



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Προς το οπτικό VLSI.
Διαχωρισμός επικεφαλίδας από το φορτίο οπτικού πακέτου
πληροφορίας με αμιγώς οπτικό τρόπο στα 40 Gb/s με χρήση
υβριδικά ολοκληρωμένων συμβολομετρικών διατάξεων
Mach-Zender**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σπύρος Ν. Νταλαπέρας

Επιβλέπων : Ηρακλής Αβραμόπουλος
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2007



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Προς το οπτικό VLSI.
Διαχωρισμός επικεφαλίδας από το φορτίο οπτικού πακέτου
πληροφορίας με αμιγώς οπτικό τρόπο στα 40 Gb/s με χρήση
υβριδικά ολοκληρωμένων συμβολομετρικών διατάξεων
Mach-Zender**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σπύρος Ν. Νταλαπέρας

Επιβλέπων : Ηρακλής Αβραμόπουλος

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 23^η Οκτωβρίου 2007.

.....
Ηρακλής Αβραμόπουλος
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Νικόλαος Ουζούνoglου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Δήμητρα-Θεοδώρα Κακλαμάνη
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2007

.....
Σπύρος Ν. Νταλαπέρας

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

Copyright © Σπύρος Ν. Νταλαπέρας

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

Σκοπός της παρούσης διπλωματικής εργασίας ήταν ο σχεδιασμός ενός κυκλώματος διαχωρισμού επικεφαλίδας από το φορτίο πακέτου πληροφορίας με αμιγώς οπτικό τρόπο στα 40 Gb/s. Το κύκλωμα διαχωρισμού επικεφαλίδας εντάσσεται στα κυκλώματα αμιγούς οπτικής επεξεργασίας σήματος και αποτελεί βασικό υποσύστημα στους μελλοντικούς οπτικούς κόμβους μεταγωγής και δρομολόγησης.

Η διάταξη υλοποιήθηκε πειραματικά και εκτιμήθηκε η απόδοσή της. Το κύκλωμα αποτελείται από δύο βασικές υπομονάδες, ένα κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού και μία οπτική πύλη βασισμένη στο συμβολόμετρο Mach-Zender που επιτελεί τη λογική πράξη ΚΑΙ, ενώ άλλοι δύο οπτικοί διακόπτες Mach-Zender συμπληρώνουν τη διάταξη, ο ένας λειτουργώντας ως μετατροπέας μήκους κύματος και ο άλλος ως αποπολυπλέκτης. Το κύκλωμα υλοποιήθηκε με τη χρήση υβριδικά ολοκληρωμένων οπτικών συμβολομετρικών διατάξεων Mach-Zender (MZI) τεσσάρων στοιχείων.

Το προτεινόμενο κύκλωμα λειτουργεί με οπτικά πακέτα πληροφορίας μεταβλητού μήκους στα 40 Gb/s. Αξιοποιεί πλήρως τα χαρακτηριστικά του κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού, έχοντας ως μοναδική είσοδο το πακέτο πληροφορίας, παρουσιάζει χαμηλές απαιτήσεις για προστατευτικές ζώνες δυφίων στη δομή των πακέτων, ενώ δεν κάνει καμία χρήση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Αυτά τα χαρακτηριστικά το καθιστούν μία ελπιδοφόρο λύση για να αποτελέσει μονάδα ενός οπτικού κόμβου σε αμιγώς οπτικά δίκτυα μεταγωγής ετικέτας.

Λέξεις κλειδιά

Αμιγώς οπτικά δίκτυα μεταγωγής ετικέτας, δίκτυα μεταγωγής ετικέτας πολλαπλών πρωτοκόλλων, οπτικό συμβολόμετρο Mach-Zender (MZI), ημιαγωγίμος οπτικός ενισχυτής (SOA), φίλτρο Fabry-Perot (FFP), κύκλωμα διαχωρισμού επικεφαλίδας/φορτίου, ανάκτηση ρολογιού, οπτικός κόμβος μεταγωγής επικεφαλίδας, υβριδικά ολοκληρωμένο συμβολόμετρο MZI τεσσάρων στοιχείων.

Abstract

The goal of this thesis was the design of an all-optical circuit that performs label/payload separation for optical packets at 40 Gb/s. The label/payload separation circuit is included in all-optical signal processing, consisting a subsystem of crucial importance in future optical switching and routing nodes.

The setup that was designed was experimentally tested so as to assess its performance. The circuit consists of two basic subunits, the clock recovery circuit and an optical gate that performs a logical AND operation based on Mach-Zender interferometer, whereas two more optical switches Mach-Zender operate as a wavelength converter and a demultiplexer, respectively. The circuit is implemented by using 4 element hybrid integrated interferometric Mach-Zender (MZI) switches.

The proposed module operates with optical data packets of variable length at 40 Gb/s and fully exploits the fast characteristics of the packet clock recovery circuit. It requires only the data packet as input to operate, has low guardband requirements and makes no use of high-speed electronics in order for the label/payload separation to be performed. These characteristics lead to a promising front-end unit for all-optical label switching (AOLS) nodes.

Key words

All-Optical Label Switching (AOLS) networks, Multi Protocol Label Switching (MPLS) networks, Mach-Zender (MZI) optical interferometer, Semiconductor Optical Amplifier (SOA), Fabry-Perot filter (FFP), label/payload separation, clock recovery, optical label switching node, 4 element hybrid integrated interferometric Mach-Zender (MZI) switches.

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη του καθηγητή Ηρακλή Αβραμόπουλου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Ηρακλή Αβραμόπουλο για την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο επιστημονικό αντικείμενο και να ολοκληρώσω τη διπλωματική μου εργασία. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Δημήτρη Πετραντωνάκη που χωρίς την καθοριστική του βοήθεια και τη συμβολή του η περάτωση της εργασίας δε θα ήταν εφικτή. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του εργαστηρίου για τη διαρκή ανταπόκριση και βοήθεια που επέδειξαν καθόλη τη διάρκεια της παρουσίας μου στο εργαστήριο.

Περιεχόμενα

1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1°	10
Εισαγωγή στα οπτικά δίκτυα	10
1.1 Εισαγωγή	10
1.2 Τύποι δικτυακής υποδομής. Μεταγωγή κυκλώματος – Μεταγωγή πακέτων	11
1.3 Η χωρητικότητα των οπτικών δικτύων και οι τεχνικές πολυπλεξίας	14
1.4 Ευρυζωνικά δίκτυα οπτικών ινών	17
1.5 Τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς	18
1.6 Τα οπτικά δίκτυα τρίτης γενιάς	19
1.7 Σκοπός και διάρθρωση της διπλωματικής	22
2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°	24
Παρουσίαση ενός αμιγώς οπτικού κόμβου μεταγωγής επικεφαλίδας	24
2.1 Εισαγωγή	24
2.2 Σχέδιο και λειτουργία του οπτικού κόμβου	27
2.3 Αυτοσυγχρονισμός στον κόμβο με αμιγώς οπτικό τρόπο	31
2.4 Λειτουργίες κόμβου με χρήση αμιγώς οπτικών λογικών πυλών και οπτικών Flip-Flap	32
2.5 Κύκλωμα διαχωρισμού επικεφαλίδας φορτίου	33
3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3°	37
Θεωρητική μελέτη του κυκλώματος αμιγούς οπτικού διαχωρισμού επικεφαλίδας/φορτίου και των στοιχείων - υποσυστημάτων που το συγκροτούν	37
3.1 Οι συμβολομετρικές διατάξεις ως το δομικό στοιχείο των οπτικών κυκλωμάτων	37
3.2 Το συμβολόμετρο Mach-Zehnder (Mach-Zehnder Interferometer) με ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή-SOA	39
3.3 Μαθηματική ανάλυση του MZI	45
3.4 Το υβριδικά ολοκληρωμένο συμβολόμετρο MZI	52
3.5 Το φίλτρο Fabry-Perot	55
3.6 Το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού πακέτων: το φίλτρο Fabry-Perot ακολουθούμενο από ένα οπτικό κύκλωμα ψαλιδισμού, με χρήση οπτικής πύλης MZI	60

3.7	<i>Υλοποίηση λειτουργίας λογικού AND με τη χρήση ΜΖΙ</i>	64
4.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο	66
	Πειραματική μελέτη του κυκλώματος διαχωρισμού επικεφαλίδας με τη χρήση υβριδικά ολοκληρωμένου ΜΖΙ τεσσάρων στοιχείων	66
4.1	<i>Στόχος και αξία του κυκλώματος διαχωρισμού επικεφαλίδας/φορτίου.</i>	66
4.2	<i>Το κύκλωμα εξαγωγής επικεφαλίδας οπτικών πακέτων και η αρχή λειτουργίας του</i>	68
4.3	<i>Δομικό διάγραμμα του κυκλώματος</i>	71
4.4	<i>Πειραματική διάταξη</i>	73
4.5	<i>Περιγραφή των στοιχείων της διάταξης</i>	74
4.6	<i>Παραγωγή των σημάτων</i>	76
4.7	<i>Εκτέλεση πειράματος</i>	80
4.8	<i>Αποτελέσματα και συμπεράσματα</i>	82
5.	Αναφορές	88

1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Εισαγωγή στα οπτικά δίκτυα

1.1 Εισαγωγή

Η διαρκής ανάπτυξη του τομέα των επικοινωνιών τα τελευταία χρόνια μέσω της εισαγωγής νέων τεχνολογιών και της κατασκευής δικτύων με πολύ υψηλές ταχύτητες μετάδοσης έρχεται ως αποτέλεσμα της ολοένα και αυξανόμενης ανάγκης για περισσότερη χωρητικότητα των τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Η αλματώδης ανάπτυξη του διαδικτύου και του Παγκόσμιου Ιστού (World Wide Web) αναφορικά με τον αριθμό των χρηστών, αλλά κυρίως με το χρόνο χρήσης και κατ' επέκταση το εύρος ζώνης για τον καθένα από αυτούς, η αυξανόμενη ανάπτυξη τεχνολογιών ευρυζωνικής πρόσβασης, όπως για παράδειγμα η ψηφιακή συνδρομητική γραμμή (Digital Subscriber Line-DSL) και τα καλωδιακά modem [5], η μείωση του κόστους παροχής εύρους ζώνης, καθώς και οι αλλαγές στον τύπο της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, συνιστούν τους παράγοντες που οδηγούν σε αυξανόμενες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης που δεσμεύεται για τη μεταφορά αρχείων και κατ' επέκταση στην αναγκαιότητα για αύξηση της χωρητικότητας των δικτύων.

Η τεχνολογική απάντηση μπροστά στη συνεχή αύξηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης έρχεται με την ανάπτυξη των φωτονικών δικτύων, καθώς οι οπτικές ίνες παρουσιάζουν τεράστιο εύρος ζώνης συγκριτικά με τα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Πιο συγκεκριμένα, το διαθέσιμο φασματικό εύρος ζώνης των οπτικών ινών γύρω από την φασματική περιοχή του 1.5 μm είναι της τάξης των ~25THz, δηλαδή περίπου 1000 φορές μεγαλύτερο από ολόκληρο το διαθέσιμο φάσμα ραδιοσυχνοτήτων [2], [4], [6], [7]. Αν προστεθεί στα τελευταία και η πολύ μικρή απόσβεση της τάξης των 0,2 dB/Km που εισάγεται στο σήμα [1]-[2], η δυνατότητα επίτευξης πολύ υψηλών ρυθμών μετάδοσης (της τάξης των Tbps με εφαρμογή τεχνικών πολυπλεξίας όπως η οπτική πολυπλεξία δεδομένων στο πεδίο του χρόνου-Optical Time Division Multiplexing-OTDM και η η πολυπλεξία κατά μήκος κύματος-Wavelength Division Multiplexing-WDM), ο χαμηλός ρυθμός εμφάνισης λαθών και το χαμηλό κόστος, γίνονται αντιληπτές οι δυνατότητες και τα πλεονεκτήματα των φωτονικών επικοινωνιών.

