσώρευσης λαθών κατά την μετάδοση σε σχέση με ένα σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί μόνο γραμμική ενίσχυση του σήματος [3.11], [3.12]. Τυπικά δεδομένα της επίδοσης ενός εμπορικά διαθέσιμου, υβριδικά ολοκληρωμένου 2R αναγεννητή βασισμένο σε SOA-MZI φαίνονται στο **σχήμα 3.1**, όπου φαίνονται τα διαγράμματα ματιού αναγεννημένων 40 Gb/s RZ δεδομένων [3.13]. Τα αναγεννημένα δεδομένα παρουσιάζουν υψηλό λόγο αντίθεσης (extinction ratio) και η συνολική ισχύς που χρειάστηκε για την μεταγωγή του σήματος στον διακόπτη ήταν μικρότερη του 1 dB. Οι καμπύλες BER φαίνονται στο **σχήμα 3.2** και δείχνουν ένα πολύ μικρό επιπλέον ποσό ισχύος να απαιτείται στον δέκτη (power penalty) σε σχέση με το σήμα της γεννήτριας. Το επιπλέον ποσό αυτό είναι αναγκαίο για την διατήρηση του ίδιου BER μιας και το σήμα της γεννήτριας είναι «ιδανικό» και όπως προείπαμε, η 2R αναγέννηση δεν μπορεί να βελτιώσει την BER επίδοση ενός τέτοιου σήματος. Πρέπει επίσης να αναφερθεί σε αυτό το σημείο ότι τα διαγράμματα BER σε σχέση με την οπτική ισχύ στον δέκτη αναφέρονται στην ευαισθησία του δέκτη και αποτελούν ένδειξη για την ποιότητα του σήματος. Ένας 2R αναγεννητής, που παρουσιάζει μια κοινή συνάρτηση μεταφοράς για το «μηδέν» και το «ένα», σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να διορθώσει λάθη παρά μόνο να βελτιώσει την ποιότητα του σήματος καθυστερώντας την συσσώρευση λαθών.



Σχήμα 3.1. Διάγραμμα ματιού αναγεννημένων RZ δεδομένων στα 40 Gb/s (Timebase = 10ps/div, PRBS length = 2^{31} -1).



Σχήμα 3.2. Διάγραμμα BER για 40 Gb/s RZ δεδομένα για διαφόρων τάξεων PRBS.

Στα 40 Gb/s, ένα από τα πιο δύσκολα φαινόμενα τα οποία υποβαθμίζουν την ποιότητα του σήματος κατά την μετάδοση είναι η διασπορά λόγω πόλωσης (Polarization Mode Dispersion – PMD). Το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών bits σε αυτό το ρυθμό είναι 25 ps και ακόμα και μια πολύ μικρή χρονική ολίσθηση μπορεί να υποβαθμίσει την ποιότητα του σήματος σημαντικά. Ευτυχώς, με χρήση 2R οπτικού αναγεννητή αμέσως πριν από τον οπτικό δέκτη, μπορεί η επίδραση του φαινομένου αυτού να ελαττωθεί σημαντικά [3.14].

Πέρα από την βασική τους αναγεννητική λειτουργία, οι 2R αναγεννητές μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως εργαλεία για τον έλεγχο (monitoring) του δικτύου απ' ευθείας στο οπτικό στρώμα. Ο έλεγχος της επίδοσης του δικτύου είναι μια εξαιρετικής σημασίας λειτουργία σε ένα υψίρρυθμο δίκτυο μετάδοσης ώστε να επιτυγχάνεται η ομαλή λειτουργία του δικτύου, να προλαμβάνεται η απώλεια πληροφορίας λόγω βλάβης αλλά και να διασφαλίζεται η ποιότητα των προσφερόμενων υπηρεσιών. Οι 2R αναγεννητές που βασίζονται σε SOA-MZI μπορούν να ελέγχουν το OSNR κατά μήκος του δικτύου καθώς και την διασπορά [3.15].

Η απλότητα, η προσαρμοστικότητα και η ανεξαρτησία από τον ρυθμό μετάδοσης των 2R αναγεννητών είναι ιδιαίτερα ελκυστικά στοιχεία στην κατασκευή πολυπλοκότερων δομών επεξεργασίας σήματος για δικτυακές εφαρμογές. Αρκετές επιτυχημένες επιδείξεις οπτικώς συστημάτων έχουν αναφερθεί για λειτουργία στα 10 Gb/s με χρήση και οπτικών αναγεννητών, τα οποία μπορούν να λειτουργήσουν και σε ρυθμούς της τάξης των 40 Gb/s. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η διαφανής διασύνδεση κόμβων με χρήση αναγεννητών στα 10 Gb/s [3.17], η ελεγχόμενη δημιουργία chirp στην έξοδο του 2R αναγεννητή για την καταπολέμηση της διασποράς [3.18] κ.α. Ακόμα, 2R αναγεννητικές διατάξεις βασισμένες σε SOA-MZI έχουν επιτυχημένα δοκιμαστεί σε εγκατεστημένα δίκτυα στη ταχύτητα των 10 Gb/s [3.19].

3.1.3 Μετατροπή μήκους κύματος

Οι αμιγώς οπτικοί αναγεννητές μπορούν επιπλέον να παρέχουν την λειτουργία της μετατροπής μήκους κύματος, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την επαναχρησιμοποίηση των μηκών κύματος, την ύπαρξη υπηρεσιών εξαρτώμενων από κατάλληλο μήκος κύματος και επιπλέον υπηρεσίες δρομολόγησης στο δίκτυο [3.20]. Η αμιγώς οπτική μετατροπή μήκους κύματος μπορεί επίσης να συμβάλει καθοριστικά και στην αντιμετώπιση των φαινομένων υποβάθμισης του σήματος όπως η διασπορά, με την αντιστροφή του φάσματος του (mid-span spectral inversion - MSSI) [3.21]. Η μετατροπή μήκους κύματος στο ίδιο μήκος κύματος είναι επίσης δυνατή με χρήση αντίθετα διαδιδόμενων σημάτων στον αναγεννητή ή με χρήση δύο αναγεννητών.

Ένας μεγάλος αριθμός επιδείξεων μετατροπής μήκους κύματος υψίρυθμων σημάτων (>168 Gb/s) με χρήση SOA-MZI έχει αναφερθεί [3.22], δείχνοντας πως οι διατάξεις αυτές είναι ικανές να λειτουργήσουν με επιτυχία όχι μόνο στις εμπορικά ανερχόμενες 40 Gb/s εφαρμογές, αλλά και σε πιο απαιτητικές εφαρμογές του κοντινού. Η μεγάλη προσαρμοστικότητα στους ρυθμούς μετάδοσης των SOA-MZI αναγεννητών είναι και αυτό που τους διαφοροποιεί από τις τωρινές ΟΕΟ υλοποιήσεις.

3.2 Αμιγώς οπτική αναγέννηση βασισμένη σε SOAs

Η βασική αρχή λειτουργίας ενός αμιγώς οπτικού αναγεννητή βασισμένο σε SOA εικονίζεται στο **σχήμα 3.3**. Το σχήμα αυτό απεικονίζει ένα συμβολόμετρο MZI το οποίο έχει ένα SOA σε κάθε βραχίονά του. Το MZI έχει δύο εισόδους, το μεταδιδόμενο σήμα δεδομένων υποβαθμισμένης ποιότητας και ένα συνεχές κύμα (CW) διαφορετικού μήκους κύματος.



Σχήμα 3.3. Διάγραμμα ενός συμβολόμετρου που λειτουργεί ως 2R αναγεννητής.

Η ισχύς του εισερχόμενου σήματος δεδομένων ρυθμίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να προκαλεί μείωση του κέρδους σε έναν από τους SOAs του MZI. Αυτή η αλλαγή στο κέρδος του ημιαγωγού συνοδεύεται και από μια αλλαγή στον δείκτη διάθλασης, το οποίο με την σειρά του οδηγεί σε αλλαγή της φάσης του CW σήματος που διέρχεται από αυτόν τον SOA (πάνω βραχίονας στο **σχήμα 3.3**). Η δέσμη φωτός του πάνω βραχίονα του MZI συμβάλει στη συνέχεια οπτικά με την ανεπηρέαστη στη φάση δέσμη φωτός, η οποία διέρχεται από τον δεύτερο SOA (κάτω βραχίονας), στον συζεύκτη εξόδου του MZI. Η διαφορά φάσης των δύο φωτεινών δεσμών έχει ως αποτέλεσμα την μεταγωγή του φωτός από την πόρτα μη-μεταγωγής του MZI στην πόρτα μεταγωγής. Όπως φαίνεται στο **σχήμα 3.4**, αν η διαφορά φάσης των δύο φωτεινών συνιστωσών είναι π, όλη η ισχύς του σήματος εμφανίζεται στη πόρτα μεταγωγής του διακόπτη (πάνω πόρτα στο **σχήμα 3.3**). Επίσης, στο **σχήμα 3.4** παρατηρούμε ότι η συνάρτηση μεταφοράς του διακόπτη, η οποία είναι εξαρτώμενη από την διαφορά φάσης των σημάτων στους δυο βραχίονες του ΜΖΙ όπως είπαμε, είναι μη-γραμμική και έχει ένα S-σχήμα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αναμόρφωση του σήματος δεδομένων και την καταπίεση του θορύβου στην έξοδο του αναγεννητή. Η αναγέννηση λοιπόν προκύπτει από την αποτελεσματική καταπίεση του θορύβου που οδηγεί σε δραματική βελτίωση του OSNR του σήματος δεδομένων στην έξοδο του αναγεννητή.



Σχήμα 3.4. Συνάρτηση μεταφοράς της πόρτας μεταγωγής του MZI σε σχέση με την διαφορά φάσης των σημάτων στους δυο βραχίονές. Εικονίζεται επίσης το πώς επιτυγχάνεται η καταπίεση της διαμόρφωσης πλάτους του σήματος δεδομένων όταν η διαφορά φάσης είναι π rad.

Σημαντικό ρόλο στην παραπάνω διαδικασία παίζει ο τύπος του ημιαγωγού που χρησιμοποιείται, μιας και η δυναμική απόκρισή του καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την επίδοση όλου του συστήματος. Συγκεκριμένα, ο SOA έχει ένα συγκεκριμένο χρόνο ανάκαμψης του κέρδους του, ο οποίος καθορίζει τον μέγιστο ρυθμό λειτουργίας του διακόπτη MZI στον οποίο επιτυγχάνεται ικανοποιητική αναγέννηση του εισερχόμενου σήματος δεδομένων. Οι τελευταίες εξελίξεις στον τομέα κατασκευής γρήγορων SOAs (χρόνος ανάκαμψης < 16 ps) [3.23] αλλά και τεχνικές όπως το «push-pull» [3.24], επιτρέπουν την αποτελεσματική αναγέννηση σημάτων με ρυθμούς μετάδοσης άνω των 40Gb/s. Το **σχήμα 3.5(a)** απεικονίζει την αρχή λειτουργίας της μεταγωγής με διαφορικά σήματα ελέγχου (push-pull).

Το σήμα δεδομένων χωρίζεται σε δύο μέρη και εισέρχεται στις δύο εισόδους ελέγχου του MZI. Με κατάλληλη χρονική καθυστέρηση των δύο αυτών σημάτων (Δt) και κατάλληλες ισχύς εισόδου, επιτυγχάνεται ακύρωση των αργών χαρακτηριστικών της ανάκαμψης του κέρδους του ημιαγωγού, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο **σχήμα 3.5(b)**. Αξίζει να τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι η τεχνική αυτή έχει ικανοποιητικό αποτέλεσμα μόνο στην περίπτωση RZ σημάτων [3.1]. Περισσότερες λεπτομέρειες για την τεχνική αυτή θα παρουσιαστούν στο 4^ο κεφάλαιο.



Σχήμα 3.5. (a) Σχηματικό διάγραμμα της μεταγωγής με διαφορικά σήματα ελέγχου (push-pull). (b) ΤοΣυνάρτηση μεταφοράς της πόρτας μεταγωγής του MZI σε σχέση με την διαφορά φάσης των σημάτων στους δυο βραχίονές. Εικονίζεται επίσης το πώς επιτυγχάνεται η καταπίεση της διαμόρφωσης πλάτους του σήματος δεδομένων όταν η διαφορά φάσης είναι π rad.

3.3 2R Αναγεννητές/Μετατροπείς μήκους κύματος βασισμένοι σε SOA-MZI

Διάφορα σχήματα έχουν προταθεί μέχρι στιγμής για μετατροπή μήκους κύματος (WC) NRZ σημάτων με χρήση SOA-MZI. Η κλασσική προσέγγιση για WC με MZI (standard scheme) περιλαμβάνει την χρήση ενός σήματος ελέγχου (CTR) σε έναν από τους δύο SOAs του MZI [3.1]. Η λύση αύτη αν και είναι εξαιρετικά εύκολη στη υλοποίηση της, παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα. Κυριότερα αυτών, είναι η διεύρυνση των παλμών κατά την έξοδό τους από το MZI και η εξάρτηση της ποιότητας τους από την αρχική ακολουθία δεδομένων, λόγω του ανομοιογενή κορεσμού του κέρδους των δύο SOAs. Τα μειονεκτήματα αυτά αντιμετωπίζονται μερικώς στην συνδεσμολογία αντίρροπων σημάτων ελέγχου (bidirectional scheme) [3.1]. Το σχήμα αυτό χρησιμοποιεί δύο σήματα ελέγχου τα οποία ταξιδεύουν σε αντίθετες κατευθύνσεις στους δύο βραχίονες του MZI (ένα σε κάθε βραχίονα). Τα δύο σήματα ελέγχου προκαλούν την ίδια διαμόρφωση κέρδους στους SOAs (XGM) αλλά προκαλούν διαφορετική στροφή φάσης στις δύο συνιστώσες του CW σήματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την επίτευξη μιας δυναμικής ισορροπίας κερδών στο MZI και μιας σταθερής όσον αφορά το πλάτος του σήματος εξόδου WC λειτουργίας με ενισχυμένα αναγεννητικά χαρακτηριστικά. Παρόλα αυτά όμως η χρήση αυτής της τεχνικής δεν εξασφαλίζει ελεγχόμενη ισορροπία στη στροφή φάσης που προκαλούν οι δύο ημιαγωγοί με αποτέλεσμα η μεταγωγή να μην είναι ιδανική και να εμφανίζεται ένα υπόβαθρο θορύβου στην έξοδο του κυκλώματος.



Σχήμα 3.6. Οι τρείς συνδεσμολογίες μετατροπής μήκους κύματος: (a) κλασσικό σχήμα (standard scheme), (b) σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου (bidirectional scheme) και (c) διαφορικά πολωμένο σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου.

Το **σχήμα 3.6** δείχνει τα δομικά διαγράμματα της κλασσικής συνδεσμολογίας με ένα σήμα ελέγχου, της συνδεσμολογίας αντίρροπων σημάτων ελέγχου και μίας νέας συνδεσμολογίας η οποία αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και ονομάζεται διαφορικά πολωμένο σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου (differentially biased bidirectional scheme) [3.2]. Και οι τρείς συνδεσμολογίες χρησιμοποιούν ένα νέο μήκος

κύματος λ₂ στο οποίο γράφεται το εισερχόμενο σήμα δεδομένων. Το σήμα αυτό χωρίζεται σε δύο ίσες συνιστώσες οι οποίες ταξιδεύουν στους δύο βραχίονες του συμβολόμετρου και συμβάλουν στην συνέχεια κατά την έξοδό τους στον συζεύκτη εξόδου του ΜΖΙ. Το σχήμα 3.6(a) εμφανίζει το δομικό διάγραμμα της κλασσικής συνδεσμολογίας η οποία χρησιμοποιεί ένα σήμα ελέγχου σε ένα βραχίονα του MZI επηρεάζοντας το κέρδος και την φάση μόνο μίας από τις δύο συνιστώσες του CW σήματος. Το σχήμα 3.6(b) σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου το οποίο παρουσιάζει το χρησιμοποιεί δύο ίδια σήματα ελέγχου σε κάθε SOA τα οποία όμως διαδίδονται σε αντίθετες κατευθύνσεις [3.1], λαμβάνοντας έτσι το συζυγές του αρχικό σήματος εισόδου στην έξοδο του διακόπτη. Το σχήμα 3.6(c) δείχνει το διαφορικά πολωμένο σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου, το οποίο ακολουθεί την αρχιτεκτονική της συνδεσμολογίας αντίρροπων σημάτων ελέγχου, αλλά επιπλέον χρησιμοποιεί ένα εξωτερικό CW σήμα στον SOA του κάτω βραχίονα. Ο ρόλος του τελευταίου είναι να πολώνει διαφορικά του δύο SOAs του MZI, επιτρέποντας την επίτευξη ελεγχόμενης ισορροπίας τόσο για το κέρδος των ημιαγωγών όσο και για την φάση τους.

Το σχήμα 3.7 αποτελεί μια σχηματική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας των τριών σχημάτων μετατροπής μήκους κύματος που παρουσιάσαμε στις προηγούμενες παραγράφους. Στο σχήμα αυτό, η αριστερή και μεσαία στήλη παρουσιάζουν το πλάτος και την φάση αντίστοιχα των δύο CW συνιστωσών στους SOAs του MZI ενώ η τρίτη στήλη, απεικονίζει την κυματομορφή του σήματος εξόδου στην θύρα μεταγωγής του συμβολόμετρου. Το σχήμα 3.7(a) απεικονίζει την κλασσική συνδεσμολογία με χρήση ενός σήματος ελέγχου, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση διακυμάνσεων στο πλάτος και την φάση μόνο της μίας CW συνιστώσας. Σε αυτή την περίπτωση, η συμβολή στην έξοδο του MZI συντελείται μεταξύ δύο πεδίων με άνισα πλάτη με συνέπεια την μερική και εξαρτώμενη από την αρχική ακολουθία δεδομένων μεταγωγή του σήματος. Επιπλέον, η αργή ανάκαμψη του κέρδους του ενός SOA συντελεί στην αύξηση του χρόνου σβέσης τον παλμών εξόδου και συνεπώς στην χρονική διεύρυνσή τους.

Το σχήμα 3.7(b) απεικονίζει το πλάτος και την φάση των δύο CW συνιστωσών στο σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου, στο οποίο δύο πανομοιότυποι παλμοί ελέγχου ταξιδεύουν στους δύο βραχίονες του MZI σε αντίθετες κατευθύνσεις. Οι δύο παλμοί ελέγχου εισάγουν την ίδια διαμόρφωση στο κέρδος των δύο ημιαγώγιμων οπτικών ενισχυτών με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται μια συνεχής ισορροπία κερδών στο MZI, τόσο όταν υπάρχουν παλμοί ελέγχου όσο κατά την απουσία αυτών. Η διαφορά της φάσης που δημιουργείται στην περίπτωση του σχήματος αντίρροπων σημάτων ελέγχου, δεν οφείλεται στο μεγαλύτερο ποσοστό της στον διαφορετικό κορεσμό των δύο SOAs με σκοπό την διαφοράς φάσης πο

μεταξύ των CW συνιστωσών, όπως στην περίπτωση του κλασσικού σχήματος. Σε αυτό το σχήμα, τον καταλυτικό ρόλο για την επίτευξη της μεταγωγής τον έχει ο παράγοντας διεύρυνσης φασματικής γραμμής. Συγκεκριμένα, όπως είδαμε στο 2° κεφάλαιο, η διαφορά της φάσης στην οποία υπόκειται ένα σήμα όταν αυτό διέρχεται από τον SOA εξαρτάται τόσο από την μεταβολή του κέρδους του τελευταίου όσο και από τον παράγοντα διεύρυνσης φασματικής γραμμής του (σχέση 2.18). Ο παράγοντας αυτός όμως λαμβάνει διαφορετική τιμή ανάλογα με την κατεύθυνση διάδοσης του σήματος [3.1]. Στο σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου λοιπόν, η αντίρροπη διάδοση των παλμών ελέγχου συνοδεύεται και από διαφορετικό παράγοντα διεύρυνσης φασματικής γραμμής για κάθε CW συνιστώσα. Με κατάλληλη ισχύ των σημάτων ελέγχου η διαφορά αυτή στον παράγοντα διεύρυνσης φασματικής γραμμής της κάθε CW συνιστώσα μπορεί να λάβει τέτοια τιμή ώστε η διαφορά φάσης των CW συνιστωσών να λάβει την ιδανική για μεταγωγή τιμή π. Το σήμα εξόδου του MZI, το οποίο είναι το συζυγές του αρχικού σήματος εισόδου, παρουσιάζει μικρότερους χρόνους ανάκαμψης και σβέσης των παλμών και σχεδόν διπλάσιο άνοιγμα ματιού σε σχέση με την κλασσική υλοποίηση μετατροπέα μήκους κύματος. Παρόλα αυτά, η βελτιστοποίηση της διαδικασίας επίτευξης ισορροπίας μεταξύ των κερδών των SOAs και η απουσία ελέγχου στην φάση των σημάτων οδηγούν στην μη ιδανική μεταγωγή του σήματος δεδομένων (όχι ακριβώς π στροφή φάσης) και στην εμφανίσει ενός υποβάθρου θορύβου στην θύρα μεταγωγής του διακόπτη.

Το **σχήμα 3.7(c)** δείχνει το πλάτος και την φάση των δύο CW συνιστωσών στο διαφορικά πολωμένο σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου. Η επίτευξη της διαφορετικής πόλωσης των δύο SOAs πραγματοποιείται με την χρήση ενός εξωτερικού συνεχούς κύματος (CW), το οποίο εισάγεται στον SOA του κάτω βραχίονα με σκοπό την επιβολή διαφοράς φάσης π μεταξύ των δύο CW συνιστωσών εισόδου κατά την απουσία παλμού ελέγχου. Στην περίπτωση που ένας παλμός ελέγχου εισέρχεται στο MZI, οι CW συνιστώσες εισόδου βλέπουν το ίδιο κέρδος και υπόκεινται την ίδια στροφή στην φάση τους, με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται ιδανική αφαιρετική συμβολή στην θύρα μεταγωγής του διακόπτη. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η παρουσία στην έξοδο του διακόπτη ενός σήματος το οποίο παρουσιάζει ιδανικό επίπεδο '0' απουσία οποιουδήποτε υποβάθρου θορύβου. Αξίζει να σημειώσουμε πως και σε αυτή την περίπτωση το σήμα εξόδου του διακόπτη είναι το συζυγές του αρχικού σήματος δεδομένων.



Σχήμα 3.7. Αρχή λειτουργίας των σχημάτων: (a) κλασσικό σχήμα (standard scheme), (b) σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου (bidirectional scheme) και (c) διαφορικά πολωμένο σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου. Η αριστερή και η μεσαία στήλη δείχνουν το πλάτος και την φάση αντίστοιχα των CW συνιστωσών στην έξοδο των δύο SOAs. Η δεξιά στήλη δείχνει το αντίστοιχο πλάτος του σήματος εξόδου στην θύρα μεταγωγής του MZI.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκε λεπτομερής ανάλυση και προσδιορισμός της επίδοσης του προτεινόμενου σχήματος αμιγούς οπτικής αναγέννησης (διαφορικά πολωμένο σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου) και αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων με εκείνα των υπολοίπων δύο συνδεσμολογιών. Η μελέτη μας πραγματοποιήθηκε τόσο με χρήση προσομοιωτικών εργαλείων, όσο και με πειραματικές διαδικασίες. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για ψευδοτυχαίες ακολουθίες NRZ δεδομένων τάξεως έως 2³¹-1 στα 10 και στα 40 Gb/s. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επαληθεύτηκαν πειραματικά στα 10 Gb/s. Επιπλέον, προσδιορίστηκε η επίδοση των τριών σχημάτων όσον αφορά την διασυνδεσιμότητα τους με την χρήση ενός οπτικού επαναληπτικού βρόγχου μετάδοσης. Τα αποτελέσματα της μελέτη των τριών αναγεννητικών σχημάτων παρουσιάζονται στις παραγράφους που ακολουθούν

3.4 Μοντελοποίηση του συμβολόμετρου MZI

Το μοντέλο του SOA-MZI που χρησιμοποιήθηκε για την προσωμοιοτική ανάλυση των τριών 2R αναγεννητικών σχημάτων βασίστηκε στο ολοκληρωμένο και εμπορικά διαθέσιμο SOA-MZI την εταιρίας CIP Technologies [3.25]. Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την μοντελοποίηση του SOA των MZI που ουσιαστικά αποτελεί και το βασικό κομμάτι της μοντελοποίησης. Το εργαλείο προσομοίωσης που επιλέχτηκε για την μελέτη των συνδεσμολογιών είναι το VPI transmissionMaker.

3.4.1 Μοντελοποίηση των Οπτικών Ενισχυτών Ημιαγωγού

Η προσομοίωση της συμπεριφοράς ενός SOA εμπεριέχει της μοντελοποίηση διαφόρων φυσικών ιδιοτήτων του ημιαγωγού. Πρώτον, πρέπει να περιγραφεί η διάδοση του κύματος του οπτικού σήματος. Τόσο η εξέλιξη του πλάτους όσο και της φάσης πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά μήκος του ημιαγωγού. Δεύτερον, οι παράμετροι του υλικού όπως είναι το κέρδος και η μεταβολή του δείκτη διάθλασης πρέπει να περιγραφούν κατά την τροφοδοσία του ημιαγωγού με τους φορείς ηλεκτρονίων από την εξωτερική πηγή. Τρίτον, η αλληλεπίδραση μεταξύ των οπτικών πεδίων και του υλικού του ημιαγωγού είναι καθοριστική, ειδικά εάν προσομοιώνεται η μη γραμμική λειτουργία του SOA. Η αλληλεπίδραση ειδικά μεταξύ των οπτικών φαινομένων όπως είναι η διαμόρφωση κέρδους και φάσης τα οποία μας ενδιαφέρουν για τις εφαρμογές αμιγώς οπτικής επεξεργασίας σήματος.

Από την παραπάνω ανάλυση είναι φανερό ότι η προσομοίωση ενός SOA δεν είναι απλή υπόθεση. Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα για SOAs, άλλα περισσότερο και άλλα λιγότερο περίπλοκα [3.26]-[3.32]. Πρέπει να αναφερθεί ότι και το ίδιο το Ε.Φ.Ε. έχει αναπτύξει διάφορα μοντέλα τα οποία όμως είναι απλοϊκά [3.33], [3.34]. Για τις ανάγκες του Ε.Φ.Ε. που είχαν ως στόχο την υποστήριξη της διεξαγωγής των πειραμάτων, χρειαζόταν ένα μοντέλο το οποίο θα ικανοποιούσε τις παρακάτω συνθήκες:

Μακροσκοπική αντιστοιχία μεταξύ αποτελεσμάτων μοντέλου
SOA και πειραματικών δεδομένων. Τα αποτελέσματα αυτά αναφέρονται πρώτον στις καμπύλες κέρδους που παρουσιάζει ο ημιαγωγός ως προς την εισερχόμενη οπτική ισχύ για διάφορα

ρεύματα έκχυσης και δεύτερον στο χρόνο που χρειάζεται για να ανάκτησης το κέρδος του όταν παλμός συγκεκριμένης οπτικής ισχύς εισέρχεται σε αυτόν.

- Δυνατότητα ομόρροπης ή αντίρροπης φοράς μεταξύ σημάτων εισόδου και σήματος ελέγχου
- Ύπαρξη θορύβου αυθόρμητης εκπομπής (Amplified Spontaneous Emission) στο μοντέλο.

Τα δύο πρώτα στοιχεία υπήρχαν στα μοντέλα που είχε αναπτύξει το Ε.Φ.Ε σε γλώσσα προγραμματισμού C [3.33]. Δεν υπήρχε όμως η δυνατότητα προσομοίωσης του θορύβου αυθόρμητης εκπομπής που εκπέμπεται από τους SOAs. Ο θόρυβος αυτός είναι από τα κύρια στοιχεία που εμποδίζει την σειριακή διασύνδεση πολλών πυλών με SOAs και επομένως είναι απαραίτητο στοιχεία για την ορθή προσομοίωση των πολύπλοκων πειραμάτων που πρόκειται να διεξάγει το Ε.Φ.Ε. Άρα η ενσωμάτωση του θορύβου θα καθιστούσε το μοντέλου του SOA πλήρη για τις ανάγκες του Ε.Φ.Ε.

Από την άλλη πλευρά το Ε.Φ.Ε. έχει στη διάθεση ένα πρόγραμμα προσομοίωσης που ονομάζεται Virtual Photonics Incorporated (VPI) [3.35]. Το πρόγραμμα αυτό αποτελείται από πολλά υποπρογράμματα τα οποία προσομοιώνουν διάφορα οπτικά και ηλεκτρονικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται συνήθως πειραματικές διατάξεις. Τα στις υπόπρογράμματα αυτά μέσα από ένα γραφικό περιβάλλον μπορούν να ενωθούν μεταξύ τους για την προσομοίωση από απλών υποσυστημάτων έως ολόκληρων οπτικών δικτύων. Επομένως γίνεται κατανοητό ότι όλη αυτή η βιβλιοθήκη υποπρογραμμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα χωρίς να χρειάζεται να αναπτυχθεί κάθε στοιχείο από την αρχή.

Ένα από τα υποπρογράμματα αυτά είναι και ο Οπτικός Ενισχυτής Ημιαγωγού. Για την αντιστοιχία της μακροσκοπικής συμπεριφοράς μεταξύ μοντέλου προσομοίωσης και πραγματικών SOA έπρεπε να βρεθεί μία σωστή ομάδα παραμέτρων. Η λύση αυτή προκρίθηκε από την εξέλιξη των απλοϊκών μοντέλων που είχε αναπτύξει το Ε.Φ.Ε. για τους παρακάτω λόγους.

- Το πρόγραμμα VPI έχει έτοιμες τις εξισώσεις που περιγράφουν την αλληλεπίδραση του φωτός με τον ημιαγωγό
- Δυνατότητα χρησιμοποίησης των διαφόρων υπό-προγραμμάτων του VPI όπως είναι οι ενισχυτές Ερβίου, φωτοδίοδοι, οπτικά και ηλεκτρικά φίλτρα,. Τέτοια στοιχεία χρησιμοποιούνται κατά κόρον στις πειραματικές διατάξεις και επομένως η προσομοίωση τους μπορεί να βοηθήσει στην άμεση αξιολόγηση λύσεων για την

αντιμετώπιση προβλημάτων που προκύπτουν κατά τη διεξαγωγή του πειράματος. Στην περίπτωση που εξελισσόταν το μοντέλο του Ε.Φ.Ε. για κάθε ένα στοιχείο θα έπρεπε να αναπτυχθεί και το αντίστοιχο πρόγραμμα.

- Το πρόγραμμα VPI μπορεί να προσομοιώνει οπτικές πηγές με jitter το οποίο μπορεί να είναι είτε τυχαίο (random) με κατανομή Gauss είτε αιτιοκρατικό (deterministic). Αυτό είναι πολύ σημαντικό στοιχείο για την πιστή αναπαραγωγή των οπτικών σημάτων που χρησιμοποιούνται στο εργαστήριο.
- Το πρόγραμμα VPI έχει διάφορα υπό-προγράμματα τα οποία μπορούν να αξιολογούν την ποιότητα ενός οπτικού σήματος. Τα υπό-προγράμματα αυτά μπορούν να μετράνε τόσο το λόγο Q και μέσω αυτού το ρυθμό μεταφοράς σφαλμάτων όσο και διάφορα άλλα χαρακτηριστικά όπως είναι ο λόγος αντίθεσης ενός οπτικού σήματος.
- Εύκολο γραφικό περιβάλλον. Η εύρεση της σωστής ομάδας παραμέτρων για τον SOA καθιστά την χρησιμοποίηση του προγράμματος VPI μετά από κάποιες οδηγίες, πολύ εύκολη υπόθεση για τους άλλους ερευνητές του Ε.Φ.Ε.

Για όλους αυτούς τους λόγους αποφασίστηκε τελικά η χρησιμοποίηση του προγράμματος VPI για την προσομοίωση του SOA [3.36].

3.4.2 Μέθοδος προσομοίωσης του SOA στο πρόγραμμα VPI

Από το πακέτο προσομοίωσης VPI για την προσομοίωση του SOA χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο VPIcomponentMaker™Active Photonics. Σε αυτό το πακέτο η ανάλυση των οπτικών ημιαγώγιμων στοιχείων όπως είναι τα Lasers και οι SOAs γίνονται με την χρήση του μοντέλου Transmission-Line Laser Module (TLLM) (σχήμα 3.8). Το μοντέλο αυτό επιλύει χρονικά σε πολλές επαναλήψεις της διαφορικές εξισώσεις της εμπρόσθιας και οπίσθιας διάδοση οπτικών σημάτων μέσα στον ημιαγωγό χωρίζοντας την κοιλότητα του SOA σε πολλά διαμήκη τμήματα. Το μήκος του κάθε τμήματος είναι η μέση απόσταση που διανύει το σήμα σε ένα βήμα. Το κάθε βήμα καθορίζεται από τη συχνότητα δειγματοληψίας της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, εάν θεωρηθεί ότι η συχνότητα δειγματοληψίας είναι f_{sample}= 2560GHz, τότε το κάθε βήμα έχει χρονική διάρκεια 1/f_{sample}≈390fs. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο ομαδικός δείκτης διάθλασης των InGaAs ημιαγωγών της ενεργού περιοχής των SOAs είναι n_{ar}≈3.5 (μεταξύ 3 και 4), προκύπτει ότι το κάθε τμήμα του SOA για το οποίο υπολογίζονται οι διαφορικές εξισώσεις διάδοσης είναι:

$$\Delta s = 1 / f_{sample} \cdot c / n_{er} = 390 \, fs \cdot 3 \cdot 10^8 / 3.5 = 33.5 \, \mu m$$

Επομένως για SOAs με μήκος μεγαλύτερο από 1mm που χρησιμοποιούνται συνήθως στις εφαρμογές οπτικής επεξεργασίας σήματος, το VPI χωρίζει τον ημιαγωγό σε τουλάχιστον σε 30 μέρη. Διπλασιάζοντας την δειγματοληψία τότε γίνεται κατανοητό ότι διπλασιάζεται και ο αριθμός των μερών που χωρίζεται ο SOA. Ανάλογα λοιπόν με την ακρίβεια που επιθυμείται στην συμπεριφορά της προσομοίωσης του SOA τίθεται και η συχνότητα δειγματοληψίας. Υπάρχει όμως ένα όριο δειγματοληψίας πέρα από το οποίο η μακροσκοπική συμπεριφορά του SOA παραμένει αμετάβλητη.



Σχήμα 3.8. Σχηματική αναπαράσταση ενός Laser ημιαγωγού και του μοντέλου TLLM (Transmission-Line Laser Model), δείχνοντας έναν κόμβο μέσα σε ένα τμήμα του μοντέλου.

Κάθε τμήμα μέσα στο πρόγραμμα εφαρμόζει διάφορους τελεστές στα οπτικά σήματα που διέρχονται μέσα από αυτό σε κάθε επανάληψη. Οι τελεστές αυτές μιμούνται φυσικές λειτουργίες όπως είναι η ενίσχυση (εξαναγκασμένη εκπομπή), οι απώλειες (σκεδάσεις και απορρόφηση), τον θόρυβο (τυχαία εκπομπή) όπως επίσης και την αλλαγή του δείκτη διάθλασης. Η ισχύ των φαινομένων αυτών εξαρτώνται από την πυκνότητα των φορέων σε κάθε τμήμα και για αυτό ονομάζεται και τοπική πυκνότητα φορέων (local carrier density). Η τοπική πυκνότητα των φορέων υπολογίζεται σε κάθε τμήμα μέσω μίας ή περισσότερων διαφορικών εξισώσεων ανάλογα με τη δομή του ημιαγωγού (άμορφος ή κβαντικών πηγαδιών). Η έξοδος του μοντέλου είναι μια ακολουθία δειγμάτων (optical field samples) με ρυθμό που καθορίζεται κατά επιλογή όπως προαναφέρθηκε. Το οπτικό φάσμα του σήματος που παράγεται στην έξοδο μπορεί εύκολα να υπολογιστεί παίρνοντας τον μετασχηματισμό Fourier αυτών των δειγμάτων.

3.4.3 Παράμετροι των SOAs που χρησιμοποιήθηκαν

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή της παραγράφου 3.4, το μοντέλο SOA που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοιωτική ανάλυση των αναγεννητικών διατάξεων βασίστηκε στο ολοκληρωμένο και εμπορικά διαθέσιμο SOA-MZI την εταιρίας CIP Technologies. Πρώτη προτερεότητα για την ανάπτυξη του μοντέλου είχε η εύρεση ομάδας παραμέτρων για τους SOAs των MZI της CIP. Πρέπει να σημειωθεί ότι το υλικό των ημιαγωγών των SOAs αυτών ήταν μορφής πολλαπλών κβαντικών πηγαδιών (MQW). Για λόγους όμως απλότητας θεωρείται ότι είναι ακατέργαστης μορφής (bulk).