Τα οπτικά δίκτυα, ως ένα ιδιαίτερο και ολοένα αναπτυσσόμενο κομμάτι αυτού που ονομάζεται τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, διαμορφώνεται και κρίνεται εν τέλει στη

βάση των σύγχρονων αναγκών που επιβάλλει η πραγματικότητα στον χώρο των επικοινωνιών. Κοντολογίς, στη βάση της απαίτησης για την κατασκευή δικτύων τα οποία να έχουν τη δυνατότητα παροχής εύρους ζώνης *όποτε* και *όπου* χρειάζεται, αφού δεν μπορούν να είναι σε θέση να προβλέψουν ούτε τον τόπο, αλλά ούτε και το χρόνο ζήτησης μιας συγκεκριμένης υπηρεσίας από κάποιον χρήστη.

Ένα σύγχρονο δίκτυο αξιολογείται στο κατά πόσο η τεχνολογική του υποδομή διαθέτει, και μάλιστα σε τι βαθμό, τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Διαφάνεια στο ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων (*bitrate-transparency*): Με τον όρο αυτό εννοούμε τη δυνατότητα του δικτύου να λειτουργεί επιτυχώς ανεξάρτητα από το συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων.

Διαφάνεια στο είδος των δεδομένων (*data-type transparency*): Είναι η δυνατότητα του δικτύου να λειτουργεί επιτυχώς για οποιοδήποτε τύπο εισερχόμενων δεδομένων, όπως για σύγχρονης ή ασύγχρονης ροής δεδομένα, για μεταβλητού μεγέθους και μεταβλητής στάθμης ισχύος δεδομένα κ.α. Άμεση συνέπεια της διαφάνειας του δικτύου στο είδος των δεδομένων είναι η ικανότητά του να χειρίζεται επιτυχώς μικρές οντότητες δεδομένων (*granularity*), παρέχοντας τη δυνατότητα για δέσμευση εύρους ζώνης κατ' απαίτηση (*bandwidth-use on demand*).

Διαφάνεια στο πρωτόκολλο (*protocol transparency*): Είναι η δυνατότητα του δικτύου να λειτουργεί επιτυχώς ανεξάρτητα από το χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο.

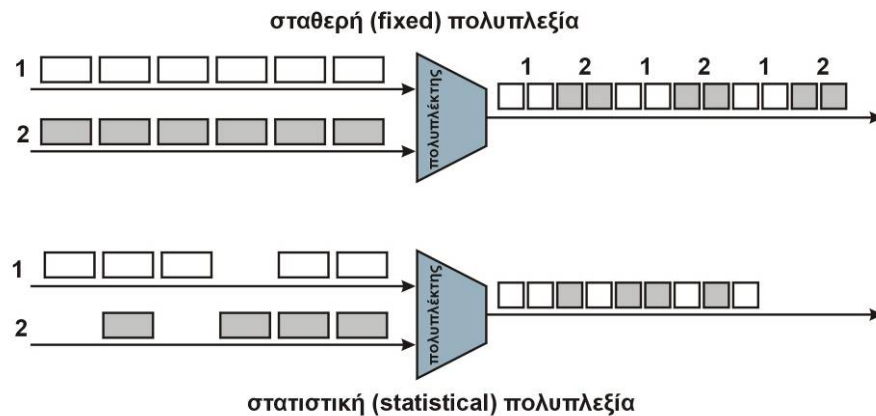
Ευελιξία (*Flexibility*): Ένα δίκτυο είναι ευέλικτο υπό την έννοια ότι προσαρμόζεται εύκολα στα συνεχώς εξελισσόμενα δίκτυα και είναι συμβατό με πολλαπλά πρωτόκολλα.

Η διάθεση αυτών των χαρακτηριστικών για ένα δίκτυο, είναι προφανές ότι, προσδίδει μια σειρά πλεονεκτημάτων, που είτε έχουν να κάνουν με την παροχή πολλαπλών υπηρεσιών των δικτύων είτε με τη μελλοντική εξέλιξή τους. Η δημιουργία οπτικών δικτύων, διαφανών ως προς τις παραπάνω παραμέτρους, αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την κατασκευή και περαιτέρω ευρεία εφαρμογή τους. Η παρουσίαση του οπτικού κόμβου μεταγωγής που θα επιχειρηθεί σε επόμενες παραγράφους θα περιλάβει στοιχεία αξιολόγησής του με γνώμονα αυτές τις παραμέτρους, ως κριτήριο για τη λειτουργικότητα και εφαρμογή του.

1.2 Τύποι δικτυακής υποδομής. Μεταγωγή κυκλώματος – Μεταγωγή πακέτων

Ο τρόπος με τον οποίο η τηλεπικοινωνιακή κίνηση πολυπλέκεται και μεταγεται σε ένα δίκτυο καθορίζει και το είδος της δικτυακής υποδομής. Δύο είναι οι βασικοί τύποι υποδομής εγκατεστημένων δικτύων: τα δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος και τα

δίκτυα μεταγωγής πακέτου. Στο σχήμα 1.1 φαίνεται η διαφοροποίηση του ενός από το άλλο είδος μεταγωγής στον τρόπο πολυπλεξίας.



Σχήμα 1.1: Δύο διαφορετικά είδη πολυπλεξίας: σταθερή (fixed) και στατιστική (statistical).

Ένα δίκτυο μεταγωγής κυκλώματος χαρακτηρίζεται από την παροχή ενός εγγυημένου σταθερού εύρους ζώνης σε κάθε σύνδεση, το οποίο είναι και διαθέσιμο όσο η σύνδεση παραμένει ενεργή, από την πρώτη στιγμή που αυτή ενεργοποιείται, καθιστώντας τη μία στατική σύνδεση. Το άθροισμα του συνόλου των επιμέρους εύρων ζώνης των νοητών κυκλωμάτων (συνδέσεων) καθορίζουν το συνολικό εύρος ζώνης της τηλεπικοινωνιακής ζεύξης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα δικτύου μεταγωγής κυκλώματος αποτελεί το δίκτυο τηλεφωνίας (PSTN), στο οποίο παρέχεται σταθερά εύρος ζώνης ~ 4 KHz με κάθε σύνδεση.

Αν και τα δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος ενδείκνυνται για ζεύξεις με συνεχή τηλεπικοινωνιακή κίνηση, εντούτις παρουσιάζουν ένα σοβαρό μειονέκτημα στην περίπτωση εκρηκτικής κίνησης δεδομένων (bursty data traffic), όπου και παρουσιάζουν σημαντική αδυναμία διαχείρισης της εν λόγω κατάστασης. Τέτοιου είδους τηλεπικοινωνιακή κίνηση εμφανίζεται κατεξοχήν σε χρήσεις του διαδικτύου, όπου μπορεί μία τέτοια χρήση να χαρακτηρίζεται για κάποιο χρονικό διάστημα από απαίτηση μετάδοσης μεγάλου αριθμού δεδομένων, ενώ για κάποιο άλλο να καθίσταται ανενεργή, ενώ ταυτόχρονα η εναλλαγή των δύο καταστάσεων γίνεται με τυχαίο τρόπο. Συνεπώς, μια "εκρηκτική" κίνηση απαιτεί διαφορετικό εύρος ζώνης, ανάλογα με το αν είναι ενεργοποιημένη ή όχι. Τηλεπικοινωνιακές κινήσεις αυτού του είδους χαρακτηρίζονται από μια μέση τιμή εύρους ζώνης (average bandwidth) και μία αντίστοιχη μέγιστη τιμή (peak bandwidth).

Για την αποτελεσματική αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού και για την αποδοτικότερη εκμετάλλευση του εύρους ζώνης μίας τηλεπικοινωνιακής ζεύξης υιοθετήθηκε η τεχνική της **μεταγωγής πακέτου**. Στην τεχνική μεταγωγής πακέτων

οι ροές δεδομένων χωρίζονται σε μικρά *πακέτα* δεδομένων, τα οποία πολυπλέκονται με άλλα πακέτα, που προέρχονται από άλλες ζεύξεις μέσα στο δίκτυο. Κατόπιν, τα πακέτα μεταγόνται ως αυτοδύναμες οντότητες στους κόμβους του δικτύου ανάλογα με τον προορισμό τους. Η πληροφορία του προορισμού κάθε πακέτου βρίσκεται στο πεδίο της επικεφαλίδας (header) του, το οποίο και προσκολλάται στο φορτίο-περιεχόμενο του (payload). Οι ενδιάμεσοι κόμβοι του δικτύου αναγνωρίζουν τις επικεφαλίδες των πακέτων και τα δρομολογούν/μετάγουν ανάλογα με τον προορισμό, που επιθυμούν, μέσω ορισμένων πολύπλοκων διαδικασιών. Η επανασύνδεση των πακέτων στην αρχική μορφή της ροής δεδομένων γίνεται μόλις αυτά φτάσουν, τελικά, στην επιθυμητή διεύθυνση. Οι εφαρμογές Διαδικτύου είναι οι κυριότερες, ίσως, εφαρμογές, οι οποίες χρησιμοποιούν δίκτυα μεταγωγής πακέτων. Στις εφαρμογές αυτές χρησιμοποιείται για την μεταγωγή και τη δρομολόγηση κάθε πακέτου στον επιθυμητό προορισμό του, το πρωτόκολλο Διαδικτύου (Internet protocol-IP).

Στα δίκτυα μεταγωγής πακέτου χρησιμοποιείται η τεχνική στατιστικής πολυπλεξίας (statistical multiplexing) για την πολυπλεξία πολλών "εκρηκτικών" ροών δεδομένων μιας ζεύξης σε μία ροή δεδομένων. Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, η πιθανότητα κάθε πολυπλεγμένη ροή δεδομένων να είναι ενεργή είναι πολύ μικρή. Η τεχνική της στατιστικής πολυπλεξίας, επομένως, «μειώνει» σημαντικά το απαιτούμενο εύρος ζώνης για τη συνολική ζεύξη βελτιώνοντας σε μεγάλο βαθμό την αποδοτικότητα του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Στο ενδεχόμενο οι ενεργές ροές δεδομένων να είναι περισσότερες από το διαθέσιμο στη ζεύξη εύρος ζώνης, χρησιμοποιούνται για τα «πλεονάζοντα» πακέτα πληροφορίας ουρές αναμονής ή καταχωρητές, ενώ στην περίπτωση που προκύπτει η ανάγκη απόρριψης πακέτων, λόγω της έντονης τηλεπικοινωνιακής κίνησης που μπορεί να οδηγήσει σε υπερχειλίση των καταχωρητών και των ουρών, η εφαρμογή προτεινόμενων πρωτοκόλλων δίνει ικανοποιητικές λύσεις (λ.χ. το υψηλού στρώματος πρωτόκολλο ελέγχου μετάδοσης (Transmission Control Protocol-TCP), το οποίο εξασφαλίζει την επαναμετάδοση των απορριπτόμενων πακέτων).

Τα δίκτυα μεταγωγής πακέτου στοχεύουν στη βέλτιστη μεταφορά δεδομένων, προσπαθώντας να παράσχουν εξυπηρέτηση βέλτιστη εξυπηρέτηση (best effort service), δίχως όμως να εξασφαλίζουν εγγυήσεις για εφαρμογές που είναι ευαίσθητες σε χρονικές καθυστερήσεις (εφαρμογές πραγματικού χρόνου), όπως είναι για παράδειγμα η μετάδοση βίντεο ή φωνής. Στα πλαίσια της προσπάθειας αναβάθμισης της ποιότητας της υπηρεσίας (Quality of Service – QoS) αναπτύχθηκε το δίκτυο Ασύγχρονου Τρόπου Μεταφοράς (Asynchronous Transfer Mode-ATM) [9], ενώ αντίστοιχα και το IP έχει διαμορφωθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να παρέχει παρόμοιες υπηρεσίες. Οι περισσότερες προσπάθειες για QoS βασίζονται στην έννοια της ύπαρξης ενός επιπέδου προανατολισμένων συνδέσεων. Έτσι, για παράδειγμα το

πρωτόκολλο MPLS (Multi-Protocol Label Switching) [10] στα IP δίκτυα χρησιμοποιείται για την υποστήριξη ροών δεδομένων από τη μία άκρη του δικτύου στην άλλη μέσω της δημιουργίας εικονικών κυκλωμάτων (virtual circuits), μεταξύ των οποίων γίνεται χρήση στατιστικής πολυπλεξίας [4], [10].

1.3 Η χωρητικότητα των οπτικών δικτύων και οι τεχνικές πολυπλεξίας

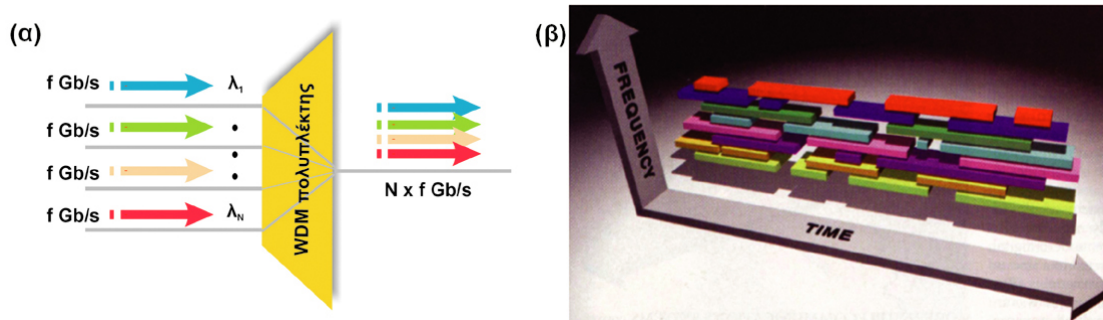
Για την αξιοποίηση της τεράστιας χωρητικότητας των οπτικών ινών και τη βέλτιστη εκμετάλλευση αυτής χρησιμοποιούνται τυπικές τεχνικές οπτικής πολυπλεξίας σε πλήρη αναλογία με τις τεχνικές ηλεκτρονικής πολυπλεξίας. Η ανάγκη για πολυπλεξία γεννήθηκε από το γεγονός ότι είναι πολύ πιο οικονομική η μετάδοση δεδομένων με υψηλότερο ρυθμό μέσα από μία και μόνο ίνα, από το να χρησιμοποιούνται πολλές ίνες μεταφέροντας δεδομένα σε χαμηλούς ρυθμούς. Οι βασικοί τρόποι πολυπλεξίας μέσα σε μία οπτική ίνα είναι η πολυπλεξία κατά μήκος κύματος (Wavelength Division Multiplexing-WDM) [2], [4], [7], [11], [12] και η οπτική πολυπλεξία δεδομένων στο πεδίο του χρόνου (Optical Time Division Multiplexing-OTDM) [2], [4], [7], [13], [14].

1.3.1 Πολυπλεξία κατά μήκος κύματος (Wavelength Division Multiplexing-WDM)

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, όπου το κάθε μήκος κύματος φέρει ένα ποσοστό του συνολικού όγκου των δεδομένων, όπως πιο παραστατικά αποδίδεται με τη βοήθεια του σχήματος 1.2.

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 [4], [6] 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

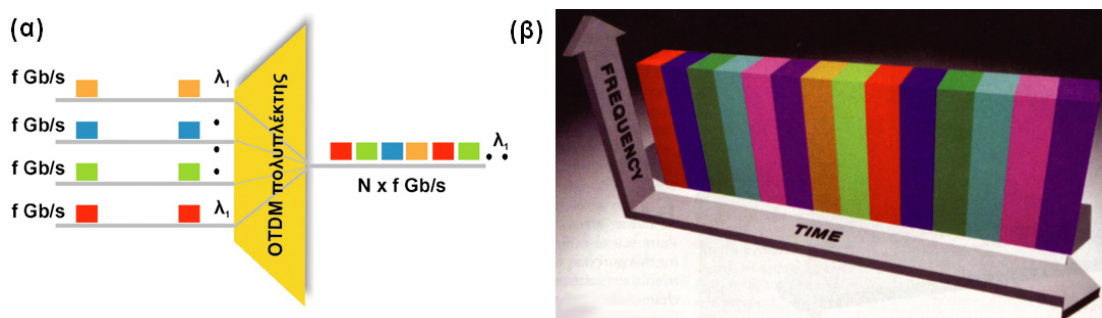
φαινόμενα σημαντικότερα είναι η χρωματική διασπορά (chromatic dispersion) της ίνας και η διασπορά τρόπων πόλωσης (Polarization Mode Dispersion-PMD).



Σχήμα 1.2: (α) Η τεχνική της πολυπλεξίας κατά μήκος κύματος (WDM). Τα N μήκη κύματος με ρυθμό πληροφορίας f Gb/s το καθένα πολυπλέκονται στον WDM πολυπλέκτη, και στην έξοδο προκύπτει ένα πολύχρωματικό (πολυκυματικό) σήμα δεδομένων με συνολικό ρυθμό $N \times f$ Gb/s μέσα στην ίδια οπτική ίνα. (β) Η τεχνική WDM μέσα από ένα γράφημα της συχνότητας συναρτήσεως του χρόνου.

1.3.2 Οπτική πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (Optical Time Division Multiplexing - OTDM)

Η τεχνική πολυπλεξίας OTDM χρησιμοποιείται στα οπτικά συστήματα σε πλήρη αντιστοιχία με την ηλεκτρονική πολυπλεξία στο πεδίο του χρόνου (Electronic Time Division Multiplexing-ETDM), που χρησιμοποιείται στα ηλεκτρονικά δίκτυα, με μόνη διαφορά ότι στην OTDM πολυπλεξία οι ρυθμοί μετάδοσης είναι πολύ υψηλότεροι. Στην τεχνική OTDM τα δεδομένα μεταδίδονται σε ένα και μόνο κανάλι (φέρουσα συχνότητα) παρεμβάλλοντας με οπτικό τρόπο τα δυφία πολλών ροών δεδομένων χαμηλής ταχύτητας σε μία μοναδική ροή δεδομένων υψηλού ρυθμού μετάδοσης, όπως πιο παραστατικά αποδίδεται με τη βοήθεια του σχήματος 1.3.

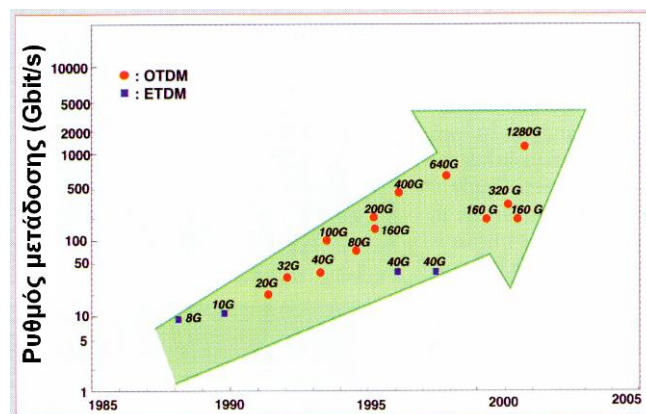


Σχήμα 1.3: (α) Η τεχνική της οπτικής πολυπλεξίας στο πεδίο του χρόνου (OTDM). Οι N ροές δεδομένων με ρυθμό f Gb/s η καθεμία στο ίδιο μήκος κύματος (λ_i) πολυπλέκονται στον TDM πολυπλέκτη, και στην έξοδο προκύπτει σήμα δεδομένων με ρυθμό $N \times f$ Gb/s μέσα στην ίδια οπτική ίνα. (β) Η τεχνική OTDM μέσα από ένα γράφημα της συχνότητας συναρτήσεως του χρόνου κατά αναλογία με το σχήμα 1.3.

Οι βασικότεροι παράγοντες για την επίδοση των OTDM συστημάτων είναι ο ακριβής χρονισμός των οπτικών σημάτων και το χρονικό εύρος των οπτικών παλμών

για την αποφυγή φαινομένων διασυμβολικής παρεμβολής (intersymbol interference) στο πολυπλεγμένο κανάλι [2], [4], [6]. Για το χρονικό εύρος των παλμών έχει υπολογιστεί ότι θα πρέπει να είναι τυπικά μικρότερο ή ίσο με το ένα τρίτο του ρυθμού επανάληψης της πολυπλεγμένης ροής δεδομένων [13], [14]. Τα σημαντικότερα φαινόμενα, που επηρεάζουν τη μετάδοση στα OTDM συστήματα, είναι κυρίως η χρωματική διασπορά και η διασπορά τρόπων πόλωσης της ίνας [2], [4], [6], [13], [14], καθώς ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων αυξάνει σε σημαντικό βαθμό. Πρέπει να σημειωθεί, όμως, ότι με τη χρήση ενός και μόνο καναλιού αποφεύγεται η διέγερση των μη γραμμικών φαινομένων της ίνας και η επίδραση αυτών στη ζεύξη, όπως επίσης καθίσταται περισσότερο πρακτική και αποδοτική η χρήση των EDFAs.

Θα πρέπει να αναφερθεί το γεγονός ότι OTDM συστήματα μετάδοσης δεν υπάρχουν αυτή τη στιγμή ως εμπορικά διαθέσιμα προϊόντα, καθώς η OTDM πολυπλεξία δεν θεωρείται ακόμα αρκετά πρακτική τεχνική μετάδοσης. Στο παρακάτω σχήμα 1.4 απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη αυτών των συστημάτων παράλληλα με την εξέλιξη των αντίστοιχων συστημάτων ηλεκτρονικής πολυπλεξίας με διαίρεση χρόνου.



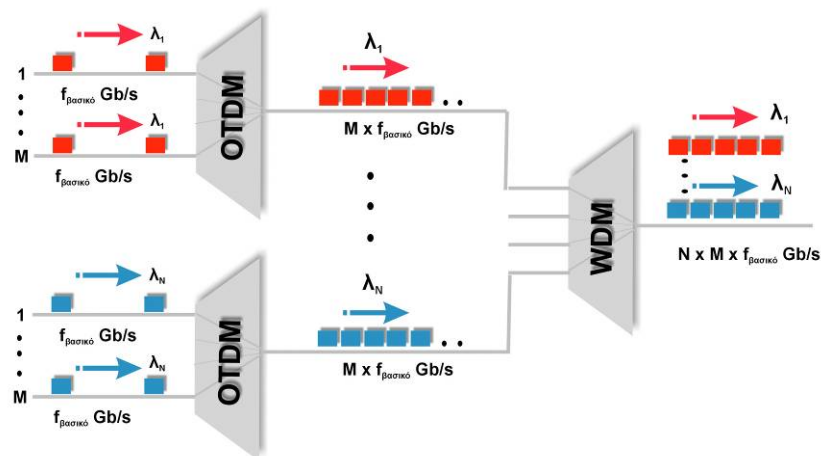
Σχήμα 1.4: Η πορεία των OTDM συστημάτων τα τελευταία 20 χρόνια σε αντιπαράθεση με κάποια από τα αντίστοιχα ETDM συστήματα.

Προφανώς οι τεχνικές πολυπλεξίας OTDM και WDM δεν είναι ανταγωνιστικές, αλλά είναι πολύ περισσότερο συμπληρωματικές και μπορούν να συνδυαστούν για την περαιτέρω αύξηση της χωρητικότητας στα οπτικά δίκτυα. Ο συνδυασμός αυτών συνιστά την υβριδική πολυπλεξία OTDM/WDM, η οποία αποδίδεται πιο παραστατικά με τη βοήθεια του σχήματος 1.5.

Στην υβριδική OTDM/WDM πολυπλεξία κάθε μήκος κύματος εισέρχεται σε έναν OTDM πολυπλέκτη πριν πολυπλεχθεί μέσω του WDM πολυπλέκτη, οπότε διαμορφώνεται με μία ροή δεδομένων σε ρυθμό μετάδοσης πολλαπλάσιο του βασικού ρυθμού μετάδοσης των μεμονωμένων ροών δεδομένων. Τα πολυπλεγμένα κατά OTDM κανάλια εισέρχονται, στη συνέχεια, στον WDM πολυπλέκτη, με αποτέλεσμα στην έξοδο του τελευταίου να προκύπτει τελικά το υβριδικά πολυπλεγμένο σήμα με ρυθμό μετάδοσης $N \times M \times f_{\text{βασικό}}$ Gb/s, όπου N είναι ο αριθμός

των χρησιμοποιούμενων WDM καναλιών και M ο αριθμός των μεμονωμένων ροών δεδομένων που πολυπλέκονται κατά OTDM σε ένα κανάλι.