Το πρόγραμμα VPI έχει μια μεγάλη λίστα με παραμέτρους που απαιτούνται για την προσομοίωση των SOAs όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 3.1 που ακολουθεί. Πολλές από τις παραμέτρους αυτές έχουν προσδιοριστεί από την CIP και επομένως δεν χωρά αμφιβολία για την τιμή τους. Οι παράμετροι αυτοί συμβολίζονται με (*). Υπάρχει μια δεύτερη κατηγορία παραμέτρων που καθορίστηκαν έτσι ώστε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των SOAs να έχουν την ίδια μακροσκοπική συμπεριφορά με τα πειραματικά αποτελέσματα. Η μακροσκοπική συμπεριφορά όπως έχει ήδη ειπωθεί στις απαιτήσεις του προγράμματος προσομοίωσης είναι πρώτον οι καμπύλες κέρδους που παρουσιάζει ο ημιαγωγός ως προς την εισερχόμενη οπτική ισχύ για διάφορα ρεύματα έκχυσης και δεύτερον ο χρόνος που χρειάζεται για να ανάκτησης το κέρδος του όταν παλμός συγκεκριμένης οπτικής ισχύς εισέρχεται σε αυτόν. Οι παράμετροι αυτοί συμβολίζονται με ([¤]). Τέλος υπάρχει και μια τρίτη ομάδα παραμέτρων οι οποίες δεν έχουν μεταβληθεί καθώς αναφέρονται σε λειτουργίες του SOA οι οποίες δεν είναι ενδιαφέρουσες για τη ερευνητική περιοχή του Ε.Φ.Ε. Αυτές συμβολίζονται με ([¢]).

Parameter	CIP SOA parameters	Unit
Nominalwavelength	1.5525246e-06	m
LaserChipLength	1600.0e-06*	m
ActiveRegionWidth	1.2e-06 *	m
ActiveRegionThickness	0.1e-06 *	m

Πίνακας 3.1: Παράμετροι τ	ων SOAs που χρησιμ	οποιήθηκαν στις πρ	οσομοιώσεις
----------------------------------	--------------------	--------------------	-------------

ConfinementFactor	0.17 *	
GroupEffectiveIndex	3.5 [¢]	
LeftFacetReflectivity	1e-6 [¢]	
RightFacetReflectivity	1e-6 [¢]	
OpticalCouplingEfficiency	0.5*	
FixedInternalLoss	5000 [¤]	1/m
CarrierDependentInternalLossCoefficient	0.0 [¢]	m^2
MaterialLinewidthEnhancementFactor	6 *	
DifferentialRefractiveIndex	-1.11e-26 [¢]	m^3
ChirpReferenceCarrierDensity	2.0e+24 [¢]	1/m
CurrentInjectionEfficiency	1.0 [¢]	
LinearRecombinationCoefficient	1e7 ¤	1/s
BimolecularRecombinationCoefficient	1.0e-17 [¤]	m^3/s
AugerRecombinationCoefficient	9.4e-41 [¤]	m^6/s
LinearMaterialGainCoefficient	6.5e-20 [¤]	m^2
TransparencyCarrierDensity	0.3e+24 [¤]	1/m^3
NonlinearGainCoefficient	3e-23 [¤]	m^3
NonlinearGainTimeconstant	200e-15 [¤]	S
GainPeakFrequency	192.25e12*	Hz
GainPeakFreqCarrierDependence	3.6e-10 [¢]	Hz*m^3
GainCoefficientSpectralWidth	1.0e+13 [¢]	Hz
GainCoeffSpectralWidthCarrierDependence	0.0 [¢]	Hz*m^3
PopulationInversionParameter	6 [¤]	
SpontaneousEmissionPeakFrequency	192.25e12 *	Hz
SpontaneousEmissionFreqCarrierDependence	0.0 [¢]	Hz*m^3
SpontaneousEmissionSpectralWidth	3.75e+12 *	Hz
SpontaneousSpectralWidthCarrierDependence	0.0 [¢]	Hz*m^3
InitialCarrierDensity	0.8e+24 ¢	1/m^3

Ο ρόλος που παίζει κάθε παράμετρος στην δυναμική λειτουργία του SOA θα επεξηγηθεί στις παρακάτω παραγράφους.

3.4.4 Δομή των Οπτικών Ενισχυτών Ημιαγωγού της CIP

Στο **σχήμα 3.9** φαίνεται η γενική διάταξη ενός οπτικού ενισχυτή ημιαγωγού, στον οποίο οι διαστάσεις της ενεργού περιοχής είναι (μήκος × πλάτος × πάχος) = (L×w×d). Οι τρεις αυτές παράμετροι καθορίζουν τον όγκο της ενεργού περιοχής και στο VPI οι αντίστοιχες ονομασίες είναι LaserChipLength, ActiveRegionWidth και ActiveRegionThickness.



Σχήμα 3.9. Γενική διάταξη ενός οπτικού ενισχυτή ημιαγωγού.

Οι ανακλαστικότητες των τερματικών επιφανειών εισόδου και εξόδου συμβολίζονται με R₁ και R₂. Στις προσομοιώσεις θεωρείται ότι η ανακλαστικότητα είναι η ίδια και για τις δύο τερματικές επιφάνειες και στο VPI είναι οι παράμετροι LeftFacetReflectivity και RightFacetReflectivity.





Για κάποιο ενισχυτή με παράγοντα κέρδους 30 dB, για να μην κάνει ταλαντώσεις το φως μέσα στον ενισχυτή κατά τα πρότυπα των laser θα πρέπει η ανακλαστικότητα των επιφανειών εξόδου να είναι $R < 1.7 \cdot 10^{-4}$. Για το λόγο αυτό σημαντικές προσπάθειες έχουν γίνει για την παραγωγή αντιανακλαστικών επιστρώσεων της τάξης του $\sim 10^{-4}$.

Είναι πολύ συνηθισμένο όμως οι Οπτικοί Ενισχυτές Ημιαγωγού με μεγάλο μήκος (>1.0mm) να έχουν ακόμα μεγαλύτερο κέρδος από 30 dB και να φτάνουν τα 35 dB, οπότε πρέπει η τιμή των αντι-ανακλαστικών επιφανειών να είναι μικρότερη από 10⁻⁵. Η μεθόδους της επίστρωσης δεν είναι δυνατό να επιτύχει από μόνη της αρκετά χαμηλές τιμές ανακλαστικοτήτων με έναν προβλέψιμο και προκαθορισμένο τρόπο. Για τον λόγο αυτό, εναλλακτικές τεχνικές αναπτύχθηκαν για τη μείωση των ανακλάσεων στην ενεργό περιοχή των SOA. Δύο είναι οι κυριότερες από αυτές, που επέδειξαν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η πρώτη μέθοδος αφορά την χρήση τερματικών επιφανειών υπό κλίση ως προς την ενεργό περιοχή του ημιαγωγού, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.10. Μία τέτοια δομή αναφέρεται ως κυματοδηγός με τερματικά άκρα υπό γωνία (angle-facet waveguide) ή κεκλιμένος κυματοδηγός (tilted waveguide). Στις δομές αυτές, η ανακλώμενη ακτίνα διαχωρίζεται από την προσπίπτουσα, ακριβώς επειδή η ανακλαστική επιφάνεια τοποθετείται υπό γωνία ως προς την ενεργό περιοχή του ημιαγωγού. Η δεύτερη μέθοδος αφορά την εισαγωγή μιας διαφανούς περιοχής μεταξύ της ενεργού περιοχής και των ανακλαστικών επιφανειών (σχήμα 3.10). Αυτή η δομή αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως κυματοδηγός αποκρυπτόμενων τερματικών επιφανειών (buried-facet waveguide). Στην περίπτωση αυτή το οπτικό σήμα εισόδου διαχέεται αρχικά στη διαφανή περιοχή, πριν εισέλθει στην ενεργό περιοχή. Αντίστοιχα, το ανακλώμενο σήμα διαχέεται σε ακόμα μεγαλύτερο βαθμό και έτσι ελαχιστοποιείται η ανάδραση μέσα στον μικρό χώρο της ενεργού περιοχής του SOA. Και με τις δύο προαναφερθείσες τεχνικές έχουν επιτευχθεί τιμές ανακλαστικοτήτων της τάξης των ~10⁻⁵. Με τέτοιες χαμηλές τιμές ανακλαστικοτήτων, ελαχιστοποιείται η κυμάτωση του φάσματος απολαβής και καθιστά τη λειτουργία των ενισχυτών περίπου όμοια με αυτή ιδανικών ενισχυτών οδεύοντος κύματος (R=0). Για τις προσομοιώσεις θεωρήθηκε ότι η τιμή της ανακλαστικότητας των δύο τερματικών επιφανειών είναι 10⁻⁶.

Ένα πολύ σημαντικό στάδιο, κατά την συσκευασία του SOA, είναι η αξονική προσαρμογή και η πλήρη σύζευξη της οπτικής ισχύος στον κυματοδηγό του πλινθίου. Στην πράξη, για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται ειδικές εκλεπτυσμένες ίνες, που έχουν φακούς αντιανακλαστικής επένδυσης, γι' αυτό και ονομάζονται φακοποιημένες ίνες (lensed fibers). Αυτή η τεχνική συντελεί στην εισαγωγή >5 dB απωλειών κατά τη σύζευξη του οπτικού σήματος στον κυματοδηγό του πλινθίου. Μια εναλλακτική τεχνική σύζευξης είναι η χρήση ειδικών προσαρμογέων ρυθμού (tapers), οι οποίοι να είναι ολοκληρωμένοι στο ίδιο υπόστρωμα με τον ημιαγωγό [3.37]. Οι προσαρμογείς αυτοί αυξάνουν σταδιακά το μέγεθος του ρυθμού και γίνεται έτσι πιο εύκολη η προσαρμογή απλής μονότροπης ίνας στα άκρα του πλινθίου ενώ μειώνονται και οι ανακλάσεις. Ωστόσο όμως χρειάζονται ειδικές διαδικασίες ανάπτυξης των προσαρμογέων ρυθμών κατά τη διαδικασία ολοκλήρωσης, γεγονός που αυξάνει την πολυπλοκότητα. Λόγο όμως των παραπάνω πλεονεκτημάτων η τεχνική αυτή προτιμάται για τη σύζευξη του φωτός στην ενεργό περιοχή των SOAs σε σχέση με τις φακοποιημένες ίνες.

Τέτοιας κατασκευής είναι και οι SOAs της CIP. Το κεντρικό τους κομμάτι έχει μήκος 600μm και πλάτος 1.2μm. Στα δύο άκρα της κεντρικής αυτής περιοχής υπάρχουν οι προσαρμογείς ρυθμού με μήκος 500 μm έκαστος. Το πλάτος τους είναι ίδιο με αυτό της κεντρικής περιοχής στο ένα άκρο τους και μειώνεται σταδιακά στα 100 nm στα άκρα που καταλήγουν στις δύο τερματικές επιφάνειες. Για λόγους απλότητας στις προσομοιώσεις θεωρείται ότι το πλάτος της ενεργού περιοχής του ενισχυτή είναι ομοιόμορφο κατά τα πρότυπα του **σχήματος 3.9**.

Στο VPI υπάρχει μια παράμετρος (OpticalCouplingEfficiency) η οποία καθορίζει τις απώλειες κατά τη σύζευξη του φωτός από τον κυματοδηγό στην ενεργό περιοχή του ενισχυτή. Στα MZI που έχει παραδώσει η CIP στο Ε.Φ.Ε. η τιμή αυτή διαφέρει όχι μόνο από πύλη σε πύλη αλλά και από το αριστερό (left input) σε σχέση με το δεξιό τερματικό άκρο (right input). Η τιμή αυτή ποικίλει από 1.5 dB (MZI με αριθμό H2691) έως 5 dB (MZI με αριθμό H2690). Επειδή θα ήταν πολύ μεγάλη πολυπλοκότητα να προσομοιωθούν οι απώλειες σύζευξης του κάθε MZI θεωρήθηκε για όλες τις προσομοιώσεις ότι η τιμή αυτή είναι ίση με 3 dB και επομένως ο λόγος σύζευξης είναι ίσος με 0.5.

3.5 Αξιολόγηση του μοντέλου του Οπτικού Ενισχυτή Ημιαγωγού

Η εύρεση της ομάδας των παραμέτρων για τους SOAs της CIP έγινε με στόχο την μακροσκοπική αντιστοιχία μεταξύ αποτελεσμάτων προσομοιώσεων και πειραματικών αποτελεσμάτων. Η μακροσκοπική αντιστοιχία αναφέρεται:

> στις καμπύλες κέρδους που παρουσιάζει ο ενισχυτής για διάφορα ρεύματα έκχυσης

στο χρόνο ανάκαμψης του κέρδους. Ο χρόνος αυτός υπολογίζεται με την τεχνική των μετρήσεων άντλησηςκαταγραφής σε καθορισμένες συνθήκες έκχυσης ρεύματος, ισχύος σήματος συνεχούς κύματος και ισχύος παλμικού σήματος.

3.5.1 Καμπύλες Κέρδους

Για τον πειραματικό υπολογισμό του κέρδους του Οπτικού Ενισχυτή Ημιαγωγού χρησιμοποιήθηκε η πειραματική διάταξη του σχήματος 3.11. Μια δίοδος laser με μήκος κύματος 1549 nm παρείχε σήμα συνεχούς κύματος με σταθερή ισχύ 5mW. Το σήμα αυτό μέσω ενός οπτικού ελεγκτή πόλωσης και ενός οπτικού εξασθενητή εκχεόταν στην είσοδο του SOA. Ο οπτικός ελεγκτής πόλωσης χρησιμοποιήθηκε για την επίτευξη ΤΕ γραμμικής πόλωσης, στην οποία ο SOA παρουσιάζει τον μεγαλύτερο οπτικό παράγοντα σύμπτυξης και επομένως το μεγαλύτερο κέρδος. Ο οπτικός εξασθενητής ρύθμιζε την οπτική ισχύ που εισέρχονταν στον ενισχυτή και στην έξοδο του καταγραφόταν η ισχύς εισόδου. Η ισχύς εξόδου του SOA καταγραφόταν σε έναν οπτικό αναλυτή φάσματος μέσω ενός οπτικού φίλτρου με φασματικό εύρος 0.6nm. Το φίλτρο χρησιμοποιήθηκε για την αποκοπή του θορύβου που παράγει ο ενισχυτής για μικρές ισχύς του σήματος εισόδου. Έτσι μετρήθηκε το καθαρό κέρδους που είναι δυνατό να παρέχει ο SOA για αυτή την περιοχή λειτουργίας. Για την αποφυγή ανακλάσεων που προκαλούν φαινόμενα lasing, στην είσοδο και στην έξοδο του ενισχυτή τοποθετήθηκαν οπτικοί απομονωτές.



Σχήμα 3.11. Πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του κέρδους του SOA.



Σχήμα 3.12. Πειραματικά αποτελέσματα κέρδους και αποτελέσματα προσομοιώσεων του μοντέλου του Οπτικού Ενισχυτή Ημιαγωγού για ρεύμα έκχυσης (a) 100mA, (b) 200mA και (c) 300mA.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του υπολογισμού του κέρδους για ρεύματα έκχυσης 100, 200 και 300mA παρουσιάζονται στο **σχήμα 3.12** όπου παρουσιάζονται επίσης και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Είναι εμφανές ότι για ρεύματα 200 και 300mA υπάρχει πλήρης ταύτιση του κέρδους για όλες τις ισχύς του σήματος εισόδου, ενώ για τα 100mA υπάρχει μόνο μια μικρή απόκλιση της τάξης του 1 dB στην περιοχή ασθενούς σήματος. Η απόκλιση αυτή πάντως είναι ήσσονος σημασίας καθώς στις περισσότερες εφαρμογές οι SOAs οδηγούνται με ρεύματα μεγαλύτερα από 200mA για την επίτευξη των μικρότερων δυνατών χρόνων ανάκαμψης του κέρδους και την μεγιστοποίηση του κέρδους.

3.5.2 Χρονική απόκριση του κέρδους

Η χρονική απόκριση του κέρδους ενός Οπτικού Ενισχυτή Ημιαγωγού ορίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται για να επανακτήσει σε ένα συγκεκριμένο ποσοστό το κέρδος του σε σχέση με αυτό που παρέχει σε σταθερή κατάσταση, όταν εισέλθει στον ενισχυτή ένας οπτικός παλμός. Η μέτρηση του χρόνου αυτού πραγματοποιείται με τη μέθοδο της άντλησηςκαταγραφής και είναι συγκεκριμένος για κάθε συνδυασμό ισχύος σήματος συνεχούς κύματος- παλμικού σήματος.

Η πειραματική υλοποίηση των μετρήσεων άντλησης-καταγραφής απαιτεί ειδική μεθοδολογία και εξοπλισμό που δεν είναι διαθέσιμος στο Ε.Φ.Ε. Αντίθετα τέτοιες μετρήσεις έχει πραγματοποιήσει η CIP στα πλαίσια χαρακτηρισμού των SOA της και για τις παρακάτω συνθήκες:

Σήμα συνεχούς κύματος:

ο Μήκος Κύματος 1550nm

- ο Ισχύς 5.4 dBm
- Σήμα άντλησης:
 - ο Μήκος Κύματος 1537.5nm,
 - ο Χρονικό Εύρος 4.5ps,
 - ο Ρυθμός Επανάληψης 2.5GHz,
 - ο Ισχύς 3dBm.
- Σήμα Καταγραφής:
ο Μήκος Κύματος 1555nm
ο Χρονικό Εύρος 3.4ps,
ο Ρυθμός Επανάληψης 2.5005GHz,
ο Ισχύς -23dBm.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στο **σχήμα 3.13(a)**. Για τις ίδιες ακριβώς συνθήκες μέτρησης τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων απεικονίζονται στο **σχήμα 3.13(b)**.





Το παλμικό σήμα καταγραφής χρησιμοποιείται ως μέσο για την εικονοποίηση των αποτελεσμάτων της επίδρασης του σήματος άντλησης, ενώ το σήμα συνεχούς κύματος χρησιμοποιείται για τον κορεσμό του SOA. Αναλυτικότερη περιγραφή για τις μετρήσεις άντλησης-καταγραφής υπάρχει στο [3.38]. Για ρεύμα έκχυσης 200mA η ανάκαμψη του κέρδους στο 1/e (67%) σύμφωνα με το **σχήμα 3.13(a)** πειραματικά μετρήθηκε στα 19ps ενώ για ρεύμα έκχυσης 300mA στα 16ps. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του **σχήματος 3.13(b)** συμφωνούν απολύτως αφού ο χρόνος απόκρισης του κέρδους στο 1/e της σταθερής κατάστασης μετρήθηκε ίσος με 16ps για 300mA και 20ps για 200mA.

Μια άλλη μέτρηση με την οποία μπορεί κανείς να επιβεβαιώσει τα παραπάνω είναι μετρώντας την χρονική απόκριση ενός συμβολομέτρου Mach Zehnder κατά την μετατροπή μήκους κύματος ενός σήματος από λ_1 σε λ₂. Η μέτρηση αυτή είναι έμμεση ως προς τον υπολογισμό απόκρισης του κέρδους και είναι μικρότερης ακρίβειας σε σχέση με τον χαρακτηρισμό ενός SOA από μετρήσεις άντλησης-καταγραφής. Τέτοιες μετρήσεις όμως μετατροπής μήκους κύματος μπορούν να πραγματοποιηθούν πολύ εύκολα στο Ε.Φ.Ε. και τα αποτελέσματα για ένα από τα MZI της CIP απεικονίζονται στο σχήμα 3.14(b) Н καταγραφή των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκαν με παλμογράφο δειγματοληψίας και φωτοδίοδο με εύρος 50 GHz. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα φασματικό των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στο σχήμα 3.14(a).



Σχήμα 3.14. Έξοδος Mach Zehnder συμβολομέτρου όταν χρησιμοποιείται ως μετατροπέας μήκους κύματος (a) Αποτελέσματα προσομοιώσεων και (b) Πειραματικά αποτελέσματα.

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα της μετατροπής μήκους κύματος ενός σήματος από τα 1555.6nm στα 1549.2nm φαίνεται στο **σχήμα 3.15**. Ως σήμα ελέγχου χρησιμοποιήθηκε μία ψευδοτυχαία ακολουθία (PRBS 2⁷-1), με ρυθμό επανάληψης δυφίων 10 Gb/s. Το χρονικό εύρος των παλμών ήταν 11 ps ενώ η ισχύς κορυφής τους ήταν 12.8 mW

(ενέργεια ανά παλμό 140fJ). Η ισχύς του σήματος συνεχούς κύματος (CW) πάνω στο οποίο καταγράφηκε το παλμικό σήμα ήταν 200 uW. Το μήκος κύματος του παλμικού σήματος ήταν 1555.6nm και του CW σήματος 1549.2nm. Το ρεύμα έκχυσης στους SOAs ήταν 300mA. Με αυτά τα χαρακτηριστικά των σημάτων, ο χρόνος απόκρισης του συμβολομέτρου μετρήθηκε στο 1-1/e (67%) της μέγιστη μεταγωγής CW σήματος στη θύρα μεταγωγής, στα ~45 ps πειραματικά και στις προσομοιώσεις ~43 ps (Σχήμα 3.14). Μικρή απόκλιση παρατηρείται μόνο στην αργή ανάκαμψη του κέρδους κατά την επαναφορά της θερμοδυναμικής ισορροπίας της πυκνότητας των φορέων λόγω της έκχυσης φορέων από την εξωτερική πηγή ρεύματος.



Σχήμα 3.15. Πειραματική διάταξη της μετατροπής μήκους κύματος από τα 1555.6nm στα 1549.2nm.

Από την παραπάνω ανάλυση προέκυψε ότι και τα δύο μακροσκοπικά χαρακτηριστικά που είχαν τεθεί στην αρχή για την εξεύρεση της σωστής ομάδας παραμέτρων για το μοντέλο του Οπτικού Ενισχυτή Ημιαγωγού στο VPI εκπληρούνται περισσότερο από ικανοποιητικά. Τόσο οι καμπύλες κέρδους όσο και ο χρόνος απόκρισης του ημιαγωγού που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις ταιριάζουν με τα πειραματικά δεδομένα για μια ευρεία περιοχή συνθηκών λειτουργίας του ενισχυτή.

3.6 Προσδιορισμός του βέλτιστου σημείου λειτουργίας των 2R SOA-MZI αναγεννητών

Το πρώτο βήμα για την ανάλυση της λειτουργίας των 2R αναγεννητικών διατάξεων βασισμένες σε SOA-MZI, με χρήση του προγράμματος VPI, αφορούσε τον προσδιορισμό του ιδανικού σημείου

1/0

101--1

VPI.

λειτουργίας τους. Το **σχήμα 3.16** δείχνει την διάταξη που υλοποιήθηκε στο VPI.

Σχήμα 3.16. Προσομοιωτική διάταξη των 2R αναγεννητών στο VPI.

Το σχήμα 3.17 απεικονίζει διαγράμματα ματιού για κάθε μία από τις τρείς υπό μελέτη αναγεννητικές συνδεσμολογίες στο σημείο ιδανικής λειτουργίας τους. Ο πίνακας 3.2 δείχνει τις τιμές ισχύος του CW σήματος εισόδου και των σημάτων ελέγχου στο παραπάνω σημείο. Σε όλες τις περιπτώσεις το ρεύμα των SOAs ήταν 300 mA.



Σχήμα 3.17. Διαγράμματα ματιού (a) του σήματος δεδομένων και της εξόδου της (b) κλασσικής συνδεσμολογίας, (c) της συνδεσμολογίας αντίρροπων σημάτων ελέγχου και (d) της διαφορικά πολωμένης συνδεσμολογίας αντίρροπων σημάτων ελέγχου.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν μία μικρή βελτίωση στους χρόνους ανόδου και σβέσης των παλμών εξόδου για το διαφορικά πολωμένο σχήμα, γεγονός που θα γίνει ακόμα πιο εμφανής στα πειραματικά αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν σε επόμενες παραγράφους του κεφαλαίου. Το αποτελέσματα των προσομοιώσεων που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία βρίσκονται εντός ενός χρονικού παραθύρου το οποίο δεν περιλαμβάνει τους πρώτους παλμούς κάθε εκτέλεσης που πραγματοποιεί το πρόγραμμα VPI. Αυτό συμβαίνει γιατί σε εκείνο το χρονικό σημείο οι SOAs δεν βρίσκονται στην σταθερή τους κατάσταση. Ο παλμός που εμφανίζεται στο **σχήμα 3.17(d)** είναι ένας από αυτούς τους πρώτους παλμούς.

Πίνακας 3.2: Ισχύς του CW εισόδου και των σημάτων ελέγχου στο σημείο βέλτιστης λειτουργίας των αναγεννητών

Single CTR	Bidirectional Scheme	Differentially biased
1mW/4 CW (192.5THz)	1mW/4 CW (192.5THz)	2mW/4 CW (192.5THz)
0.9mW/2 CTR (193.25THz)	0,889 mW push/2 (193.25THz)	1.613mW/2 push (193,25THz)
	0,168 mW pull (193.25THz)	0,81mW pull (193,25THz)
		6mW/4 CW (191.4THz)

Το σχήμα 3.18 εμφανίζει χρονικά στιγμιότυπα και μετρήσεις chirp στην έξοδο των τριών SOA-MZI αναγεννητών. Το σχήμα 3.18(a) δείχνει την έξοδο της κλασσικής συνδεσμολογίας με ένα σήμα ελέγχου, το σχήμα 3.28(b) δείχνει την έξοδο του σχήματος αντίρροπων σημάτων ελέγχου ενώ το σχήμα 3.18(c) την έξοδο του διαφορικά πολωμένου σχήματος.



Σχήμα 3.18. Χρονικά στιγμιότυπα και μετρήσεις chirp για (a) την κλασσική συνδεσμολογία, (b) το σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου και (c) το διαφορικά πολωμένο σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου.

Μετά τον προσδιορισμό του βέλτιστου σημείου λειτουργίας των αναγεννητών, εξετάσαμε την ανεκτικότητα των τριών σχημάτων στην χρονική ολίσθηση του σήματος δεδομένων. Χρησιμοποιήσαμε μια ροή

δεδομένων που εμφάνιζε κατά περίπτωση χρονική ολίσθηση της τάξεως των 1, 2, 4 και 7 ps rms ως σήμα ελέγχου στο MZI και πραγματοποιήσαμε μετρήσεις ελέγχου λαθών στην έξοδό του για κάθε αναγεννητική συνδεσμολογία. Το σχήμα 3.19 απεικονίζει διαγράμματα ματιού στην έξοδο κάθε αναγεννητικής συνδεσμολογίας ενώ το σχήμα 3.20 εμφανίζει της καμπύλες BER. Τα SOA-MZIs, μπορούν να πραγματοποιήσουν 2R αναγέννηση σημάτων τα οποία παρουσιάζουν διαμόρφωση πλάτους ή μικρό OSNR όταν αυτά βρίσκονται εντός συγκεκριμένων ορίων. Αν το σήμα δεδομένων έχει υποστεί υποβάθμιση της ποιότητας του πέρα από αυτά τα όρια, τότε ο αναγεννητής δεν μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά. Το σχήμα 3.19 δείχνει ότι μικρές διακυμάνσεις στην ποιότητα του σήματος δεδομένων δεν επηρεάζουν την λειτουργία του αναγεννητή. Επιπλέον, η χρονική ολίσθηση του σήματος εισόδου εμφανίζεται και στην έξοδο του κυκλώματος, γεγονός αναμενόμενο αφού οι 2R αναγεννητές δεν μπορούν να περιορίσουν την χρονική ολίσθηση των σημάτων. Η μείωση στην απαιτούμενη ισχύ στον δέκτη που παρατηρείτε στην καμπύλη BER του διαφορικά πολωμένου σχήματος οφείλεται στην βελτίωση της διαμόρφωσης πλάτους και του OSNR που επιτυγχάνει το σχήμα και όχι σε βελτίωση της χρονικής ολίσθησης.



Σχήμα 3.19. Διαγράμματα ματιού του σήματος εισόδου και της εξόδου των τριών αναγεννητικών σχημάτων για σήμα εισόδου που παρουσιάζει 1, 2, 4 και 7 ps rms χρονική ολίσθηση.

Το **σχήμα 3.20** δείχνει πως μικρές διακυμάνσεις της χρονικής ολίσθησης του σήματος εισόδου δεν επηρεάζουν την απόδοση BER των αναγεννητών. Ακόμα, από τα παραπάνω διαγράμματα διακρίνονται καθαρά τα έντονα αναγεννητικά χαρακτηριστικά του διαφορικά

πολωμένου σχήματος αντίρροπων σημάτων ελέγχου, το οποίο παρουσιάζει μια βελτίωση στην απαιτούμενη ισχύ στον δέκτη της τάξεως των 4 dBm συγκριτικά με το αρχικό σήμα δεδομένων.



Σχήμα 3.20. Μετρήσεις BER για το σήμα εισόδου και την έξοδο των τριών αναγεννητικών σχημάτων για σήμα εισόδου που παρουσιάζει 1, 2, 4 και 7 ps rms χρονική ολίσθηση.

3.7 Βελτίωση της ποιότητας του μεταδιδόμενου σήματος δεδομένων με χρήση 2R αναγεννητών

Για να μελετήσουμε την βελτίωση στα χαρακτηριστικά ενός σήματος δεδομένων μετά την μετάδοσή του όταν αυτό αναγεννηθεί από ένα SOA-MZI, σχεδιάσαμε στο πρόγραμμα VPI το σενάριο που εικονίζεται στο **σχήμα 3.21**.



Σχήμα 3.21. Διάγραμμα ενός οπτικού κόμβου μετάδοσης για την μελέτη της επίδρασης ενός 2R SOA-MZI αναγεννητή στα χαρακτηριστικά ενός σήματος δεδομένων μετά την μετάδοση του.

Η είσοδος του επαναληπτικού βρόγχου μετάδοσης ήταν μια παλμοσειρά NRZ δεδομένων στα 10 Gb/s με λόγο αντίθεσης ίσο με 17 dB και χρονική ολίσθηση rms 1 psec. Ο βρόγχος αποτελείται από 80 km μονής μονορυθμικής ίνας (Single Mode Fiber – SMF) με D=16ps/nm/km και 14,222 km DCF ίνας με D=-90ps/nm/km, η οποία αντισταθμίζει πλήρως την χρωματική διασπορά της SMF. Δύο οπτικοί ενισχυτές ίνας ερβίου (Erbium Doped Fiber Amplifier - EDFA) τοποθετήθηκαν πριν από κάθε καλούμπα SMF και DCF ίνας με σκοπό να αντισταθμίσουν την απώλειες ισχύος της μετάδοσης. Οι ενισχυτές είχαν συντελεστή θορύβου (noise figure) ίσο με 6 dB και το μέγιστο κέρδος τους ήταν 16dB πριν την SMF και 8.5 dB πριν την DCF. Στην έξοδο του βρόγχου τοποθετήθηκε ένας 3 dB συζεύκτης ισχύος, ο οποίος χώριζε το σήμα σε δύο μέρη. Το ένα οδηγούνταν σε ένα δέκτη ενώ το άλλο μέρος του σήματος αναγεννιόταν σε έναν 2R SOA-MZI αναγεννητή πριν καταλήξει και αυτό σε έναν δεύτερο οπτικό δέκτη. Το σχήμα 3.22 δείχνει το παραπάνω κύκλωμα στο περιβάλλον του VPI ενώ στον πίνακα 3.3 φαίνονται οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.

Το **σχήμα 3.23** δείχνει διαγράμματα ματιού για το σήμα δεδομένων στην έξοδο του βρόγχου και κατόπιν 2R αναγέννησής του με χρήση του κλασικού σχήματος (δεύτερη γραμμή), του σχήματος αντίρροπων σημάτων ελέγχου (τρίτη γραμμή) και του διαφορικά πολωμένου σχήματος (τέταρτη γραμμή). Η πρώτη στήλη απεικονίζει το σήμα μετά από δέκα επαναλήψεις στον οπτικό βρόγχο, η δεύτερη στήλη έπειτα από είκοσι και η τρίτη ύστερα από τριάντα επαναλήψεις. Εύκολα μπορεί να διακρίνει κανείς πως το διαφορικά πολωμένο σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου παρουσιάζει καλύτερη επίδοση συγκριτικά με τις άλλες δύο συνδεσμολογίες, έχοντας μειώσει σημαντικά την διαμόρφωση πλάτους της αρχικής παλμοσειράς δεδομένων.



Σχήμα 3.22. Η υπό μελέτη διάταξη στο VPI.

Το σχήμα 3.23 δείχνει ότι η μεγάλη διαμόρφωση πλάτους και η σημαντική μείωση του OSNR του σήματος δεδομένων που παρουσιάζεται έπειτα από 10, 20 και 30 επαναλήψεις του τελευταίου στον οπτικό βρόγχο, οδηγεί σε μετατόπιση των σημείων διασταύρωσης των παλμών προς το επίπεδο του λογικού άσσου. Το παραπάνω συμπέρασμα ισχύει για την κλασσική συνδεσμολογία και την συνδεσμολογία αντίρροπων σημάτων ελέγχου και γίνεται περισσότερο εμφανές στην περίπτωση των τριάντα επαναλήψεων. Το διαφορικά πολωμένο σχήμα αναιρεί μερικώς αυτές τις υποβαθμίσεις της ποιότητας του σήματος ακόμα και στην περίπτωση των 30 επαναλήψεων.

CW	Electrical	SMF	DCF
193.25THz	17dB ER	L=80Km	L=80x(16/96)Km
1mW	25ps rise/fall time 10- 90%	D=16ps/nmKm	D=-90ps/nmKm
	1.5ps rms jitter	Atten=0.2dB	Atten=0.6dB
	7.5ps PtP jitter	D slope=0ps/nmKm^2	D slope=0ps/nmKm^2
		Non linear index =2.6e- 20m^2/W	Non linear inde4e- 20m^2/W

Πίνακας 3.3: Παράμετροι λειτουργίας του οπτικού επαναληπτικού βρόγχου

Effective Are	ea=80e-12 m^2 Effective Area=30e-12 m^2
Gain Edfa b SMF=80x0.2	efore Gain Edfa before 2dB SMF=16,66x0.6dB
NF of EDFA	before SMF=6 NF of EDFA before DCF=6



Σχήμα 3.23. Διαγράμματα ματιού του σήματος δεδομένων στην έξοδο του επαναληπτικού βρόγχου (πρώτη γραμμή) και έπειτα από 2R αναγέννησή του.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη του σχήματος 3.23 είναι σε πλήρη συμφωνία με τα αποτελέσματα BER που ελήφθησαν στην έξοδο του οπτικού βρόγχου και στην έξοδο των τριών αναγεννητικών διατάξεων. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στο σχήμα 3.24.



Σχήμα 3.24. Μετρήσεις ελέγχου λαθών έπειτα από (a) 10, (b) 20 και (c) 30 επαναλήψεις στον οπτικό βρόγχο.

Στο σχήμα 3.24(a) μπορούμε να δούμε ότι στην περίπτωση των 10 επαναλήψεων, το διαφορικά πολωμένο σχήμα εμφανίζει μια εντυπωσιακή μείωση στην απαιτούμενη ισχύ στον δέκτη της τάξεως των 5 dBm, ενώ στις περιπτώσεις του κλασσικού σχήματος και του σχήματος αντίρροπων σημάτων ελέγχου, η μείωση στη απαιτούμενη ισχύ στον δέκτη είναι 2 dBm. Στην περίπτωση των 20 επαναλήψεων, όλες οι συνδεσμολογίες πετυχαίνουν μείωση της απαιτούμενης ισχύος στον δέκτη σε σχέση με σήμα δεδομένων στη έξοδο του βρόγχου, με το διαφορικά πολωμένο σχήμα να πετυχαίνει την μεγαλύτερη μείωση που φτάνει τα 2 dB, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.24(b). Το σχήμα 3.24(c) δείχνει καμπύλες BER έπειτα από τριάντα επαναλήψεις στον οπτικό βρόγχο. Η αναγέννηση του σήματος δεδομένων έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της απαιτούμενης ισχύος στον δέκτη κατά 1 dB για το κλασσικό σχήμα και το σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου και κατά 2 dB για το διαφορικά πολωμένο σχήμα. Σε όλες τις περιπτώσεις το διαφορικά πολωμένο σχήμα εμφάνισε καλύτερη επίδοση σε σχέση με τις άλλες δύο συνδεσμολογίες, οι οποίες παρουσίασαν παρόμοια συμπεριφορά.

3.8 Μετάδοση του σήματος δεδομένων μετά την 2R αμιγώς οπτική αναγέννησή του

Στην προηγούμενη παράγραφο μελετήσαμε την επίδοση τριών συνδεσμολογιών 2R αναγέννησης βασισμένες σε SOA-MZI για διάφορα σήματα δεδομένων. Σε αυτή την παράγραφο επεκτείνουμε την προηγούμενη μελέτη, προσθέτοντας ένα δεύτερο οπτικό βρόγχο μετά τον αναγεννητή με σκοπό τον προσδιορισμό των πλεονεκτημάτων που συνοδεύουν την αναγέννηση του σήματος κατά την μετάδοση του. Ο δεύτερος οπτικός βρόγχος έχει τις ίδιες παραμέτρους με τον πρώτο (πίνακας 3.3) και εικονίζεται στο σχήμα 3.25.