Η επιλογή του ρυθμού μετάδοσης κάθε ξεχωριστού καναλιού (OTDM) και του αριθμού των συνολικών καναλιών (WDM) είναι ένας πολύ βασικός παράγοντας της απόδοσης του συστήματος και πρέπει να γίνεται ανάλογα με τον τύπο και τις παραμέτρους της χρησιμοποιούμενης ίνας στο δίκτυο, το είδος της παρεχόμενης υπηρεσίας και το κόστος του απαιτούμενου εξοπλισμού (π.χ. ίνας, WDM και OTDM στοιχείων). Προφανώς, η χρήση της υβριδικής πολυπλεξίας επιβάλλει την επίλυση των προβλημάτων, που παρουσιάζονται τόσο σε απλά WDM συστήματα, όσο και σε απλά OTDM συστήματα, όπως αυτά αναλύθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους.



Σχήμα 1.5: Η τεχνική της υβριδικής πολυπλεξίας WDM/OTDM.

1.4 Ευρυζωνικά δίκτυα οπτικών ινών

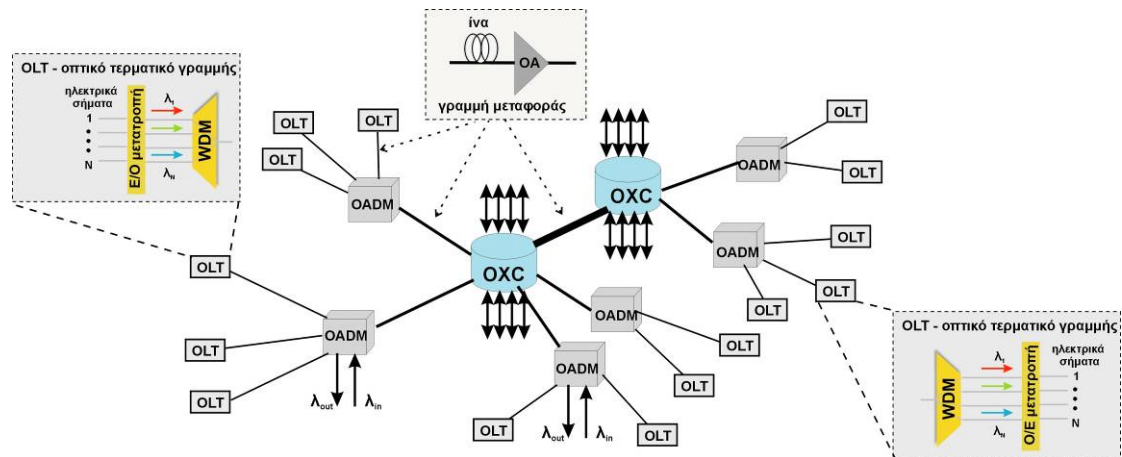
Μετά τη δημιουργία και ευρεία χρήση των οπτικών δικτύων πρώτης γενιάς, έρχεται να προστεθεί πέραν της δημιουργίας των οπτικών δικτύων δεύτερης γενιάς, και ο σχεδιασμός των μελλοντικών οπτικών δικτύων τρίτης γενιάς. Στα οπτικά δίκτυα πρώτης γενιάς η οπτική ίνα χρησιμοποιούνταν μόνο ως φυσικό μέσο μετάδοσης και παροχής χωρητικότητας, ενώ η μεταγωγή, η δρομολόγηση, καθώς και όλες οι άλλες ευφυείς δικτυακές διεργασίες επιτελούνταν από ηλεκτρονικά κυκλώματα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα των οπτικών δικτύων πρώτης γενιάς είναι το Σύγχρονο Οπτικό Δίκτυο (Synchronous Optical Network-SONET) και το SDH [4], τα οποία σχηματίζουν τον κορμό της τηλεπικοινωνιακής υποδομής στη Βόρεια Αμερική, την Ασία και την Ευρώπη. Στα οπτικά δίκτυα δεύτερης και τρίτης γενιάς, μέρος της

δρομολόγησης, της μεταγωγής καθώς και των άλλων ευφυών διαδικασιών έχει μετακινηθεί στο οπτικό επίπεδο (optical layer).

1.5 Τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς

Τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς, παρά την αρχική υλοποίησή τους μόνο για τη μετάδοση δεδομένων, παρουσιάζουν δυνατότητες για τη μεταφορά ορισμένων από τις διεργασίες μεταγωγής και δρομολόγησης, που επιτελούνταν από ηλεκτρονικά κυκλώματα, απευθείας στο οπτικό επίπεδο. Έτσι, ορισμένες λειτουργίες γίνονται σε συντομότερο χρονικό διάστημα και ταυτόχρονα απαλλάσσονται τα ηλεκτρονικά κυκλώματα από την επεξεργασία όλου του όγκου δεδομένων. Στα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς είναι δυνατή η χρήση και των δύο ειδών πολυπλεξίας, της WDM και της OTDM, όμως τα σημερινά δίκτυα περιορίζονται στην πολυπλεξία WDM, καθώς η OTDM πολυπλεξία δεν θεωρείται ακόμη πρακτική λύση [4].

Τα βασικά δομικά συστήματα αυτών των δικτύων είναι τα οπτικά τερματικά γραμμής (optical line terminal-OLT), οι οπτικοί πολυπλέκτες προσθήκης/αφαίρεσης δεδομένων (optical add/drop multiplexer-OADM) και τα οπτικά στοιχεία διασύνδεσης (optical cross-connect-OXC). Τα WDM οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς παρέχουν συνδέσεις μήκους κύματος μεταξύ των τερματικών, και για το λόγο αυτό αποκαλούνται και δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος (wavelength-routed networks). Κατά συνέπεια οι συνδέσεις μεταξύ των τερματικών γραμμής είναι υψηλής χωρητικότητας και παρέχονται σε σταθερή βάση. Τα χαρακτηριστικά των WDM δικτύων δεύτερης γενιάς, τα καθιστούν ικανά να παρέχουν τη δυνατότητα για ευρυζωνικές συνδέσεις υψηλής ταχύτητας δεδομένων και μεγάλης χρονικής διάρκειας, καθώς και τη δυνατότητα για αποδοτική διαχείριση ενός τεράστιου όγκου δεδομένων απευθείας στο οπτικό επίπεδο. Όχι, όμως, και ικανά ώστε να παρέχουν τη δυνατότητα για χειρισμό οντοτήτων δεδομένων μικρού μεγέθους (granularity), καθιστώντας απαγορευτική τη χρήση των οπτικών συστημάτων δεύτερης γενιάς σε δίκτυα, στα οποία απαιτείται άμεσα η παροχή πολλαπλών υπηρεσιών τόσο συνεχούς,



Σχήμα 1.6: Τα βασικά δομικά τμήματα και η διασύνδεση αυτών στα WDM οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς.

όσο και εκρηκτικής ροής δεδομένων σε υψηλές ταχύτητες μετάδοσης. Τέτοια δίκτυα είναι, για παράδειγμα, τα μητροπολιτικά δίκτυα (MANs) [8].

1.6 Τα οπτικά δίκτυα τρίτης γενιάς

1.6.1 Αμιγώς Οπτικά Δίκτυα Μεταγωγής Πακέτων (All-Optical Packet Switched Networks)

Στα αμιγώς οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων η πληροφορία αποστέλλεται με τη μορφή οπτικών πακέτων δεδομένων και όχι με τη μορφή μεγάλου μεγέθους συνεχών ροών δεδομένων. Το κάθε πακέτο δεδομένων αποτελείται από το πεδίο της επικεφαλίδας (header), το οποίου το περιεχόμενο καθορίζει τον προορισμό του πακέτου μέσα στο δίκτυο, από το πεδίο του φορτίου (payload), το περιεχόμενο του οποίου είναι τα χρήσιμα δεδομένα προς μετάδοση, και από την προστατευτική ζώνη δυφίων (guardband), η οποία περιέχει τον απαραίτητο αριθμό βοηθητικών δυφίων για την υποστήριξη των διαφόρων λειτουργικών διαδικασιών του δικτύου.

Τα βασικά χαρακτηριστικά που διακρίνουν ένα οπτικό δίκτυο μεταγωγής πακέτων [4], [8] είναι το γεγονός ότι η μεταγωγή και η δρομολόγηση των δεδομένων επιτελούνται απευθείας στο οπτικό επίπεδο χωρίς την μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό και αντίστροφα, ενώ παράλληλα η μεταγωγή γίνεται σε επίπεδο μεμονωμένου πακέτου και κάθε πακέτο επεξεργάζεται ως ξεχωριστή οντότητα. Με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι τα οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων αποσκοπούν στην παροχή των υπηρεσιών, που προσφέρουν τα αντίστοιχα ηλεκτρονικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων, αλλά σε πολύ

υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, εκμεταλλευόμενα το κατεξοχήν πλεονέκτημα της οπτικής έναντι της ηλεκτρονικής τεχνολογίας στον τομέα αυτό.

Τα οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων προσφέρουν μια σειρά από πλεονεκτήματα, τα οποία απορρέουν από τα δύο βασικά τους χαρακτηριστικά, την αμιγώς οπτική τους υπόσταση και τη δρομολόγηση των δεδομένων σε επίπεδο μεμονωμένου πακέτου. Καταρχήν, είναι εφικτή η επεξεργασία δεδομένων μικρού μεγέθους (granularity) με άμεση συνέπεια τη δυνατότητα της δέσμευσης εύρους ζώνης κατ' απαίτηση (bandwidth-use on demand) και την αποδοτικότερη εκμετάλλευση της χωρητικότητας του δικτύου, χωρίς να παραμένει μία σύνδεση ανενεργή για μεγάλο χρονικό διάστημα. Το γεγονός αυτό καθιστά, επίσης, τα δίκτυα αυτά περισσότερο ευέλικτα (flexibility), υπό την έννοια ότι προσαρμόζονται σχετικά εύκολα στα συνεχώς εξελισσόμενα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, αφού μπορούν να παρέχουν ταυτόχρονα πολλαπλές υπηρεσίες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της ευελιξίας τους αποτελεί η ευρεία χρήση των IP δρομολογητών, καθώς αυτοί μπορούν να μεταφέρουν πληροφορία προσανατολισμένης σύνδεσης (connection-oriented), όπως TCP κίνηση, καθώς επίσης και πληροφορία ασύνδετης υπηρεσίας (connectionless), όπως είναι η κίνηση UDP, οπότε είναι συμβατά με διάφορες τεχνολογίες χαμηλότερου τηλεπικοινωνιακού στρώματος (ATM ή SONET) [8]. Επιπλέον, τα οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων μπορούν να είναι διαφανή στο είδος της εισερχόμενης πληροφορίας (data-format transparency), καθώς διαχειρίζονται εξίσου επιτυχώς σύγχρονες ή ασύγχρονες ροές πακέτων δεδομένων με σταθερό ή μεταβλητό μέγεθος πακέτων και συνεχείς ροές δεδομένων. Τελευταίο, αλλά πολύ σημαντικό προτέρημα, είναι το γεγονός ότι τα παραπάνω πλεονεκτήματα της τεχνικής μεταγωγής πακέτων παρέχονται στα οπτικά δίκτυα αυτού του είδους σε πολύ υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης συγκριτικά με τα αντίστοιχα ηλεκτρονικά δίκτυα, ως αποτέλεσμα της διεκπεραίωσης όλων των λειτουργικών διαδικασιών του δικτύου από αμιγώς οπτικά στοιχεία.

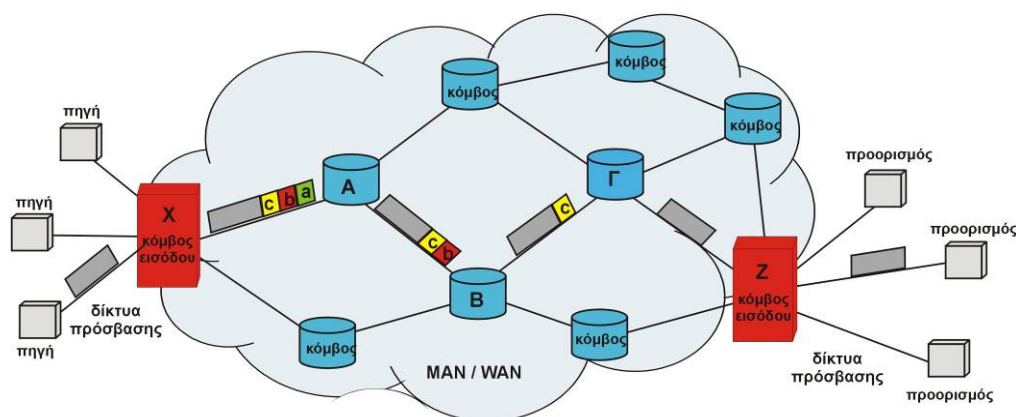
1.6.2 Αμιγώς Οπτικά Δίκτυα Μεταγωγής Πακέτων Εκρηκτικής Ροής (All-Optical Burst Switched Networks)

Η υλοποίηση των οπτικών δικτύων μεταγωγής πακέτων εκρηκτικής ροής έρχεται να καλύψει έναν βασικό ανασταλτικό παράγοντα των δικτύων μεταγωγής πακέτου· την μέχρι στιγμής αδυναμία των οπτικών κυκλωμάτων να παρέχουν αξιόπιστη καταχώρηση και αποθήκευση δεδομένων (buffering), ανταγωνιστική της ηλεκτρονικής μνήμης τυχαίας προσπέλασης (Random Access Memory - RAM), ώστε να αποφεύγονται οι συγκρούσεις των πακέτων.