Σε όλα τα σενάρια που μελετήσαμε το μήκος μετάδοσης του δεύτερου βρόγχου ήταν το ίδιο με εκείνου πριν την αναγέννηση. Μετρήσεις BER πραγματοποιήθηκαν στην έξοδο του πρώτου βρόγχου, μετά τον 2R αναγεννητή και στην έξοδο του δεύτερου βρόγχου για κάθε αναγεννητικό σχήμα. Ακόμα, επιπλέον μετρήσεις BER πραγματοποιήθηκαν για την περίπτωση μετάδοσης μέσω του πρώτου και του δεύτερου βρόγχου χωρίς την ενδιάμεση παρουσία αναγεννητή.



Σχήμα 3.25. Δεύτερος επαναληπτικός οπτικός βρόγχος μετά τον SOA-MZI αναγεννητή.

Σενάριο πρώτο: 10 επαναλήψεις στους βρόγχους 1 και 2

Το σχήμα 3.26 δείχνει διαγράμματα ματιού του αρχικού σήματος δεδομένων, της εξόδου του πρώτου βρόγχου, του αναγεννημένου σήματος, της εξόδου του δευτέρου βρόγχου και του σήματος στην έξοδο του δεύτερου βρόγχου χωρίς να έχει μεσολαβήσει αναγέννηση μεταξύ πρώτου και δεύτερου βρόγχου (Direct Out στο σχήμα 3.26). Το σχήμα 3.27 δείχνει διαγράμματα ελέγχου λαθών (BERs) που ελήφθησαν στην έξοδο του πρώτου βρόγχου, στην έξοδο του δεύτερου βρόγχου μετά την αναγέννηση του σήματος με χρήση κάθε μιας από τις τρείς υπό μελέτη συνδεσμολογίες και στην έξοδο του δεύτερου βρόγχου χωρίς να έχει μεσολαβήσει αναγέννηση μεταξύ πρώτου και δεύτερου βρόγχου. Το διάγραμμα δείχνει ότι η ποιότητα του σήματος δεδομένων στην έξοδο του δεύτερου βρόγχου είναι καλύτερη σε σχέση με εκείνη στην έξοδο του πρώτου όταν γίνεται χρήση αναγέννησης. Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις δείχνουν μια μείωση της απαιτούμενης ισχύος στον δέκτη της τάξεως των 1,6 dBm με χρήση του κλασσικού σχήματος (SC) και του σχήματος αντίρροπων σημάτων ελέγχου (Bi. Sc.) και σχεδόν 3 dBm στην περίπτωση του διαφορικά πολωμένου σχήματος αντίρροπων σημάτων ελέγχου (Dif. Bi.). Στην περίπτωση που δεν γίνει χρήση αναγεννητή μεταξύ πρώτου και δεύτερου βρόγχου, υπάρχει μια επιπλέον απαίτηση ισχύος της τάξεως του 1 dB στον δέκτη για το σήμα εξόδου του δεύτερου βρόγχου συγκριτικά με την έξοδο του πρώτου.



Σχήμα 3.26. Διαγράμματα ματιού του αρχικού σήματος δεδομένων, της εξόδου του πρώτου βρόγχου, του αναγεννημένου σήματος, της εξόδου του δευτέρου βρόγχου και του σήματος στην έξοδο του δεύτερου βρόγχου χωρίς αναγέννηση.



Σχήμα 3.27. Μετρήσεις ελέγχου λαθών.

Σενάριο δεύτερο: 20 επαναλήψεις στους βρόγχους 1 και 2

Το **σχήμα 3.28** δείχνει διαγράμματα ματιού του αρχικού σήματος δεδομένων, της εξόδου του πρώτου βρόγχου, του αναγεννημένου σήματος, της εξόδου του δευτέρου βρόγχου και του σήματος στην έξοδο του

δεύτερου βρόγχου χωρίς να έχει μεσολαβήσει αναγέννηση μεταξύ πρώτου και δεύτερου βρόγχου.



Σχήμα 3.28. Διαγράμματα ματιού του αρχικού σήματος δεδομένων, της εξόδου του πρώτου βρόγχου, του αναγεννημένου σήματος, της εξόδου του δευτέρου βρόγχου και του σήματος στην έξοδο του δεύτερου βρόγχου χωρίς αναγέννηση.

Το **σχήμα 3.29** δείχνει διαγράμματα ελέγχου λαθών (BERs) που ελήφθησαν στην έξοδο του πρώτου βρόγχου, στην έξοδο του δεύτερου βρόγχου μετά την αναγέννηση του σήματος με χρήση κάθε μιας από τις τρείς υπό μελέτη συνδεσμολογίες και στην έξοδο του δεύτερου βρόγχου χωρίς να έχει μεσολαβήσει αναγέννηση μεταξύ πρώτου και δεύτερου βρόγχου. Το διάγραμμα δείχνει ότι η ποιότητα του σήματος δεδομένων στην έξοδο του δεύτερου βρόγχου είναι καλύτερη σε σχέση με εκείνη στην έξοδο του πρώτου όταν γίνεται χρήση αναγέννησης. Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις δείχνουν μια μείωση της απαιτούμενης ισχύος στον δέκτη της τάξεως των 1,3 dBm με χρήση του κλασσικού σχήματος (SC) και του σχήματος αντίρροπων σημάτων ελέγχου (Bi. Sc.) και σχεδόν 3,1 dBm στην ελέγχου (Dif. Bi.). Στην περίπτωση που δεν γίνει χρήση αναγεννητή μεταξύ πρώτου και δεύτερου βρόγχου, υπάρχει μια επιπλέον απαίτηση ισχύος της τάξεως του 1 dB στον δέκτη για το σήμα εξόδου του δεύτερου βρόγχου

συγκριτικά με την έξοδο του πρώτου και επιπλέον εμφανίζεται ένα κατώφλι λαθών στην τιμή 10⁻¹¹.



Σχήμα 3.29. Μετρήσεις ελέγχου λαθών.

Σενάριο τρίτο: 30 επαναλήψεις στους βρόγχους 1 και 2

Το **σχήμα 3.30** δείχνει διαγράμματα ματιού του αρχικού σήματος δεδομένων, της εξόδου του πρώτου βρόγχου, του αναγεννημένου σήματος, της εξόδου του δευτέρου βρόγχου και του σήματος στην έξοδο του δεύτερου βρόγχου χωρίς να έχει μεσολαβήσει αναγέννηση μεταξύ πρώτου και δεύτερου βρόγχου.

Το **σχήμα 3.31** δείχνει διαγράμματα ελέγχου λαθών (BERs) που ελήφθησαν στην έξοδο του πρώτου βρόγχου, στην έξοδο του δεύτερου βρόγχου μετά την αναγέννηση του σήματος με χρήση κάθε μιας από τις τρείς υπό μελέτη συνδεσμολογίες και στην έξοδο του δεύτερου βρόγχου χωρίς να έχει μεσολαβήσει αναγέννηση μεταξύ πρώτου και δεύτερου βρόγχου. Το διάγραμμα δείχνει ότι η ποιότητα του σήματος δεδομένων στην έξοδο του δεύτερου βρόγχου είναι καλύτερη σε σχέση με εκείνη στην έξοδο του πρώτου όταν γίνεται χρήση αναγέννησης (περίπου 1.5 dB μείωση της απαιτούμενης ισχύς στον δέκτη). Η βελτίωση αυτή γίνεται ελάχιστη στην τιμή -15 dBm για την ισχύ στον δέκτη, όπου εμφανίζεται ένα κατώφλι λαθών στην τιμή 10⁻¹⁰. Η επίδοση των τριών αναγεννητικών σχημάτων σε αυτό το σενάριο είναι παρόμοια. Οι μετρήσεις φανερώνουν μια μείωση της τάξεως των 5 dBm στην απαιτούμενη ισχύ στον δέκτη για το σήμα στην ίξοδο του δεύτερου βρόγχου με την χρήση αναγεννητή, συγκριτικά με την ίδια έξοδο στην περίπτωση απουσίας του τελευταίου. Επιπλέον, στην

περίπτωση που δεν γίνει χρήση αναγεννητή μεταξύ πρώτου και δεύτερου βρόγχου, το σήμα εξόδου του δεύτερου βρόγχου εμφανίζει ένα κατώφλι λαθών στην τιμή 10⁻⁵.



Σχήμα 3.30. Διαγράμματα ματιού του αρχικού σήματος δεδομένων, της εξόδου του πρώτου βρόγχου, του αναγεννημένου σήματος, της εξόδου του δευτέρου βρόγχου και του σήματος στην έξοδο του δεύτερου βρόγχου χωρίς αναγέννηση.



Σχήμα 3.31. Μετρήσεις ελέγχου λαθών.

3.9 Προσδιορισμός της επίδοσης των SOA-MZI 2R αναγεννητών στα 40 Gb/s

Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης που μπορεί να υποστηρίξει ένας 2R αναγεννητής βασισμένος σε συμβολόμετρο MZI καθορίζεται κατά κύριο λόγο από τον χρόνο ανάκαμψης των SOAs, δηλαδή τον χρόνο που απαιτείται ώστε το κέρδος του SOA να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση έπειτα από την διέλευση ενός παλμών από αυτόν. Οι εμπορικά διαθέσιμοι αμιγώς οπτικοί αναγεννητές που χρησιμοποιήσαμε στο μοντέλο του VPI που αναπτύξαμε είχαν χρόνο ανάκαμψης 75 ps ο οποίος είναι αρκετός για την λειτουργία του κυκλώματος σε ρυθμό 10 Gb/s και για NRZ σήματα, αλλά δεν επιτρέπει την ικανοποιητική λειτουργία του αναγεννητή σε ταχύτητες μεγαλύτερες ή ίσες από τα 40 Gb/s. Τα ανεπιθύμητα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο σήμα εξόδου σε αυτούς τους ρυθμούς λειτουργίας και όπως είπαμε οφείλονται στον αργό χρόνο ανάκαμψης του SOA, μπορούν να αντισταθμιστούν μερικώς με την χρήση ενός ισχυρού CW σήματος ή της τεχνικής «push-pull» αν πρόκειται για RZ σήματα [3.24].

Το **σχήμα 3.32** δείχνει διαγράμματα ματιού του σήματος εξόδου των τριών αναγεννητικών σχημάτων στα 40 Gb/s για λειτουργία τους ως μετατροπείς μήκους κύματος. Όπως μπορούμε να διακρίνουμε, ο αργός χρόνος ανάκαμψης παίζει σημαντικό ρόλο στο σχήμα των παλμών και ειδικά στους χρόνους ανόδου και σβέσης τους. Παρόλα αυτά, μπορούμε να δούμε στο **σχήμα 3.32(d)** ότι η χρήση αντίρροπων σημάτων ελέγχου σε συνδυασμό με το επιπλέον CW σήμα στο διαφορικά πολωμένο σχήμα, αντισταθμίζουν τα ανεπιθύμητα φαινόμενα της αργής ανάκαμψης επιτυγχάνοντας ένα σημαντικά καλύτερο σε μορφή παλμό εξόδου συγκριτικά με τις άλλες δύο υλοποιήσεις. Σε όλες τις περιπτώσεις το ρεύμα των SOAs ήταν ρυθμισμένο στα 300 mA.



Σχήμα 3.32. Διαγράμματα ματιού (α)του σήματος δεδομένων στα 40 Gb/s και της εξόδου της (b) κλασσικής συνδεσμολογίας, (c) της συνδεσμολογίας αντίρροπων σημάτων ελέγχου και (d) της διαφορικά πολωμένης συνδεσμολογίας αντίρροπων σημάτων ελέγχου.

Το **σχήμα 3.33** δείχνει τις μετρήσεις BER που ελήφθησαν για το σήμα δεδομένων και τις εξόδους των αναγεννητικών διατάξεων, οι οποίες λειτουργούν σαν μετατροπείς μήκους κύματος. Στο σχήμα φαίνεται ότι και για τις τρείς συνδεσμολογίες υπάρχει μια αύξηση στην απαιτούμενη ισχύ στον δέκτη συγκριτικά με το σήμα εισόδου, η οποία κυμαίνεται στο 1 dBm για το διαφορικά πολωμένο σχήμα και στα 2 dBm για την κλασσική συνδεσμολογία και το σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου.



Σχήμα 3.33. Μετρήσεις ελέγχου λαθών.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφέρουμε ότι τα συμβολόμετρα SOA-MZIs μπορούν να υποστηρίξουν NRZ σήματα ρυθμού μετάδοσης έως 40 Gb/s χρησιμοποιώντας SOAs με συντομότερο χρόνο ανάκαμψης, ο οποίοι έγιναν πολύ πρόσφατα εμπορικά διαθέσιμοι [3.25]. Η επίδοση των αναγεννητών με του «γρήγορους» SOAs στα 40 Gb/s περιμένουμε να είναι παρόμοια με εκείνη που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες παραγράφους του κεφαλαίου με τους «αργούς» SOAs στα 10 Gb/s. Η χρήση όμως των καινούργιων SOAs στα συμβολόμετρα MZI αναμένουμε ότι θα αυξήσει σημαντικά και το κόστος των τελευταίων.

3.10 Πειραματική μελέτη της επίδοσης των τριών 2R αναγεννητικών σχημάτων

Η πειραματική μελέτη της επίδοσης του προτεινόμενου 2R αναγεννητικού σχήματος, καθώς και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις άλλες δύο υπό μελέτη συνδεσμολογίες, πραγματοποιήθηκε με την χρήση

διαφόρων τάξεων NRZ PRBS ακολουθιών δεδομένων στα 10 Gb/s. Το πειραματικό κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο **σχήμα 3.34** και αποτελείται από την οπτική πηγή δεδομένων και ένα υβριδικά ολοκληρωμένο MZI της εταιρίας CIP [3.25].



Σχήμα 3.34. Πειραματική διάταξη του μετατροπέα μήκους κύματος.

Για την παραγωγή των ακολουθιών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ένα συνεχές κύμα (CW) στα 1561 nm το οποίο εισήλθε σε έναν Ti: LiNbO3 ήλεκτρο-οπτικό διαμορφωτή. Μια ηλεκτρική γεννήτρια δεδομένων τροφοδοτούσε τον διαμορφωτή με 10 Gb/s NRZ δεδομένα, με αποτέλεσμα στην έξοδο του τελευταίου να εμφανίζονται οπτικές PRBS ακολουθίες NRZ δεδομένων. Η οπτική ακολουθία με την σειρά της εισερχόταν σ' ένα ελεγχόμενο εξασθενιτή ισχύος και έπειτα σε έναν EDFA με σκοπό την υποβάθμιση της ποιότητάς της όσον αφορά το OSNR, πριν εισέλθει στο MZI ως σήμα ελέγχου. Κατάλληλη τροποποίηση μπορούσε να υπεισέλθει και στον λόγο σβέσης της οπτικής ακολουθίας με την χρήση ενός ελεγκτή πόλωσης πριν από τον ήλεκτρο-οπτικό διαμορφωτή. Ένα CW σήμα στα 1558 nm χρησιμοποιήθηκε ως σήμα εισόδου στον διακόπτη ενώ το μήκος κύματος του CW λέιζερ που χρησιμοποιήθηκε ως επιπλέον εξωτερικό σήμα στο διαφορικά πολωμένο σχήμα ήταν στα 1556 nm. Το μήκος των SOAs του MZI που χρησιμοποιήθηκε ήταν 1,6 μm, είχαν κέρδος ασθενούς σήματος 28 dB και 25 ps 1/e χρόνο ανάκαμψης του κέρδους τους στην περιοχή του κόρου. Οι ισχύς που χρησιμοποιήθηκε για κάθε υπό μελέτη συνδεσμολογία φαίνεται στον πίνακα 3.4.

WC scheme	Input CW @1558nm (dBm)	Co- propagating CTR (dBm)	Counter- propagating CTR (dBm)	external CW@1556 nm (dBm)
Standard	-0.36	-1		
Bid. push-pull	-6.38	-5	-9	
Diff. biased	-1.25	-9.1	-0.46	-1.6

Πίνακας 3.4: Οπτική ισχύς για τα τρία αναγεννητικά σχήματα.

Το **σχήμα 3.35** δείχνει διαγράμματα ματιού του υποβαθμισμένης ποιότητας σήμα εισόδου και των σημάτων εξόδου των τριών υπό μελέτη συνδεσμολογιών για σήμα δεδομένων μια 2⁷-1 PRBS ακολουθία. Οι μετρήσεις OSNR και λόγου σβέσης των σημάτων που πραγματοποιήθηκαν, φανερώνουν μία βελτίωση της ποιότητα του σήματος δεδομένων στην έξοδο του αναγεννητή για όλα τα υπό μελέτη σχήματα. Η βελτίωση αυτή γίνεται πιο αισθητή στην περίπτωση του διαφορικά πολωμένου σχήματος. Συγκεκριμένα, το υποβαθμισμένο σήμα εισόδου εμφάνιζε ένα OSNR της τάξεως των 11,2 dB και ένα λόγο σβέσης ίσο με 10,7 dB, όπως φαίνεται στο **σχήμα 3.35(a)**. Οι αντίστοιχες τιμές για το κλασσικό σχήμα ήταν 15 dB και 11,1 dB (**σχήμα 3.35(b**)), για το σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου 16,21 dB και 11,67 dB (**σχήμα 3.35(c**)), ενώ για το διαφορικά πολωμένο σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου 19,16 dB και 12,53 dB αντίστοιχα (**σχήμα 3.35(d**).



Σχήμα 3.35. Διαγράμματα ματιού (a)του υποβαθμισμένου σήματος δεδομένων και της εξόδου της (b) κλασσικής συνδεσμολογίας, (c) της συνδεσμολογίας αντίρροπων σημάτων ελέγχου και (d) της διαφορικά πολωμένης συνδεσμολογίας αντίρροπων σημάτων ελέγχου.



Σχήμα 3.36. Μετρήσεις ελέγχου λαθών.

То 3.36 μετρήσεις σχήμα δείχνει ελέγχου λαθών που πραγματοποιήθηκαν για διαφόρων τάξεων PRBS και για τα τρία υπό μελέτη σχήματα. Η μεγαλύτερη μείωση στην απαιτούμενη ισχύ στον δέκτη μεταξύ των τριών συνδεσμολογιών παρατηρήθηκε στην έξοδο του διαφορικά πολωμένου σχήματος, για όλες τις περιπτώσεις μου μελετήσαμε. Η τιμή της μείωσης κυμαινόταν από 0.5 dBm στην περίπτωση της 2³¹-1 PRBS έως 1.2 dBm στην περίπτωση της 2⁷-1, συγκριτικά πάντα με το υποβαθμισμένο σήμα εισόδου. Θα πρέπει σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε πώς στην περίπτωση της 2³¹-1 PRBS ακολουθίας, τόσο το κλασσικό σχήμα όσο και το σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου εμφάνισαν αύξηση στην απαιτούμενη ισχύ στον δέκτη, επιβεβαιώνοντας έτσι τα έντονα αναγεννητικά χαρακτηριστικά της διαφορικά πολωμένης συνδεσμολογίας.

3.11 Μελέτη της δια-συνδεσιμότητας των 2R SOA-MZI μετατροπέων μήκους κύματος

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηρίστηκα ενός 2R αναγεννητή είναι η δια-συνδεσιμότητα του. Δυστυχώς, οι απλοί μετατροπείς μήκους κύματος που παρουσιάζουν αναγεννητικές δυνατότητες έχουν δείξει ότι διαθέτουν περιορισμένες δυνατότητες διασύνδεσης, περιορίζοντας με αυτό τον τρόπο την χρήση τους σε υψίρρυθμες γραμμές μετάδοσης [3.39]. Δεδομένης όμως της σημαντικότητας της μετατροπής μήκους κύματος και την σχετική απλότητα των 2R μετατροπέων μήκους κύματος βασισμένους σε SOA-MZI, σημαντική προσπάθεια καταβάλλεται για την βελτίωση των δυνατοτήτων των τελευταίων όσον αφορά την δια-συνδεσιμότητά τους. Η επίτευξη αυτού του στόχου θα επιφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στην μετάδοση των δεδομένων μιας και θα επιτρέψει την διαφάνεια στον τύπο την πληροφορίας, δεδομένου ότι τα SOA-MZI λειτουργούν αμιγώς οπτικά, προσφέροντας επιλεκτική αναγέννηση και ταχύτατη επίλυση πιθανόν συγκρούσεων κατά την δρομολόγηση (π.χ. με χρήση δυναμικής δρομολόγησης μηκών κύματος).

Σε αυτή την παράγραφο, θα εξετάσουμε πειραματικά τις δυνατότητες δια-συνδεσιμότητας του νέου 2R αναγεννητικού σχήματος που αναπτύχθηκε σε αυτή την διατριβή και θα συγκρίνουμε την επίδοσή του με τις άλλες δύο συνδεσμολογίες που μελετήσαμε σε αυτό το κεφάλαιο, την κλασσική συνδεσμολογία και το σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου [3.1]. Η πειραματική ανάλυση των τριών συνδεσμολογιών πραγματοποιήθηκε με την χρήση ενός οπτικού επαναληπτικού βρόγχου μήκους 160 km, οποίος και σχεδιάστηκε αποκλειστικά για τις ανάγκες της μελέτης μας.

Το **σχήμα 3.37** δείχνει την πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη της δια-συνδεσιμότητας των τριών αναγεννητικών σχημάτων. Για την παραγωγή του σήματος δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ένα CW λέιζερ στα 1556 nm η έξοδος του οποίου τροφοδοτήθηκε σε έναν Ti:LiNbO₃ ήλεκτρο-οπτικό διαμορφωτή. Μια ηλεκτρική γεννήτρια δεδομένων τροφοδοτούσε τον διαμορφωτή με 10 Gb/s NRZ δεδομένα, με αποτέλεσμα στην έξοδο του τελευταίου να εμφανίζεται μια PRBS ακολουθία NRZ δεδομένων τάξεως 2³¹-1. Ο επαναληπτικός βρόγχος αποτελούταν από δύο καλούμπες SMF ίνας μήκους 80 km η οποίες ακολουθούνταν από ενισχυτές ερβίου και κατάλληλου μήκους DCF ίνες, -1360 ps/nm and -1190 ps/nm, για την αντιστάθμιση των απωλειών ισχύος και της διασποράς αντίστοιχα.



Σχήμα 3.37. Πειραματική διάταξη.

Τα επίπεδα ισχύος του σήματος εισόδου στις δύο SMF και DCF ίνες ήταν 3.2 dBm και -4 dBm αντίστοιχα. Δύο SOA-MZI μετατροπείς μήκους κύματος χρησιμοποιήθηκαν για κάθε πέρασμα του σήματος από τον βρόγχο, ένας για την μετατροπή του σήματος από 1556 nm σε 1551 nm μετά την μετάδοση από την πρώτη SMF καλούμπα και ένας για την μετατροπή του 1551 nm μήκους κύματος στο αρχικό των 1556 nm. Οι SOAs και των δύο συμβολόμετρων τροφοδοτούνταν με 300 mA ρεύματος και απαιτούσαν 1.7 dBm CW σήματος στην είσοδό τους. Οι ισχύεις των σημάτων ελέγχου ήταν 4 dBm για το κλασσικό σχήμα, 2 και -1.5 dBm για το σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου και 2 και -0.5 dBm για τα σήματα ελέγχου του διαφορικά πολωμένου σχήματος. Ακόμα, η ισχύς του επιπλέον CW σήματος στο διαφορικά πολωμένο σχήμα ήταν 4 dBm και το σήμα αυτό βρισκόταν στα 1560 nm. Σε όλες τις υπό μελέτη περιπτώσεις, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ρυθμίζοντας αρχικά την πόλωση του σήματος δεδομένων κατά την είσοδο και την έξοδό του από τον βρόγχο και χωρίς να ελέγχουμε την πόλωση του σήματος δεδομένων των 2R αναγεννητικών διατάξεων.

Στο σχήμα 3.38 απεικονίζεται η αλλαγή στα διαγράμματα ματιού του σήματος δεδομένων μετά τις διαδοχικές διελεύσεις του από τον επαναληπτικό βρόγχου για κάθε ένα από τα τρία υπό μελέτη σχήματα. Ουμίζουμε και πάλι πως κάθε διέλευση του σήματος από τον βρόγχο αντιστοιχεί σε δύο διαδοχικές διελεύσεις του από SOA-MZI αναγεννητές. Το σχήμα 3.38(a) δείχνει το σήμα στη έξοδο του κλασσικού σχήματος που γίνεται χρήση μόνο ενός σήματος ελέγχου. Στο σχήμα αυτό παρατηρούμε ότι το διάγραμμα ματιού του σήματος δεδομένων εμφανίζεται τελείως κλειστό μόλις στην δεύτερη διέλευση του σήματος κύματος, λόγω της ταχύτητα αυξητικής χρονικής ολίσθησης και διακύμανσης πλάτους. Η επίδοση του σχήματος αντίρροπων σημάτων ελέγχου φαίνεται στο **σχήμα 3.38(b)**, όπου παρατηρούμε μια σημαντική βελτίωση καθώς η χρήση του δεύτερου σήματος ελέγχου επιβραδύνει την συγκέντρωση χρονικής ολίσθησης και διακύμανσης πλάτους. Με χρήση λοιπόν αυτού του σχήματος παρατηρούμε ότι είναι δυνατή η επίτευξη δύο επαναλήψεων στον βρόγχο που αντιστοιχεί σε τέσσερα διαδοχικά στάδια μετατροπής μήκους κύματος. Τέλος, το σχήμα **3.38(c)** δείχνει την επίδοση του νέου διαφορικά πολωμένου σχήματος. Από το σχήμα συμπεραίνουμε ότι είναι εφικτή η επίτευξη τεσσάρων επαναλήψεων στον βρόγχο το οποίο αντιστοιχεί σε οκτώ διαδοχικά στάδια μετατροπής μήκους κύματος.



Σχήμα 3.38. Διαγράμματα ματιού στη έξοδο του βρόγχου για (a) την κλασσική συνδεσμολογία, (c) την συνδεσμολογία αντίρροπων σημάτων ελέγχου και (d) την διαφορικά πολωμένη συνδεσμολογία αντίρροπων σημάτων ελέγχου.

Αξίζει να τονίσουμε σε αυτό το σημείο πως η χρονική ολίσθηση ενός σήματος δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί από ένα 2R αναγεννητή. Συγκεκριμένα, εάν δεν υπήρχε κανένα συμβολόμετρο MZI μέσα στον βρόγχο, η επίδραση της χρονικής ολίσθησης στο σήμα δεδομένων θα γινόταν εμφανής μόνο μετά από έναν σημαντικά μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων από αυτών που παρουσιάζεται στο **σχήμα 3.38**. Οι αναγεννητές που βασίζονται σε SOA-MZI τείνουν να προσθέτουν χρονική ολίσθηση στο σήμα δεδομένων, το ποσοστό της οποίας εξαρτάται από το σχήμα που χρησιμοποιείται (η διακύμανση πλάτους στην είσοδο οδηγεί σε χρονική ολίσθηση στην έξοδο). Αυτή η επιπλέον χρονική ολίσθηση είναι σχετικά μικρή στην περίπτωση του διαφορικά πολωμένου σχήματος και αυτός είναι ένας από τους βασικούς λόγους της αυξημένης δυνατότητας δια-συνδεσιμότητας που παρουσιάζει.



Σχήμα 3.39. Μετρήσεις ελέγχου λαθών.

Τα σχήματα 3.39(a), (b) και (c) δείχνουν μετρήσεις ρυθμού λαθών σε σχέση με την ισχύ του σήματος εισόδου στον δέκτη για το κλασσικό σχήμα, το σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου και το διαφορικά πολωμένο σχήμα αντίστοιχα. Λειτουργία χωρίς λάθη επετεύχθη για το διαφορικά πολωμένο σχήμα ακόμα και μετά από οκτώ διαδοχικά στάδια μετατροπής μήκους κύματος. Ο αριθμός αυτός γίνεται 2 και 4 για την κλασσική συνδεσμολογία και το σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου αντίστοιχα. Το σχήμα 3.39(d) δείχνει την υποβάθμιση του BER για τα τρία υπό μελέτη σχήματα προς των συνολικό αριθμό διαδοχικών σταδίων μετατροπής μήκους κύματος. Ένα BER της τάξεως του 10⁻⁸ μετρήθηκε έπειτα από δέκα διαδοχικές μετατροπές μήκους κύματος με χρήση του διαφορικά πολωμένου σχήματος, ενώ αντίστοιχα ένα κατώφλι λαθών παρουσιάστηκε έπειτα από τέσσερις και έξι διαδοχικές μετατροπές μήκους κύματος για την κλασσική συνδεσμολογία και το σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου αντίστοιχα.

Οι αναγεννητές βασισμένοι σε SOA-MZI πραγματοποιούν 2R αναγέννηση σε σήματα τα οποία παρουσιάζουν υποβάθμιση στην ποιότητα τους εντός κάποιων ορίων. Όταν η υποβάθμιση της ποιότητας του σήματος είναι πέρα από αυτά τα όρια, ο αναγεννητής δεν είναι σε θέση να

λειτουργήσει το ίδιο αποδοτικά. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος, στο **σχήμα 3.39(d)** παρατηρούμε μία απότομη αύξηση του ρυθμού λαθών στο διαφορικά πολωμένο σχήμα έπειτα από 8 διαδοχικές μετατροπές μήκους κύματος.

3.12 Συμπεράσματα

Από την μελέτη των 2R αναγεννητικών συνδεσμολογιών που προηγήθηκε, μπορούμε εύκολα να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι η νέα συνδεσμολογία που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής παρουσιάζει αισθητά καλύτερη επίδοση σε σχέση με προηγούμενες υλοποιήσεις. Το νέο σχήμα, που ονομάζεται διαφορικά πολωμένο σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου, παρουσίασε μικρές μεταβολές στην λειτουργία του όταν δοκιμάστηκε σε PRBS ακολουθίες δεδομένων διαφορετικής τάξης και έδειξε ότι μπορεί να ανταπεξέλθει και σε υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων από τα 10 Gb/s. Συγκριτικά, η επίδοση των υπολοίπων συνδεσμολογιών ήταν σαφώς κατώτερη. Εκεί όμως που το νέο σχήμα διαφοροποιείται αισθητά από τον ανταγωνισμό, είναι στον τομέα της δια-συνδεσιμότητας. Σε αυτή την κρίσιμη λειτουργία, αν και οι άλλες δυο υπό μελέτη συνδεσμολογίες δεν καταφέρνουν διατηρήσουν την ποιότητα του σήματος δεδομένων όταν αυτό διέρχονταν διαδοχικά από αυτές, με την χρήση του διαφορικά πολωμένου σχήματος επιτυγχάνουμε οκτώ διαδοχικές μετατροπές μήκους κύματος, αριθμό ρεκόρ για τα έως τώρα δεδομένα στον χώρο των 2R αναγεννητών ημιαγωγού.

Αναφορές

- [3.1] M. Hattori, K.Nishimura, R. Inohara, and M. Usami, "Bidirectional Data Injection Operation of Hybrid Integrated SOA–MZI All-Optical Wavelength Converter", *IEE/OSA J. Light. Tech.*, 25, 512-519 (2007).
- [3.2] D. Apostolopoulos, K. Vyrsokinos, P. Zakynthinos, N. Pleros and H. Avramopoulos, "An SOA-MZI NRZ Wavelength Conversion Scheme with Enhanced 2R Regeneration Characteristics", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 21, No 19, pp. 1363-1365, Oct. 2009.
- [3.3] D. Apostolopoulos, D. Klonidis, P. Zakynthinos, K. Vyrsokinos, N. Pleros, I. Tomkos and H. Avramopoulos, "Cascadability Performance Evaluation of a New NRZ SOA-MZI Wavelength Converter", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 21, No. 18, pp. 1341-1343, Sept. 2009.
- [3.4] Available Online: <u>http://www.avvionetworks.com/model_A1020.htm</u>.
- [3.5] Available Online: <u>http://www.infinera.com</u>.
- [3.6] D. Cotter, R. J. Manning, K. J. Blow, A. D. Ellis, A. E. Kelly, D. Nesset, I. D. Phillips, A. J. Poustie, D. C. Rogers, "Nonlinear Optics for High-Speed Digital Information Processing", Science, 286, p.1433 (1999).
- [3.7] A. Poustie, "Semiconductor Devices for All-optical Signal Processing", ECOC 2005, paper We3.5.1, Glasgow (2005).
- [3.8] Available Online: <u>http://www.wordsun.com/cip2.html</u>.
- [3.9] G. Maxwell, A. Poustie, C. Ford, M. Harlow, P. Townley, M. Nield, I. Lealman, S. Oliver, L. Rivers, R. Waller, "Hybrid Integration of Monolithic Semiconductor Optical Amplifier Arrays Using Passive Assembly", 55th Electronics and Technology Conference (ECTC), Lake Buena Vista, (2005).
- [3.10] B. Mikkelsen et al, "All-optical noise reduction capability of interferometric wavelength converters", Electron. Lett., 32, p.566 (1996).
- [3.11] J. Mork, F. Ohman, S. Bischoff, "Analytical expression for the bit error rate of cascaded all-optical regenerators", IEEE Phot. Technol. Lett., 15, p.1479 (2003).
- [3.12] P. Ohlen and E. Berglind, "Noise accumulation and BER estimates in concatenated nonlinear optoelectronic repeaters", IEEE Phot. Technol. Lett., 9, p.1011 (1997).
- [3.13] G. Maxwell et al, "WDM-enabled, 40Gb/s Hybrid Integrated All-optical Regenerator", ECOC 2005, Paper Th4.2.2, Glasgow (2005).
- [3.14] Y. Akasaka et al, "PMD Mitigation Application of MZI-SOA Based Optical 2R Regeneration in the Receiver", OFC 2005, paper JWA22, Anaheim, (2005).

- [3.15] P. Vorreau, D. C. Kilper, J. Leuthold, "Optical Noise and Dispersion Monitoring With SOA-Based Optical 2R Regenerator", IEEE Phot. Technol. Lett., 17, p. 244 (2005).
- [3.16] J. Leuthold, R. Ryf, D. Maywar, S. Cabot, J. Jaques and S. Patel, "Nonblocking all-optical cross connect based on regenerative alloptical wavelength converter in a transparent demonstration over 42 nodes and 16800km", IEEE J. Lightwave Technol., 21, p.2863 (2003).
- [3.17] H.S. Chung, R. Inohara, K. Nishimura and M. Usami, "Transparent interconnection between metro-core and metro-access network by using SOA-MZI based 2R wavelength converter", ECOC 2005, paper We4.P.034, Glasgow (2005).
- [3.18] H. Chayet et al, "Compensation of Chromatic Dispersion by Chirp Control in All-Optical Regenerator Based on Asymmetric Sagnac Loop", OFC 2005, paper OFK6, Anaheim (2005).
- [3.19] D. Chen et al, "Triple 640km cascade of tunable all-optical regenerators in a 10Gb/s WDM field trial over 160km per span distance in MCI's metro network", ECOC 2005, paper We2.4.2, Glasgow (2005).
- [3.20] C. S. Ram Murthy and M. Gurusamy, "WDM Optical Networks: Concepts, Design, and Algorithms", Prentice Hall, 2002.
- [3.21] D. Marcenac et al, "40 Gbit/s transmission over 406km of NDSF using mid-span spectral inversion by FWM in a 2mm long SOA", Electron. Lett., 33, p.879 (1997).
- [3.22] S. Nakamura, Y. Ueno, and K. Tajima, "168-Gbit/s all-optical wavelength conversion with a symmetric-Mach-Zehnder-type switch", IEEE Phot. Technol. Lett., 13, p. 1091 (2001).
- [3.23] <u>http://www.wordsun.com/cip2.html</u>.
- [3.24] K. Tajima, "All-optical Switch with Switch-off Time Unrestricted by Carrier Lifetime", Jpn. J. Appl. Phys., **32**, L1746 (1993).
- [3.25] <u>http://www.ciphotonics.com/</u>
- [3.26] M. Eiselt, W. Pieper, H.G. Weber, "SLALOM: Semiconductor laser amplifier in a loop mirror," IEEE/OSA J. Lightwave Technol., vol. 13, No. 10, pp. 2099-2112, 1995.
- [3.27] J. M. Tang and K. A. Shore, "Strong picosecond optical pulse propagation in semiconductor optical amplifiers at transparency", IEEE J. Quantum Electron., vol. 34, No. 7, pp. 1263-1269, 1998.
- [3.28] G. Toptchiyski, S. Kindt, K. Petermann, E. Hilliger, S. Diez, and H. G. Weber, "Time-domain modeling of semiconductor optical amplifiers for OTDM applications, IEEE/OSA J. of Lightwave Technol., vol. 17, No. 12, pp. 2577-2583, 1999.
- [3.29] R. Gutiérrez-Castrejón, L. Schares, L. Occhi, and G. Guekos, "Modeling and measurement of longitudinal gain dynamics in saturated

semiconductor optical amplifiers of different length", IEEE J. Quantum Electron., vol. 36, No. 12, pp. 1476-1484, 2000.