Στα οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων εκρηκτικής ροής πολλαπλά πακέτα IP συναθροίζονται σε μία μεγαλύτερου μεγέθους οντότητα δεδομένων (burst), η οποία αποστέλλεται στη συνέχεια με εκρηκτικό τρόπο στο δίκτυο. Το απαιτούμενο εύρος ζώνης για τη μετάδοση αυτού του σήματος δεσμεύεται εκ των προτέρων στο δίκτυο με τη βοήθεια ενός επιπλέον σήματος ελέγχου-καθορισμού της διαδρομής (control set-up signal), το οποίο αποστέλλεται πριν το burst στο δίκτυο. Κατά συνέπεια, κάθε κόμβος στη διαδρομή του burst ενημερώνεται για την επιθυμητή διαδρομή του burst πριν αυτό φτάσει στον κόμβο, οπότε αποφεύγεται η χρήση καταχωρητών και στοιχείων αποθήκευσης της πληροφορίας για την πρόληψη των συγκρούσεων των πακέτων και η ανάλυση του περιεχομένου της επικεφαλίδας του πακέτου. Αυτοί είναι και οι βασικότεροι λόγοι για τους οποίους εισήχθησαν τα οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων εκρηκτικής ροής [17], [18]. Η πιο σημαντική διαφορά στη δομή των δεδομένων σε αυτά τα δίκτυα συγκριτικά με τη δομή δεδομένων στα δίκτυα μεταγωγής πακέτων είναι το γεγονός ότι τα πακέτα έχουν σίγουρα μεταβλητό και επίσης, μεγαλύτερο μέγεθος.

1.6.3 Αμιγώς Οπτικά Δίκτυα Μεταγωγής Ετικέτας (All-Optical Label Switched Networks)

Η υλοποίηση των οπτικών δικτύων μεταγωγής ετικέτας έρχεται να καλύψει έναν βασικό ανασταλτικό παράγοντα των δικτύων μεταγωγής πακέτου: το γεγονός ότι η δρομολόγηση των πακέτων γίνεται με βάση τον τελικό τους προορισμό με αποτέλεσμα να δημιουργούνται πίνακες δρομολόγησης (routing look-up tables) υπερβολικά μεγάλου μεγέθους, ιδιαίτερα στα IP δίκτυα, και να αυξάνει δραματικά η πολυπλοκότητα της δρομολόγησης.



Σχήμα 1.7: Αμιγώς οπτικό δίκτυο μεταγωγής ετικέτας με ετικέτες γενικού χαρακτήρα. Με την είσοδο του στο δίκτυο το πακέτο αποκτά μία συνολική ετικέτα αποτελούμενη από επιμέρους ετικέτες, και κάθε επιμέρους ετικέτα σβήνεται στον επόμενο κόμβο μέχρι τον τελικό προορισμό του πακέτου.

Η βασική διαφορά των οπτικών δικτύων μεταγωγής ετικέτας από τα οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων είναι ότι σε κάθε πακέτο εισάγεται, επιπλέον, μία ετικέτα με μικρότερο μέγεθος από την επικεφαλίδα και η δρομολόγηση του πακέτου γίνεται, πλέον, με βάση το περιεχόμενο της ετικέτας και όχι της επικεφαλίδας, οπότε τα δίκτυα αυτά είναι συμβατά με το πρωτόκολλο MPLS (Multi-Protocol Label Switching). Μόνο η μικρού μεγέθους ετικέτα χρησιμοποιείται για τη δρομολόγηση του πακέτου, ενώ το μήκος κύματος του πακέτου χρησιμοποιείται μόνο για την προώθηση αυτού [8]. Κατά συνέπεια, οι πίνακες δρομολόγησης απλουστεύονται σε σημαντικό βαθμό, η διαδικασία της δρομολόγησης είναι λιγότερο πολύπλοκη λόγω του μικρότερου μεγέθους της ετικέτας, ενώ διατηρείται το πλεονέκτημα της διεκπεραίωσης όλων των διεργασιών στο οπτικό επίπεδο.

Η ετικέτα εισάγεται είτε σειριακά στο πακέτο, οπότε και τοποθετείται χρονικά πριν την επικεφαλίδα του πακέτου, είτε πολυπλεγμένη σε διαφορετική συχνότητα από την κεντρική φέρουσα συχνότητα του πακέτου με χρήση της τεχνικής πολυπλεξίας υποφέρουσας συχνότητας (Sub-carrier multiplexing) [15], [16]. Ο χαρακτήρας της ετικέτας μπορεί να είναι είτε τοπικός (local) είτε γενικός (global) [8]. Στην πρώτη περίπτωση, η ετικέτα σηματοδοτεί τον επιθυμητό προορισμό του πακέτου κατά τη διαδρομή του μεταξύ δύο κόμβων, ενώ στη δεύτερη περιέχει τη συνολική πληροφορία για τον τελικό προορισμό του πακέτου μέσα στο δίκτυο.

1.7 Σκοπός και διάρθρωση της διπλωματικής

Κύρια κατεύθυνση των μελλοντικών ασύγχρονων οπτικών δικτύων μεταγωγής πακέτων είναι η βέλτιστη εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Αυτή απορρέει από το στόχο των ασύγχρονων οπτικών δικτύων μεταγωγής πακέτων για συνδυασμό των προτερημάτων των αρχιτεκτονικών μεταγωγής πακέτων, που παρέχονται ήδη από τα εγκατεστημένα ηλεκτρονικά δίκτυα αυτού του είδους, και των οπτικών τεχνολογιών. Το πρωταρχικό ζητούμενο σε αυτήν την κατεύθυνση είναι η ανάπτυξη υψίρρυθμων κυκλωμάτων ικανών να λειτουργούν με ασύγχρονες ροές πακέτων δεδομένων απευθείας στο οπτικό επίπεδο, ώστε να υπάρξει η δυνατότητα για αντικατάσταση όλων των ηλεκτρονικών υποσυστημάτων του κόμβου.

Η κατασκευή κυκλώματος εξαγωγής επικεφαλίδας εντάσσεται στο πλαίσιο πειραμάτων οπτικής λογικής που έχουν σαν τελικό στόχο την υλοποίηση ενός αμιγώς οπτικού κόμβου μεταγωγής και δρομολόγησης. Η προτεινόμενη διάταξη λειτουργεί με μοναδική είσοδο οπτικά πακέτα πληροφορίας ρυθμού 40Gbps και βασίζεται σε δύο δομικές υπομονάδες. Το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού και μία λογική πύλη που υλοποιεί τη λογική πράξη AND, με δομικό στοιχείο το οπτικό συμβολόμετρο Mach-Zender. Είναι δε το πρώτο, από όσο γνωρίζουμε, κύκλωμα αμιγώς οπτικού

διαχωρισμού επικεφαλίδας/φορτίου με την χρήση υβριδικά ολοκληρωμένων συμβολομετρικών διατάξεων Mach-Zender τεσσάρων στοιχείων.

Η διάρθρωση του κειμένου έχει τη μορφή:

- **Κεφάλαιο 1:** Εισαγωγή στα οπτικά δίκτυα με έμφαση στα οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτου και ετικέτας.
- **Κεφάλαιο 2:** Συνοπτική παρουσίαση ενός ολοκληρωμένου αμιγούς οπτικού κόμβου μεταγωγής ετικέτας (AOLS), στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος IST-LASAGNE, ως μια βασική εφαρμογή του κυκλώματος εξαγωγής επικεφαλίδας.
- **Κεφάλαιο 3:** Θεωρητική ανάλυση του κυκλώματος διαχωρισμού επικεφαλίδας/φορτίου με αμιγώς οπτικό τρόπο συμπεριλαμβανομένου των στοιχείων – υποσυστημάτων που το αποτελούν.
- **Κεφάλαιο 4:** Παρουσίαση του πειραματικού μέρους. Κύκλωμα διαχωρισμού επικεφαλίδας από το φορτίο οπτικού πακέτου πληροφορίας στα 40 Gb/s με τη χρήση υβριδικά ολοκληρωμένου MZI τεσσάρων στοιχείων (4 elements hybrid integrated MZI).

2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Παρουσίαση ενός αμιγώς οπτικού κόμβου μεταγωγής επικεφαλίδας

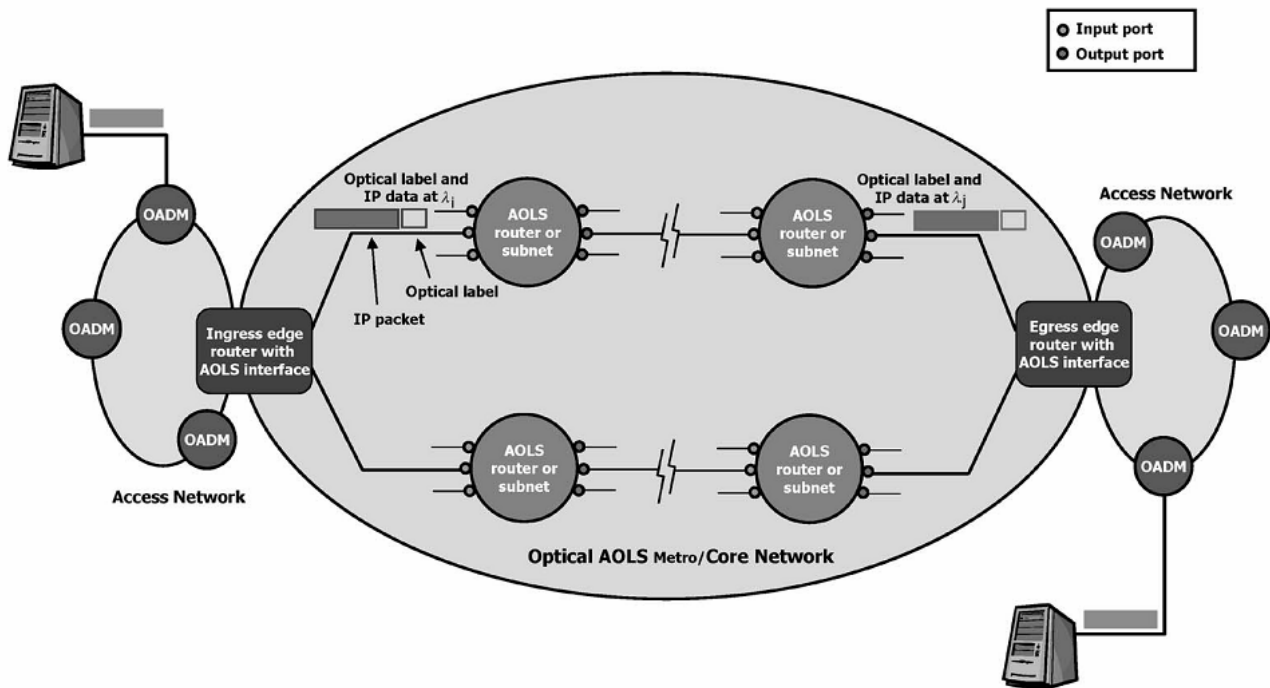
2.1 Εισαγωγή

Η τεράστια αύξηση της διαδικτυακής τηλεπικοινωνιακής κίνησης κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών αναγκάζει τα νέας γενιάς δίκτυα πρωτοκόλλου Διαδικτύου (IP) για αύξηση της χωρητικότητας, της απόδοσης, και των ρυθμών προώθησης των πακέτων πληροφορίας. Τα μελλοντικά IP δίκτυα, βασισμένα σε αμιγώς οπτική λειτουργία, θα έχουν απαιτήσεις για τεχνολογίες που θα επιτρέπουν τη δρομολόγηση πακέτων σε ταχύτητες της τάξης των terabit ανά δευτερόλεπτο, ούτως ώστε να είναι σε θέση να υποστηρίζουν τα νέα βελτιωμένα πρωτόκολλα δρομολόγησης IP, όπως αυτά των δικτύων μεταγωγής ετικέτας πολλαπλών πρωτοκόλλων (MPLS) [10]. Οι δυνατότητες των κόμβων των οπτικών δικτύων, που έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα, περιλαμβάνουν την επεξεργασία των ετικετών των πακέτων στην ηλεκτρική περιοχή με τη χρήση διαφορετικών τύπων διαμόρφωσης ή με τη χρήση πολυπλεξίας σε υποφέρουσα συχνότητα χαμηλότερων ρυθμών bit, μέσω υβριδικά ολοκληρωμένων οπτο-ηλεκτρονικών αρχιτεκτονικών (χάρην παραδείγματος αναφέρουμε το IST-Switching Technologies for Optically Labeled Signals (IST-STOLAS) [21] ή το IST-Light wave Architectures for the processing of Broadband ELectronic Signals (IST-LABELS) [16] project). Εντούτοις, προκειμένου να επιτευχθούν η λειτουργία σε υψηλούς ρυθμούς δεδομένων [22], η διαφάνεια όσον αφορά το είδος των πακέτων (packet-format transparency) [23], και η δυνατότητα για υψηλής ταχύτητας μετάδοση, όλες οι λειτουργίες των κόμβων των δικτύων όπως η μεταγωγή, η δρομολόγηση και η προώθηση πρέπει να υλοποιούνται απευθείας στο φυσικό στρώμα. Επιπλέον, το οπτικό στρώμα των κόμβων πρέπει να διαθέτει την απαραίτητη "νοημοσύνη", ούτως ώστε να μπορεί να "σαρώνει" τον πίνακα δρομολόγησης και αναλόγως να διαβιβάζει τα πακέτα.

Η αμιγώς οπτική μεταγωγή ετικέτας (AOLS) έχει προταθεί ως βιώσιμη προσέγγιση για την επίλυση της διαφοράς που παρουσιάζεται μεταξύ της χωρητικότητας μετάδοσης των οπτικών ινών και της χωρητικότητας ως προς την προώθηση των πακέτων στο επίπεδο του δρομολογητή, εις βάρος πάντα της τελευταίας [15]. Σε ένα τέτοιο κόμβο, όλες οι λειτουργίες δρομολόγησης και προώθησης των δικτύων μεταγωγής ετικέτας πολλαπλών πρωτοκόλλων (MPLS) εφαρμόζονται απευθείας στην οπτική περιοχή. Η χρήση των οπτικών ετικετών επιτρέπει στα IP πακέτα να κατευθύνονται μέσω του κεντρικού οπτικού δικτύου,

δίχως να απαιτούνται οπτο-ηλεκτρονικές μετατροπές (O/E/O conversions), όποτε μια απόφαση δρομολόγησης είναι απαραίτητη. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι η δυνατότητα να δρομολογούνται πακέτα εκρηκτικής ροής ανεξάρτητα από το ρυθμό των bit, τη μορφή των πακέτων, ή το μήκος των πακέτων. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση της ευελιξίας των δικτύων (flexibility) καθώς και της ικανότητας να χειρίζονται επιτυχώς μικρές οντότητες δεδομένων (granularity), ιδιότητες ιδιαίτερα επιθυμητές στα ευρυζωνικά δίκτυα, τα οποία χαρακτηρίζονται από εφαρμογές που παρουσιάζουν δυνατότητα για δέσμευση εύρους ζώνης κατ' απαίτηση (bandwidth-use on demand). Επιπλέον, έναντι των προηγούμενων κόμβων [16], [21], [24], ο αμιγώς οπτικός κόμβος δικτύων πρέπει να είναι ικανός για λειτουργία στη συχνότητα των bits της ετικέτας, επιτυγχάνοντας την χρησιμοποίηση μεγάλου εύρους ζώνης και ταυτόχρονα την απλούστευση των λειτουργιών μετάδοσης. Η δυνατότητα να υποβληθούν σε επεξεργασία οι ετικέτες στη βασική συχνότητα (line rate) μέσω αμιγώς οπτικών τεχνικών εξασφαλίζει την μη αναγκαιότητα για οπτο-ηλεκτρονικές μετατροπές (O/E/O conversions) και ταυτόχρονα επιτρέπει μεγάλης πληροφορίας να τοποθετείται στις ετικέτες, συγκριτικά με εφαρμογές χαμηλότερων ρυθμών μετάδοσης [15]. Όσον αφορά τις ετικέτες, αυτές δημιουργούνται αντίστοιχα με τον τρόπο δημιουργίας του ωφέλιμου φορτίου (payload) [25], πληρώνοντας έτσι μια απαίτηση αρκετά σημαντική για την εφαρμογή της νέας γενιάς αμιγώς οπτικών δικτύων.

Σε αυτό το κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα επιχειρηθεί μία συνοπτική παρουσίαση του οπτικού κόμβου μεταγωγής και δρομολόγησης, όπως αυτός παρουσιάστηκε στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος IST-LASAGNE (all-optical LAbel SwApping employing optical logic Gates in NEtwork nodes). Η πρόταση αυτή παρουσιάζει ένα νέο κόμβο και μία νέα αρχιτεκτονική δομή βασισμένα στην αμιγώς οπτική μεταγωγή της επικεφαλίδας μέσα στον κόμβο. Το πρόγραμμα LASAGNE στοχεύει στο σχεδιασμό και την εφαρμογή του πρώτου, διαμορφώσιμου, εξελικτικού, και πραγματικού αμιγώς οπτικού φωτονικού δρομολογητή ικανού για λειτουργία στα 40 Gb/s. Οι κατευθύνσεις του προγράμματος IST-LASAGNE άπτονται της διερεύνησης και επικύρωσης της χρήσης, των μέχρι τώρα εμπορικά διαθέσιμων, αμιγώς οπτικών λογικών πυλών στις λειτουργίες των κόμβων και γενικά των δικτύων. Οι οπτικές λογικές πύλες είναι όλες σχεδιασμένες για να ενσωματώνονται και να λειτουργούν χρησιμοποιώντας την ίδια θεμελιώδη δομική μονάδα: το συμβολόμετρο Mach-Zehnder βασισμένο στον οπτικό ενισχυτή ημιαγωγού (SOA), το οποίο οδηγεί σε μια ευέλικτη και εξελικτική προσέγγιση από την άποψη της κατασκευής. Αν και το φωτονικό πρωτότυπο σχεδιάζεται αυτήν την περίοδο ως διασύνδεση των ινών μεταξύ των SOA-MZI



Σχήμα 2.1: Παράδειγμα του δικτύου LASAGNE AOLS.

συσκευών, προβλέπεται ότι μέσω της προόδου στην έρευνα της φωτονικής ολοκλήρωσης (photonic integration), ένας τέτοιος δρομολογητής θα μπορούσε να ενσωματωθεί ενδεχομένως σε μια ενιαία υβριδική πλατφόρμα. Παραδείγματος χάριν, το ευρωπαϊκό πρόγραμμα IST-MUFINS (MULti- Functional integrated arrays of INterferometric Switches) στοχεύει στη μονολιθική ολοκλήρωση συμβολομετρικών διακοπών, με απώτερο στόχο τη φωτονική πολύ μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωση (VLSI) [40]. Στοιχεία που αφορούν το εν λόγω πρόγραμμα και συγκεκριμένα το υβριδικά ολοκληρωμένο συμβολόμετρο τεσσάρων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε στο πειραματικό μέρος, θα παρουσιαστούν στο τρίτο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί, ότι ο καθορισμός της αρχιτεκτονικής του κόμβου AOLS πρέπει να είναι συμβατός με το προτεινόμενο σενάριο δικτύου καθώς και τα πρωτόκολλα που θα χρησιμοποιηθούν. Η λύση που βασίζεται στην αμιγώς οπτική μεταγωγή ετικέτας (AOLS) και προτείνεται στο πρόγραμμα LASAGNE είναι συμβατή με μια σειρά διαφορετικών αρχιτεκτονικών δικτύων οπτικής μεταγωγής (optical packet switching networks – OPS). Με άλλα λόγια, το σχέδιο του κόμβου που περιγράφεται δεν επιβάλλει σημαντικούς περιορισμούς στο σχεδιασμό του δικτύου. Η αρχιτεκτονική που επιλέγεται είναι αρχιτεκτονική προσανατολισμένης σύνδεσης (connection oriented). Η βασική οντότητα προώθησης είναι μία εικονική σύνδεση, που ονομάζεται OPS μονοπάτι μεταγωγής ετικέτας (label switched path – LSP), η οποία είναι μία οπτική αναλογία ενός δικτύου MPLS LSP ή ενός εικονικού κυκλώματος (virtual circuit) ενός δικτύου ATM (Asynchronous Transfer Mode) [20].

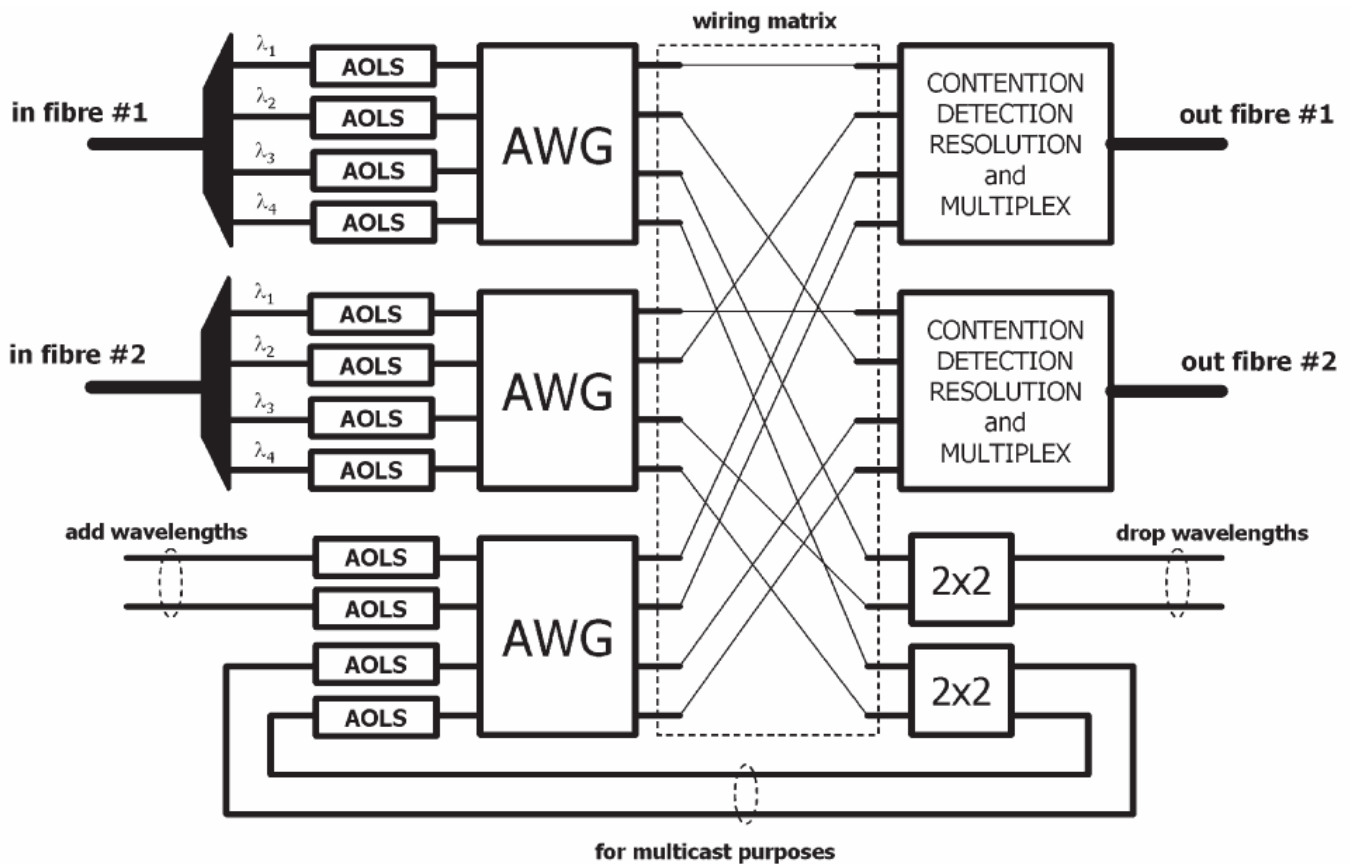
2.2 Σχέδιο και λειτουργία του οπτικού κόμβου