- [3.30] Y. Kim, H. Lee, J. Ko, and J. Jeong, "Analysis of frequency chirping and extinction ratio of optical phase conjugate signals by four-wave mixing in SOA's", IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., vol. 5, No. 3, pp. 873-879, 1999.
- [3.31] A. Mecozzi and J. Mork, "Saturation induced by picosecond pulses in semiconductor optical amplifiers", J. Opt. Society. Amer. B, vol. 14, No. 4, pp. 761-770, 1997.
- [3.32] L. Occhi, Y. Ito, H. Kawaguchi, L. Schares, J. Eckner, and G. Guekos, "Intraband gain dynamics in bulk semiconductor optical amplifiers: measurements and simulations", IEEE J. Quantum Electron., vol. 38, No. 1, pp. 54-60, 2002.
- [3.33] Γ. Θ. Κανέλλος, "Αμιγώς οπτική ανάκτηση ρολογιού στα 10 Gb/s", Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π., Αθήνα 2002.
- [3.34] Κ. Ο. Γιαννόπουλος, "Κυκλώματα Υπερυψηλών Ταχυτήτων για Ψηφιακά Οπτικά Δίκτυα", Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2004.
- [3.35] <u>www.vpiphotonics.com</u>
- [3.36] Κ. Χ. Βυρσωκινός, "Αμιγώς Οπτική Επεξεργασία Δεδομένων σε Ψηφιακά Τηλεπικοινωνιακά Δίκτυα", Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2007.
- [3.37] K. Kato, and Y. Tohmori, "PLC Hybrid Integration Technology and Its Application to Photonic Components", IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., vol. 6, No. 1, pp. 4-13, 2000.
- [3.38] L. Occhi, "Semiconductor Optical Amplifiers made of Ridge Waveguide Bulk InGaAsP: Experimental Characterization and Numerical Modelling of Gain, Phase, and Noise", PhD Thesis, ETHZ, Zurich 2002.
- [3.39] M. Funabashi et al, "Cascadability of optical 3R regeneration for NRZ format investigated in recirculation loop transmission over field fibers", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 18, 2081-2083 (2006).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΜΙΓΩΣ ΟΠΤΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΣΗΣ ΠΑΚΕΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΕΠΙΚΕΦΑΛΙΔΑΣ

Η βασική λειτουργία ενός κόμβου σ' ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο μεταγωγής πακέτων είναι η δρομολόγηση του εισερχόμενου σήματος δεδομένων στην κατάλληλη έξοδο του κόμβου, ούτως ώστε το σύνολο των διακομβικών διαδρομών του σήματος να αποτελεί σύνδεση με τερματικά άκρα τον κόμβο αρχικής αποστολής και τον κόμβο τελικού προορισμού του σήματος δεδομένων. Για τη διαδικασία δρομολόγησης του σήματος στην επιθυμητή έξοδο, κάθε κόμβος ενημερώνεται για τον τελικό προορισμό του σήματος μέσο του πεδίου της επικεφαλίδας (header) ή αλλιώς διεύθυνσης (address), το οποίο συνοδεύει το σήμα πραγματικής πληροφορίας, που αποκαλείται φορτίο (payload), καθ' όλη τη διάρκεια της μετάδοσής του στό δίκτυο. Η διαδικασία ενημέρωσης του κόμβου για τον τελικό προορισμό του εισερχόμενου σήματος επιτελείται σε δύο στάδια: το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει το διαχωρισμό και την απομόνωση της επικεφαλίδας από το

φορτίο του σήματος, ενώ το δεύτερο στάδιο συνίσταται στην επεξεργασία του περιεχομένου της επικεφαλίδας και στην αναγνώριση του τελικού του προορισμού. Πριν από την επεξεργασία που υπόκειται το κάθε εισερχόμενο πακέτο δεδομένων κρίνεται απαραίτητη η 3R αναγέννηση του, η οποία και διασφαλίζει την ομαλή λειτουργία όλων των υπολοίπων σταδίων επεξεργασίας.

Οι παραπάνω λειτουργίες, οι οποίες πραγματοποιούνται στο σύστημα υποδοχής του κόμβου, πραγματοποιούνται ακόμη και σήμερα με ηλεκτρονικά μέσα καθώς το εισερχόμενο οπτικό σήμα δεδομένων μετατρέπεται σε ηλεκτρικό. Απαραίτητη προϋπόθεση όμως για την πλήρη εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης των οπτικών δικτύων, στην οποία αποσκοπούν τα φωτονικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων, είναι η διεξαγωγή της διαδικασίας ενημέρωσης του κόμβου για την τελική διεύθυνση του σήματος απευθείας στο οπτικό επίπεδο, μέσω κατάλληλων οπτικών συστημάτων εξαγωγής και επεξεργασίας της επικεφαλίδας. Η ίδια προϋπόθεση ισχύει και για τα οπτικά δίκτυα μεταγωγής ετικετών, στα οποία η ετικέτα του πακέτου αναλαμβάνει το ρόλο της επικεφαλίδας για ένα μικρότερης έκτασης τμήμα του δικτύου. Ο λόγος, για τον οποίο απαιτείται η διεξαγωγή αυτών των διεργασιών στο οπτικό επίπεδο, είναι ότι η χρήση οπτο-ηλεκτρονικών διατάξεων μετατροπής (O/E/O conversions) και ηλεκτρονικών κυκλωμάτων επεξεργασίας του σήματος συνεπάγεται αυτόματα μείωση της ταχύτητας λειτουργίας του δικτύου, καθώς τα ηλεκτρονικά κυκλώματα αδυνατούν να συναγωνιστούν τις ταχύτητες των φωτονικών κυκλωμάτων.

Τα οπτικά κυκλώματα διαχωρισμού επικεφαλίδας ή ετικέτας, που έχουν προταθεί ως σήμερα, αναδεικνύουν μια ποικιλία μεθόδων, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, παρόλο που ο συνολικός αριθμός των κυκλωμάτων που έχουν αναφερθεί είναι περιορισμένος. Μια τέτοια τεχνική είναι η χρήση διαφορετικού μήκους κύματος για την αποστολή της επικεφαλίδας, οπότε ο διαχωρισμός της από το φορτίο επιτυγχάνεται πολύ εύκολα με χρήση κατάλληλων οπτικών φίλτρων. Εναλλακτική, αλλά ευρύτερα διαδεδομένη παρόμοια προσέγγιση, αποτελεί η αποστολή της επικεφαλίδας με πολυπλεξία σε υποφέρουσα συχνότητα (Sub-Carrier Multiplexing - SCM), όπου η επικεφαλίδα μεταδίδεται, πλέον, στο ίδιο μήκος κύματος με το φορτίο, αλλά σε διαφορετική συχνότητα, η οποία απέχει κάποια GHz από την κεντρική φέρουσα συχνότητα [4.1]-[4.3]. Ο διαχωρισμός της, σε αυτήν την περίπτωση, γίνεται είτε με χρήση μικροκυματικών φίλτρων, είτε με χρήση οπτικών παθητικών διατάξεων με σε στενή φασματική ιδιότητες φιλτραρίσματος ζώνη [4.3]. Στα πλεονεκτήματα των δύο παραπάνω τεχνικών εξαγωγής της επικεφαλίδας συγκαταλέγονται ασφαλώς η απλότητά τους και το μικρό τους κόστος, όπως, επίσης, και η δυνατότητα, που παρέχουν, για μετάδοση της επικεφαλίδας σε μικρότερο ρυθμό μετάδοσης από το φορτίο, ώστε να είναι

εφικτή η επεξεργασία της από ηλεκτρονικά κυκλώματα. Σοβαρό μειονέκτημα, όμως, αποτελεί το γεγονός ότι η εκμετάλλευση του εύρους ζώνης δε γίνεται με βέλτιστο τρόπο, καθώς η απλότητα των τεχνικών αυτών επιτυγχάνεται εις βάρος επιπρόσθετων φασματικών περιοχών, οι οποίες δεσμεύονται για την αποστολή της επικεφαλίδας και μόνο.

Για τη βέλτιστη εκμετάλλευση του εύρους ζώνης, η επικεφαλίδα οφείλει να είναι στην ίδια φέρουσα συχνότητα και να έχει τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης με το φορτίο. Σε αυτήν την περίπτωση, η επικεφαλίδα επιλέγεται να καταλαμβάνει ένα διακριτό χρονικό πεδίο μέσα στο πακέτο διαφορετικό από αυτό του φορτίου, και, συνήθως, το πεδίο αυτό τοποθετείται στην αρχή του πακέτου και μπροστά από το φορτίο. Αυτή είναι και η περίπτωση, που απαντάται στις δομές των πακέτων που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα ATM (Asynchronous Transfer Mode) και στα δίκτυα IP (Internet Protocol). Η χρήση, όμως, διαφορετικών χρονικών τμημάτων του πακέτου για τη διάκριση μεταξύ επικεφαλίδας και φορτίου, καθιστά το διαχωρισμό της από το φορτίο με οπτικές μεθόδους ακόμα πιο απαιτητική διαδικασία.

Μια από τις πρώτες «οπτικές» απόπειρες για την εξαγωγή της διεύθυνσης σε τέτοιες δομές πακέτων βασίστηκε στη χρήση λέξεωνκλειδιών με συνολικό μέγεθος 6 δυφίων [4.4]. Επίσης, έχει προταθεί ο διαχωρισμός επικεφαλίδας/φορτίου με αξιοποίηση των έντονων μη γραμμικών ιδιοτήτων των οπτικών ημιαγώγιμων ενισχυτών (SOAs) όταν οι τελευταίοι λειτουργούν στην περιοχή έντονου κορεσμού [4.5]-[4.7]. Σημαντικό μειονέκτημα της τελευταίας είναι η ανάγκη για διαφορετική κωδικοποίηση του πεδίου της διεύθυνσης από το πεδίο του φορτίου, ούτως ώστε να είναι εφικτή η διέγερση της μη γραμμικότητας του SOA μόνο για το χρονικό τμήμα της επικεφαλίδας. Αποτέλεσμα της διαφορετικής κωδικοποίησης είναι ο περιορισμός της ελευθερίας και της ευελιξίας της δομής των πακέτων δεδομένων.

Αντίθετα με τα οπτικά κυκλώματα διαχωρισμού επικεφαλίδας ή ετικέτας, οι λύσεις που έχουν προταθεί για αμιγώς οπτική 3R αναγέννηση ως σήμερα είναι αρκετές σε αριθμό και παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Συγκεκριμένα, μεθόδων που στην πλειοψηφία των υλοποιήσεων γίνεται συνδυασμένη χρήση κυκλωμάτων ανάκτησης ρολογιού, και οπτικών διακοπτών ως στοιχείων απόφασης. Ως κυκλώματα ανάκτησης ρολογιού χρησιμοποιούνται, συνήθως, κυκλώματα βρόχων εγκλείδωσης φάσης, λέιζερ ίνας δακτυλίου, που λειτουργούν με την τεχνική της εγκλείδωσης ρυθμών, και αυτοπαλλόμενα λέιζερ (self-pulsating lasers) [4.8]. Ως στοιχεία απόφασης, ευρεία είναι η χρήση οπτικών συμβολομετρικών διακοπτών [4.9], [4.10] ή οπτικών διαμορφωτών ήλεκτρο-απορρόφησης (Electro-Absorption Modulators - EAMs) [4.11]. Παρόλα αυτά, υπάρχουν ακόμα πολλές ελλείψεις στα προτεινόμενα κυκλώματα οπτικών 3R αναγεννητών, όπως είναι η λειτουργία υψίρρυθμων αναγεννητών (40 Gb/s ή υψηλότερα) υλοποιημένοι εξολοκλήρου στο οπτικό επίπεδο, αλλά και η λειτουργία αναγεννητών με σύγχρονα και ασύγχρονα πακέτα δεδομένων με μεταβλητή χρονική διάρκεια. Ο κυριότερος λόγος για την απουσία αξιόπιστης λύσης σ' αυτόν τον τομέα είναι η αδυναμία των κυκλωμάτων ανάκτησης ρολογιού να αποκριθούν σε σύντομο χρονικό διάστημα στις εισερχόμενες ροές ασύγχρονων πακέτων και να λειτουργήσουν σε επίπεδο μεμονωμένου πακέτου. Τα αυτοπαλλόμενα λέιζερ, τα οποία, όπως έχει αναφερθεί, είναι τα μόνα που έχουν λειτουργήσει με ασύγχρονα οπτικά πακέτα [4.12], [4.13], παρουσιάζουν μεγάλο χρόνο σβέσης του ανακτημένου ρολογιού, γεγονός το οποίο καθιστά μη αποδοτική την εφαρμογή τους για την αναγέννηση ασύγχρονων πακέτων αλλά και πακέτων μικρής χρονικής διάρκειας. Αντίθετα, οι οπτικοί συμβολομετρικοί διακόπτες πληρούν τις προϋποθέσεις για αναγέννηση τόσο σύγχρονων όσο και ασύγχρονων πακέτων μεταβλητού μήκους, δεδομένης της ικανότητάς τους να λειτουργούν σε επίπεδο bit του σήματος ακόμα και σε πολύ υψηλές ταχύτητες μετάδοσης [4.10], [4.14], [4.15]. Επιπλέον, η αποκλειστική χρήση οπτικών διακοπτών ίδιας τεχνολογίας για την υλοποίηση του 3R αναγεννητή διευκολύνει την υλοποίηση του κυκλώματος αλλά και την ολοκλήρωσή του μελλοντικά σε μία κοινή πλατφόρμα.

Στα πλαίσια της παρούσης διατριβής αξιοποιήθηκαν οι δυνατότητες ενός αμιγώς οπτικού κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού πακέτων [4.16] και αναπτύχθηκε ένα πρωτότυπο κύκλωμα αναγέννησης δεδομένων και διαχωρισμού επικεφαλίδας/φορτίου από οπτικά πακέτα δεδομένων στα 40 Gb/s [4.17]. Το προτεινόμενο κύκλωμα βασίζεται στη συνδυαστική χρήση του κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού πακέτων, το οποίο αποτελείται από ένα Fabry-Perot φίλτρο και μια οπτική πύλη Mach Zehnder που λειτουργεί ως κύκλωμα ψαλιδισμού, σε συνδυασμό με τρία ακόμα MZI τα οποία και συνδέονται με το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού σειριακά. Η τέταρτη κατά σειρά πύλη MZI επιτελεί τη λογική πράξη AND μεταξύ του αρχικού πακέτου δεδομένων και μιας καθυστερημένης χρονικά εκδοχής του αντίστοιχου ανακτημένου πακέτου ρολογιού. Με κατάλληλη επιλογή της χρονικής καθυστέρησης μεταξύ του πακέτου δεδομένων και του αντίστοιχου ανακτημένου πακέτου ρολογιού στο δεύτερο MZI, έτσι ώστε η χρονική καθυστέρηση να είναι ίση με τη χρονική διάρκεια του πεδίου της επικεφαλίδας του πακέτου, η πράξη AND έχει ως αποτέλεσμα τον επιτυχή διαχωρισμό της επικεφαλίδας από το φορτίο του πακέτου δεδομένων. Το πρώτο MZI λειτουργεί σαν μετατροπέας μήκους κύματος των εισερχόμενων πακέτων σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος προσδίδοντας ευστάθεια και βέλτιστη λειτουργία στο σύστημα μας, αφού το ανεξαρτητοποιεί από το μήκος κύματος του πακέτου που εισέρχεται στο κύκλωμα μας. Το τρίτο MZI χρησιμοποιείται ως πύλη απόφασης για την αναγέννηση των δεδομένων.

Το προτεινόμενο κύκλωμα υλοποιήθηκε με την πρώτη ολοκληρωμένη τετραπλή συστοιχία διακοπτών ΜΖΙ. Η λειτουργία του

ελέγχθηκε σε πειραματικό επίπεδο με σήματα εισόδου οπτικά πακέτα διαφορετικού μήκους όσον αφορά το φορτίου, και σταθερού μήκους όσον αφορά την επικεφαλίδα σε ρυθμό μετάδοσης τα 40 Gb/s, ενώ τα πακέτα είχαν διαφορετικό μήκος σκοπίμως προκειμένου να αποδειχθεί η ανεξαρτησία του συστήματος σε θέματα που αφορούν το μέγεθος των πακέτων.

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζεται αναλυτικά η προτεινόμενου συστήματος αρχιτεκτονική του αλλά και κάθε υποσυστήματος που το αποτελεί. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας του μετατροπέα μήκους κύματος RZ παλμών, του κυκλώματος ανάκτησης πακέτων ρολογιού και του διαχωριστή φορτίου/επικεφαλίδας. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη του προτεινόμενου κυκλώματος και τα αποτελέσματα της αξιολόγησης της λειτουργίας του σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s. Αρχικά όμως, στην υπό-ενότητα που ακολουθεί, επιχειρείται να προβληθεί το δικτυακό περιβάλλον μέσα στο οποίο το προτεινόμενο κύκλωμα μπορεί βρει εφαρμογή.

4.1 Οπτικό δίκτυο μεταγωγής ετικέτας (AOLS network)

Οι ανάγκες των ενσύρματων τηλεπικοινωνιακών δικτύων νια αυξημένη χωρητικότητα και ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων στη μεταγωγή πακέτων δεδομένων, έχουν υποδείξει ότι τα μελλοντικά οπτικά δίκτυα θα πρέπει να διακινούν πληροφορία σε υψίρρυθμα, μικρής χρονικής διάρκειας πακέτα δεδομένων τύπου IP. Η παρούσα όμως κατάσταση των δικτύων φαίνεται να αντιτίθεται σε αυτήν την προοπτική καθώς πολλά από τα προβλήματα αναφορικά με τις καθυστερήσεις στη μεταγωγή των πακέτων έγκειται στην συνύπαρξη πολλών διαφορετικών πρωτοκόλλων σε ένα δίκτυο πολλών επιπέδων (multi-layer network). Το πρωτόκολλο MPLS (multi-protocol label switching) είναι το δικτυακό πρωτόκολλο που έχει προταθεί για να πραγματοποιήσει τη διάφανη μεταγωγή οπτικών πακέτων δεδομένων στο δίκτυο (transparent networks) συγχωνεύοντας πακέτα IP, κελιά ATM, και πλαίσια SDH/SONET σε ένα κοινό επίπεδο επόμενης γενιάς στα πρότυπα του πρωτοκόλλου ΙΡ [4.18]. Παράλληλα, τα αμιγώς οπτικά δίκτυα έχουν προταθεί σαν το μέσο με τη χρήση των οποίων, θα ικανοποιηθούν οι σύγχρονες ευρυζωνικές ανάγκες και παράλληλα θα υποστηρίζονται νέες πρωτοποριακές,

διάφανες ως προς τον τύπο πακέτων δεδομένων τυποποιήσεις, όπως το MPLS. Συγκεκριμένα τα αμιγώς οπτικά δίκτυα αλλαγής ετικέτας (all-optical label swapping - AOLS) [4.19], έχουν προταθεί με σκοπό την επίτευξη δικτυακών εφαρμογών σε ρυθμούς 40 Gb/s ή υψηλότερα, και ταυτόχρονα

να εφαρμόζουν την τεχνική δρομολόγησης MPLS απευθείας στο φυσικό/οπτικό επίπεδο του δικτύου [4.2], [4.20] - [4.22].



Σχήμα 4.1. Δομή και λειτουργία του αμιγώς οπτικού δικτύου μεταγωγής ετικέτας ή *"all-optical label swapping (AOLS) network"*.

Σύμφωνα με την τεχνική AOLS, το δίκτυο κάνει χρήση οπτικών ετικετών με τις οποίες δρομολογεί πακέτα σύμφωνα με τη διεύθυνση που επικεφαλίδα περιέχεται στην ανεξαρτήτου περιεχομένου, ρυθμού πληροφορίας η χρονικής διάρκειας του πακέτου. μετάδοσης Н αρχιτεκτονική του δικτύου κορμού AOLS όπως και η αρχή λειτουργίας του απεικονίζονται στο σχήμα 4.1. Θεωρούμε ότι το δίκτυο AOLS συνδέει δύο δίκτυα πρόσβασης (access networks) μέσω του κόμβου εισόδου (ingress node) στη μία άκρη και τον κόμβο εξόδου (egress node) στην άλλη άκρη του δικτύου. Υποθέτουμε ότι ένα πακέτο τύπου IP εισέρχεται από τον κόμβο εισόδου και περιέχει την πληροφορία που επιθυμεί να μεταδώσει ο χρήστης στο πεδίο του φορτίου (payload) καθώς και το πεδίο της επικεφαλίδας (header) (προηγείται χρονικά του φορτίου) το οποίο περιέχει πληροφορίες για την διεύθυνση του τελικού χρήστη. Στον κόμβο εισόδου αφαιρείται η επικεφαλίδα από ένα μέρος της ισχύος του πακέτου ενώ το υπόλοιπο προωθείτε για δρομολόγηση. Αφού η επικεφαλίδα του εισερχόμενου πακέτου επεξεργαστεί για να αναγνωρίσει ο κόμβος τον προορισμό του πακέτου, εισάγει στην έξοδο του κόμβου και μπροστά από το συνολικό πακέτο εισόδου την λεγόμενη ετικέτα (label). Από αυτό το σημείο του δικτύου και έπειτα, ο κάθε κόμβος AOLS επεξεργάζεται μόνο την οπτική ετικέτα για δρομολόγηση μέσα στο δίκτυο κορμού ανεξάρτητα από τον τύπο του πακέτου, μέχρι τον κόμβο εξόδου (egress node) όπου η οπτική ετικέτα αφαιρείται. Η γενική δομή των κόμβων (router) του δικτύου AOLS
[4.23] περιλαμβάνει έναν οπτικό αναγεννητή 3R για την απαλοιφή ολίσθησης στην φάση και στο πλάτος των οπτικών παλμών, ένα κύκλωμα αφαίρεσης της επικεφαλίδας (στο ingress node) ή της ετικέτας μέσα στο δίκτυο κορμού (label/payload separation – LPS) μία μονάδα ελέγχου (control unit – CU) ή οποία ελέγχει τον πίνακα μεταγωγής (switching matrix) των εισερχόμενων φορτίων καθώς και το κύκλωμα εισαγωγής νέας ετικέτας (label insertion – LI) σύμφωνα με τις οδηγίες της αρχικής ετικέτας. Στον κόμβο εξόδου αφαιρείται η ετικέτα του δικτύου AOLS και το πακέτο δρομολογείται στο προοριζόμενο δίκτυο πρόσβασης το οποίο με τη σειρά του θα επεξεργαστεί την αρχική επικεφαλίδα του πακέτου.

Τα πλεονεκτήματα της παραπάνω αρχιτεκτονικής για την προώθηση (packet δρομολόγηση πακέτων forwarding and routing) και τn περιλαμβάνουν αφενός την ενίσχυση της ευελιξίας του δικτύου αφού το τελευταίο έχει την δυνατότητα να επεξεργαστεί κάθε είδους πακέτα, και αφετέρου τη μείωση του κόστους του δικτύου αφού με τη χρήση της αμιγώς οπτικής τεχνολογίας αποφεύγονται οι ηλεκτρό-οπτικές (Ο-Ε-Ο) μετατροπές στις διεπαφές κάθε κόμβου. Ιδιαίτερα σε ρυθμούς μετάδοσης 40 Gb/s, το κόστος των οπτο-ηλεκτρονικών μετατροπέων είναι -τουλάχιστον μέχρι σήμερα, απαγορευτικό για την εγκατάστασή τους σε πραγματικά δίκτυα.

4.2 Το κυκλώματος αναγέννησης πακέτων και διαχωρισμού επικεφαλίδας

Όπως είδαμε στην παραπάνω παράγραφο, το σύστημα υποδοχής ενός αμιγώς οπτικού κόμβου μεταγωγής πακέτων αποτελείται από έναν 3R αναγεννητή και ένα υποσύστημα διαχωρισμού φορτίου/επικεφαλίδας. Ο αναγεννητής χρησιμοποιείται για την βελτίωση της ποιότητας των εισερχόμενων δεδομένων απαλλάσσοντας τα από φαινόμενα όπως η χρονική ολίσθηση και διάφορα είδη θορύβων. Το κύκλωμα εξαγωγής της επικεφαλίδας χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό του φορτίου των εισερχόμενων πακέτων από την επικεφαλίδα τους [4.20]. Η επικεφαλίδα που περιέχει εκτός των άλλων πληροφορίες δρομολόγησης, θα οδηγηθεί στην μονάδα ελέγχου του κόμβου καθώς το φορτίο θα δρομολογείται μέσω ενός πίνακα δρομολόγησης ο οποίος θα ελέγχεται από την μονάδα ελέγχου.



Σχήμα 4.2 Δομικό διάγραμμα του κυκλώματος αναγέννησης δεδομένων και διαχωρισμού φορτίου/επικεφαλίδας.

Το σχήμα 4.2 εικονίζει το δομικό διάγραμμα του κυκλώματος αναγέννησης δεδομένων και διαχωρισμού φορτίου/επικεφαλίδας που σχεδιάσαμε. Για την υλοποίηση του κυκλώματος χρησιμοποιήσαμε μια τετραπλή συστοιχία διακοπτών MZI. Οι διακόπτες είναι υβριδικά ολοκληρωμένοι σε ένα πλινθίο. Ο κάθε διακόπτης επιτελεί μια διαφορετική λειτουργία: ο πρώτος χρησιμοποιείται για την μετατροπή μήκους κύματος των εισερχόμενων δεδομένων, ο δεύτερος αποτελεί μέρος του κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού, ο τρίτος χρησιμοποιείται ως κύκλωμα απόφασης στην αναγέννηση των δεδομένων και ο τέταρτος είναι ρυθμισμένος να λειτουργεί ως AND πύλη.

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται αναλυτικά τα παραπάνω υπό-συστήματα του κυκλώματος αναγέννησης δεδομένων και διαχωρισμού φορτίου/επικεφαλίδας καθώς και οι συνθήκες λειτουργίας των συμβολομέτρων MZI σε αυτά.

4.3 Μετατροπή μήκους κύματος RZ παλμών δεδομένων

Η μετατροπή μήκους κύματος των εισερχομένων παλμών δεδομένων είναι μια κρίσιμη λειτουργία που επηρεάζει την απόδοση του συνόλου των λειτουργιών του κυκλώματος αναγέννησης δεδομένων και εξαγωγής επικεφαλίδας. Συγκεκριμένα, η χρήση του μετατροπέα μήκους κύματος ως πρώτο στάδιο επεξεργασίας δεδομένων του συστήματος μας εξασφαλίζει την ανεξαρτησία του τελευταίου στις μεταβολές της φάσης (Φ) του πεδίου οπτικών παλμών λόγω διάδοσης σε οπτική ίνα ή χρήσης οπτικών πηγών με μη-σταθερή σχέση φάσης παλμό ανά παλμό, καθώς και την ανεξαρτησία του στην πόλωση (Pol) και στο μήκος κύματος (λ)του εισερχόμενου σήματος δεδομένων.

Στο σχήμα 4.3 φαίνεται η διαδικασία μετατροπής μήκους κύματος RZ παλμών. Ο διακόπτης ΜΖΙ τροφοδοτείται από ένα συνεχές οπτικό σήμα σε μήκος κύματος λ2 το οποίο διασπάται σε δύο ίσα μέρη, διαδίδεται στους δύο ημιαγωγούς, συμβάλει στο δεύτερο συζεύκτη. Η κατάσταση μεταγωγής του διακόπτη ελέγχεται από ένα ισχυρό παλμικό σήμα ελέγχου σε μήκος κύματος λ1 το οποίο προκαλεί έντονες διακυμάνσεις στο κέρδος του ενισχυτή και αυτή η διακύμανση αποτυπώνεται στο οπτικό πεδίο του συνεχούς σήματος που κυματοδηγείται στον ημιαγωγό. Τα δύο μέρη του συνεχούς σήματος συμβάλουν στην έξοδο και λόγω της αλλαγής της φάσης του πεδίου, τελικά η παλμική φύση του σήματος ελέγχου έχει αποτυπωθεί στο σήμα εξόδου. Το χρονικό εύρος των παλμών εξόδου εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το χρόνο απόκρισης (recovery time) του ενισχυτή. Επομένως, αν υποθέσουμε ότι η απόκριση (10%-90%) του ημιαγώγιμου ενισχυτή είναι 100 ps, τότε το χρονικό εύρος μέσης ισχύος του παλμού εξόδου (FWHM) θα είναι μεταξύ 40-70 ps ανάλογα με το βαθμό κορεσμού που προκαλεί το συνεχές σήμα εισόδου στους SOAs του MZI. Αυτό σημαίνει όμως ότι ένας τέτοιος διακόπτης δεν μπορεί να λειτουργήσει σε ρυθμούς λειτουργίας 40 Gb/s, καθώς η σχισμή δυφίου σε αυτό το ρυθμό είναι μόλις 25 ps.



Σχήμα 4.3 Μετατροπή μήκους κύματος RZ δεδομένων με χρήση του συμβολομέτρου MZI.

Μια αρκετά αποδοτική και σχετικά απλή μέθοδος αύξησης της ταχύτητας απόκρισης του διακόπτη είναι η χρήση της τεχνικής διαφορικών σημάτων ελέγχου (push/pull technique). Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη τεχνική, η κατάσταση του διακόπτη ελέγχεται από δύο πανομοιότυπα σήματα ελέγχου καθυστερημένα κατά κάποιο ποσοστό της σχισμής δυφίου. Στο **σχήμα 4.4** φαίνεται αναλυτικά η τεχνική μεταγωγής με δύο διαφορικά σήματα ελέγχου (A και B) καθυστερημένα κατά δτ με το σήμα ελέγχου B να έχει λιγότερη οπτική ισχύ. Το κάθε σήμα ελέγχου προκαλεί την αντίστοιχη βύθιση στο κέρδος του ημιαγωγού και την αργή ανάκαμψή του λόγω επανασύνδεσης των φορέων. Στο σήμα ελέγχου B, εισάγεται κατάληλη καθυστέρηση και εξασθένηση της ισχύος του, τόσο ώστε οι «ουρές» της ανάκαμψης των δύο κερδών να συμπίπτουν. Με αυτό τον τρόπο, όπως φαίνεται στο δεξιό τμήμα του σχήματος, εισάγεται η ίδια στροφή φάσης και στα δύο πεδία στο αργό μέρος της ανάκαμψης τους. Έτσι, στον συζεύκτη εξόδου, τα δύο αυτά τμήματα έχουν διαφορά φάσης δφ = 0 και επομένως έχει αναιρεθεί η επίδραση της αργής ανάκαμψης του ημιαγώγιμου ενισχυτή. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιήθηκε για την μετατροπή μήκους κύματος στο κύκλωμα αναγέννησης πακέτων δεδομένων και διαχωρισμού φορτίου/επικεφαλίδας.



Σχήμα 4.4 Τεχνική μεταγωγής με διαφορικά σήματα ελέγχου (push/pull) για την επίτευξη στενού παραθύρου μεταγωγής.

4.4 Αμιγώς οπτικό κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού από πακέτο πληροφορίας

4.4.1 *Εισαγωγή*

Η ανάκτηση του ρολογιού του συστήματος (clock recovery) είναι μια λειτουργία που συντελείτε σε κάθε κόμβο μεταγωγής πακέτων. Το ρολόι είναι ουσιαστικά η συχνότητα λειτουργίας μίας ψηφιακής επικοινωνίας και η ανάκτησή του είναι απαραίτητη για το συγχρονισμό των ψηφιακών κυκλωμάτων, για τη λειτουργία στοιχείων όπως τα flip-flops, καθώς και για συνθετότερες λειτουργίες, όπως η δρομολόγηση πακέτων σε έναν κόμβο δικτύου.

Το ρολόι μιας επικοινωνίας περιέχεται σαν πληροφορία στο σήμα που στέλνεται από τον πομπό. Τα δεδομένα που αποστέλλονται αποτελούνται από μια ακολουθία λογικών '1' και '0', τα οποία απέχουν χρονικά μεταξύ τους κατά την περίοδο του ρολογιού. Έτσι, για συστήματα που χρησιμοποιούν την RZ (Return to Zero) κωδικοποίηση ψηφίων, η ανάκτηση του ρολογιού συνίσταται στη μετατροπή των '0' σε '1'.

Γενικά, ένα κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού χρειάζεται ένα καθορισμένο χρόνο για να συγχρονιστεί με την ακολουθία των δεδομένων (rise time). Αυτό σημαίνει ότι τα πρώτα bits κάθε πακέτου που εκπέμπεται δε μπορούν να περιέχουν πληροφορία, αλλά χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για το συγχρονισμό του κυκλώματος. Επίσης, το ρολόι που παράγεται από ένα τέτοιο κύκλωμα έχει κάποιο χρόνο ζωής (lifetime), που συνίσταται στο χρονικό διάστημα που το κύκλωμα παραμένει «κλειδωμένο» μετά το πέρας του πακέτου. Έτσι, προκειμένου να διαχειριστούμε ασύγχρονη κίνηση, είμαστε υποχρεωμένοι να διατηρούμε ανάμεσα στα πακέτα χρονικά διαστήματα απραξίας ίσα με αυτό το χρόνο ζωής (guarbands). Αποτέλεσμα είναι η σπατάλη εύρους ζώνης, που γίνεται αρκετά υπολογίσιμη όσο πιο μικρά πακέτα χρησιμοποιούνται, οπότε ο λόγος guardbands/δεδομένα μεγαλώνει. Από τα παραπάνω προκύπτουν οι απαιτήσεις από ένα κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού: γρήγορος συγχρονισμός και μικρός χρόνος ζωής. Ιδανικά, το ρολόι θα πρέπει να έχει το μέγεθος του πακέτου που το παρήγαγε.

Στην οπτική τεχνολογία έχουν εφαρμοστεί πολλές τεχνικές για την ανάκτηση ρολογιού. Πολλές από αυτές χρησιμοποιούσαν και ηλεκτρονικά μέσα, γεγονός που αποτελεί μειονέκτημα, καθώς η περιορισμένη ταχύτητά τους δεν επιτρέπει την πλήρη εκμετάλλευση του τεράστιου εύρους ζώνης των οπτικών διατάξεων. Τέτοιες τεχνικές είναι τα συγχρονισμένα lasers δακτυλίου, οι ηλεκτρονικοί βρόχοι κλειδώματος φάσης και τα αυτόπαλλόμενα DFB lasers [4.8]. Οι τεχνικές αυτές απαιτούν μεγάλα κενά χρονικά διαστήματα μεταξύ των πακέτων, γεγονός που της καθιστά ακατάλληλες για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης ή μικρό μήκος πακέτων. Αντίθετα, ένα κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού που πετυχαίνει μικρό χρόνο ανύψωσης και παράγει ρολόι στο μήκος περίπου του οπτικού πακέτου, μπορεί να υλοποιηθεί με συνδυασμό ενός φίλτρου Fabry-Perot και ενός MZI [4.16].

Το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού που υλοποιήσαμε λειτουργεί αποκλειστικά στο οπτικό επίπεδο, ώστε να μπορεί να εκμεταλλευτεί τις δυνατότητες των οπτικών μέσων και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα μελλοντικά δίκτυα τρίτης γενιάς. Τα βασικά στοιχεία του είναι το φίλτρο Fabry-Perot και ένα συμβολόμετρο MZI το οποίο λειτουργεί σαν ψαλιδιστής ισχύος. Βασικό πλεονέκτημά του είναι ότι παράγει ρολόι μήκους περίπου ίσου με το μήκος του οπτικού πακέτου, οπότε μας δίνει τη δυνατότητα επεξεργασίας σημάτων και εφαρμογής πράξεων μέσα στο πακέτο, προκειμένου να αναγνωρίσουμε ή και να αντικαταστήσουμε την επικεφαλίδα του. Επίσης το κύκλωμα αυτό πετυχαίνει συγχρονισμό ρολογιού με σταθερό αριθμό bits, ο οποίος είναι και ιδιαίτερα μικρός. Το γεγονός αυτό αποτελεί ιδιαίτερο προσόν απέναντι σε κυκλώματα που απαιτούν σταθερό χρόνο "κλειδώματος", καθώς όσο αυξάνεται ο ρυθμός μετάδοσης τόσο ο χρόνος αυτός μεταφράζεται σε περισσότερα bits που σπαταλιούνται.

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφουμε αναλυτικά την λειτουργία των δομικών στοιχείων του κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού, δηλαδή του φίλτρου Fabry-Perot και του συμβολόμετρου MZI και εξηγούμε το ρόλο του καθενός στο κύκλωμα.