2.2.1 Έννοια δικτύων

Ένα παράδειγμα ενός δικτύου AOLS παρουσιάζεται στο σχέδιο 2.1. Τα πακέτα IP εισάγονται στο δίκτυο AOLS μέσω του κόμβου εισόδου. Εκεί, αυτά τα "low-bit-rate" πακέτα (~ 10 Gb/s) πολυπλέκονται οπτικά στο πεδίο του χρόνου για να λάβουν τη μορφή high-bit-rate πακέτων ή πακέτων εκρηκτικής ροής (~ 40–80 Gb/s). Σε αυτά τοποθετείται μια οπτική ετικέτα, και επαναμεταδίδονται σε ένα νέο μήκος κύματος, αν αυτό είναι απαραίτητο. Στα δίκτυα μητροπολιτικής περιοχής (MAN) και στα ευρείας περιοχής δίκτυα (WAN), μόνο η οπτική ετικέτα χρησιμοποιείται για τις αποφάσεις δρομολόγησης στους οπτικούς κόμβους, ενώ το μήκος κύματος χρησιμοποιείται για τη δυναμική επανοπρόωση (forward) των high-bit-rate πακέτων. Κάθε δρομολογητής στα δίκτυα AOLS χρησιμοποιεί το περιεχόμενο των αποσπώμενων ετικετών για να εκτελέσει την απόφαση προώθησης και να διαβιβάσει τα πακέτα προς το δρομολογητή εξόδου (edge router - ER). Ένας οπτικός δρομολογητής εκτελεί τις λειτουργίες δρομολόγησης και προώθησης ταυτόχρονα με τη μετατροπή μήκους κύματος και την αντικατάσταση (εξαγωγή-τοποθέτηση) των επικεφαλίδων/ετικετών (label swapping). Καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, τα high-bit-rate πακέτα διατηρούνται στην οπτική περιοχή.

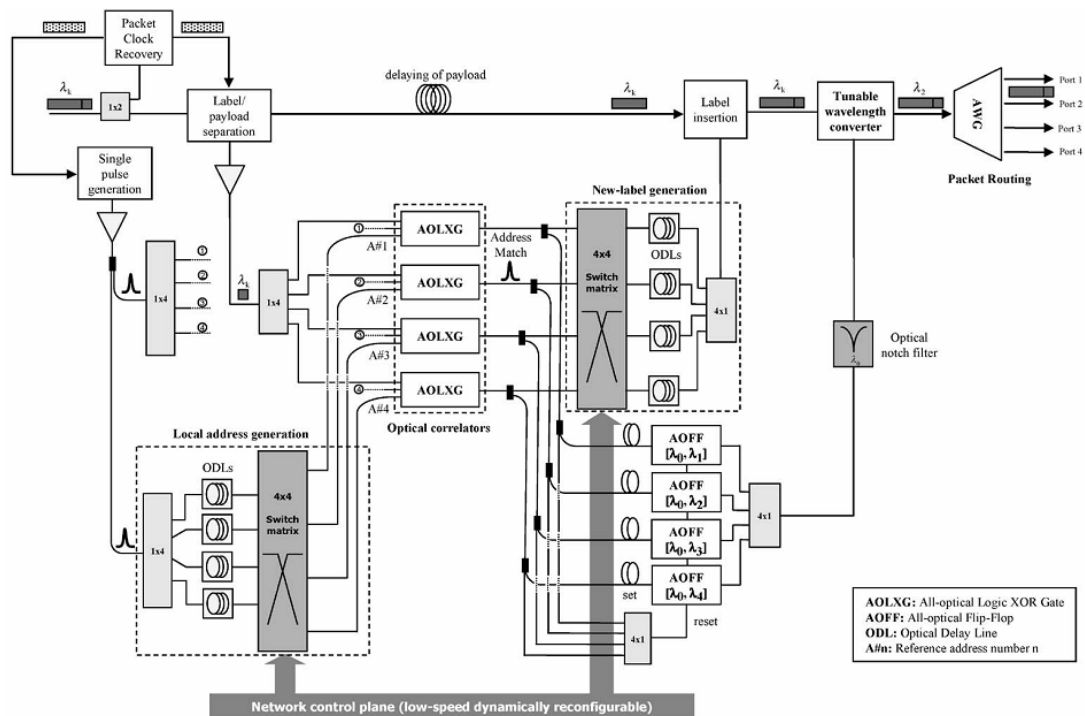
2.2.2 Σχέδιο κόμβων

Το σχέδιο 2.2 παρουσιάζει την προτεινόμενη αρχιτεκτονική του κόμβου που σχεδιάστηκε και μελετήθηκε στο πρόγραμμα LASAGNE. Εξαιτίας της αποκλειστικής εστίασης στις αμιγώς οπτικές λειτουργίες και τους περιορισμένους πόρους, η έκταση της εφαρμογής και της πειραματικής επικύρωσης καθίσταται περιορισμένη στον κόμβο AOLS και το δρομολογητή πακέτων, οι οποίοι και εκτίθενται λεπτομερώς στο σχέδιο 2.3. Οι κύριες λειτουργίες που απαιτούνται από το σχέδιο AOLS (ανάγνωση επικεφαλίδας/ετικέτας, νέα εισαγωγή ετικέτας, και δρομολόγηση πακέτων) είναι βασισμένες στη χρήση αμιγώς οπτικών λογικών πυλών και flip-flops. Όπως φαίνεται στο σχέδιο 2.2, τα μήκη κύματος που εισάγονται στον κόμβο αρχικά αποπολυπλέκονται, και για κάθε μήκος κύματος που προκύπτει χρησιμοποιείται ένα



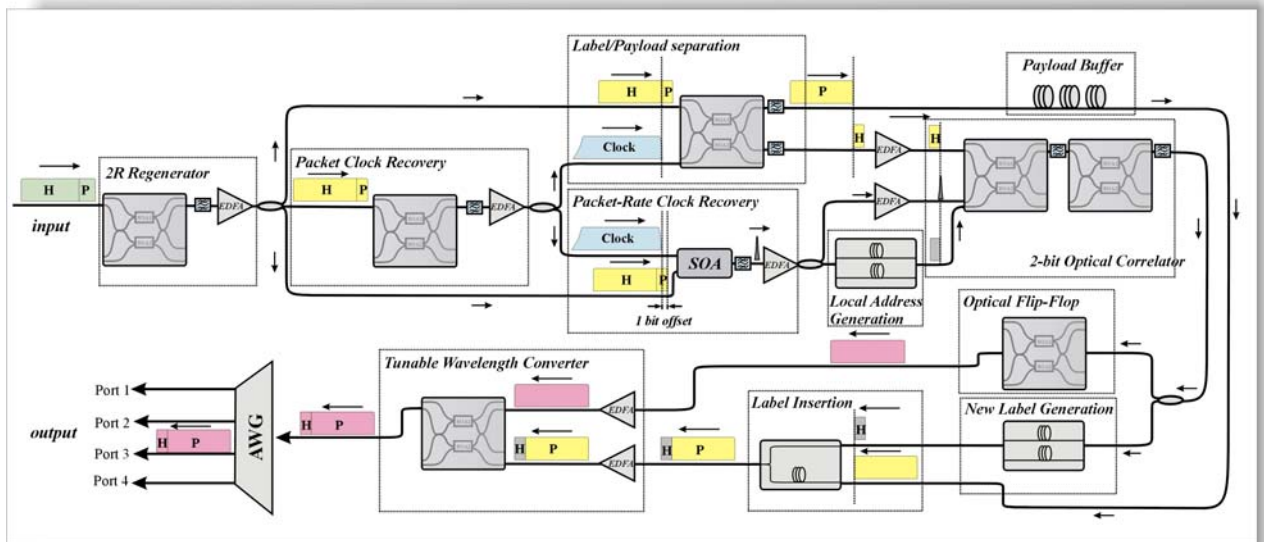
Σχήμα 2.2: Προτεινόμενη αρχιτεκτονική φωτονικής δρομολόγησης.

μπλοκ AOLS. Κάθε μπλοκ AOLS «κατανοεί» τη λειτουργία προώθησης των εισερχόμενων πακέτων. Καθώς εισάγεται ένα πακέτο πληροφορίας στην ενότητα AOLS, το φορτίο (40 Gb/s) και η ετικέτα (10 Gb/s) διαχωρίζονται μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο σχέδιο 2.3. Η εξαγόμενη οπτική ετικέτα οδηγείται σε μια διάταξη από οπτικούς συσχετιστές (correlators), αποτελούμενους από αμιγώς οπτικές λογικές XOR πύλες (AOLXGs), όπου συντελείται η σύγκριση μεταξύ της ετικέτας και ενός συνόλου τοπικών διευθύνσεων. Αυτές οι τοπικές διευθύνσεις παράγονται χρησιμοποιώντας οπτικές γραμμές καθυστέρησης (ODLs). Μία γραμμή ODL αποτελείται από ένα σύνολο διασυνδεδεμένων ινών καθυστέρησης, συζεύκτες, και καθρέφτες, η οποία και παράγει μια ακολουθία bit από έναν παλμό. Η σύγκριση της εισερχόμενης ετικέτας με τις τοπικές διευθύνσεις προϋποθέτει ότι για κάθε πιθανή εισερχόμενη ετικέτα, μία ξεχωριστή γραμμή ODL και ένας correlator πρέπει να εγκατασταθούν στο μπλοκ AOLS. Μετά τη σύγκριση, ένας παλμός υψηλής έντασης θα εμφανιστεί στην έξοδο του XOR συσχετιστή (correlator) με τον πίνακα αντιστοίχισης διευθύνσεων. Αυτός ο παλμός τροφοδοτεί ένα μπλοκ ελέγχου που οδηγεί σε έναν μετατροπέα μήκους κύματος. Το μπλοκ ελέγχου είναι φτιαγμένο από



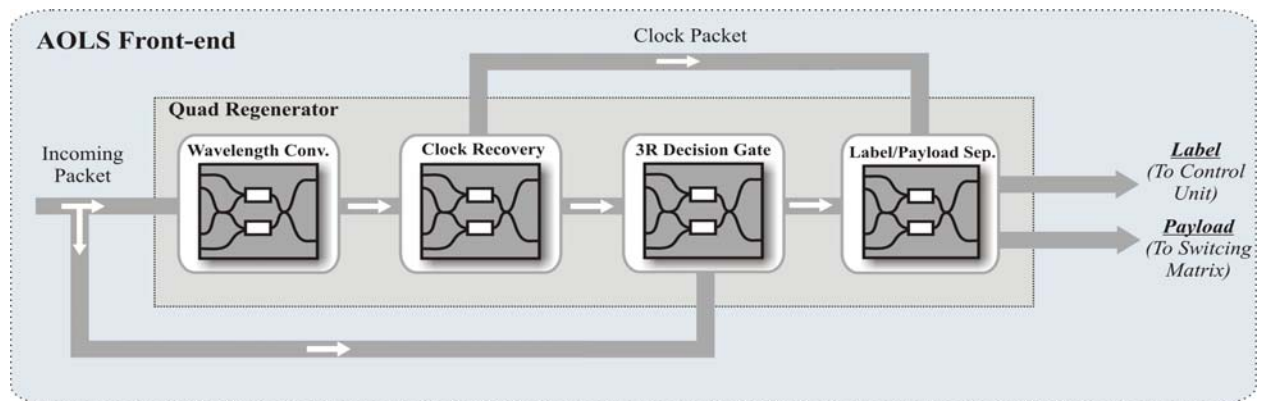
Σχήμα 2.3: Πειραματικό σχεδιάγραμμα του κυκλώματος σύγκρισης-αντικατάστασης ετικέτας (label swapper) και δρομολόγησης πακέτων (packet router) στα πλαίσια του προγράμματος LASAGNE.