4.4.2 Το φίλτρο Fabry-Perot

Το φίλτρο Fabry-Perot (*FPF: Fabry-Perot Filter*) αποτελείται από μία συντονισμένη κοιλότητα που σχηματίζεται από δύο παράλληλα κάτοπτρα. Το φως εισέρχεται από μία ίνα εισόδου και αφού γίνει κάθετο στα κάτοπτρα με τη βοήθεια κατάλληλου φακού, περνά μέσα από την κοιλότητα και τέλος εστιάζεται ξανά με άλλον ένα φακό στο άκρο της ίνας εξόδου. Η λειτουργία του FPF βασίζεται στη συμβολή με διαίρεση πλάτους. Στην ανάλυση που ακολουθεί, έχουμε λάβει υπόψη μόνο τα φαινόμενα που συμβαίνουν μέσα στην κοιλότητα και θα παραλείψουμε τις ίνες εισόδου και εξόδου καθώς και τους φακούς και τις απώλειες που εισάγουν στο σήμα.



Σχήμα 4.5 Απεικόνιση του Φίλτρου Fabry Perot

Στο **σχήμα 4.5** βλέπουμε τη μορφή ενός φίλτρου Fabry-Perot. Στην πράξη, για να μην παρουσιάζονται ανεπιθύμητοι συντονισμοί από ανακλάσεις μεταξύ των δύο εξωτερικών πλευρών των κατόπτρων, οι εξωτερικές τους επιφάνειες βρίσκονται υπό ελαφριά κλίση και συχνά φέρουν αντί-ανακλαστική επίστρωση. Ωστόσο, οι εσωτερικές επιφάνειες των κατόπτρων βρίσκονται σε πλήρη παραλληλισμό.

Το εισερχόμενο φως ανακλάται πολλαπλά μέσα στην κοιλότητα και αν το μήκος L της κοιλότητας είναι ακριβώς:

$$L = \frac{i\lambda}{2n} = \frac{ic}{2nf} \tag{3.1}$$

(όπου n ο δείκτης διάθλασης μέσα στην κοιλότητα και i η τάξη συντονισμού), τότε πριν η φωτεινή ένταση εξασθενίσει στο 1/e της αρχικής της τιμής, το φως εκτελεί έναν αριθμό διαδοχικών ανακλάσεων μέσα στην κοιλότητα, ανάλογο προς μία ποσότητα που ονομάζεται λεπτότητα (finesse). Όλο σχεδόν το «φώς» περνάει στην έξοδο. Αντίθετα, αν το μήκος της κοιλότητας αποκλίνει από την παραπάνω τιμή, η συμβολή δεν είναι εντελώς θετική, οπότε η ισχύς εξόδου περιορίζεται.

4.4.2.1 Λειτουργία και χαρακτηριστικά

Υποθέτουμε ότι ο συντελεστής απωλειών λόγω απορρόφησης κατά τη διέλευση του φωτός μέσα από κάθε κάτοπτρο είναι Α και έστω R η ανακλαστικότητα ισχύος του κάθε κατόπτρου. Αν το προσπίπτον πεδίο στο συμβολόμετρο είναι:

 $\vec{E}_{in} = E_{in}e^{-j\omega t}$

τότε περνώντας από το πρώτο κάτοπτρο, το διαδιδόμενο πεδίο γίνεται

 $E = \sqrt{1 - R - A} E_{in} e^{-j\omega t}$

Στο δεύτερο κάτοπτρο, το φως έχει διανύσει απόσταση L, οπότε το διαδιδόμενο πεδίο θα έχει την τιμή:

 $E_{1T} = (1 - R - A)E_{in}e^{-j\omega t}e^{-j\beta L}$

(όπου β η σταθερά διάδοσης) ενώ αυτό που ανακλάται προς τα πίσω θα ισούται με:

$$E_{1R} = \sqrt{R}\sqrt{1 - R - A}E_{in}e^{-j\omega t}e^{-j\beta L}$$

Το πεδίο αυτό αφού διανύσει απόσταση L θα ανακλαστεί και πάλι στο πρώτο κάτοπτρο και μετά από ακόμα L θα διαδοθεί μέσα από το δεύτερο κάτοπτρο, παίρνοντας την τιμή:

$$E_{2T} = R(1 - R - A)E_{in}e^{-j\omega t}e^{-3j\beta L} = R \cdot e^{-2j\beta L}E_{1T}$$

Κατά τον ίδιο τρόπο καταλήγουμε ότι:

$$E_{NT} = \left(R \cdot e^{-2j\beta L} \right)^N \cdot E_{1T}$$

δηλαδή το πεδίο φθίνει εκθετικά με τον αριθμό των ανακλάσεων που έχει υποστεί.

Οι συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου και ο μηχανισμός των ανακλάσεων φαίνονται στο **σχήμα 4.6**.



Σχήμα 4.6 Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου των διαδοχικών ανακλάσεων

Προσθέτοντας όλες τις συνεισφορές στην ένταση εξόδου και χρησιμοποιώντας τη σχέση βx = 2πft καταλήγουμε στη μιγαδική συνάρτηση μεταφοράς της έντασης του πεδίου:

$$H(f) = \frac{E_0(f)}{E_i(f)} = (1 - A - R) \cdot e^{-j2\pi f\tau} \sum_{m=0}^{\infty} R^m \cdot e^{-j4\pi mf\tau} = \frac{1 - A - R}{1 - R \cdot e^{-j4\pi f\tau}} \cdot e^{-j2\pi \tau}$$
(3.2)

Επομένως η συνάρτηση μεταφοράς ισχύος $T(f) = H^2(f)$ θα είναι:

$$T(f) = \left(1 - \frac{A}{1 - R}\right)^{2} \cdot \left[1 + \left(\frac{2\sqrt{R}}{1 - R} \cdot \sin\frac{4\pi f\tau}{2}\right)^{2}\right]^{-1}$$
(3.3)

και η γραφική της παράσταση φαίνεται στο σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7 Η συνάρτηση μεταφοράς ισχύος (ή συνάρτηση του Airy) για απλά 'πρότυπα' συμβολόμετρα (etalon) με διαφορετική λεπτότητα.

Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι έχουμε ενισχυτική συμβολή για συχνότητες $f = \frac{m \cdot c}{2nL}, m = 1,2,3...$ η οποία προσδίδει στο φίλτρο/συμβολόμετρο Fabry-Perot συμπεριφορά φίλτρου που επιτρέπει την προσπέλαση μόνο επιλεγμένων συχνοτήτων. Η περιοδικότητα με την οποία επαναλαμβάνεται η ενισχυτική συμβολή ονομάζεται «Ελεύθερη Φασματική

Περιοχή» (*Free Spectral Range – FSR*), αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος του φίλτρου Fabry-Perot και δίνεται από τη σχέση:

$$FSR = \frac{c}{2nL}$$

εξαρτάται δηλαδή από το μήκος L της κοιλότητας.

Σε ένα δίκτυο με διαίρεση συχνότητας μέσα στην ελεύθερη φασματική περιοχή τοποθετούνται Ν ισαπέχοντα κανάλια. Το εύρος ημίσειας ισχύος της κάθε κορυφής (Full Width at Half Maximum – FWHM) δίνεται από τον τύπο:

$$FWHM = \frac{c}{2nL} \frac{1-R}{\pi\sqrt{R}}$$

Η πιο σημαντική παράμετρος που χαρακτηρίζει ένα φίλτρο Fabry-Perot είναι η «**λεπτότητα**» F (Finesse). Η λεπτότητα είναι ίση με το πηλίκο της FSR προς το FWHM και εκφράζει την οξύτητα του φίλτρου ως προς την περίοδο επανάληψης, επομένως συνδέεται στενά με το μέγιστο αριθμό καναλιών που μπορούν να υποστηριχθούν.

$$F = \frac{FSR}{FWHM} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$$

Όπως φαίνεται και από το **σχήμα 4.7** το εύρος ημίσειας ισχύος της κάθε κορυφής μικραίνει όσο αυξάνεται η ανακλαστικότητα, άρα και το Finesse. Αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερη διακριτική ευχέρεια για το φίλτρο καθώς συμπιέζονται οι πλευρικοί λοβοί και είναι γενικά επιθυμητό.

4.4.2.2 Απόκριση του φίλτρου Fabry-Perot στο πεδίο του χρόνου

Όταν ένας παλμός εισέλθει στο φίλτρο, ένα μεγάλο μέρος της ισχύος του εμφανίζεται στην έξοδο. Η υπόλοιπη όμως ισχύς εγκλωβίζεται ανάμεσα στα κάτοπτρα και, έχοντας υποστεί διαδοχικές ανακλάσεις κατά τον ίδιο τρόπο, διαπερνά τελικά την κοιλότητα σχηματίζοντας δευτερογενείς παλμούς. Η χρονική διαφορά ανάμεσα στους παλμούς αυτούς ισούται με το χρόνο που χρειάζεται το φως για να διανύσει δύο φορές την απόσταση ανάμεσα στα δύο κάτοπτρα, δηλαδή $t = \frac{2nL}{c}$ ή στο πεδίο της συχνότητας

 $f = \frac{c}{2nL}$. Παρατηρούμε ότι η έκφραση αυτή ισούται με τη τιμή της ελεύθερης φασματικής περιοχής (FSR). Συνεπώς, αν θέλουμε να ανακτήσουμε ένα ρολόι με συγκεκριμένη συχνότητα, επιλέγουμε ένα φίλτρο Fabry-Perot με την κατάλληλη τιμή FSR, ή ισοδύναμα με το αντίστοιχο μήκος της κοιλότητας.

Είδαμε λοιπόν ότι αν κάποια χρονική στιγμή εισέλθει ένας παλμός στο συμβολόμετρο και δεν ακολουθήσει άλλος, θα πάρουμε στην έξοδο μία ακολουθία παλμών που τα πλάτη τους θα φθίνουν εκθετικά, όπως βλέπουμε στο **σχήμα 4.8**. Ο χρόνος μέχρι να μηδενιστούν οι δευτερογενείς παλμοί καθορίζεται από την τιμή της λεπτότητας (Finesse) του φίλτρου, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από την ανακλαστικότητα των κατόπτρων. Τα πλάτη φθίνουν στην έξοδο γιατί κάθε παλμός αποτελείται από ένα ποσοστό της ισχύος που βρίσκεται εγκλωβισμένη στην κοιλότητα, η οποία και μειώνεται διαρκώς.



Σχήμα 4.8 Έξοδος του Fabry-Perot στο πεδίο του χρόνου για είσοδο ενός παλμού.

Στην περίπτωση που έχουμε περισσότερους από έναν παλμό, η έξοδος του φίλτρου θα προκύπτει από την επαλληλία των εξόδων του κάθε παλμού χωριστά, χρονικά μετατοπισμένες μεταξύ τους. Σαν παράδειγμα, στο **σχήμα 4.9** παρουσιάζουμε την έξοδο του φίλτρου αν στην είσοδο έχουμε τρεις διαδοχικούς παλμούς.



Σχήμα 4.9 Έξοδος του Fabry-Perot στο πεδίο του χρόνου για είσοδο τριών διαδοχικών παλμών.

4.4.3 Το Mach-Zehnder στο κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού – Ανάκτηση οπτικών πακέτων ρολογιού

Όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 2, υπό την επίδραση ισχυρού CW σήματος το συμβολόμετρο Mach Zehnder λειτουργεί σαν κύκλωμα ψαλιδισμού. Η ιδιότητά του αυτή χρησιμεύει στην μετατροπή των έντονα ασύμμετρων στο πλάτος παλμών που παράγει το Fabry-Perot (όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο) σε όσο το δυνατόν πιο ισοϋψείς, ώστε να παραχθεί τελικά το επιθυμητό ρολόι, όπως φαίνεται στο **σχήμα 4.10**.



Σχήμα 4.10 Έξοδος του Fabry-Perot στο πεδίο του χρόνου για είσοδο τριών διαδοχικών παλμών.

Το πλήρες κύκλωμα αμιγώς οπτικής αναγέννησης ρολογιού φαίνεται στο **σχήμα 4.11**. Τα πακέτα δεδομένων εισέρχονται στο φίλτρο Fabry-Perot στην έξοδο του οποίου παράγεται ένα πακέτο ρολογιού παρόμοιου μήκους με το αρχικό πακέτο του οποίου όμως οι παλμοί παρουσιάζουν έντονη διαμόρφωση πλάτους. Το πακέτο αυτό στην συνέχεια εισέρχεται στο συμβολόμετρο MZI το οποίο είναι ρυθμισμένο να λειτουργεί σαν ψαλιδιστής ισχύος κάτω από την επήρεια ισχυρού σήματος σταθερής ισχύος (Continuous Wave – CW). Από την παραπάνω στη έξοδο του MZI προκύπτουν πακέτα ρολογιού παρόμοιου μήκους με τα αρχικά πακέτα δεδομένων.



Σχήμα 4.11 Το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού.

Για τον σωστό συγχρονισμό του κυκλώματος απαιτούνται τουλάχιστον δύο bits στην αρχή του κάθε πακέτου, αριθμός σαφώς μικρότερος από οποιαδήποτε άλλη αμιγώς οπτική υλοποίηση. Οι χρόνοι κλειδώματος και σβέσης του ρολογιού εξαρτώνται από την λεπτότητα του φίλτρου Fabry-Perot. Τυπικές τιμές είναι δύο bits για το χρόνο κλειδώματος και 14 bits για τον χρόνο σβέσης.

4.5 Αμιγώς Οπτική 3R Αναγέννηση με χρήση του συμβολομέτρου MZI

4.5.1 Αρχή λειτουργίας των 3R αναγεννητών

Η 3R αναγέννηση σήματος είναι μια από τις σημαντικότερες λειτουργικές διεργασίες, που επιτελούνται σε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Το μεταδιδόμενο σήμα σε κάθε δίκτυο υφίσταται αναπόφευκτα σημαντική παραμόρφωση, η οποία προκύπτει ως αποτέλεσμα διαφόρων φαινομένων, όπως είναι οι απώλειες ισχύος της γραμμής μεταφοράς, η διασπορά, τα μη γραμμικά φαινόμενα, η συσσώρευση θορύβου λόγω ενισχυτικών σταδίων, τα φαινόμενα πόλωσης κ.α. Η παραμόρφωση αυτή συνίσταται, κυρίως, στην εξασθένηση της ισχύος του σήματος, στην παραμόρφωση του σχήματος των παλμών του, και στην απώλεια του σωστού χρονισμού των παλμών λόγω αυξημένης χρονικής ολίσθησης (ολίσθηση φάσης). Για την αποφυγή της συσσώρευσης αυτών των χαρακτηριστικών κατά τη μετάδοση του σήματος μέσα από τα διάφορα στάδια του δικτύου και την αποφυγή της λανθασμένης λήψης των δεδομένων στον τελικό δέκτη, τοποθετούνται σε ενδιάμεσα στάδια του δικτύου και ανά τακτές αποστάσεις μετάδοσης κατάληλες διατάξεις προς ανάκτηση των αρχικών χαρακτηριστικών του σήματος, οι οποίες καλούνται αναγεννητές 3R. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, όρος 3R υποδηλώνει την αναγέννηση του σήματος και στα τρία επίπεδα, δηλαδή επανενίσχυση (Reamplifying), αναμόρφωση κυματομορφής (Reshaping), και επανασυγχρονισμό (Retiming) του σήματος. Με τη χρήση αναγεννητών επιτυγχάνεται η μετάδοση σήματος σε πολύ μεγάλες αποστάσεις όπως είναι οι υπέρ-ατλαντικές ζεύξεις.



Σχήμα 4.12: Δομικό διάγραμμα ενός 3R αναγεννητή δεδομένων (τύπου RZ).

Στο σχήμα 4.12 απεικονίζεται η βασική δομή ενός 3R αναγεννητή. Κύριο υποσύστημα μιας τέτοιας διάταξης είναι ένα κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού, το οποίο είναι υπεύθυνο για την παραγωγή παλμών ρολογιού απαλλαγμένων από ολίσθηση φάσης και αναμορφωμένων ως προς την κυματομορφή τους. Στη συνέχεια, εισάγοντας το ανακτημένο σήμα ρολογιού σε ένα στοιχείο απόφασης (decision element), οι παλμοί δεδομένων «αντιγράφονται» επάνω στους παλμούς ρολογιού. Η λειτουργία που επιτελείται στο διακόπτη απόφασης είναι όμοια με τη λογική πράξη AND των ψηφιακών πυλών, μεταξύ του ανακτημένου ρολογιού και του παραμορφωμένου εισερχόμενου σήματος όπως φαίνεται και στο ένθετο διάγραμμα στο σχήμα 4.12. Η πληροφορία του εισερχόμενου σήματος διατηρείται στην έξοδο αλλά με αναγεννημένους πλέον παλμούς, δηλαδή αναμορφωμένους τόσο στο πλάτος τους όσο και στον χρονισμό τους.

4.5.2 Αμιγώς οπτική υλοποίηση του 3R αναγεννητή

βασική δομή και η αρχή λειτουργίας του κυκλώματος 3R Н αναγέννησης που υλοποιήσαμε απεικονίζεται στο σχήμα 4.13 για λειτουργία με πακέτα δεδομένων. Το προτεινόμενο κύκλωμα αποτελείται από το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού, η λειτουργία του οποίου παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο, και ένα διακόπτη Βασικό απόφασης. δομικό στοιχείο του κυκλώματος είναι 0 συμβολομετρικός διακόπτης MZI.



Σχήμα 4.13 Δομικό διάγραμμα ενός 3R αναγεννητή δεδομένων (τύπου RZ).

Το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού περιλαμβάνει όπως είδαμε ένα φίλτρο Fabry-Perot με ελεύθερη φασματική περιοχή ίση με το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων και ένα οπτικό διακόπτη MZI (MZI-1) με είσοδο ένα οπτικό CW σήμα. Η λειτουργία της απόφασης υλοποιείται από ένα δεύτερο οπτικό διακόπτη MZI (MZI-2), ο οποίος επιτελεί τη λογική πράξη AND μεταξύ των αρχικών δεδομένων και του αντίστοιχου ανακτημένου ρολογιού. Τα αρχικά δεδομένα λοιπόν εισέρχονται στο κύκλωμα και διασπώνται σε δύο τμήματα, ένα εκ των οποίων εισάγεται στο κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού, ενώ το άλλο εισέρχεται στο δεύτερο διακόπτη για αναγέννηση. Στην έξοδο του κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού προκύπτει το ανακτημένο πακέτο ρολογιού με πολύ μικρό χρόνο ανάκτησης και χρόνο σβέσης ρολογιού και με χρονική διάρκεια περίπου ίση με αυτή των αρχικών πακέτων. Το κάθε πακέτο ρολογιού εισάγεται, στη συνέχεια, στο δεύτερο διακόπτη MZI-2, παράλληλα με το αντίστοιχο αρχικό πακέτο δεδομένων, αφού τα δύο σήματα συγχρονιστούν κατάλληλα με τη βοήθεια μιας οπτικής γραμμής χρονικής καθυστέρησης τ. Ο επιθυμητός συγχρονισμός των δύο σημάτων στο διακόπτη MZI-2 απεικονίζεται με τη βοήθεια των κάθετων διακεκομμένων γραμμών στο σχήμα 4.13. Όπως φαίνεται, ο συγχρονισμός των δύο σημάτων αποσκοπεί στην αποφυγή της μεταγωγής των παλμών

δεδομένων από τους παλμούς ρολογιού, που βρίσκονται στα τμήματα του ανακτημένου πακέτου ρολογιού που αντιπροσωπεύουν το χρόνο ανάκτησης και το χρόνο σβέσης του ρολογιού.

Το αποτέλεσμα της λογικής πράξης AND μέσα στο δεύτερο διακόπτη μεταξύ των παλμών δεδομένων και των αντίστοιχων συγχρονισμένων παλμών ρολογιού, αποδίδει το σύνολο των δεδομένων αναγεννημένο στη θύρα μεταγωγής του διακόπτη MZI-2. Κατά συνέπεια, επιτυγχάνεται αναγνώριση του περιεχομένου των πακέτων δεδομένων και στην έξοδο του κυκλώματος εμφανίζεται το ανακτημένο σήμα δεδομένων. Οι παλμοί στην έξοδο του αναγεννητή είναι πλέον αναμορφωμένοι ως προς το σχήμα και το πλάτος τους, εμφανίζουν μειωμένη χρονική ολίσθηση, οπότε έχουν επανασυγχρονιστεί ως προς την προκαθορισμένη περίοδο bit του σήματος ενώ το επίπεδο θορύβου έχει καταπιεστεί.

4.6 Αρχή λειτουργίας MZI ως AND πύλη – Διαχωρισμός επικεφαλίδας/φορτίου οπτικών πακέτων

Το τελευταίο υπό-σύστημα του δέκτη ενός αμιγώς οπτικού κόμβου μεταγωγής πακέτων είναι το κύκλωμα διαχωρισμού φορτίου/επικεφαλίδας. Ο σκοπός του κυκλώματος αυτού είναι η προώθηση της επικεφαλίδας στο κύκλωμα επεξεργασίας επικεφαλίδας της λογικής μονάδας του κόμβου και του φορτίου του πακέτου στον πίνακα δρομολόγησης. Το κύκλωμα διαχωρισμού φορτίου/επικεφαλίδας μπορεί να υλοποιηθεί με την χρήση ενός επιπλέον συμβολομέτρου MZI στην έξοδο του κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού.

Η αρχή λειτουργίας του κυκλώματος διαχωρισμού επικεφαλίδας απεικονίζεται στο **σχήμα 4.14**. Το συμβολόμετρο MZI είναι ρυθμισμένο να πραγματοποιεί μια λογική AND λειτουργία μεταξύ των αναγεννημένων πακέτων δεδομένων και των αντίστοιχων ανακτημένων πακέτων ρολογιού. Ο συγχρονισμός των δύο σημάτων στο συμβολομετρικό διακόπτη είναι τέτοιος ώστε τα αναγεννημένα δεδομένα, τα οποία εισέρχονται στον διακόπτη από μια εκ των δύο εισόδων του, να προηγούνται των ανακτημένων πακέτων ρολογιού κατά χρονικό διάστημα ίσο με το χρόνο διάρκειας της επικεφαλίδας, αυξημένο κατά τον χρόνο ανάκτησης του ρολογιού. Το αποτέλεσμα της λειτουργίας αυτής είναι η εμφάνιση της επικεφαλίδας του πακέτου δεδομένων στην έξοδο μη-μεταγωγής του διακόπτη (U-port) και του φορτίου στην έξοδο μεταγωγής.



Σχήμα 4.14 Αρχή λειτουργίας του κυκλώματος διαχωρισμού φορτίου/επικεφαλίδας.

Λόγω του γρήγορου αλλά όχι άμεσου χρόνου ανάκτησης του ρολογιού, συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα ασφαλείας πρέπει να χρησιμοποιηθούν στα μεταδιδόμενα πακέτα δεδομένων. Το σχήμα 4.15 δείχνει την μορφή των πακέτων δεδομένων που πρέπει να ακολουθηθεί για την ομαλή κυκλώματος διαχωρισμού φορτίου/επικεφαλίδας. λειτουργία του Συγκεκριμένα, δύο διαδοχικοί «άσσοι» πρέπει να τοποθετούνται στην αρχή της επικεφαλίδας. Σκοπός αυτών των δύο επιπλέον bit είναι να βοηθήσουν όσο το δυνατόν αμεσότερη ανάκτηση του ρολογιού. Επιπλέον, ένα κενό διάστημα διάρκειας τριών bit θα πρέπει να ακολουθεί την επικεφαλίδα του κάθε πακέτου. Ο χρόνος αυτός θα αποτρέπει την μερική μεταγωγή των πρώτων παλμών του φορτίου του πακέτου εξαιτίας των μικρής ενέργειας πρώτων παλμών του ανακτημένου ρολογιού.



Σχήμα 4.15 Μορφή πακέτων δεδομένων για την αποτελεσματική λειτουργία του κυκλώματος διαχωρισμού φορτίου/επικεφαλίδας.

4.7 Πειραματική υλοποίηση και αποτελέσματα

Στις προηγούμενες παραγράφους περιγράψαμε την λειτουργία κυκλώματος αναγέννησης δεδομένων και διαχωρισμού του επικεφαλίδας/φορτίου οπτικών πακέτων. Η λειτουργία του κυκλώματος ελέγχθηκε σε πειραματικό επίπεδο με σήματα εισόδου οπτικά πακέτα διαφορετικού μήκους όσον αφορά το payload, και σταθερού μήκους όσον αφορά την επικεφαλίδα. Ο ρυθμός μετάδοσης ήταν τα 40 Gb/s, ενώ τα πακέτα είχαν διαφορετικό μήκος σκοπίμως προκειμένου να αποδειχθεί η ανεξαρτησία του συστήματος σε θέματα που αφορούν το μέγεθος των πακέτων. Στις παραγράφους που ακολουθούν παρατίθεται η πειραματική διάταξη και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την λειτουργία του κυκλώματος.

4.7.1 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική υλοποίηση του κυκλώματος αναγέννησης πακέτων δεδομένων και διαχωρισμού επικεφαλίδας, με χρήση μιας τετραπλής συστοιχίας διακοπτών MZI, φαίνεται στο **σχήμα 4.16**. Η διάταξη για την αξιολόγηση της επίδοσης του συστήματος αποτελείται από μια πηγή παραγωγής οπτικών πακέτων δεδομένων στα 40 Gb/s και από ένα στάδιο από-πολυπλεξίας από τα 40 Gb/s στα 10 Gb/s.

Η παραγωγή των οπτικών πακέτων πραγματοποιήθηκε ως εξής: Αρχικά, ένα DFB laser παρήγαγε οπτικούς παλμούς ρολογιού σε συχνότητα 10,025 GHz και με εύρος 7 ps μετά από γραμμική συμπίεση. Το εύρος των παλμών αυτών μειώθηκε περεταίρω στα 3 ps μετά από την διέλευση τους μέσα από έναν μη-γραμμικό συμπιεστή. Κατά την έξοδο τους από τον συμπιεστή, οι στενοί παλμοί ρολογιού εισήλθαν σε έναν ήλεκτρο-οπτικό διαμορφωτή (Ti:LiNbO₃), το σήμα ελέγχου του οποίου προερχόταν από μία παραγωγής δεδομένων στα 10,025 Gb/s. Η τελευταία είναι γεννήτρια πλήρως προγραμματιζόμενη από τον χρήστη με αποτέλεσμα εκτός από συνεχής ακολουθίες δεδομένων να μπορεί να παράγει οπτικά πακέτα επιλογής του χρήστη στα 10 Gb/s, όπως και συνέβη στο πείραμα που πραγματοποιήθηκε. Για την παραγωγή των πακέτων στα 40 Gb/s χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της οπτικής χρονικής πολυπλεξίας (OTDM). Συγκεκριμένα, τα πακέτα των 10 Gb/s ήταν κατάλληλα επιλεγμένα ώστε μετά την διέλευση τους από ένα οπτικό πολυπλέκτη, να προκύπτουν 40

Gb/s πακέτα δεδομένων τα οποία ακολουθούν την μορφή του **σχήματος 4.15** της προηγούμενης παραγράφου.



Σχήμα 4.16 Πειραματική διάταξη του κυκλώματος αναγέννησης πακέτων και διαχωρισμού φορτίου/επικεφαλίδας με χρήση μίας τετραπλής συστοιχίας διακοπτών MZI.

Μετά την παραγωγή τους, τα πακέτα δεδομένων χωρίστηκαν σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος χρησιμοποιήθηκαν ως σήμα ελέγχου στον μετατροπέα μήκους (HMZI 1), ενώ το δεύτερο μέρος χρησίμευσε ως σήμα ελέγχου στην πύλη απόφασης του 3R αναγεννητή (HMZI 3). Στον μετατροπέας μήκους κύματος έγινε χρήση της τεχνικής διαφορικών σημάτων ελέγχου με σκοπό την αποδοτικότερη λειτουργία του στον υψηλό ρυθμό μετάδοσης των 40 Gb/s. Στην έξοδο του παραπάνω κυκλώματος το εύρος των παλμών δεδομένων ήταν 7 ps οι οποίοι πλέον βρίσκονταν σε μήκος κύματος 1545 nm. Εν συνεχεία, οι παλμοί δεδομένων ενισχύθηκαν και εισήλθαν στο υπό-σύστημα ανάκτησης ρολογιού. Το υπό-σύστημα αυτό αποτελείται από ένα φίλτρο Fabry-Perot, με εύρος φασματικής γραμμής ίσο με ρυθμό μετάδοσης (40.1 GHz) και λεπτότητα ίση με 39, και ένα συμβολόμετρο MZI (HMZI 2). Το MZI τροφοδοτείται από μια πηγή συνεχούς κύματος στα 1559 nm (LD 3). Όπως περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το φίλτρο Fabry-Perot μετατρέπει τα πακέτα δεδομένων που εισέρχονται σε αυτό σε πακέτα ρολογιού με έντονη διαμόρφωση πλάτους. Οι παλμοί των πακέτων απόθκτούν ίσα πλάτη μετά την διέλευση του από το MZI το οποίο λειτουργεί ως ψαλιδιστής. Όπως και στον μετατροπέας μήκους κύματος, και στο HMZI 2 έγινε χρήση της τεχνικής διαφορικών σημάτων ελέγχου με σκοπό την ελάττωση του χρονικού εύρους των παλμών ρολογιού στα 8 ps. Τα ανακτημένα πακέτα ρολογιού χρησιμοποιήθηκαν ως σήμα εισόδου στο SOA-MZI 3 (HMZI 3), όπου εισήλθαν και τα αρχικά πακέτα δεδομένων ως διαφορικά σήματα ελέγχου. Η αναγέννηση και ο συγχρονισμός των παλμών δεδομένων κατέστησαν δυνατά μέσω οπτικής δειγματοληψίας των αρχικών παλμών δεδομένων στους συγχρονισμένους παλμούς του οπτικού ρολογιού, όπως αναλυτικά περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Εν συνεχεία, τα αναγεννημένα πακέτα εισήλθαν στο διακόπτη HMZI 4 ως σήμα εισόδου και ως σήμα ελέγχου χρησιμοποιήθηκαν τα ανακτημένα πακέτα ρολογιού, καθυστερημένα για χρονικό διάστημα ίσο με την διάρκεια της επικεφαλίδας των αντίστοιχων πακέτων δεδομένων.

Για την αξιολόγηση της ποιότητας των σημάτων εξόδου του κάθε υπο-συστήματος του κυκλώματος αναγέννησης πακέτων δεδομένων και διαχωρισμού φορτίου επικεφαλίδας, πραγματοποιήσαμε μετρήσεις ρυθμού λαθών (Bit error rate - BER) μετά από από-πολυπλεξία των πακέτων από τα 40 Gb/s στα 10 Gb/s. Για να το επιτύχουμε αυτό, χρησιμοποιήσαμε ένα διαμορφωτή ήλεκτρο-απορρόφησης (Electro-Absorption Modulator - EAM) οδηγούμενο από μια γεννήτρια ημιτονικού σήματος στα 10 GHz. Αξίζει να τονιστεί επίσης ότι οπτικοί ενισχυτές ίνας ερβίου (EDFAs) τοποθετήθηκαν στην έξοδο κάθε υποσυστήματος για να αναπληρώσουν τις απώλειες διασύνδεσής τους. Ακόμα, απομονωτές και ελεγκτές πόλωσης χρησιμοποιήθηκαν των συμβολομέτρων MZI για να εμποδίσουν την «προς τα πίσω» διάδοση του θορύβου και των σημάτων και για να μας δώσουν την δυνατότητα ελέγχου της πόλωσης των σημάτων που εισέρχονται στους διακόπτες αντίστοιχα.

4.7.2 Πειραματικά αποτελέσματα

Για την πειραματική αξιολόγηση του συστήματος αναγέννησης πακέτων δεδομένων και διαχωρισμού φορτίου/επικεφαλίδας χρησιμοποιήσαμε δύο πακέτα διαφορετικού μήκους της μορφής που δείχνει το **σχήμα 4.15**. Η επικεφαλίδα του κάθε πακέτου είχε μήκος 11 bits, συμπεριλαμβανομένων και των δύο bits προ-ενίσχυσης για την γρήγορη ανάκτηση του ρολογιού. Το μέγεθος των φορτίων των πακέτων ήταν 188 and 71 bits.

Το **σχήμα 4.17** παρουσιάζει χρονικά στιγμιότυπα και διαγράμματα ματιού των ανακτημένων πακέτων ρολογιού και των αναγεννημένων δεδομένων. Η πρώτη γραμμή δείχνει τα αρχικά πακέτα δεδομένων, η δεύτερη τα πακέτα στην έξοδο του μετατροπέα μήκους κύματος, η τρίτη δείχνει τα ανακτημένα πακέτα ρολογιού και η τέταρτη τα αναγεννημένα δεδομένα στην έξοδο του τέταρτου διακόπτη MZI. Όπως βλέπουμε, οι παλμοί του αρχικού σήματος εισόδου παρουσιάζουν έντονη διαμόρφωση πλάτους και χρονική ολίσθηση η οποία προέρχεται από έναν εσκεμμένο από-συγχρονισμό των ηλεκτρικών και οπτικών σημάτων στην πηγή δεδομένων. Το μέγεθος των ανακτημένων πακέτων ρολογιού στην έξοδο του τρίτου διακόπτη MZI είναι ίσο με το μέγεθος των αντίστοιχων πακέτων δεδομένων αυξημένο κατά 5 bits στην αρχή τους και 14 bits στο τέλος τους. Τα πρώτα 5 bits χαρακτηρίζονται ως χρόνος σβέσης του και αντιστοιχούν στον χρόνο που χρειάζεται το ρολόι ώστε η οι παλμοί του να φθίνουν στο 1/e της μεγίστης τους τιμής. Ο χρόνος αυτός καθορίζει και τον ελάχιστο χρόνο ασφαλείας που πρέπει να μεσολαβεί μεταξύ δύο συνεχόμενων πακέτων ώστε να διασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία του υπόσυστήματος ανάκτησης ρολογιού. Τόσο ο χρόνος ανάκτησης του ρολογιού όσο και ο χρόνος σβέσης εξαρτώνται από την λεπτότητα του φίλτρου Fabry-Perot και ως άθροισμα καθορίζουν το επιπλέον εύρος ζώνης που απαιτεί το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού.



Σχήμα 4.17 Πειραματικά αποτελέσματα για τα υπό-συστήματα ανάκτησης ρολογιού και αναγέννησης δεδομένων. Χρονικά στιγμιότυπα και διαγράμματα ματιού των (a) εισερχόμενων πακέτων, (b) πακέτων στην έξοδο του μετατροπέα μήκους κύματος, (c) ανακτημένων πακέτων ρολογιού και (d) των αναγεννημένων δεδομένων.

Τα πειραματικά αποτελέσματα για το υπό-σύστημα διαχωρισμού φορτίου/επικεφαλίδας φαίνονται στο **σχήμα 4.18**. Η πρώτη γραμμή δείχνει τα αναγεννημένα πακέτα ρολογιού, η δεύτερη την διαχωρισμένη

επικεφαλίδα στην έξοδο μη-μεταγωγής του διακόπτη και η τρίτη το φορτίο των πακέτων στην έξοδο μεταγωγής. Ο λόγος αντίθεσης και στις δύο θύρες του MZI ήταν άνω των 8 dB.



Σχήμα 4.18 Πειραματικά αποτελέσματα για το υπό-συστήματα διαχωρισμού φορτίου/επικεφαλίδας. Χρονικά στιγμιότυπα και διαγράμματα ματιού των (a) αναγεννημένων πακέτων δεδομένων, (b) επικεφαλίδων και (c) των φορτίων των πακέτων.

Ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 4.1) συνοψίζει τις ενεργειακές απαιτήσεις των ΗΜΖΙ για την λειτουργία τους στα υπό-συστήματα μετατροπής μήκους κύματος, ανάκτησης ρολογιού, αναγέννησης δεδομένων και διαχωρισμού φορτίου/επικεφαλίδας.

	είσοδος	push	pull
Μετατροπέας Μήκους Κύματος	11.86 dBm	3.76 dBm	1.32dBm
Υπό-σύστημα Ανάκτησης Ρολογιού	0.37 dBm	5.75 dBm	2.51 dBm
Data recovery subsystem	2.51 dBm	0.75 dBm	-4.02 dBm
Διαχωρισμός Φορτίου/Επικεφαλίδας	-13.77 dBm	-5.16 dBm	-

Πίνακας 4.1

Πίνακας 4.1: Ισχύς μεταγωγής των ΗΜΖΙ στο πείραμα αναγέννησης πακέτων δεδομένων και διαχωρισμού φορτίου/επικεφαλίδας. Πειραματικά αποτελέσματα για το υπό-συστήματα διαχωρισμού φορτίου/επικεφαλίδας. Χρονικά στιγμιότυπα και διαγράμματα ματιού των (a) αναγεννημένων πακέτων δεδομένων, (b) επικεφαλίδων και (c) των φορτίων των πακέτων.

Μετρήσεις ρυθμού λαθών (BER) πραγματοποιήθηκαν για τα αρχικά πακέτα δεδομένων, τα αναγεννημένα πακέτα και τα φορτία/επικεφαλίδες των πακέτων, μετά την από-πολυπλεξία τους από τα 40 Gb/s στα 10 Gb/s με την χρήση ενός διαμορφωτή ήλεκτρο-απορρόφησης, ο οποίος οδηγούταν από μια γεννήτρια ημιτονικού σήματος στα 10 GHz. Το σχήμα 4.19 παρουσιάζει τα αποτελέσματα για τα τέσσερα 10 Gb/s κανάλια εισόδου, τα τέσσερα 10 Gb/s κανάλια αναγεννημένων δεδομένων και τα τέσσερα 10 Gb/s κανάλια επικεφαλίδων και φορτίων στην έξοδο του συνολικού κυκλώματος. Επιτυχή λειτουργία του κυκλώματος χωρίς την παρουσία λαθών επετεύχθη για όλα τα από-πολυπλεγμένα κανάλια. Τα αναγεννημένα πακέτα δεδομένων παρουσίασαν μείωση στην επιβάρυνση ισχύος στον δέκτη της τάξης των -1.9 dB σε σχέση με τα αρχικά δεδομένα εισόδου. Η επιβάρυνση ισχύος που παρουσίασαν τα διαχωρισμένα φορτία των πακέτων σε σχέση με τα αναγεννημένα δεδομένα ήταν 1.2 dB και των επικεφαλίδων 1.7 dB, λαμβάνοντας υπόψη την διαφορά ισχύος μεταξύ των πακέτων εισόδου και εξόδου. Οι επιβαρύνσεις ισχύος αυτές οφείλονται κυρίως στον περιορισμένο λόγο σβέσης των 10 dB για τα φορτία των πακέτων και 8 dB για τις επικεφαλίδες που παρουσιάζονται στην έξοδο του HMZI4.



Σχήμα 4.19 Μετρήσεις ελέγχου λαθών για τα 4x10 Gb/s από-πολυπλεγμένα πακέτα εισόδου, αναγεννημένα πακέτα και διαχωρισμένα φορτία/επικεφαλίδες.

4.8 Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα της προηγούμενης παραγράφου παρατηρούμε ότι το κύκλωμα αναγέννησης δεδομένων και διαχωρισμού επικεφαλίδας/φορτίου διατηρεί όλα τα ελκυστικά χαρακτηριστικά του κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού, όπως ο μικρός χρόνος ανάκτησης και σβέσης του παραγόμενου πακέτου ρολογιού και η δυνατότητα λειτουργίας του κυκλώματος σε επίπεδο μεμονωμένου πακέτου, ακόμα και στην περίπτωση, που τα πακέτα δεδομένων είναι μεταβλητού μεγέθους και ασύγχρονα μεταξύ τους. Βασικά πλεονεκτήματα του προτεινόμενου κυκλώματος είναι, επίσης, η απλή υλοποίησή του, καθώς απαιτεί μόνο ένα Fabry-Perot φίλτρο και τέσσερις οπτικές πύλες για την κατασκευή του, όπως, επίσης, το γεγονός ότι αποφεύγεται η χρήση ηλεκτρονικών διατάξεων, ενώ μοναδική απαίτησή για τη λειτουργία του κυκλώματος είναι το αρχικό πακέτο δεδομένων ως είσοδος. Η πολυπλοκότητα του κυκλώματος δεν αυξάνει όταν αυξάνει το μέγεθος της επικεφαλίδας, καθώς αρκεί μόνο μια αντίστοιχη μεταβολή στη χρονική καθυστέρηση μεταξύ των δύο σημάτων στη δεύτερη πύλη για την εκ νέου επιτυχή λειτουργία του. Επιπλέον, δεδομένων των δυνατοτήτων των επιμέρους υποσυστημάτων του κυκλώματος για λειτουργία τους σε ταχύτητες μέχρι 100 Gb/s, o

διαχωρισμός της επικεφαλίδας με χρήση αυτού του κυκλώματος αναμένεται να είναι εφικτός και σε ταχύτητες πολύ μεγαλύτερες των 40 Gb/s. Τέλος, το κύκλωμα μπορεί, εν δυνάμει, να κατασκευαστεί σε συμπαγή μορφή με χρήση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων διακοπτών τύπου Mach-Zehnder και συμπαγούς συσκευασίας Fabry-Perot φίλτρου με προσαρτημένες ίνες εισόδου και εξόδου. Τα παραπάνω πλεονεκτήματα στοιχειοθετούν ένα κύκλωμα με ιδιαίτερα ελκυστικά χαρακτηριστικά για την εφαρμογή του στα μελλοντικά οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων και τα οπτικά δίκτυα μεταγωγής ετικετών.

Αναφορές

- [4.1] Zhu Z. Q. et al., "RF photonics signal processing in subcarrier multiplexed optical-label switching communication systems" J. Lightwave Technol., vol. 21, no. 12, pp. 3155-3166, Dec. 2003.
- [4.2] K. Vlachos et al., "STOLAS: switching technologies for optically labeled signals", IEEE Commun. Mag., vol. 41, pp. 43-49, Nov. 2003.
- [4.3] P. Öhlén et al., "All-Optical Header Erasure and Penalty-Free Rewriting in a Fiber-Based High-Speed Wavelength Converter", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 12, No. 6, pp. 663-665, June 2000.
- [4.4] D. Cotter et al., "Self-routing of 100 Gbit/s packets using 6 bit 'keyword' address recognition", Electron. Lett., vol. 31, No. 25, pp. 2201-2202, 1995.
- [4.5] H. J. S. Dorren et al., "Optical packet switching and buffering by using all-optical signal processing methods", J. Lightwave Technol., vol. 21, No. 1, pp. 2-12, 2003.
- [4.6] N. Calabretta et al., "Optical Signal Processing Based on Self-Induced Polarization Rotation in a Semiconductor Optical Amplifier", J. of Lightwave Technology, vol. 22, No. 2, pp. 372-381, Feb. 2004.
- [4.7] Wai Hung et al., "A Bit-Serial Optical Packet Label-Swapping Scheme Using DPSK Encoded Labels", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 15, No.11, pp. 1630-1632, Nov. 2004.
- [4.8] B. Sartorius, "All-Optical clock recovery for 3R optical regeneration", in Optical Fiber Communication Conf., 2001, MG7.
- [4.9] M. Tsurusawa et al., "Distinct regeneration capacity of 40 Gb/s signal impaired with amplitude noise and timing jitter using SOA-based alloptical polarization discriminated switch", Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, Anaheim, pp. 84– 87, March 2002.
- [4.10] C. Bornholdt et al., "Semiconductor-based all-optical 3R regenerator demonstrated at 40Gbit/s", Electron. Lett., Vol. 15, pp. 192-194, Feb. 2004.
- [4.11] E. Awad et al., "Optical 3R regeneration using a single EAM for alloptical timing extraction with simultaneous reshaping and wavelength conversion", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 14, No. 9, pp. 1378-1380, Sept. 2002.
- [4.12] D. Chiaroni et al., "All-optical clock recovery from 10 Gbit/s asynchronous data packets", in Eur. Conf. Optical Communication, 2000, Vol. 4, pp. 69-70.
- [4.13] B. Sartorius et al., "40 GHz optical clock recovery for application in asynchronous networks", 27th European Conference on Optical Communication 2001, (ECOC '01), Vol. 3, pp. 442-443, Oct. 2001.

- [4.14] K. L. Hall and K. A. Rauschenbach, "100 Gbit/s bitwise logic", Opt. Lett., vol. 23, pp. 1271-1273, Aug. 1998.
- [4.15] Y. Ueno, "All-Optical Signal Processing for over 100 Gb/s Optical-TDM Networks", LEOS Annual Meeting, Tucson, TuY1, Oct. 2003.
- [4.16] N. Pleros, K. Vyrsokinos, C. Bintjas, K. Yiannopoulos, K. Vlachos, H. Avramopoulos and G. Guekos, "All-Optical Clock Recovery from short, asynchronous data packets at 10 Gb/s", Photonics Technology Letters, Vol. 15, No. 9, September 2003.
- [4.17] P. Zakynthinos, D.Apostolopoulos, O. Zouraraki, D. Petrantonakis, G. Theophilopoulos, A. Poustie, G. Maxwell and H. Avramopoulos, "Single Chip Quad MZI array in a 40 Gb/s AOLS Front-end", OFC 2007, Tech. Dig. OWH7, Anaheim, USA, 2007.
- [4.18] E. Rosen, A. Viswanathan, and R. Callon, "RFC 3031: Multiprotocol Label Switching Architecture", IETF Request of Comments, 2001.
- [4.19] D. J. Blumenthal, et al., "All-optical label swapping networks and technologies", J. Lightwave Technol., vol. 18, no. 2, pp. 2058-2075, 2000.
- [4.20] F. Ramos, et al., "IST-LASAGNE: Towards All-Optical Label Swapping Employing Optical Logic Gates and Optical Flip-flops", IEEE/OSA J. Lightwave Technol., vol. 23, pp. 2993-3011, Oct. 2005.
- [4.21] L. Stampoulidis, et al., "ARTEMIS: A 40 Gb/s All-Optical Self-Router using Asynchronous Bit and Packet-Level Optical Signal Processing", IEEE GLOBECOM 2005, Nov. 2005, St. Louis, Missouri.
- [4.22] D. J. Blumenthal and M. Masanovic, "LASOR (Label Switched Optical Router): Architecture and Underlying Integration Technologies", We2.1.1, European Conference on Optical Communications (ECOC) 2005, Glasgow, Scotland.
- [4.23] D. Tsiokos et al., "All-Optical Signal Processing Using Integrated Mach Zehnder Interferometric Switches for 40 Gb/s All-Optical Label-Swapped Networks", Conference on Broadband Networks (BROADNETS) 2006, Jan Hose, California.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Αμιγώς οπτική μονάδα μνήμης ταχείας προσπέλασης

Είναι πλέον κοινά αποδεκτό ότι οι επαναστατικές αλλαγές που έχει υποστεί ο τομέας των τηλεπικοινωνιών οφείλονται κυρίως στην καθιέρωση της οπτικής ίνας ως το βασικό μέσω μετάδοσης της πληροφορίας. Το σημαντικό της πλεονέκτημα, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, είναι το πολύ μεγάλο εύρος ζώνης που προσφέρει για την παροχή υπηρεσιών εν συγκρίσει με παλαιότερες τεχνολογίες. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο στην καθιέρωση των οπτικών ινών έχουν και τα οπτικά συστήματα μετάδοσης που υπερέχουν αισθητά των αντίστοιχων ηλεκτρονικών σε θέματα εύρους ζώνης.

Έχοντας ως κίνητρο τις ίδιες αρχές που συνέβαλαν στην υιοθέτηση του φωτός ως το κύριο μέσω μετάδοσης πληροφορίας στην εποχή μας, η έρευνα στην φωτονική τεχνολογία κινείται, μεταξύ άλλων, προς την ανάπτυξη μιας αμιγώς οπτικής ψηφιακής πλατφόρμας επεξεργασίας σήματος, η οποία θα είναι ικανή να υπερκεράσει τα εμπόδια στην ταχύτητα

μετάδοσης δεδομένων που αντιμετωπίζουν τα σύγχρονα ψηφιακά ηλεκτρονικά κυκλώματα. Η επίδραση που θα έχει μια τέτοια πλατφόρμα θα είναι ανάλογη της επίδρασης που είχε η υιοθέτηση των οπτικών ινών ως το κύριο μέσω μετάδοσης πληροφορίας. Οι τομείς που μεταξύ άλλων θα δεχθούν την μεγαλύτερη επιρροή είναι οι λογικές μονάδες ψηφιακών συστημάτων και οι επεξεργαστές υπολογιστικών συστημάτων. Τα σενάρια που περιλαμβάνουν αυτούς τους τομείς δίνουν υποσχέσεις για πανίσχυρα υπολογιστικά συστήματα με εξαιρετικές δυνατότητες όσον αφορά την υπολογιστική ταχύτητα, υπονοώντας εξαιρετική πρόοδο και εξέλιξη των συστημάτων επικοινωνιών, των διαγνωστικών και μετρητικών μηχανημάτων καθώς και στους τομείς της κρυπτογραφίας και της πληροφορικής, σε περίπτωση που τα ηλεκτρόνια αντικατασταθούν από φωτόνια στις λειτουργίες επεξεργασίας πληροφορίας. Οι σκέψεις αυτές με την σειρά τους, έχουν τροφοδοτήσει μια σειρά από καινοτόμες ερευνητικές προσπάθειες οι οποίες στοχεύουν στην αντικατάσταση των υπαρχόντων συστημάτων επεξεργασίας της πληροφορίας και στην αντικατάστασή τους από φωτονικά κυκλώματα για όλο το φάσμα των λειτουργιών, από οπτικές λογικές πύλες Boolean μέχρι ολοκληρωμένα υπολογιστικά συστήματα.

Οι προσπάθειες αυτές έχουν επιπλέον ενισχυθεί και από την επιταχυνόμενη διείσδυση των οπτικών επικοινωνιών σε μεταδόσεις μικρών αποστάσεων, μικρότερες των 10 μέτρων, η οποία αποτελεί σημάδι για την επερχόμενη έκρηξη τόσο στον ρυθμό μετάδοσης όσο και στον όγκο των δεδομένων για επικοινωνία μεταξύ πλινθίων (chip) αλλά και υπό-κυκλωμάτων εντός του ιδίου πλινθίου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ζήτησης μεγαλυτέρου όγκου δεδομένων σε ελάχιστο χρόνο αποτελούν οι υπέρ-υπολογιστές. Η ταχεία μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων αποτελεί το ένα από τα δύο κύρια ζητούμενα σε αυτή την εφαρμογή με το άλλο να είναι η υπολογιστική-επεξεργαστική ισχύς. Τα βήματα που γίνονται από μεγάλες εταιρίες του κλάδου καθώς και από ερευνητικές ομάδες που ασχολούνται με το συγκεκριμένο αντικείμενο συγκλίνουν προς την υιοθέτηση της φωτονικής τεχνολογίας, τόσο συστημάτων όσο και μετάδοσης, ως λύση για το άμεσο μέλλον.

Γενικότερα, μπορούμε να πούμε ότι οι ιστορικές εξελίξεις φανερά υποδεικνύουν ότι είναι απλά θέμα χρόνου ώσπου η φωτονική τεχνολογία να διεισδύσει πλήρως στην επικοινωνία μεταξύ των υπολογιστικών κυκλωμάτων, αλλά και ακόμη περισσότερο στον τρόπο λειτουργίας τους, καθιστώντας ικανή την πλήρη εκμετάλλευση του εύρους ζώνης που προσφέρει η οπτική ίνα. Ωστόσο, λόγω των περιορισμών στην απ' ευθείας μετατροπή των υπαρχόντων δομών σε αμιγώς οπτικές (πχ. μέγεθος), είναι πια φανερό ότι δε μπορούμε να βασιστούμε άλλο στην περαιτέρω επέκταση υπαρχόντων διατάξεων και στην εκμετάλλευση τεχνικών των παραλληλισμού. Ως εκ τούτου, επιβάλλεται η εκ νέου σχεδίαση τους ώστε να αναδεικνύουν τα πλεονεκτήματα της οπτικής μετάδοσης, υπερκεράζοντας όλα τα εμπόδια και τους περιορισμούς, και επιτυγχάνοντας τεράστιες ταχύτητες ακόμη και στη σειριακή μετάδοση.

Παρά τις μεγάλες προσπάθειες, όμως, και τις επενδύσεις που έχουν γίνει πάνω στην έρευνα, ώστε οι φωτονικές διατάξεις να γίνουν η κυρίαρχη τεχνολογική πλατφόρμα και στον τομέα της επεξεργασίας σήματος, οι φωτονικές λογικές πύλες ακόμη παρουσιάζουν αρκετές δυσκολίες ως προς την τεκμηρίωση των λειτουργικών τους δυνατοτήτων. Οι κύριοι λόγοι γι' αυτό είναι:

- Η έλλειψη ενός αμιγώς οπτικού στοιχείου μνήμης άμεσης προσπέλασης (RAM Random Access Memory), που θα επιτρέπει την άμεση και γρήγορη αποθήκευση και προσπέλαση "on-demand" των οπτικών δεδομένων, καθώς και για την χρήση σε πολύπλοκες ακολουθιακές πύλες Boolean, που θα χειρίζονται την πληροφορία αμιγώς στο οπτικό πεδίο. Η οπτική RAM συνεχίζει να είναι η μεγάλη πρόκληση στη Φωτονική, καθώς η οπτική αποθήκευση δεν έχει ακόμη ξεπεράσει τους περιορισμούς που προκύπτουν λόγω της φύσης του φωτός, με πιο σημαντικό το γεγονός ότι τα φωτόνια είναι ουδέτερα φορτισμένα, κάτι που δυσχεραίνει την αποθήκευση τους, μιας και είναι αδύνατο να μιμηθούμε τα αντίστοιχα ηλεκτρονικά στοιχεία που αποθηκεύουν αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια.
- Н ανεπάρκεια της τεχνολογίας ολοκλήρωσης φωτονικών ٠ κυκλωμάτων να δημιουργήσει ένα chip πολλαπλές, με διασυνδεδεμένες οπτικές διατάξεις, επιτρέποντας έτσι την ανάπτυξη εξελιγμένων φωτονικών λογικών κυκλωμάτων, με βελτιωμένες ικανότητες επεξεργασίας.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής επιχειρήσαμε να αντιμετωπίσουμε τις προκλήσεις που θέτουν τα παραπάνω προβλήματα παρουσιάζοντας την πρώτη αμιγώς οπτική μονάδα μνήμης άμεσης προσπέλασης [5.1]. Η πειραματική μελέτη της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής στα 5 Gb/s επιβεβαίωσε τα πολύ υψηλά επίπεδα απόδοσης που προσφέρει, που για πρώτη φορά μπορούν να φτάσουν έως και τα 40 Gb/s [5.2]. Η διάταξη που παρουσιάζει το παρών κεφάλαιο εκμεταλλεύεται άμεσα την πρόσφατα εισηγμένη πλατφόρμα ολοκλήρωσης οπτικών κυκλωμάτων πυριτίου, κάτι που επιδεικνύει την δυνατότητα άμεσης υλοποίησης και εφαρμογής της. Η αμιγώς οπτική μονάδα μνήμης που αναπτύξαμε και παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο ανοίγει νέους ορίζοντες στην οπτική επεξεργασία σήματος με τη λειτουργικότητα της πραγματοποιώντας μια τομή όχι μόνο στον τομέα των επικοινωνιών, αλλά και στην επιστήμη των υπολογιστών γενικότερα.

5.1 Προσπάθειες υλοποίησης αμιγώς οπτικών διατάξεων αποθήκευσης δεδομένων

Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα που έχουν οι αμιγώς οπτικοί διακόπτες, που μελετήσαμε στα προηγούμενα κεφάλαια, είναι η ιδιότητα τους να λειτουργούν δυφίο προς δυφίο, γεγονός που οδηγεί στην ικανότητά μεταγωγής δεδομένων ανεξαρτήτως πρωτοκόλλου και ρυθμού λειτουργίας. Όπως όμως αναφέραμε και στην αρχή αυτού του κεφαλαίου, ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στην οπτική επεξεργασία σήματος εξακολουθεί να είναι η ανάπτυξη τεχνολογίας για την υλοποίηση της οπτικής μνήμης (photonic RAM) και πιο συγκεκριμένα η υλοποίηση κατάλληλων αμιγώς οπτικών κυκλωμάτων με ιδιότητες μνήμης. Το προτέρημα λειτουργίας δυφίου-προς- δυφίου των οπτικών διακοπτών μετατρέπεται σε μειονέκτημα, σε δικτυακές εφαρμογές όπου απαιτείται η υλοποίηση υπο-συστημάτων με μνήμη για τη παραγωγή σημάτων με σταθερό πλάτος φωτός ή παλμών και διάρκεια ίση με το πακέτο εισερχόμενων δεδομένων. Η ικανότητα σχεδιασμού και υλοποίησης τέτοιων συστημάτων είναι πολύ σημαντική, καθώς το συγκεκριμένο σήμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν σήμα ελέγχου σε οπτικούς διακόπτες για επεξεργασία σήματος όπως εξαγωγή επικεφαλίδας και οπτικής δρομολόγηση.

Μέχρι στιγμής, η οπτική προσωρινή αποθήκευση δεδομένων έχει βασιστεί σε υλοποιήσεις που στηρίζονται στην ανατροφοδότηση του σήματος με χρήση οπτικών ινών καθυστέρησης [5.3], ή οπτικών βρόγχων περιορισμένων λειτουργικών δυνατοτήτων [5.4]. Η οπτική αποθήκευση δεδομένων σε επίπεδο bit παρουσιάστηκε σχετικά πρόσφατα με χρήση στοιχείων μνήμης βασισμένα σε συζευγμένα ημιαγώγιμα λέιζερ [5.5], [5.6] ή συζευγμένους συμβολομετρικούς διακόπτες [5.7]. Παρόλα αυτά, φωτονική αποθήκευση με πραγματικά χαρακτηριστικά ταχείας πρόσβασης έχει υλοποιηθεί μέχρι στιγμής μόνο με παραλληλισμένα ήλεκτρο-οπτικά κυκλώματα μνήμης [5.8], [5.9], τα οποία απαιτούν μετατροπή του εισερχόμενου οπτικού σήματος δεδομένων σε ηλεκτρικό και αποδιαμόρφωσή του σε σήματα μικρότερου ρυθμού μετάδοσης. Πραγματική αμιγώς οπτική μνήμη ταχείας προσπέλασης που να προσφέρει κατά απαίτηση αποθήκευση και ανάκτηση υψίρρυθμων οπτικών σημάτων, δεν έχει ακόμα παρουσιαστεί.

5.2 Αρχιτεκτονική της αμιγώς οπτικής μονάδας RAM

Το προτεινόμενο κύκλωμα μνήμης ταχείας προσπέλασης αποτελείτε ουσιαστικά από τρία στοιχεία. Τα δύο από αυτά είναι δύο ημιαγώγιμοι οπτικοί ενισχυτές οι οποίοι χρησιμοποιούνται σαν διακόπτες και το τρίτο, ένα υβριδικά ολοκληρωμένο, αμιγώς οπτικό, flip-flop. Στις παραγράφους που ακολουθούν θα περιγράψουμε αναλυτικά την βασική αρχή λειτουργίας της μονάδας RAM τόσο κατά την λειτουργία ανάγνωσης όσο και κατά την λειτουργία εγγραφής. Η περιγραφή μας θα ξεκινήσει από παρουσίαση της λειτουργίας του αμιγώς οπτικού flip-flop, το οποίο αποτελεί την καρδία του προτεινόμενου κυκλώματος μνήμης.

5.2.1 Αμιγώς οπτικό flip-flop

Πριν ξεκινήσουμε την ανάλυση του σχεδιασμού και υλοποίησης του αμιγώς οπτικού flip-flop, θα πραγματοποιήσουμε μια αναφορά στην αντίστοιχη υλοποίηση χρησιμοποιώντας ψηφιακές ηλεκτρονικές διατάξεις. Πιο συγκεκριμένα, ο μανδαλωτής τύπου RS αναλύεται παρακάτω, καθώς ο ακολουθιακού συγκεκριμένος τύπος στοιχείου, παρουσιάζει τις περισσότερες ομοιότητες με το αντίστοιχο στοιχείο μνήμης στο οπτικό επίπεδο. Στο σχήμα 5.1(α) φαίνεται το λογικό διάγραμμα του μανδαλωτή τύπου «RS» με χρήση διασυνδεδεμένων ψηφιακών πυλών «OYTE». Αναλυτικότερα, δύο απλές πύλες «ΟΥΤΕ» διασυνδέονται έτσι ώστε η έξοδος της μίας να αποτελεί είσοδο της δεύτερης, δημιουργώντας έτσι ένα σύστημα ανάδρασης που οδηγεί στην ικανότητα διατήρησης μίας κατάστασης επ' αόριστο. Η εναλλαγή λογικών καταστάσεων επιτυγχάνεται με ψηφιακούς παλμούς σύμφωνα με τον πίνακα αληθείας του σχήματος 5.1(β). Η παρουσία λογικής στάθμης «1» στην είσοδο θέσης «S» οδηγεί την έξοδο «Q» να παίρνει τιμή «1» ώσπου εισαχθεί ψηφιακός παλμός «1» στην είσοδο επαναφοράς «R». Συγκεκριμένα, όταν παλμός λογικής στάθμης «1» εισέρχεται στον μανδαλωτή από τη θύρα θέσης, η έξοδος «Q» παίρνει την τιμή «1». Στην περίπτωση που η είσοδος θέσης αλλάξει σε λογικό «0», τότε όπως φαίνεται και από τον πίνακα αληθείας, ο μανδαλωτής διατηρεί λογικό «1». Αξίζει να σημειωθεί ότι αλλαγή κατάστασης μπορεί να γίνει και με αντίθετα ψηφιακά σήματα (αρνητικούς παλμούς), όπου η αλλαγή κατάστασης γίνεται με την παρουσία λογικής στάθμης «0». Η υλοποίηση αυτού του είδους μανδαλωτή γίνεται με ψηφιακές πύλες «OXI-KAI».



Σχήμα 5.1. (α) Λογικό διάγραμμα μανδαλωτή «RS» και (β) αντίστοιχος πίνακας αληθείας.

Σε αντίθεση με τις ηλεκτρονικές ψηφιακές διατάξεις όπου γίνεται χρήση ανάδρασης για την επίτευξη μνήμης, η εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνικής με οπτικές πύλες είναι πολύ πιο δύσκολο να οδηγήσει σε σταθερή και ικανοποιητική λειτουργία μανδαλωτή. Ο βασικός λόγος είναι ότι η υλοποίηση συστημάτων ανάδρασης μεταξύ των πυλών μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία οπτικής κοιλότητας, η οποία μπορεί να λειτουργήσει σαν laser αν το σήμα ανάδρασης δημιουργήσει κέρδος στην κοιλότητα. Μια αρκετά σταθερή υλοποίηση ενός οπτικού flip-flop βασίζεται στην αλληλοεπίδραση δύο ενεργών οπτικών στοιχείων [5.10]. Η λειτουργία ενός τέτοιου flip-flop βασίζεται σε διασυνδεδεμένους δακτυλίους laser σύμφωνα με το σχήμα 5.2. Σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας διασυνδεδεμένων δακτυλίων laser, οι δύο λογικές στάθμες του flip-flop είναι τα δύο μήκη κύματος που εκπέμπει ο κάθε δακτύλιος laser A και B. Λόγω διασύνδεσης των δύο δακτυλίων με τη χρήση οπτικού συζεύκτη, η εξαναγκασμένη εκπομπή σε ένα δακτύλιο (Α), επηρεάζει και καταπιέζει την εξαναγκασμένη εκπομπή του άλλου (Β). Παρουσία ενός ισχυρού οπτικού σήματος, στον ένα δακτύλιο, καταπιέζεται η εξαναγκασμένη εκπομπή του δακτυλίου. Αυτή η διαταραχή στην δυναμικότητα του συστήματος, βοηθά τον δεύτερο καταπιεσμένο δακτύλιο (Β) να αναπτύξει κέρδος και να επαναξεκινήσει παραγωγή φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή.

Αν ο παλμός ελέγχου είναι αρκετά φαρδύς, τότε το φως εκπομπής του δεύτερου δακτυλίου εισέρχεται στον πρώτο και τον καταπιέζει. Επομένως, επιτυγχάνεται αλλαγή κατάστασης του flip-flop. Το χρονικό εύρος του παλμού θα πρέπει να είναι αρκετές φορές πιο μεγάλο από το συνολικό μήκος της κάθε κοιλότητας, έτσι ώστε να υπάρχει αρκετός χρόνος για την αναστροφή των φορέων και την εκκίνηση εξαναγκασμένης εκπομπής. Το ακριβές χρονικό εύρος εξαρτάται από παράγοντες όπως το συνολικό μήκος της κοιλότητας, το κέρδος των ενεργών στοιχείων και το παράγοντα Q της κοιλότητας.



Σχήμα 5.2. Αρχή λειτουργίας οπτικού flip-flop με χρήση διασυνδεδεμένων οπτικών δακτυλίων laser. **(α)** Σταθερή δυναμική κατάσταση εκπομπής δακτυλίου Α και **(β)** καταπίεση εκπομπής δακτυλίου Α και αλλαγή κατάστασης σε εκπομπή δακτυλίου Β. **(γ)** Σχηματική απεικόνιση πεδίου χρόνου της λειτουργίας του flip-flop.

Ο συγκεκριμένος σχεδιασμός του οπτικού flip-flop, αποτέλεσμα της ερευνητικής προσπάθειας στο ερευνητικό κέντρο COBRA του πολυτεχνείου του Αϊντχόβεν, παρουσιάζει πολύ υψηλούς λόγους αντίθεσης, αλλά χρειάζεται οπτικούς παλμούς πολλαπλάσιου χρονικού εύρους του μήκους της κοιλότητας, για την επίτευξη αλλαγής κατάστασης. Αυτό σημαίνει ότι η χρήση τέτοιου οπτικού flip-flop με παλμούς ρυθμού λειτουργίας 40 Gb/s και εύρους της τάξης των 5-10 ps είναι αδύνατη, καθώς δεν είναι εφικτή η κατασκευή και ολοκλήρωση τόσο μικρών κοιλοτήτων. Η λύση του προβλήματος αυτού ήρθε με τον επανασχεδιασμό του flip-flop, αυτή τη χρησιμοποιώντας δύο σειριακά διασυνδεδεμένους υβριδικά φορά ολοκληρωμένους οπτικούς διακόπτες SOA-MZI με εξωτερικά σήματα συνεχούς φωτός (CW) τα οποία ορίζουν τις δύο καταστάσεις του flip-flop. Αναλυτικότερα, το οπτικό flip-flop σχεδιάστηκε στο πολυτεχνείο του Αϊντχόβεν και ολοκληρώθηκε στην εταιρεία Center for Integrated Photonics στην Αγγλία στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος IST-LASAGNE. Το συγκεκριμένο πρωτότυπο χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της αμιγούς οπτικής μονάδας μνήμης ταχείας προσπέλασης.



Σχήμα 5.3. Σχηματικό διάγραμμα οπτικού flip-flop με χρήση διασυνδεδεμένων οπτικών διακοπτών τύπου MZI: **(α)** διασύνδεση για στατική λειτουργία, **(β)** επίτευξη δυναμικής λειτουργίας μέσω οπτικών παλμών SET/RESET.

Το σχηματικό διάγραμμα του οπτικού flip-flop φαίνεται στο σχήμα 5.3, όπου διακρίνονται οι δύο διασυνδεδεμένοι οπτικοί διακόπτες [5.11]. Ο κάθε διακόπτης αποτελείται από μια συμβολομετρική διάταξη τύπου Mach Zehnder. Στον ένα οπτικό δρόμο έχει τοποθετηθεί ένας οπτικός ημιαγώγιμος ενισχυτής και στον άλλο ένα στοιχείο μεταβολής της φάσης του πεδίου (phase shifter). Το συγκεκριμένο στοιχείο είναι ικανό να μεταβάλλει τη φάση του εισερχόμενου οπτικού πεδίου ανάλογα με την εφαρμοζόμενη ηλεκτρική τάση. Στην υλοποίηση του οπτικού μανδαλωτή που φαίνεται στο σχήμα, η ικανότητα της μνήμης επιτυγχάνεται λόγω της σειριακής διασύνδεσης των οπτικών διακοπτών και την ικανότητα του κάθε διακόπτη να επηρεάσει την κατάσταση μεταγωγής του άλλου. Οι δύο δυνατές καταστάσεις δίνονται από το μήκος κύματος εκπομπής δύο DFB laser, που εισάγονται σε κάθε διακόπτη. Η στατική λειτουργία του μανδαλωτή μπορεί να εξηγηθεί με τη βοήθεια του σχήματος [σχήμα 5.3(α)]. Ο αριστερός διακόπτης SOA-MZI1 δέχεται σαν σήμα εισόδου ένα συνεχές οπτικό κύμα σε μήκος κύματος λ1. Το κέρδος του ημιαγώγιμου ενισχυτή σε συνδυασμό με τον phase shifter καθορίζονται έτσι ώστε το οπτικό σήμα να εξέρχεται από το κάτω μέρος του συζεύκτη εξόδου Α, δηλαδή από την έξοδο Α2. Δηλαδή οι φάσεις των πεδίων στα δύο τμήματα του συμβολόμετρου, συμβάλουν προσθετικά σε αυτή την έξοδο και αναιρετικά στην Α1. Το σήμα αυτό εισέρχεται στον δεύτερο συμβολομετρικό διακόπτη μέσω του συζεύκτη Β και στον δεύτερο ημιαγώγιμο ενισχυτή, επηρεάζοντας
τη δυναμική φορέων του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μεταγωγή του σήματος λ2 στην έξοδο B1 του συζεύκτη. Δηλαδή το οπτικό σήμα σε μήκος κύματος λ2 δεν εισέρχεται στον ημιαγώγιμο ενισχυτή του διακόπτη SOA-MZI1 και επομένως δεν μπορεί να επηρεάσει την δυναμική των φορέων του και επομένως την κατάσταση μεταγωγής του διακόπτη. Το αποτέλεσμα της διασύνδεσης αυτής οδηγεί στην στατική κατάσταση του μανδαλωτή, στην οποία η κατάσταση λ1 επικρατεί και εξέρχεται από την έξοδο του διακόπτη SOA-MZI2. Λόγω της συμμετρίας του συστήματος, η στατική αρχική κατάσταση του μανδαλωτή μπορεί να είναι η αντίστροφη, δηλαδή να επικρατεί το μήκος κύματος λ2. Η δυναμική λειτουργία του μανδαλωτή, αλλαγή κατάστασης του συστήματος δηλαδή ŋ αμιγώς οπτικά, επιτυγχάνεται με τη χρήση παλμικών σημάτων ελέγχου SET και RESET όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3(β).

Ας υποθέσουμε ότι ο μανδαλωτής βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση στην οποία ο διακόπτης SOA-MZI1 επικρατεί του διακόπτη SOA-MZI2, δηλαδή το σήμα λ1 εξέρχεται από τον μανδαλωτή. Ο στόχος του παλμικού σήματος RESET είναι να προκαλέσει τον κορεσμό του ημιαγώγιμου ενισχυτή για τόσο χρονικό διάστημα όσο χρειάζεται ο ημιαγώγιμος ενισχυτής στον διακόπτη SOA-MZI2 να ανακάμψει και μετάγει το οπτικό σήμα μήκους κύματος λ2 στον διακόπτη SOA-MZI1. Σε αυτό το σημείο, ακόμα και μετά την παύση του σήματος ελέγχου RESET, ο διακόπτης SOA-MZI2 επικρατεί και το σήμα που επικρατεί είναι το σήμα με μήκος κύματος λ2. Η επαναφορά του μανδαλωτή στην κατάσταση λ1 γίνεται αντίστοιχα με την εισαγωγή του σήματος SET στο διακόπτη SOA-MZI2. Η επιτυχής αλλαγή κατάστασης του μανδαλωτή εξαρτάται άμεσα από την οπτική ισχύ και το χρονικό εύρος των παλμών ελέγχου. Ο συνδυασμός αυτών των δύο φυσικών μεγεθών πρέπει να προκαλέσει την μείωση του κέρδους του ημιαγώγιμου ενισχυτή για τόση χρονική περίοδο, όση είναι απαραίτητη για την ανάκαμψη του δεύτερου ημιαγώγιμου ενισχυτή.



Σχήμα 5.4. Τελικό σχέδιο ολοκληρωμένου υβριδικού συστήματος που αποτελείται από δύο οπτικά flip-flop σε παραλληλία.

Ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη του ολοκληρωμένου οπτικού μανδαλωτή βασίστηκε στην υβριδική φωτονική τεχνολογία της εταιρείας C.I.P. Το **σχήμα 5.4** απεικονίζει το τελικό σχέδιο ολοκλήρωσης, που αποτελείται από δύο μανταλωτές σε παραλληλία στο ίδιο πλινθίο. Το **σχήμα 5.5(α)** είναι η φωτογραφία της μητρικής πλακέτας που περιέχει τους οπτικούς κυματοδηγούς και τα σημεία επαφής για την τοποθέτηση της δευτερεύουσας πλακέτας [**σχήμα 5.5(β)**] που περιέχει τους ημιαγώγιμους ενισχυτές. Στη φωτογραφία του **σχήματος 5.5(γ)** φαίνεται το τελικό και ολοκληρωμένου πρωτότυπο που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα χαρακτηρισμού και ανάπτυξης της αμιγώς οπτικής μονάδας μνήμης.



Σχήμα 5.5. Φωτογραφίες υβριδικά ολοκληρωμένων flip-flop: (α) μητρική πλακέτα, (β) δευτερεύουσα πλακέτα και (γ) τελικό συσκευασμένο πρωτότυπο.

Το δομικό διάγραμμα του μανδαλωτή που παρουσιάστηκε παραπάνω είναι αρκετά γενικό και δύναται να τροποποιηθεί ανάλογα με τη συγκεκριμένη εφαρμογή και ανάλογα αν απαιτείται ξεχωριστός έλεγχος παλμών SET/RESET, δύο καταστάσεις μηκών κύματος κλπ. Για παράδειγμα σε εφαρμογή οπτικής δρομολόγησης πακέτων, ένας τέτοιος μανδαλωτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν δρομολογητής στο πεδίο μήκους κύματος. Δηλαδή, ο μανδαλωτής ανάλογα με το αν υπάρχει οπτικός παλμός στην είσοδό του, αλλάζει η όχι κατάσταση μήκους κύματος. Με αυτό τον τρόπο, μπορεί να επιτευχθεί δρομολόγηση πακέτων.



Σχήμα 5.6. (α) Σχεδιασμός μανδαλωτή πεπερασμένης διάρκειας Τ και έξοδος μανδαλωτή (β) στο πεδίο μήκους κύματος και (γ) στο πεδίο του χρόνου.

Μία τέτοια υλοποίηση φαίνεται στο **σχήμα 5.6(α)**, όπου τα δύο σήματα ελέγχου SET/RESET προέρχονται πλέον από ένα παλμικό σήμα και έχουν συγκεκριμένη χρονική καθυστέρηση. Στην πραγματικότητα, αυτή η χρονική καθυστέρηση ορίζει την διάρκεια κατά την οποία ο μανδαλωτής θα βρίσκεται στην κατάσταση SET ή RESET. Σε εφαρμογές οπτικής δρομολόγησης πακέτων, η καθυστέρηση αυτή θέτεται τόση όση είναι και η διάρκεια των οπτικών πακέτων δεδομένων. Επίσης, οι δύο έξοδοι καταστάσεων του μανδαλωτή ενώνονται με τη βοήθεια συζεύκτη ώστε να είναι δυνατή η εναλλαγή του μήκους κύματος σε μία οπτική ίνα, όπως θα ήταν αναγκαίο για τη δρομολόγηση και μετατροπή μήκους κύματος πακέτων δεδομένων. Η εναλλαγή των δύο καταστάσεων του μανταλωτή φαίνεται με τη βοήθεια του γραφήματος στο **σχήμα 5.6(β)** και η αντίστοιχη εικόνα στο πεδίο του χρόνου στο **σχήμα 5.6(γ)**. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο πεδίο του χρόνου, ο οπτικός μανδαλωτής έχει πανομοιότυπη λειτουργία με εκείνη του ηλεκτρονικού μανδαλωτή, αντιστοιχίζοντας τις δύο καταστάσεις λ1 και λ2 με τις καταστάσεις Q και Q'.

5.2.2 Αρχιτεκτονική και λειτουργία της αμιγώς οπτικής μονάδας μνήμης ταχείας προσπέλασης

Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιάσουμε την αρχιτεκτονική της οπτικής μονάδας μνήμης και θα περιγράψουμε την βασική αρχή λειτουργίας της. Όπως αναφέραμε και στην αρχή αυτή της ενότητας, η διάταξη αποτελείται από 2 οπτικούς ενισχυτές ημιαγωγού (SOA) και μια διάταξη αμιγώς οπτικού flip-flop, ή οποία με την σειρά της αποτελείται από ένα ζεύγος πλήρως διασυνδεδεμένων οπτικών συμβολόμετρων Mach-Zehnder που χρησιμοποιούν SOAs (SOA-MZI) ως το μη γραμμικό τους μέσο.

Το οπτικό flip-flop λειτουργεί ως στοιχείο μνήμης μοναδικού-bit, κάνοντας χρήση του μηχανισμού διασύνδεσης των 2 SOA-MZI και των μηκών κύματος πόλωσης για τον καθορισμό του περιεχομένου προς αποθήκευση. Οι 2 ενισχυτές SOA εκμεταλλεύονται την ετεροδιαμόρφωση κέρδους (XGM) για να χειρίζονται την πρόσβαση στα 2 SOA-MZI. Η διάταξη φαίνεται στο **σχήμα 5.7** [5.1].



Σχήμα 5.7. Αμιγώς οπτική μονάδα μνήμης ταχείας προσπέλασης.

Όπως φαίνεται παραπάνω σχήμα, τα δύο SOA-MZI τροφοδοτούνται από δύο CW μήκη κύματος, λ₁ και λ₂. Η λογική τιμή του κυττάρου καθορίζεται από το μήκος κύματος του κυρίαρχου CW σήματος. Συγκεκριμένα, το λογικό '1' αντιστοιχεί στην κατάσταση όπου το λ₁ είναι κυρίαρχο σήμα του flip-flop, ενώ το λογικό '0' αντιστοιχεί στην κατάσταση όπου το λ₂ είναι το κυρίαρχο σήμα του flip-flop.

Η μετάβαση από τη μια κατάσταση μνήμης στην άλλη επιτυγχάνεται μέσω ενός εξωτερικού οπτικού παλμού, που εισάγεται στους βραχίονες Set και Reset στο πάνω μέρος των SOA-MZI, επηρεάζοντας την κατάσταση του flip-flop.

Η λειτουργία άμεσης προσπέλασης (Random Access) του κυττάρου ελέγχεται από τους δύο οπτικούς ενισχυτές SOA που εκμεταλλεύονται την ετεροδιαμόρφωση φάσης και λειτουργούν ως διακόπτες ON/OFF, ελεγχόμενοι από το ανεστραμμένο bit ελέγχου (Access bit). Αναλυτικότερα, ένα ανεστραμμένο bit ελέγχου λογικής τιμής '1' φέρνει τους δύο SOA σε κατάσταση κορεσμού (saturation), εμποδίζοντας την ροή οπτικού σήματος μέσα από αυτούς και κόβοντας με αυτόν τον τρόπο την επικοινωνία του κυττάρου μνήμης με τον εξωτερικό κόσμο, όπως φαίνεται και στο **σχήμα 5.8**.

Σ' αυτή την κατάσταση, δε μπορούν να συμβούν οι λειτουργίες Read και Write, και το κύτταρο RAM διατηρεί το περιεχόμενο του. Η πρόσβαση στο περιεχόμενο του κύτταρου RAM μπορεί να ενεργοποιηθεί μόνο όταν το ανεστραμμένο Access bit γίνει '0', όπως μπορεί να γίνει κατανοητό στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 5.8. Στιγμιότυπο της κατάστασης της μονάδας RAM με Access bit = 1.

Η λειτουργία ανάγνωσης (Read) επιτυγχάνεται όταν το ανεστραμμένο Access bit είναι '0' και εισέρχεται στο κύτταρο και συγχρόνως τα σήματα εισόδου Bit και *Bit* είναι και τα δύο μηδενικά. Σ' αυτή την περίπτωση, το λ₁ ή λ₂ περιεχόμενο μεταδίδεται μέσω των SOAs στην έξοδο του κυττάρου, όπως φαίνεται στα **σχήματα 5.9** και **5.10**, για κυρίαρχο λ₁ ή λ₂ αντίστοιχα.



Σχήμα 5.9. Λειτουργία Read με κυρίαρχο το μήκος κύματος λ1.



Σχήμα 5.10. Λειτουργία Read με κυρίαρχο το μήκος κύματος λ2.

Όταν το Access bit έχει τιμή '0' και θέλουμε να γίνει λειτουργία εγγραφής (Write), τα σήματα εισόδου Bit και \overline{Bit} εισέρχονται στο κύτταρο RAM μέσω των SOA και στη συνέχεια εισέρχονται στο flip-flop, λειτουργώντας ως σήματα Set και Reset αντίστοιχα. Μ' αυτό τον τρόπο, ένα '1' Bit αναγκάζει το λ_1 να γίνει το κυρίαρχο σήμα στο flip-flop, ενώ ένα '1' \overline{Bit} αναγκάζει το λ_2 να γίνει το κυρίαρχο σήμα στο flip-flop. Σ' αυτό το σημείο, έχει επιτευχθεί αποθήκευση της εισερχόμενης δυαδικής τιμής στο

κύτταρο RAM. Διαδοχικά στιγμιότυπα της διαδικασίας αυτής φαίνονται στο παρακάτω σχήμα [**σχήμα 5.11**].



Σχήμα 5.11. Στιγμιότυπα της λειτουργίας Write.

5.3 Πειραματική μελέτη της λειτουργία της αμιγώς οπτικής μονάδας μνήμης

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, υλοποιήθηκε και εκτιμήθηκε πειραματικά η, κατά την γνώμη μας, πρώτη μονάδα αμιγώς οπτικής μνήμης ταχείας προσπέλασης με πραγματική δυνατότητα εγγραφής και ανάγνωσης. Το κύκλωμα, υλοποιήθηκε στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών (Ε.Φ.Ε.) με χρήση διακριτών στοιχείων και η επίδοσή του μελετήθηκε στα 5 Gb/s. Όπως αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο, το κύκλωμα αποτελείται από δύο ημιαγώγιμους οπτικούς ενισχυτές και ένα ολοκληρωμένο οπτικό flip-flop, το οποίο αποτελείται από δύο συζευγμένα MZI [5.7]. Το οπτικό flip-flop λειτουργεί ως στοιχείο μνήμης μοναδιαίου-bit, κάνοντας χρήση του μηχανισμού διασύνδεσης των 2 SOA-MZI και των μηκών κύματος πόλωσης για τον καθορισμό του περιεχομένου προς αποθήκευση. Οι 2 ενισχυτές SOA εκμεταλλεύονται την ετεροδιαμόρφωση κέρδους (XGM) για να ελέγχουν την πρόσβαση στο οπτικό flip-flop.

Η πειραματική διάταξη της αμιγώς οπτικής μονάδας μνήμης που υλοποιήθηκε στο Ε.Φ.Ε., εικονίζεται στο **σχήμα 5.12(a)**. Το κύκλωμα αποτελείται από δύο SOAs και ένα οπτικό flip-flop. Το τελευταίο σχηματίζεται από δύο συζευγμένα SOA-MZIs τα οποία τροφοδοτούνται από δύο εξωτερικά CW σήματα εισόδου (πόλωσης) στο λ0 (1559nm) και στο λ1 (1556nm). Τα σήματα εξόδου του flip-flop εμφανίζονται στις θύρες FF#1 και FF#2 και η λογική τιμή της μονάδας μνήμης καθορίζεται από το μήκος κύματος του CW που κυριαρχεί [5.7]. Η κατάσταση λογικού '1' αντιστοιχεί στην κατάσταση όπου το λ0 είναι το κυρίαρχο σήμα στο flip-flop, ενώ η κατάσταση του λογικού '0' παρατηρείται όταν το κυρίαρχο σήμα στο sintuγχάνεται με την εισαγωγή ενός εξωτερικού παλμού στους βραχίονες 'Set' ή 'Reset' του flip-flop [5.7].

Η λειτουργία άμεσης προσπέλασης της μονάδας RAM επιτυγχάνεται με την χρήση των ημιαγώγιμων ενισχυτών SOA3 και SOA4 οι οποίοι λειτουργούν ως ON-OFF διακόπτες ελεγχόμενοι από το συζυγές σήμα πρόσβασης. Ένα συζυγές δυφίο πρόσβασης λογικής τιμής "1", κοραίνει το κέρδος τόσο του SOA3 όσο και του SOA4 εμποδίζοντας την διέλευση επιπλέων οπτικών σημάτων μέσω αυτών, αποτρέποντας έτσι την επικοινωνία την μονάδας μνήμης και του έξω κόσμου. Με αυτόν τον τρόπο, ούτε η λειτουργία της Έγγραφής' ούτε εκείνη της 'Ανάγνωσης' μπορούν να λάβουν χώρα και η μονάδα μνήμης διατηρεί το περιεχόμενό της. Η πρόσβαση στην μνήμη είναι εφικτή όταν το συζυγές δυφίο πρόσβασης λάβει την λογική τιμή "0". Η λειτουργία Άνάγνωσης' επιτυγχάνεται όταν η τιμή του συζυγούς δυφίου πρόσβασης λάβει την λογική τιμή "0" και ταυτόχρονα το ^{Bit} και το ^{Bit} σήμα εισόδου είναι ίσο με μηδέν. Σε αυτή την περίπτωση, το λ0 ή το λ1 περιεχόμενο της μνήμης διέρχεται από τον SOA4 ή τον SOA3 και εμφανίζεται στην θύρα ο/p2 ή ο/p1, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.12. (a) Πειραματική διάταξη της μονάδας μνήμης ταχείας προσπέλασης, (b) πειραματική διάταξη λειτουργία 'Ανάγνωσης' και (c) πειραματική διάταξη λειτουργίας Έγγραφής'.

Στην περίπτωση που η τιμή του συζυγούς δυφίου πρόσβασης είναι "0" και επιδιώκεται η λειτουργία Έγγραφής', οι εισερχόμενες παλμοσειρές ^{Bit} και \overline{Bit} εισέρχονται στην μονάδα μνήμης μέσω των ημιαγώγιμων οπτικών ενισχυτών SOA3 και SOA4, αντίστοιχα, και εν συνεχεία εισέρχονται στο flipflop λειτουργώντας ως σήματα 'Set' και 'Reset'. Με αυτόν τον τρόπο, μια λογική τιμή του ^{Bit} ίση με '1' αναγκάζει το λ0 να γίνει το κυρίαρχο σήμα στο flipflop ανεξάρτητα από την προηγούμενη κατάστασή του. Αντίστοιχα, μια λογική τιμή του \overline{Bit} ίση με '1' αναγκάζει το λ1 να γίνει το κυρίαρχο σήμα στο flipflop. Με την λειτουργία αυτή επιτυγχάνεται η αποθήκευση της καινούργια δυαδικής τιμής στην μονάδα μνήμης και το περιεχόμενο της και η συζυγής του τιμή εμφανίζονται στις θύρες κατάστασης S/P2 και S/P1, αντίστοιχα.

Το σχήμα 5.12(b) δείχνει την πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε για την ανάλυση της επίδοσης της μονάδας μνήμης ταχείας προσπέλασης όταν αυτή λειτουργεί στην κατάσταση 'Ανάγνωσης'. Ένας CW σήμα στα 1561nm χρησιμοποιήθηκε ως σήμα εισόδου σε έναν Ti:LiNbO3 modulator (MOD1) ο οποίος τροφοδοτούνταν από μία ηλεκτρική γεννήτρια παραγωγής ψευδό-τυχαίων ακολουθιών. Η έξοδος του διαμορφωτή ήταν μια οπτική PRBS ακολουθία δεδομένων τάξεως 2⁹-1 στα 5 Gb/s, η οποία χρησιμοποιήθηκε ως το συζυγές δυφίο πρόσβασης της μονάδας μνήμης. Το σχήμα 5.12(c) απεικονίζει την διάταξη που υλοποιήθηκε για την μελέτη της λειτουργίας Έγγραφής'. Η παραγωγή του συζυγούς δυφίου πρόσβασης της μονάδας μνήμης έγινε με παρόμοιο τρόπο με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη της λειτουργίας 'Ανάγνωσης'. Για την παραγωγή των σημάτων Bit and \overline{Bit} χρησιμοποιήθηκε ένα CW signal στα 1558nm ως σήμα εισόδου σε έναν επιπλέον Ti:LiNbO3 modulator (MOD2), ο οποίος τροφοδοτούνταν από μία ηλεκτρική γεννήτρια παραγωγής ψευδό-τυχαίων ακολουθιών τάξεως 29-1. Η έξοδος του διαμορφωτή ήταν μια οπτική ακολουθία NRZ δεδομένων στα 5 Gb/s με συνεχόμενα συζυγή μέρη μήκους 500-bit. Το σήμα αυτό στην συνέχεια χωρίστηκε σε δύο βραχίονες, οι οποίοι εισήγαγαν 500-bit διαφορική καθυστέρηση μεταξύ των δύο συνιστωσών, και εν συνεχεία τα δύο αυτά σήματα δεδομένων εισήλθαν στην μονάδα μνήμης ως Bit και \overline{Bit} .

Το σχήμα 5.13 παρουσιάζει πειραματικά αποτελέσματα από την λειτουργία της διάταξης στα 5 Gb/s στην κατάσταση 'Ανάγνωσης'. Το σχήμα 5.13(a) δείχνει το διάγραμμα ματιού και ένα χρονικό στιγμιότυπο του συζυγούς δυφίου πρόσβασης στην είσοδο της μονάδας μνήμης ενώ τα σχήματα 5.13(b) και 5.13(c) απεικονίζουν τα σήματα στις θύρες εξόδου ο/p2 και o/p1 του κυκλώματος για τις δύο καταστάσεις του flip-flop που αντιστοιχούν στην κυριαρχία του μήκους κύματος λ0 ή λ1, αντίστοιχα. Η επιτυχημένη λειτουργία της μονάδας μνήμης ταχείας προσπέλασης μπορεί να επιβεβαιωθεί από τις συμπληρωματικές τιμές του σήματος εξόδου του κυκλώματος και του συζυγούς δυφίου πρόσβασης.



Σχήμα 5.13. Διαγράμματα ματιού και χρονικά στιγμιότυπα κατά την λειτουργία 'Ανάγνωσης' των σημάτων: **(a)** συζυγές δυφίο πρόσβασης της μονάδας μνήμης, **(b)** έξοδος θύρας ο/p2, **(c)** έξοδος ο/p1.

Η λειτουργία της μονάδας μνήμης στην κατάσταση Έγγραφής' εικονίζεται στα διαγράμματα ματιού και στα χρονικά στιγμιότυπα του σχήματος 5.14(a)-(e). Το σχήμα 5.14(a) δείχνει το συζυγές δυφίου πρόσβασης στην είσοδο της μονάδας μνήμης, ενώ το σχήμα 5.14(b) απεικονίζει την Bit παλμοσειρά που εισέρχεται στην RAM. Τα σχήματα 5.14(c) και 5.14(d) δείχνουν τα 'Set' και 'Reset' σήματα στις εξόδους των ημιαγώγιμων ενισχυτών SOA3 και SOA4 αντίστοιχα, ενώ το σχήμα 5.14(e) παρουσιάζει το περιεχόμενο της μονάδας μνήμης όπως έχει αποτυπωθεί στο λ0 και έχει καταγραφεί στη θύρα εξόδου S/P2. Στην περίπτωση που η λογική τιμή του συζυγούς δυφίου πρόσβασης στην είσοδο της μονάδας μνήμης είναι '0', τα 'Set' και 'Reset' σήματα είναι όμοια με τις εισερχόμενες *Bit* και *Bit* παλμοσειρές μιας και οι τελευταίες περνούν ανεπηρέαστες από τους SOA3 και SOA4, αντίστοιχα. Σε αυτή την περίπτωση λοιπόν, το λ0 περιεχόμενο της μονάδας μνήμης ακολουθεί την μορφή του 'Set' σήματος με αποτέλεσμα την επιτυχή αποθήκευση στην μνήμη του εισερχόμενου σήματος Bit, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.14(e). Όταν η λογική τιμή του συζυγούς δυφίου πρόσβασης στην είσοδο της μονάδας μνήμης γίνει ίση με '1', τόσο ο SOA3 όσο και ο SOA4 λειτουργούν στην κατάσταση μημεταγωγής (OFF-switching) αποκλείοντας την είσοδο στην μονάδα μνήμης στις παλμοσειρές ^{Bit} και ^{Bit}. Με αυτό τον τρόπο, τα σήματα 'Set' και 'Reset' γίνονται ίσα με μηδέν ανεξάρτητα από την μορφή των ^{Bit} και ^{Bit}, ενώ το περιεχόμενο της μονάδας μνήμης διατηρεί την προηγούμενή του κατάσταση.



Σχήμα 5.14. Χρονικά στιγμιότυπα και διαγράμματα ματιού των: **(a)** συζυγές δυφίο πρόσβασης, **(b)** Bit εισόδου, **(c)** σήμα 'Set', **(d)** σήμα 'Reset' και **(e)** περιεχόμενο της μονάδας RAM καταγεγραμμένο στη θύρα *S*/P2 (λ0).

Το **σχήμα 5.15** παρουσιάζει καμπύλες για τον ρυθμό λαθών οι οποίες προέκυψαν από μετρήσεις σε κάθε στάδιο λειτουργίας της μονάδας οπτικής μνήμης και για ρυθμό μετάδοσης 5 Gb/s. Οι καμπύλες του **σχήματος 5.15** φανερώνουν ότι η λειτουργία του κυκλώματος γίνεται χωρίς λάθη και στην κατάσταση 'Ανάγνωσης' αλλά και στην κατάσταση 'Εγγραφής', με μία επιπλέον τιμή ισχύος στον δέκτη της τάξεως των 2 και 3 dB, αντίστοιχα. Στις ιδανικές συνθήκες λειτουργίας της μονάδας μνήμης η ισχύς των δύο CW σημάτων ήταν 1 dBm και 5.5 dBm (μέση τιμή) ενώ η ισχύς κορυφής των 'Set' and 'Reset' σημάτων ήταν 6.5dBm και 8.8dBm, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.15. Μετρήσεις BER στα 5 Gb/s για τις καταστάσεις 'Ανάγνωσης' και 'Εγγραφής'.

5.4 Συμπεράσματα

παρούσας διατριβής, Στα πλαίσια της επιχειρήσαμε να αντιμετωπίσουμε τις προκλήσεις που θέτει η απουσία οπτικής αποθήκευσης των δεδομένων, παρουσιάζοντας την πρώτη αμιγώς οπτική μονάδα μνήμης άμεσης προσπέλασης [5.1]. Το κύκλωμα που προτείναμε αποτελείται από δύο ημιαγώγιμους οπτικούς ενισχυτές και ένα ολοκληρωμένο οπτικό flip-flop, το οποίο αποτελείται από δύο συζευγμένα MZI [5.7]. Το οπτικό flipflop λειτουργεί ως στοιχείο μνήμης μοναδιαίου-bit, κάνοντας χρήση του μηχανισμού διασύνδεσης των 2 SOA-MZI και των μηκών κύματος πόλωσης για τον καθορισμό του περιεχομένου προς αποθήκευση. Οι 2 ενισχυτές SOA εκμεταλλεύονται την ετεροδιαμόρφωση κέρδους (XGM) για να ελέγχουν την πρόσβαση στο οπτικό flip-flop.

Η πειραματική μελέτη της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής στα 5 Gb/s επιβεβαίωσε τα πολύ υψηλά επίπεδα απόδοσης που προσφέρει, που για πρώτη φορά μπορούν να φτάσουν έως και τα 40 Gb/s [5.2]. Το κύκλωμα λειτούργησε χωρίς λάθη τόσο στην κατάσταση 'Ανάγνωσης' όσο και σε αυτή της Έγγραφής, απαιτώντας πολύ μικρή αύξηση στην ισχύ του σήματος δεδομένων στο δέκτη, σε σχέση με το αρχικό σήμα, για την διατήρηση του ίδιου BER [5.1]. Η διάταξη που παρουσιάζει το παρών κεφάλαιο εκμεταλλεύεται άμεσα την πρόσφατα εισηγμένη πλατφόρμα ολοκλήρωσης οπτικών κυκλωμάτων πυριτίου, κάτι που επιδεικνύει την δυνατότητα άμεσης υλοποίησης και εφαρμογής της. Το προτεινόμενο κύκλωμα μπορεί να βρει εφαρμογή σε λειτουργίες επεξεργασίας δεδομένων ασύγχρονων και τυχαίου μεγέθους πακέτων, βελτιώνοντας την διαφάνεια στον τύπο των εισερχόμενων δεδομένων των μοναδιαίου-bit flip-flops [5.12]. Η αρχιτεκτονική του αναλογία με την αντίστοιχη ηλεκτρονική μονάδα μνήμης ταχείας προσπέλασης [5.9], μπορεί εν δυνάμει να οδηγήσει σε υλοποιήσεις πολύ-κυψελικών δομών οπτικής RAM, αξιοποιώντας τεχνικές ολοκλήρωσης πολλαπλών SOAs [5.13] ή, εναλλακτικά, μεταγωγέων βασισμένων σε πυρίτιο αντί για SOA, για αυξημένη πυκνότητα ολοκλήρωσης. Η αμιγώς οπτική μονάδα μνήμης ταχείας προσπέλασης που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και παρουσιάστηκε σε αυτό το κεφάλαιο, αποτελεί μια σημαντική εξέλιξη στην οπτική επεξεργασία και πραγματοποιεί μια τομή στον τομέα των επικοινωνιών αλλά και στην επιστήμη των υπολογιστών γενικότερα.

Αναφορές

- [5.1] N. Pleros, D. Apostolopoulos, D. Petrantonakis, C. Stamatiadis and H. Avramopoulos, "Optical Static RAM Cell", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 21, No 2, pp. 73-75, Jan. 2009.
- [5.2] Δ. Γ. Φίτσιος, "Θεωρητική μελέτη οπτικής διάταξης RAM (Random Access Memory) και εύρεση της συνάρτησης μεταφοράς της", Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πληροφορικής Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 2009.
- [5.3] D. K. Hunter, M. C. Chia, and I. Andonovic, "Buffering in optical packet switches," *J. Lightw. Technol.*, vol. 16, no. 12, pp. 2081–2094, Dec. 1998.
- [5.4] J.P. Mack, H.N. Poulsen, E.F. Burmeister, J.E. Bowers, and D.J. Blumenthal, "A 40 Gb/s asynchronous optical packet buffer based on an SOA gate matrix for contention resolution", in Proc. Optical Fiber Commun. Conf (OFC) 2007, OWH7, USA, 2007.
- [5.5] M. T. Hill et al, "A fast low-power optical memory based on coupled micro-ring lasers", Nature, Vol. 432, pp. 206-209, Nov.2004.
- [5.6] G. Yuan and S. Yu, "Analysis of dynamic switching behavior of bistable semiconductor ring lasers triggered by resonant optical pulse injection", *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 13, no. 5, pp. 1227–1234, Sep./Oct. 2007.
- [5.7] Y. Liu et al, "Packaged and hybrid integrated all-optical flip-flop memory", Electron. Lett., Vol. 42, No. 24, pp. 1399-1400, Nov. 2006.
- [5.8] R. Takahashi, "Photonic Random Access Memory for 40-Gb/s 16-b burst optical packets", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 16, No. 4, pp. 1185-1187, Apr. 2004.
- [5.9] A. V. Krishnamoorthy, R. G. Rozier, J. E. Ford and F. E. Kiamilev, "CMOS static RAM chip with high-speed optical Read and Write", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 9, No. 11, pp. 1517-1519, Nov. 1997.
- [5.10] J. Mork, M.T. Hill, H.J.S. Dorren, T.J. de Vries, et. al., A fast low-power optical memory based on coupled micro-ring lasers, Nature 432, 206-209.
- [5.11] Y. Liu, R. McDougall, J. Seoane, E. Kehayas, M. T. Hill, G. Maxwell, S. Zhang, R. Harmon, F.M. Huijskens, L. Rivers, P. V. Holm-Nielsen, J. M. Martinez, J. Herrera, J. Marti, H. Avramopoulos, P. Jeppesen, A.M.J. Koonen, A. Poustie and H.J.S. Dorren, "Characterization of Hybrid Integrated All-Optical Flip-Flop", Invited Talk, paper ThBB 1, IEEE/LEOS Annual Meeting 2006, Montreal, Canada.
- [5.12] H. J. S. Dorren et al, "Optical packet switching and buffering by using all-optical signal processing methods", J. of Lightwave Technol., Vol. 21, No. 1, pp. 2-12, Jan. 2003.

[5.13] G.T. Kanellos et al. "All-optical 3R Burst-Mode Reception at 40 Gb/s using four integrated MZI switches", J. of Lightwave Technol., vol. 25, No. 1, pp. 184-192, Jan. 2007.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Σύνοψη αποτελεσμάτων και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Ο κύριος σκοπός της παρούσας διατριβής ήταν η σχεδίαση και η ανάπτυξη αμιγώς οπτικών κυκλωμάτων, βασισμένων σε ολοκληρωμένα στοιχεία, για την επεξεργασία, τη μεταγωγή και την αποθήκευση δεδομένων. Το βασικό δομικό στοιχείο όλων των κυκλωμάτων που υλοποιήθηκαν ήταν το συμβολόμετρο MZI. Οι διατάξεις που υλοποιήθηκαν εκμεταλλεύονται πλήρως τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των φωτονικών στοιχείων από τα οποία αποτελούνται, προφέροντας διαφάνεια στο ρυθμό και την μορφή του εισερχόμενου σήματος δεδομένων. Ακόμα, παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι αντίστοιχων των υλοποιήσεων, όπως υψηλή ηλεκτρονικών ταχύτητα επεξεργασίας, ανεξαρτησία της κατανάλωσης ισχύος από το ρυθμό μετάδοσης και απουσία ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής στην περίπτωση ολοκλήρωσης τους σε συστήματα στο δίκτυο. Η ανάπτυξη τέτοιου είδους κυκλωμάτων συντελεί σε μεγάλο βαθμό στην ώθηση των τεχνολογικών εξελίξεων προς την υλοποίηση αμιγώς οπτικών δικτύων, στα οποία θα αποφεύγεται η

χρήση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και όλες οι λειτουργικές διαδικασίες θα επιτελούνται στο οπτικό επίπεδο.

Το πρώτο σημαντικό πρόβλημα, που αντιμετωπίστηκε στα πλαίσια αυτής της διατριβής ήταν η αμιγώς οπτική αναγέννηση του σήματος δεδομένων κατά την μετάδοση του. Η υποβάθμιση της ποιότητας του σήματος αποτελεί σημαντικό περιοριστικό παράγοντα για την μέγιστη απόσταση διάδοσής του και περιορίζει ταυτόχρονα και τον μέγιστο ρυθμό λειτουργίας του δικτύου. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται έως σήμερα με χρήση ηλεκτρονικών αναγεννητών, οι οποίοι όμως δεν είναι σε θέση να καλύψουν τις σύγχρονες τηλεπικοινωνιακές ανάγκες. Το δεύτερο σημαντικό πρόβλημα, στο οποίο εστιάσαμε ήταν η εξαγωγή της επικεφαλίδας και ο διαχωρισμός της από το φορτίο του πακέτου καθώς και η 3R αναγέννησή του τελευταίου κατά την είσοδό του στον κόμβο δρομολόγησης, έτσι ώστε το περιεχόμενό της επικεφαλίδας να μπορεί να επεξεργαστεί από το επόμενο υποσύστημα του κόμβου και να αναγνωριστεί ο τελικός προορισμού του πακέτου. Τέλος, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής παρουσιάσαμε την πρώτη αμιγώς οπτική μονάδα μνήμης άμεσης προσπέλασης.

Στην πορεία για την επίλυση αυτών των προβλημάτων αναπτύχθηκαν πρωτοποριακά κυκλώματα οπτικής επεξεργασίας σήματος για την υλοποίηση επιμέρους δομικών υποσυστημάτων. Η λειτουργία αυτών των συστημάτων ανέδειξε, επίσης, νέες εφαρμογές αυτών στο γενικότερο πεδίο της οπτικής μεταγωγής και επεξεργασίας δεδομένων.

Πιο συγκεκριμένα, με δεδομένο το παραπάνω πλαίσιο αναφοράς, και αφού υλοποιήθηκαν οι κατάλληλες γεννήτριες των οπτικών σημάτων, η έρευνα επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη των παρακάτω υποσυστημάτων:

- ενός αμιγώς οπτικού 2R αναγεννητή/μετατροπέα μήκους κύματος βασισμένο στο συμβολόμετρο SOA-MZI.
- ενός κυκλώματος αναγέννησης πακέτων δεδομένων και διαχωρισμού του φορτίου από την επικεφαλίδα τους.
- μίας **αμιγώς οπτικής μονάδας μνήμης ταχείας προσπέλασης**.

6.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Στα κεφάλαια που προηγήθηκαν, παρουσιάστηκαν τρείς αμιγώς οπτικές κυκλωματικές υλοποιήσεις βασισμένες σε υβριδικά ολοκληρωμένα συμβολόμετρα SOA-MZI. Τα κυκλώματα αυτά, όπως αναφέραμε και παραπάνω, είναι: μια καινοτόμα υλοποίηση ενός 2R αναγεννητή/μετατροπέα μήκους κύματος, ένα κύκλωμα για την υποδοχή πακέτων δεδομένων σε οπτικούς κόμβους και μία μονάδα οπτικής μνήμης ταχείας προσπέλασης. Τα σημαντικότερα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον σχεδιασμό, την υλοποίηση και την μελέτη της λειτουργίας αυτών των διατάξεων, παρουσιάζονται στις παραγράφους που ακολουθούν.

6.1.1 Αμιγώς οπτική 2R αναγέννηση NRZ δεδομένων

Η μελέτη μας στις αμιγώς οπτικές 2R αναγεννητικές διατάξεις εστιάστηκαν σε NRZ δεδομένα, τα οποία αποτελούν και την πιο διαδεδομένη μορφή δεδομένων για τη μετάδοση οπτικής πληροφορίας αυτή την στιγμή. Οι διατάξεις που μελετήθηκαν βασίστηκαν στο συμβολόμετρο SOA-MZI. Η μελέτη που πραγματοποιήσαμε εστιάστηκε στα δύο πιο γνωστά σχήματα 2R αναγέννησης με χρήση διακοπτών SOA-MZI και σε ένα καινούργιο σχήμα, το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Στόχος μας ήταν όχι μόνο να εκτιμήσουμε και να συγκρίνουμε την απόδοση των διαφόρων αναγεννητικών διατάξεων, αλλά κυρίως, να καθορίσουμε τα οφέλη τα που προκύπτουν από την χρήση αμιγώς οπτικώς διατάξεων αναγέννησης και μετατροπής μήκους κύματος στη συνολική επίδοση του δικτύου.

Η μελέτη των 2R αναγεννητικών διατάξεων πραγματοποιήθηκε αρχικά με την χρήση προσομοιωτικών εργαλείων. Συγκεκριμένα, αρχικά αναπτύχθηκε ένα προσωμοιωτικό μοντέλο ενός εμπορικά διαθέσιμου διακόπτη MZI και ελέγχθηκε η ακρίβεια του με πειραματικά δεδομένα. Σε όλες τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν η συμπεριφορά του μοντέλου των SOAs του διακόπτη ήταν παρόμοια με αυτή που μετρήθηκε πειραματικά.

Στην συνέχεια ακολούθησε η προσομοιωτική μελέτη των τριών αναγεννητικών διατάξεων για ψευδοτυχαίες (Pseudo-Random Bit Sequences – PRBS) ροές NRZ δεδομένων τάξης έως 2³¹-1 στα 10 και 40 Gbps, με σκοπό την εκτίμηση της επίδοσης τους. Τα τρία σχήματα μελετήθηκαν στα εξής σενάρια: Αναγέννηση του σήματος δεδομένων έπειτα από μετάδοσή του σε οπτικό επαναληπτικό βρόγχο μετάδοσης.

Η κάθε μια αναγεννητική διάταξη τοποθετήθηκε στην έξοδο ενός επαναληπτικού βρόγχου μετάδοσης μήκους ≈95 Km, με σκοπό τον ακριβή προσδιορισμό της βελτίωσης των χαρακτηριστικών του σήματος στην έξοδο του αναγεννητή. Για λόγους σύγκρισης, μετρήσεις BER πραγματοποιήθηκαν και απευθείας στο σήμα εξόδου του βρόγχου. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για διάφορες αποστάσεις μετάδοσης έδειξαν τα πλεονεκτήματα της αναγεννητικής διαδικασίας και την ξεκάθαρη υπεροχή του νέου σχήματος σε σχέση με προηγούμενες υλοποιήσεις. Ο πίνακας 6.1 συνοψίζει τα αποτελέσματα.

Πίνακας 6.1: Απαιτούμενη ισχύ στον	δέκτη για	χ την	διατήρηση	του	ίδιου	BER	με το
σήμα εξόδου του βρόγχου (σε dBm).							

Αριθμός επαναλήψεων στον βρόγχο	Κλασσικό σχήμα	Σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου	Διαφορικά πολωμένο σχήμα
10	-2	-2	-5
20	-1	-1	-2
30	-1	-1	-2

 Μετάδοση του σήματος δεδομένων μετά την 2R οπτική αναγέννησή του.

Η μελέτη αυτή αποτελεί συνέχεια του προηγούμενου σεναρίου καθώς στην ήδη υπάρχουσα τοπολογία προστέθηκε ένας δεύτερος οπτικός βρόγχος μετά τον αναγεννητή, με σκοπό τον προσδιορισμό των πλεονεκτημάτων που συνοδεύουν την αναγέννηση του σήματος κατά την μετάδοση του. Ο δεύτερος οπτικός βρόγχος είχε τις ίδιες παραμέτρους με τον βρόγχο που προηγούταν του αναγεννητή.

Σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν το μήκος μετάδοσης του δεύτερου βρόγχου ήταν το ίδιο με εκείνου πριν την αναγέννηση. Μετρήσεις BER πραγματοποιήθηκαν στην έξοδο του πρώτου βρόγχου, μετά τον 2R αναγεννητή και στην έξοδο του δεύτερου βρόγχου για κάθε αναγεννητικό σχήμα. Ακόμα, επιπλέον μετρήσεις BER πραγματοποιήθηκαν για την περίπτωση μετάδοσης μέσω του πρώτου και του δεύτερου βρόγχου χωρίς την ενδιάμεση παρουσία αναγεννητή.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για διάφορες αποστάσεις μετάδοσης έδειξαν για μία ακόμα τα πλεονεκτήματα της αναγεννητικής διαδικασίας και την ξεκάθαρη υπεροχή του νέου σχήματος σε σχέση με προηγούμενες υλοποιήσεις. Ο πίνακας 6.2 συνοψίζει τα αποτελέσματα.

Αριθμός επαναλήψεων στους βρόγχους	Έξοδος 2 ^{ου} βρόγχου με το κλασσικό σχήμα	Έξοδος 2 ^{ου} βρόγχου με το σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου	Έξοδος 2 ^{ου} βρόγχου με το διαφορικά πολωμένο σχήμα	Έξοδος 2 ^{ου} βρόγχου χωρίς αναγέννηση	
10	-1,6	-1,6	-3	+1	
20	-1,3	-1,3	-3,1	+1 (κατώφλι λαθών στο 10 ⁻¹¹)	
30	-1	-1	-1,2	+5 (κατώφλι λαθών στο 10 ⁻¹¹)	

Πίνακας 6.2: Απαιτούμενη ισχύ στον δέκτη για την διατήρηση του ίδιου BER με το σήμα εξόδου του βρόγχου 1 (σε dBm).

Η λειτουργία των τριών αναγεννητικών διατάξεων μελετήθηκε και για εισερχόμενα σήματα δεδομένων στα 40 Gb/s. Από την μελέτη αυτή προέκυψε ότι η χρήση του σχήματος αντίρροπων σημάτων ελέγχου σε συνδυασμό με το επιπλέον CW σήμα στο διαφορικά πολωμένο σχήμα, αντισταθμίζουν τα ανεπιθύμητα φαινόμενα της αργής ανάκαμψης επιτυγχάνοντας ένα σημαντικά καλύτερο σε μορφή παλμό εξόδου συγκριτικά με τις άλλες δύο υλοποιήσεις.

Μετά την μελέτη των 2R SOA-MZI αναγεννητών με την χρήση του προγράμματος VPI, ακολούθησε η πειραματική τους μελέτη στα 10 Gb/s. Το πρώτο στάδιο της μελέτης αυτής περιελάμβανε την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων τις προσομοίωσης και την εξακρίβωση των ορίων λειτουργίας των συνδεσμολογιών. Ακόμα, η μελέτη πραγματοποιήθηκε για διάφορες RPBS ακολουθίες δεδομένων με σκοπό την εκτίμηση του ποσοστού εξάρτησης της λειτουργίας του κυκλώματος από την μορφή των δεδομένων εισόδου. Σε αυτές τις μετρήσεις, όπως και στην προηγούμενη μελέτη με το VPI, το διαφορικά πολωμένο σχήμα υπερείχε ξεκάθαρα των άλλων υλοποιήσεων.

Τέλος, στην πειραματική ανάλυση που πραγματοποιήσαμε και παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, εξετάσαμε την διασυνδεσιμότητα των υπό μελέτη 2R αναγεννητικών διατάξεων με τη χρήση ενός οπτικού επαναληπτικού βρόγχου. Τα αποτελέσματα της μελέτης επιβεβαίωσαν για μία ακόμα φορά την ανωτερότητα της νέας 2R αναγεννητικής συνδεσμολογίας. Συγκεκριμένα, σε αυτή την κρίσιμη λειτουργία, αν και οι άλλες δυο υπό μελέτη συνδεσμολογίες δεν καταφέρνουν διατηρήσουν την ποιότητα του σήματος δεδομένων όταν αυτό διέρχονταν διαδοχικά από αυτές, με την χρήση του διαφορικά πολωμένου σχήματος επιτυγχάνουμε οκτώ διαδοχικές μετατροπές μήκους κύματος, αριθμό ρεκόρ για τα έως τώρα δεδομένα στον χώρο των 2R αναγεννητών ημιαγωγού.

6.1.2 Αμιγώς οπτικό κύκλωμα αναγέννησης πακέτων δεδομένων και εξαγωγής επικεφαλίδας

Στα πλαίσια της παρούσης διατριβής αναπτύχθηκε ένα πρωτότυπο κύκλωμα αναγέννησης δεδομένων και διαχωρισμού επικεφαλίδας/φορτίου οπτικών πακέτων δεδομένων στα 40 Gb/s. Το προτεινόμενο κύκλωμα βασίστηκε στη συνδυαστική χρήση ενός κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού πακέτων, το οποίο αποτελείται από ένα Fabry-Perot φίλτρο και μια οπτική πύλη Mach Zehnder που λειτουργεί ως κύκλωμα ψαλιδισμού, με τρία ακόμα MZI τα οποία συνδέονται με το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού σειριακά. Η τέταρτη κατά σειρά πύλη MZI επιτελεί τη λογική πράξη AND μεταξύ του αρχικού πακέτου δεδομένων και μιας καθυστερημένης χρονικά εκδοχής του αντίστοιχου ανακτημένου πακέτου ρολογιού. Με κατάλληλη επιλογή της χρονικής καθυστέρησης μεταξύ του πακέτου δεδομένων και του αντίστοιχου ανακτημένου πακέτου ρολογιού στο δεύτερο MZI, έτσι ώστε η χρονική καθυστέρηση να είναι ίση με τη χρονική διάρκεια του πεδίου της επικεφαλίδας του πακέτου, η πράξη AND έχει ως αποτέλεσμα τον επιτυχή διαχωρισμό της επικεφαλίδας από το φορτίο του πακέτου δεδομένων. Το πρώτο MZI λειτουργεί σαν μετατροπέας μήκους κύματος των εισερχόμενων πακέτων σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος προσδίδοντας ευστάθεια και βέλτιστη λειτουργία στο σύστημα μας, αφού το ανεξαρτητοποιεί από το μήκος κύματος του πακέτου που εισέρχεται στο κύκλωμα μας. Το τρίτο MZI

χρησιμοποιείται ως πύλη απόφασης για την αναγέννηση των δεδομένων.

Το προτεινόμενο κύκλωμα υλοποιήθηκε με την πρώτη ολοκληρωμένη τετραπλή συστοιχία διακοπτών MZI. Η λειτουργία του ελέγχθηκε σε πειραματικό επίπεδο με σήματα εισόδου οπτικά πακέτα διαφορετικού μήκους όσον αφορά το φορτίου, και σταθερού μήκους όσον αφορά την επικεφαλίδα σε ρυθμό μετάδοσης τα 40 Gb/s, ενώ τα πακέτα είχαν διαφορετικό μήκος σκοπίμως, προκειμένου να αποδειχθεί η ανεξαρτησία του συστήματος σε θέματα που αφορούν το μέγεθος των πακέτων. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι σε όλα τα σενάρια κυκλοφορίας που μελετήθηκαν, η προτεινόμενη διάταξη ανταποκρίθηκε με μεγάλη επιτυχία.

Βασικά πλεονεκτήματα της προτεινόμενης διάταξης είναι ο μικρός χρόνος ανάκτησης και σβέσης του παραγόμενου πακέτου ρολογιού και η δυνατότητα λειτουργίας του κυκλώματος σε επίπεδο μεμονωμένου πακέτου, ακόμα και στην περίπτωση, που τα πακέτα δεδομένων είναι μεταβλητού μεγέθους και ασύγχρονα μεταξύ τους. Ακόμα, το προτεινόμενο κύκλωμα είναι απλό στην υλοποίησή του, καθώς απαιτεί μόνο ένα Fabry-Perot φίλτρο και τέσσερις οπτικές πύλες για την κατασκευή του και επίσης αποφεύγει τη χρήση ηλεκτρονικών διατάξεων, ενώ μοναδική απαίτησή για τη λειτουργία του είναι το αρχικό πακέτο δεδομένων ως είσοδος. Η πολυπλοκότητα του κυκλώματος δεν αυξάνει όταν αυξάνει το μέγεθος της επικεφαλίδας, καθώς αρκεί μόνο μια αντίστοιχη μεταβολή στη χρονική καθυστέρηση μεταξύ των δύο σημάτων στη δεύτερη πύλη για την εκ νέου επιτυχή λειτουργία του. Επιπλέον, δεδομένων των δυνατοτήτων των επιμέρους υποσυστημάτων του κυκλώματος για λειτουργία τους σε ταχύτητες μέχρι 100 Gb/s, ο διαχωρισμός της επικεφαλίδας με χρήση αυτού του κυκλώματος αναμένεται να είναι εφικτός και σε ταχύτητες πολύ μεγαλύτερες των 40 Gb/s.

6.1.3 Αμιγώς οπτική μονάδα μνήμης ταχείας προσπέλασης

Ένα σημαντικό μέρος της παρούσας διατριβής αφιερώθηκε στην αντιμετώπιση των προκλήσεων που θέτει η απουσία οπτικής αποθήκευσης

των δεδομένων και είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη της πρώτη αμιγώς οπτικής μονάδας μνήμης ταχείας προσπέλασης. Το κύκλωμα που προτείναμε αποτελείται από δύο ημιαγώγιμους οπτικούς ενισχυτές και ένα ολοκληρωμένο οπτικό flip-flop, το οποίο αποτελείται από δύο συζευγμένα MZI. Το οπτικό flip-flop λειτουργεί ως στοιχείο μνήμης μοναδιαίου-bit, κάνοντας χρήση του μηχανισμού διασύνδεσης των 2 SOA-MZI και των μηκών κύματος πόλωσης για τον καθορισμό του περιεχομένου προς αποθήκευση. Οι 2 ενισχυτές SOA εκμεταλλεύονται την έτερο-διαμόρφωση κέρδους (XGM) για να ελέγχουν την πρόσβαση στο οπτικό flip-flop.

Η πειραματική μελέτη της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής στα 5 Gb/s επιβεβαίωσε τα πολύ υψηλά επίπεδα απόδοσης που προσφέρει, που για πρώτη φορά μπορούν να φτάσουν έως και τα 40 Gb/s. Το κύκλωμα λειτούργησε χωρίς λάθη τόσο στην κατάσταση 'Ανάγνωσης' όσο και σε αυτή της Έγγραφής', απαιτώντας πολύ μικρή αύξηση στην ισχύ του σήματος δεδομένων στο δέκτη, σε σχέση με το αρχικό σήμα, για την διατήρηση του ίδιου BER. Η διάταξη που αναπτύξαμε εκμεταλλεύεται άμεσα την πρόσφατα εισηγμένη πλατφόρμα ολοκλήρωσης οπτικών κυκλωμάτων πυριτίου, κάτι που αποδεικνύει την δυνατότητα άμεσης υλοποίησης και εφαρμογής της. Το προτεινόμενο κύκλωμα μπορεί να βρει εφαρμογή σε λειτουργίες επεξεργασίας δεδομένων ασύγχρονων και τυχαίου μεγέθους πακέτων, βελτιώνοντας την διαφάνεια στον τύπο των εισερχόμενων δεδομένων των μοναδιαίου-bit flip-flops.

Η αμιγώς οπτική μονάδα μνήμης ταχείας προσπέλασης που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αποτελεί μια σημαντική εξέλιξη στην οπτική επεξεργασία και πραγματοποιεί μια τομή στον τομέα των επικοινωνιών αλλά και στην επιστήμη των υπολογιστών γενικότερα.

6.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής παρουσιάστηκαν συστήματα για την επεξεργασία και αποθήκευση δεδομένων με αμιγώς απτικό τρόπο. Τα κυκλώματα που υλοποιήθηκαν στόχευαν στην βελτίωση των χαρακτηριστικών μετάδοσης του σήματος, στην επεξεργασία του σε έναν οπτικό κόμβο και στην αποθήκευσή του η οποία εμφανίζει μεγάλη γκάμα εφαρμογών. Η περαιτέρω εξέλιξη αυτών των συστημάτων βασίζεται σε έναν μεγάλο βαθμό στην υιοθέτηση νέων τεχνικών σχεδίασης συστημάτων και μετάδοσης της οπτικής πληροφορίας και κυρίως, στην αλματώδη πρόοδο της τεχνολογίας οπτικής ολοκλήρωσης.

6.2.1 Σχεδίαση αμιγώς οπτικών συστημάτων επεξεργασίας και αποθήκευσης δεδομένων

Η φωτονική τεχνολογία και πιο συγκεκριμένα η οπτική επεξεργασία σήματος, μπορεί να παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των ηλεκτρονικών, όπως υψηλή ταχύτητα επεξεργασίας, ανεξαρτησία της κατανάλωσης ισχύος από το ρυθμό μετάδοσης και απουσία ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής στην περίπτωση ολοκλήρωσης φωτονικών κυκλωμάτων σε συστήματα στο δίκτυο. Τα οπτικά συστήματα πρέπει να μετάγουν, να δρομολογούν, ακόμα και να επιλύουν τη συμφόρηση στους οπτικούς κόμβους χωρίς την ανάγκη για οπτο-ηλεκτρονική μετατροπή. Στο επίπεδο λογικής σχεδίασης, υψίστης σημασίας είναι η συνειδητοποίηση ότι τα φωτονικά κυκλώματα επεξεργασίας διαφέρουν αρκετά από τα αντίστοιχα ηλεκτρονικά και η σχεδίαση τους θα πρέπει να εκμεταλλεύεται τα μοναδικά χαρακτηριστικά του κάθε οπτικού στοιχείου, ενεργού ή παθητικού. Η ευθύς εφαρμογή τεχνικών της ηλεκτρονικής και η απλή μετατροπή των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων στο οπτικό επίπεδο δεν αποτελεί πάντα τη βέλτιστη λύση.

Στον τομέα της αναγέννησης του σήματος κατά την μετάδοσή του, η φωτονικές υλοποιήσεις υπερτερούν σε σχέση με αντίστοιχες ήλεκτροοπτικές, μιας και παρουσιάζουν διαφάνεια στον ρυθμό και στο τύπο των εισερχόμενων δεδομένων. Το σημείο αυτό πρέπει να αποτελέσει βάση για το σχεδιασμό μελλοντικών αναγεννητικών διατάξεων που υποχρεωτικά θα πρέπει να είναι σε θέση να λειτουργούν με συστήματα διαμόρφωσης φάσης, όπως DPSK και DQPSK, τα οποία φαίνεται ότι υπερτερούν σημαντικά σε θέματα μετάδοσης σε ρυθμούς μεγαλύτερους από 40 Gb/s. Κρίσιμο χαρακτηριστικών των αναγεννητών είναι και η δυνατότητα διασυνδεσιμότητας τους που όπως είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο μπορεί να αντιμετωπιστεί με την τεχνική που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

Ακόμα, σημαντικό ρόλο στην καθιέρωση της οπτικής επεξεργασίας σήματος μπορεί να παίξει και το προτεινόμενο κύκλωμα διαχωρισμού φορτίου/επικεφαλίδας και αναγέννηση σήματος. Το κύκλωμα αυτό αποτελεί ουσιαστικά το βασικό κομμάτι της υποδοχής ενός οπτικού κόμβου δρομολόγησης και πραγματοποιεί το πρώτο βήμα στην ελαχιστοποίηση, ή απάλειψη, ήλεκτρο-οπτικών μετατροπών στην στον κόμβο, και αξιοποιώντας όλα τα ωφέλει της αμιγούς οπτικής εξεργασίας σήματος. Και σε αυτή την περίπτωση, η εξέλιξη του προτεινόμενου κυκλώματος πρέπει να ακολουθήσει τους σχεδιαστικούς κανόνες που αναφέρθηκαν στην παραπάνω παράγραφο για τους οπτικούς αναγεννητές. Επιπλέον όμως, όσο αφορά την σχεδίαση του οπτικού κόμβου, η ελαχιστοποίηση των απαραίτητων οπτικών πυλών είναι υψίστης σημασίας, καθώς η διασύνδεση πολλών οπτικών πυλών, εκτός από τις προφανείς επιπτώσεις στο κόστος, οδηγούν και σε συσσώρευση θορύβου, φαινόμενο το οποίο μειώνει αρκετά γρήγορα την ποιότητα των επεξεργαζόμενων σημάτων. Από την πλευρά της λογικής σχεδίασης, ο οπτικός κόμβος πρέπει να έχει χαρακτηριστικά επεκτασιμότητας (scaling) στα στάδια του πίνακα μεταγωγής και της επεξεργασίας σήματος.

Τέλος, η μονάδα μνήμης ταχείας προσπέλασης που αναπτύχθηκε στο Ε.Φ.Ε. αποτελεί το πρώτο από μια σειρά κυκλωμάτων που δύναται να υλοποιηθούν με βάση το συγκεκριμένο στοιχείο. Το **σχήμα 6.1** δείχνει μια 4x3 πολύ-κυτταρική RAM δομή αποτελούμενη από δώδεκα ανεξάρτητες ελεγχόμενες μονάδες μνήμης σε έναν 2-D πίνακα, με κάθε σειρά να έχει την δυνατότητα να αποθηκεύσει λέξεις των 3-bit. Ένα εισερχόμενο σήμα 'Ανάγνωσης'/Έγγραφής' καθορίζει την κατάσταση του κυκλώματος, ενώ η πρόσβαση στις επιμέρους μονάδες RAM επιτρέπεται μόνο όταν η είσοδος 'Word' έχει λογική τιμή '1'. Η υλοποίηση μιας συστοιχίας οπτικής μνήμης ταχείας προσπέλασης, ακόμα και με μικρές δυνατότητες αποθήκευσης, μπορεί δυνητικά να ανοίξει νέους ορίζοντες στους τομείς της επεξεργασίας δεδομένων σε αμιγώς οπτικούς κόμβους δρομολόγησης και στην διασύνδεση υψίρρυθμων υπολογιστικών συστημάτων.



Σχήμα 6.1. 4x3 πολύ-κυτταρική RAM δομή αποτελούμενη από δώδεκα ανεξάρτητες ελεγχόμενες μονάδες μνήμης σε έναν 2-D πίνακα.

6.2.2 Φωτονική ολοκλήρωση

Το σημαντικότερο, πιθανότατα, κριτήριο για την υιοθέτηση της αμιγώς οπτικής επεξεργασίας σήματος σε εμπορικές εφαρμογές, αποτελεί η εξέλιξη της τεχνολογίας ολοκλήρωσης των φωτονικών διατάξεων. Ο ρυθμός εξέλιξής της είναι διαρκώς επιταχυνόμενος τα τελευταία χρόνια με αποτέλεσμα την επίδειξη μεγάλου αριθμού συστημάτων βασισμένων σε ολοκληρωμένα στοιχεία. Μπορούμε χαρακτηρίστηκα να αναφέρουμε τους 2R αναγεννητές που υλοποιήθηκαν με μεμονωμένους SOA-MZI υβριδικά ολοκληρωμένους διακόπτες και το κύκλωμα διαχωρισμού φορτίου/επικεφαλίδας και αναγέννησης οπτικών πακέτων το οποίο υλοποιήθηκε με την χρήση μίας ολοκληρωμένης συστοιχίας τεσσάρων μεμονωμένων συμβολόμετρων SOA-MZI. Στο σχήμα 6.2, φαίνεται επίσης ένα υβριδικά ολοκληρωμένο κύκλωμα αναγέννησης δεδομένων εκρηκτικής ροής, το οποίο αποτελείται από τρείς διασυνδεδεμένου διακόπτες MZI. Αξίζει να σημειωθεί πως η πλακέτα αυτή αποτελεί ένα πλήρες αμιγώς οπτικό κύκλωμα μίας και πέρα από τα MZI, περιλαμβάνει και όλα τα απαραίτητα παθητικά στοιχεία του κυκλώματος.



Σχήμα 6.2. (α) Δομικά σχεδιάγραμμα του αναγεννητή δεδομένων εκρηκτικής ροής και **(β)** ολοκληρωμένο κύκλωμα του αναγεννητή.

Η υλοποίηση του **σχήματος 6.2**, η οποία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του ευρωπαϊκού ερευνητικού έργου MUFINS, αποτέλεσε τομή στον χώρο της οπτικής ολοκλήρωσης, μιας και αποτέλεσε το πρώτο πραγματικά ολοκληρωμένο κύκλωμα αμιγούς οπτικής επεξεργασίας. Οι ραγδαίες εξελίξεις στο χώρο και οι απαιτήσεις για μεγαλύτερη πυκνότητα ολοκλήρωσης και αυξημένη λειτουργικότητα, οδήγησαν σε υλοποιήσεις με μεγάλο αριθμό ολοκληρωμένων στοιχείων. Ένα τέτοιο κύκλωμα φαίνεται στο **σχήμα 6.3** και αποτελεί ένα 8x8 αμιγώς οπτικό δρομολογητή κατασκευασμένο από το πανεπιστήμιο της Santa Barbara στην California των Ηνωμένων Πολιτειών.



Σχήμα 6.3. Αμιγώς Οπτικός Δρομολογητής 8x8.

Το επόμενο βήμα στην εξέλιξη της τεχνολογίας φωτονικής ολοκλήρωσης, το οποίο θα μπορούσε να μειώσει το μέγεθος των ολοκληρωμένων διατάξεων και να αυξήσει την πυκνότητα ολοκλήρωσης, είναι η χρήση μη-γραμμικών κυματοδηγών στην θέση των ημιαγώγιμων οπτικών ενισχυτών. Κλειδί επίσης για την δια-σύνδεση κυκλωμάτων σε ένα πλινθίο θα αποτελέσει και η εξέλιξη των ολοκληρωμένων ενισχυτικών στοιχείων που είναι αναγκαία για την αντιστάθμιση των απωλειών διάδοσης του σήματος μέσα στο πλινθίο.

Παράρτημα: Δημοσιεύσεις σε έγκριτα επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια

Δημοσιεύσεις σε περιοδικά (με κρίση):

- D. Apostolopoulos, D. Klonidis, P. Zakynthinos, K. Vyrsokinos, N. Pleros, I. Tomkos and H. Avramopoulos, "Cascadability Performance Evaluation of a new NRZ SOA-MZI Wavelength Converter", IEEE Photonic Technology Letters, Vol. 21, No. 18, Sept. 15, 2009.
- D. Apostolopoulos, K. Vyrsokinos, P. Zakynthinos, N. Pleros and H. Avramopoulos, "A SOA-MZI NRZ Wavelength Conversion Scheme with Enhanced 2R Regeneration Characteristics", IEEE Photonic Technology Letters, Vol. 21, No. 19, Oct. 1, 2009.
- Leontios Stampoulidis, Efstratios Kehayas, Paraskevas Bakopoulos, Dimitrios Apostolopoulos, Panagiotis Zakynthinos, Dimitrios Petrantonakis, A. Poustie, G. Maxwell and Hercules Avramopoulos, "Photonic Routing Systems Using All-optical, Hybrid Integrated Wavelength Converter Arrays", (invited), to appear in Journal of Networks, (special issue on Transparent Optical Networking).
- Nikos Pleros, Dimitrios Apostolopoulos, Dimitrios Petrantonakis, Christos Stamatiadis, and Hercules Avramopoulos, "Optical Static RAM Cell", IEEE Photonic Technology Letters, Vol. 21, No. 2, January 15, 2009.
- D. Petrantonakis, P. Zakynthinos, D. Apostolopoulos, A. Poustie, G. Maxwell, and H. Avramopoulos, "All-Optical Four-Wavelength Burst Mode Regeneration Using Integrated Quad SOA-MZI Arrays", IEEE Photonic Technology Letters, Vol. 20, No. 23, pp. 1953-1955, December 1, 2008.

- Hassan Teimoori, Dimitrios Apostolopoulos, Kyriakos G. Vlachos, Cédric Ware, Dimitrios Petrantonakis, Leontios Stampoulidis, Hercules Avramopoulos, and Didier Erasme, "Optical-Logic-Gate Aided Packet-Switching in Transparent Optical Networks", IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol. 26, No. 16, pp. 2848-2856, August 15, 2008.
- L. Stampoulidis, D. Apostolopoulos, D. Petrantonakis, P. Zakynthinos, P. Bakopoulos, O. Zouraraki, E. Kehayas, A. Poustie, G. Maxwell and H. Avramopoulos, "Enabling Tb/s Photonic Routing: Development of Advanced Hybrid Integrated Photonic Devices to Realize High-Speed, All-Optical Packet Switching", Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of, Volume 14, Issue 3, May-June 2008 Page(s):849 – 860.
- Carla Raffaelli, Kyriakos Vlachos, Nicola Andriolli, Dimitrios Apostolopoulos, Jakob Buron, Ruth van Caenegem, Grzegorz Danilewicz, Jorge M. Finochietto, Joan Garcia-Haro, Dimitrios Klonidis, Mike O'Mahony, Guido Maier, Achille Pattavina, Pablo Pavon-Marino, Sarah Ruepp, Michele Savi, Mirco Scaffardi, Ioannis Tomkos, Anna Tzanakaki, Lena Wosinska, Olga Zouraraki and Fabio Neri, "Photonics in switching: Architectures, systems and enabling technologies", Elsevier Computer Networks 52 (2008) 1873–1890.
- D. Apostolopoulos, P. Zakynthinos, L. Stampoulidis, E. Kehayas, R. McDougall, R. Harmon, A. Poustie, G. Maxwell, R. Van Caenegem, D. Colle, M. Pickavet, E. Tangdiongga, H.J.S. Dorren and H. Avramopoulos, *"Contention Resolution for Burst-Mode Traffic Using Integrated SOA-MZI Gate Arrays and Self-Resetting Optical Flip-Flops"*, Photonics Technology Letters, IEEE Volume 20, Issue 24, Dec.15, 2008 Page(s):2024 2026.
- D. Petrantonakis, G.T. Kanellos, P. Zakynthinos, D. Apostolopoulos, N. Pleros and H. Avramopoulos, "40-Gb/s 3R Burst Mode Regenerator Using Four Integrated MZI Switches", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.19, No. 5, pp. 288-290, March. 2007.
- 11. L. Stampoulidis, E. Kehayas, D. Apostolopoulos, P. Bakopoulos, K. Vyrsokinos and H. Avramopoulos, "On-the-Fly All-Optical Contention Resolution for NRZ and RZ Data Formats Using Packet Envelope Detection and Integrated Optical Switches", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.19, No. 8, pp. 538-540, April 2007.

- P. Zakynthinos, G. T. Kanellos, D. Klonidis, D. Apostolopoulos, N. Pleros, A. Poustie, G. Maxwell, I. Tomkos, and H. Avramopoulos, "Cascaded Operation of a 2R Burst-Mode Regenerator for Optical Burst Switching Network Transmission", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 19, No. 22, pp 1834-1836, November 2007.
- 13. G. T. Kanellos, D. Petrantonakis, D. Tsiokos, P. Bakopoulos, P. Zakynthinos, N. Pleros, **D. Apostolopoulos**, G. Maxwell, A. Poustie, and H. Avramopoulos, "All-Optical 3R Burst-Mode Reception at 40 Gb/s Using Four Integrated MZI Switches", IEEE/OSA J. Lightwave Technol., Vol. 25, No. 1, pp. 184-193, January 2007.
- Ch. Kouloumentas, N. Pleros, P. Zakynthinos, D. Petrantonakis, D. Apostolopoulos, O. Zouraraki, A. Tzanakaki, H. Avramopoulos, and I. Tomkos, "Packet clock recovery using a bismuth oxide fiber-based optical power limiter", OSA Optics Express, Vol. 15, Issue 16, pp. 9948-9953.
- D. Petrantonakis, D. Apostolopoulos, O. Zouraraki, D. Tsiokos, P. Bakopoulos, and H. Avramopoulos, "Packet-Level Synchronization Scheme for Optical Packet Switched Network Nodes", OSA Optics Express, vol. 14, Iss. 26, pp. 12665-12669, Dec. 2006.
- D. Apostolopoulos, D. Petrantonakis, O. Zouraraki, E. Kehayas, N. Pleros and H. Avramopoulos, *"All-Optical Label/Payload Separation at 40 Gb/s"*, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 18, no. 19, pp. 2023–2025, Oct. 2006.
- 17. E. Kehayas, D. Tsiokos, P. Bakopoulos, D. Apostolopoulos, D. Petrantonakis, L. Stampoulidis, A. Poustie, R. McDougall, G. Maxwell, Y. Liu, S. Zhang, H. J. S. Dorren, J. Seoane, P. V. Holm Nielsen, P. Jeppesen and H. Avramopoulos, "40 Gb/s All-Optical Processing Systems using Hybrid Photonic Integration Technology", IEEE Journal of Light. Tech., vol. 24, issue 12, pp. 4903-4911, Dec. 2006.
- L. Stampoulidis, E. Kehayas, K. Vyrsokinos, D. Apostolopoulos and H. Avramopoulos, "Design of All-Optical Contention Detection and Resolution for 40 Gb/s Label-Switched Routers", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.18, No. 23, pp. 2478-2480, Dec. 2006.

Δημοσιεύσεις σε συνέδρια (με κρίση):

- D. Petrantonakis, D. Apostolopoulos, M. Spyropoulou, N. Pleros, K. Vyrsokinos and H. Avramopoulos, "40 Gb/s NRZ Wavelength Conversion with Enhanced 2R Regeneration Characteristics using a Differentiallybiased SOA-MZI switch", presented at the 22nd Annual Meeting of the IEEE Photonics Society, Belek-Antalya, Turkey, 2009.
- P. Bakopoulos, P. Zakynthinos, E. Kehayas, L. Stampoulidis, F. Fresi, C. Porzi, N. Calabretta, Ch. Kouloumentas, D. Petrantonakis, A. Maziotis, C. Stamatiadis, **D. Apostolopoulos**, M. Guina, D. Klonidis, L. Potì, E. Tangdiongga, A. Poustie, G. Maxwell, I. Tomkos, A. Bogoni, H.J.S. Dorren and H. Avramopoulos, "160 Gb/s All-Optical Contention Resolution with Prioritization using Integrated Photonic Components", to be presented in ECOC 2009.
- 3. **Dimitrios Apostolopoulos**, Dimitrios Klonidis, Panagiotis Zakynthinos, Konstantinos Vyrsokinos, Nikos Pleros, Ioannis Tomkos, Hercules Avramopoulos, "Demonstration of 8 Error-Free Cascades of 2R NRZ SOA-MZI Wavelength Converter", Tech. Dig. OFC 2009, OThS2, San Diego, USA, 2009.
- 4. K. Vyrsokinos, **D. Apostolopoulos**, P. Zakynthinos, N. Pleros and H. Avramopoulos, "*Wavelength Conversion for NRZ Signals with Enhanced Regenerative Characteristics*", Tech. Dig. OFC 2009, JWA32, San Diego, USA, 2009.
- 5. N. Pleros, **D. Apostolopoulos**, D. Petrantonakis, C. Stamatiadis and H. Avramopoulos, *"All-Optical Static RAM Cell with Read/Write functionality at 5 Gb/s"*, paper We.2.C.5, European Conference on Optical Communications 2008 (ECOC), 21-25 September 2008, Brussels, Belgium.
- P. Zakynthinos, D. Apostolopoulos, L. Stampoulidis, E. Kehayas, A. Poustie, G. Maxwell, R. Van Caenegem, D. Colle, M. Pickavet, E. Tangdiongga, H.J.S. Dorren and H. Avramopoulos, "Successful Interconnection of SOA-MZI Arrays and Flip-Flops to Realize Intelligent, All-optical Routing", paper We.2.D.2, European Conference on Optical Communications 2008 (ECOC), 21-25 September 2008, Brussels, Belgium.

- Teimoori Hassan, Apostolopoulos Dimitrios, Vlachos Kyriakos, Ware Cedric, Petrantonakis Dimitrios, Yiannopoulos Kostas, Stampoulidis Leontios, Avramopoulos Hercules, Erasme Didier, "Physical architectures for packet-switching network nodes based on nonlinear logic gates", Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, 2008. CNSDSP 2008. 6th International Symposium on, 25-25 July 2008 Page(s):676 – 679.
- Leontios Stampoulidis, Efstratios Kehayas, Panagiotis Zakynthinos, Dimitrios Apostolopoulos, Dimitrios Petrantonakis, Paraskevas Bakopoulos, Olga Zouraraki and Hercules Avramopoulos, "New generation integrated photonic systems-on-chip enabling Tb/s-capacity Photonic Routers", 13th European Conference on Networks and Optical Communications & 3rd Conference on Optical Cabling & Infrastructure June 30th – July 3rd, 2008, Invited paper.
- Stampoulidis Leontios, Kehayas Efstratios, Bakopoulos Paraskevas, Zakynthinos Panagiotis, Petrantonakis Dimitrios, **Apostolopoulos Dimitrios**, Zouraraki Olga, Avramopoulos Hercules, "Enabling Tb/s photonic routing: Development of advanced hybrid integrated photonic devices to realize high-speed, all-optical networking", Transparent Optical Networks, 2008. ICTON 2008. 10th Anniversary International Conference on Volume 4, 22-26 June 2008 Page(s):110 – 113.
- P. Zakynthinos, D.Petrantonakis, D. Apostolopoulos, A. Poustie, G. Maxwell and H. Avramopoulos, "Four-Wavelength 3R Burst Mode Regenerator Using Three Integrated Quad MZI Arrays", OFC 2008, Tech. Dig. OWK5, San Diego, USA, 2008.
- 11. P. Zakynthinos, **D.Apostolopoulos**, O. Zouraraki, D. Petrantonakis, G. Theophilopoulos, A. Poustie, G. Maxwell and H. Avramopoulos, "Single Chip Quad MZI array in a 40 Gb/s AOLS Front-end", OFC 2007, Tech. Dig. OWH7, Anaheim, USA, 2007.
- 12. G.T. Kanellos, D. Klonidis, N. Pleros, P. Zakynthinos, **D. Apostolopoulos**, A. Poustie, G. Maxwell, H. Avramopoulos and I. Tomkos, "Cascaded operation of a 2R burst-mode regenerator with data exhibiting 6 dB power variation", OFC 2007, Tech. Dig. OWP4, Anaheim, USA, 2007.

- 13. Menychtas, **D. Apostolopoulos**, D. Kyriazis, K. Christodoulopoulos, H. Avramopoulos and T. Varvarigou, *"Enabling a Network Simulation Application on Grid Infrastructure"*, in Proc. of Panhellenic Conference on Informatins, vol. B, p. 289-298.
- 14. Ch. Kouloumentas, N. Pleros, P. Zakynthinos, D. Petrantonakis, **D. Apostolopoulos**, O. Zouraraki, A. Tzanakaki, H. Avramopoulos, I. Tomkos, "Packet clock recovery at 40 Gb/s and beyond, using a Fabry-Perot filter and an optical power limiter based on a bismuth oxide fibre", Lasers and Electro-Optics, 2007 and the International Quantum Electronics Conference CLEOE-IQEC 2007.
- 15. **D. Apostolopoulos**, O. Zouraraki, D. Petrantonakis, P. Bakopoulos, D. Tsiokos, E. Kehayas and H. Avramopoulos, *"Bit- and Packet-Level Self-Synchronization for All-Optical Label-Switched Network Nodes with Transparency to Network-Traffic"*, OFC 2006, Tech. Dig. OThS2, Anaheim, USA, 2006.
- 16. D. Petrantonakis, G. T. Kanellos, P. Zakynthinos, N. Pleros, D. Apostolopoulos, and H. Avramopoulos, "A 40 Gb/s 3R Burst Mode Receiver with 4 integrated MZI switches", OFC 2006, Post Deadline Session PDP25, Anaheim, USA, 2006.
- 17. O. Zouraraki, D. Petrantonakis, **D. Apostolopoulos**, E. Kehayas, N. Pleros and H. Avramopoulos, *"A 40 Gbps All-Optical Label/Payload Separation Circuit Using Hybrid Integrated MZI Switches"*, paper Th 1.4.1., European Conference on Optical Communications 2006, Cannes, France.
- 18. **D. Apostolopoulos**, E. Kehayas, L. Stampoulidis, P. Bakopoulos and H. Avramopoulos, "All-Optical Contention Resolution in Space and Wavelength Domain with Ultra-Fast Packet Envelope Detection and Integrated Optical Gates", paper We1.4.2, European Conference on Optical Communications 2006, Cannes, France.
- 19. E. Kehayas, L. Stampoulidis, K. Vyrsokinos, **D. Apostolopoulos**, H. Avramopoulos, *"Architecture, design and physical layer modelling of an all-optical buffering system for all-optical label switched routers"*, International Conference on Photonics in Switching 2006, Paper 11.3, Heraclion, Greece.
- 20. D. Tsiokos, E. Kehayas, P. Bakopoulos, D. Apostolopoulos, D. Petrantonakis, N. Pleros and H. Avramopoulos, "All-Optical Signal Processing Using Integrated Mach Zehnder Interferometric Switches for 40 Gb/s All-Optical Label-Swapped Networks", Broadnets 06.
- P. Bakopoulos, D. Tsiokos, D. Apostolopoulos, D. Petrantonakis, E. Kehayas and H. Avramopoulos, "All-Optical SOA-based Packet Detection for Packet-Rate Synchronization", presented at ECOC 2005, Tech. Dig. We. 2.4.5, Glasgow, Scotland, 2005.