αμιγώς οπτικά flip-flops (AOFFs). Ανάλογα με τη διεύθυνση μεταγωγής (τον παλμό εξόδου του correlator), κατάλληλο flip-flop θα εκπέμψει ένα σήμα συνεχούς κύματος (CW) σε ένα ορισμένο μήκος κύματος. Κατ' αυτό τον τρόπο, επιλέγεται το εσωτερικό μήκος κύματος. Εν τω μεταξύ, μια νέα ετικέτα παράγεται στην κατάλληλη γραμμή καθυστέρησης ODL. Η νέα ετικέτα εισάγεται μπροστά από το φορτίο, και στη συνέχεια και τα δύο (φορτίο και νέα επικεφαλίδα) μετατρέπονται στο μήκος κύματος που παράγεται από το flip-flop. Κατόπιν, το πακέτο περνά μέσω ενός κυματοδηγού AWG (Arrayed-Waveguide Grating). Για αυτό το λόγο, το μήκος κύματος, πάνω στο οποίο το πακέτο εξέρχεται του AOLS μπλοκ, καθορίζει και τη θύρα εξόδου από την οποία το εξερχόμενο πακέτο θα αφήσει τον κόμβο. Δύο διακόπτες παρέχουν την ευελιξία να διαμορφωθούν οι αντιστοιχίσεις μεταξύ των εισερχόμενων και εξερχόμενων ετικετών με τα μήκη κύματος. Το μέγεθος του δρομολογητή πακέτων (παραδείγματος χάριν, ο αριθμός των οπτικών correlators και των flip-flops) είναι άμεσα εξαρτημένο από τον αριθμό των τοπικών διευθύνσεων που χρησιμοποιούνται στον πίνακα δρομολόγησης. Το υποσύστημα AOLS του σχεδίου 2.3 απεικονίστηκε για



Σχήμα 2.4: Πειραματικό σχεδιάγραμμα του κυκλώματος σύγκρισης-αντικατάστασης ετικέτας (label swapper) και δρομολόγησης πακέτων (packet router) στα πλαίσια του προγράμματος LASAGNE, αναφορικά με το υλικό (συμβολομετρικές διατάξεις SOA-MZI).

τη συγκεκριμένη περίπτωση τεσσάρων διαφορετικών τοπικά παραγόμενων διευθύνσεων (2-bit οπτικές ετικέτες).



Σχήμα 2.5: Μπλοκ διάγραμμα μίας AOLS front-end μονάδας με τον CIP's quad regenerator.

Ο συγχρονισμός μεταξύ των οπτικών υποσυστημάτων που χρησιμοποιούνται στον κόμβο δρομολόγησης AOLS και της πληροφορίας του εισερχόμενου πακέτου είναι κρίσιμης σπουδαιότητας για την κατάλληλη λειτουργία του κόμβου. Ο κόμβος AOLS απαιτεί, αφενός την εξαγωγή χρονικών διαστημάτων στη βάση του χρονικού μεγέθους των πακέτων πληροφορίας, καθώς και της σειράς εισόδου αυτών, αφετέρου μια διαδικασία ανίχνευσης της άφιξης των πακέτων στον κόμβο. Αυτές οι λειτουργίες εκτελούνται από ένα κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού και μια μονοπαλική γεννήτρια. Όσον αφορά το πρώτο (κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού), αυτό τοποθετείται στην αρχή του δρομολογητή και είναι σε θέση να διαχειρίζεται οπτικά

πακέτα εκρηκτικής ροής. Η μονοπαλική γεννήτρια παράγει έναν οπτικό παλμό με την άφιξη ενός πακέτου στον κόμβο AOLS.

2.3 Αυτοσυγχρονισμός στον κόμβο με αμιγώς οπτικό τρόπο

Το σενάριο LASAGNE AOLS περιλαμβάνει το σχέδιο και την εφαρμογή ενός αμιγώς οπτικού κόμβου ικανού, για την παραλαβή, την επεξεργασία και την δρομολόγηση πακέτων πληροφορίας στην οπτική περιοχή. Η οπτική επεξεργασία δεδομένων, εντούτοις, απαιτεί την παρουσία ενός αμιγώς οπτικού σταδίου συγχρονισμού στην εισαγωγή του κόμβου που θα χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο ή την ενίσχυση των επόμενων υποσυστημάτων κόμβων. Εξετάζοντας το καθορισμένο σενάριο AOLS που συνδυάζει ένα δίκτυο μεταγωγής πακέτων με αμιγώς οπτική επεξεργασία σήματος, ένα τέτοιο στάδιο συγχρονισμού πρέπει να είναι ικανό να λειτουργεί στη βασική συχνότητα (line rate) καθώς και με ακολουθίες διαδοχικών πακέτων (packet-by-packet λειτουργία), διατηρώντας ταυτόχρονα τη δυνατότητα χρησιμοποίησης μεγάλου εύρους ζώνης. Η δυνατότητα να λειτουργεί με πακέτα πληροφορίας επιτρέπει τη χρήση δέσμευση εύρους ζώνης κατ' απαίτηση (bandwidth-use on demand), ενώ η αποτελεσματική επεξεργασία των μικρότερων πακέτων καθορίζουν τελικά την ικανότητα του δικτύου να χειρίζεται επιτυχώς μικρές οντότητες δεδομένων (granularity). Σε αυτήν την λογική, η σημαντικότερη ιδιότητα τέτοιων κυκλωμάτων συγχρονισμού είναι η ικανότητά τους να λειτουργήσουν με πακέτα πληροφορίας, ένα γεγονός που απαιτεί χαμηλό χρόνο ανάκτησης (lock-in time) και χαμηλό χρόνο σβέσης (persistence time). Σε αυτήν την κατεύθυνση, ο οπτικός κόμβος μεταγωγής περιλαμβάνει δύο κυκλώματα συγχρονισμού, τα χαρακτηριστικά και η αποτελεσματικότητα των οποίων επαληθεύονται πειραματικά [20] : Το πρώτο είναι ένα κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού πακέτων πληροφορίας που λειτουργεί σε 40 Gb/s ικανό να εξάγει το ρολόι για κάθε εισερχόμενο πακέτο από μια ακολουθία πακέτων που εισέρχεται στο κύκλωμα. Τόσο η αρχή λειτουργίας όσο και η αξία του κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού θα αναλυθούν σε επόμενες παραγράφους της παρούσης διπλωματικής εργασίας. Το δεύτερο είναι ένα κύκλωμα, που λειτουργεί ως γεννήτρια απλών παλμών στα 10 Gb/s ικανό να παράγει έναν παλμό για κάθε εισερχόμενο πακέτο (Packet-Rate Clock Recovery). Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτές οι ενότητες αυτοσυγχρονισμού σχεδιάστηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε να μην απαιτείται παραγωγή τοπικών σημάτων ούτε και ο συγχρονισμός των εισερχόμενων πακέτων με τοπικούς οπτικούς ή ηλεκτρικούς ταλαντωτές.

2.4 Λειτουργίες κόμβου με χρήση αμιγώς οπτικών λογικών πυλών και οπτικών Flip-Flop

Οι αμιγώς οπτικές λογικές πύλες καθώς και τα οπτικά flip-flops θεωρούνται ως τα βασικά λειτουργικά μπλοκ για την υλοποίηση των βασικών λειτουργιών που απαιτούνται στον οπτικό κόμβο: διαχωρισμός επικεφαλίδας/ετικέτας από το φορτίο, ανάγνωση ετικετών, ρυθμίσιμη μετατροπή μήκους κύματος, και δρομολόγηση πακέτων. Τα προαναφερθέντα υποσυστήματα επιχειρείται να παρουσιαστούν συνοπτικά στη συνέχεια.

Αμιγώς οπτικοί συσχετιστές (correlators) βασισμένοι σε λογικές XOR λογικές πύλες. Προκειμένου να ληφθούν οι αποφάσεις δρομολόγησης πακέτων μέσα στον κόμβο LASAGNE, οι ετικέτες των εισερχόμενων πακέτων πρέπει να συγκριθούν με συγκεκριμένες λέξεις κλειδιά διευθύνσεων. Ένας κοινός τρόπος να εκτελεσθεί αυτή η οπτική αναγνώριση των παραθύρων bits (bit pattern) είναι μέσω της χρήσης ενός οπτικού συσχετιστή (correlator), που λειτουργεί στο πεδίο του χρόνου, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η αντιστοίχιση των ακολουθιών των bits με έναν οπτικό πίνακα ελέγχου. Ο τρόπος να εφαρμοστεί αυτή η λειτουργία στο σχέδιο LASAGNE, είναι με τη βοήθεια αμιγώς οπτικών λογικών πυλών XOR (AOLXG), βασισμένων στις συσκευές SOA-MZI.

Οπτικά Flip-Flops. Το οπτικό Flip Flop είναι ένας οπτικός διακόπτης. Η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στην χρησιμοποίηση δύο παλμών με χρονική καθυστέρηση μεταξύ τους ανάλογη της επιθυμητής μας λειτουργίας. Ο πρώτος παλμός είναι ο SET παλμός και ο οποίος ουσιαστικά αλλάζει την κατάσταση του διακόπτη από OFF σε ON. Αυτό σημαίνει ότι το flip flop αρχίζει να άγει. Στον συγκεκριμένο κόμβο ανάλογα με το σήμα εισόδου που έρχεται από την XOR άγει ή μη ένα CW συγκεκριμένου μήκους κύματος, διαφορετικό από αυτό του σήματος εισόδου. Ο δεύτερος παλμός ο οποίος είναι καθυστερημένος σε σχέση με το πρώτο είναι ο RESET παλμός ο οποίος και επαναφέρει το flip flop στην αρχική του κατάσταση. Η χρονική καθυστέρηση μεταξύ των δυο παλμών είναι ανάλογη με το μήκος του πακέτου. Η έξοδος του flip flop αποτελεί το εισερχόμενο σήμα στο μετατροπέα μήκους κύματος (τελευταίο στάδιο), ενώ το μήκος κύματος που άγει επιλέγεται ανάλογα προκειμένου να αποφευχθούν συγκρούσεις στην έξοδο του κόμβου (αξιοποίηση WDM πλεονεκτημάτων).

Μετατροπή μήκους κύματος και δρομολόγηση πακέτων. Στον κόμβο LASAGNE, ένας ρυθμίσιμος μετατροπέας μήκους κύματος λαμβάνει τα εισερχόμενα οπτικά πακέτα (φορτίο και επικεφαλίδα) και τα μετατρέπει επάνω στο νέο κανάλι μήκους κύματος που τίθεται από το μπλοκ των οπτικών flip-flops. Στη συνέχεια, μέσω της χρήσης ενός αποπολυπλέκτη μήκους κύματος AWG, μπορεί να επιτευχθεί η

δρομολόγηση των οπτικών πακέτων. Το στάδιο της μετατροπής μήκους κύματος λειτουργεί καθοριστικά για την αποφυγή συγκρούσεων στην έξοδο του κόμβου.

2.5 Κύκλωμα διαχωρισμού επικεφαλίδας φορτίου

Η βασική λειτουργία ενός κόμβου σε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο 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. Στα δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος ο τελικός προορισμός του σήματος καθορίζεται από το μήκος κύματος της πληροφορίας, οπότε κάθε μήκος κύματος αντιστοιχεί σε διαφορετικές συνδέσεις. Η κατάσταση είναι διαφορετική στα δίκτυα μεταγωγής πακέτων, όπου η απαίτηση για δυναμική και όχι στατική μεταγωγή απαγορεύει τη χρήση του μήκους κύματος ως ένδειξη του τελικού προορισμού. Για τη διαδικασία δρομολόγησης του σήματος στην επιθυμητή έξοδο, κάθε κόμβος ενημερώνεται για τον τελικό προορισμό του σήματος μέσω του πεδίου της επικεφαλίδας (header) ή αλλιώς διεύθυνσης (address), το οποίο συνοδεύει το σήμα πραγματικής πληροφορίας, που αποκαλείται φορτίο (payload), καθόλη τη διάρκεια της μετάδοσής του στο δίκτυο. Η διαδικασία ενημέρωσης του κόμβου για τον τελικό προορισμό του εισερχόμενου σήματος επιτελείται σε δύο στάδια [4]: 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.

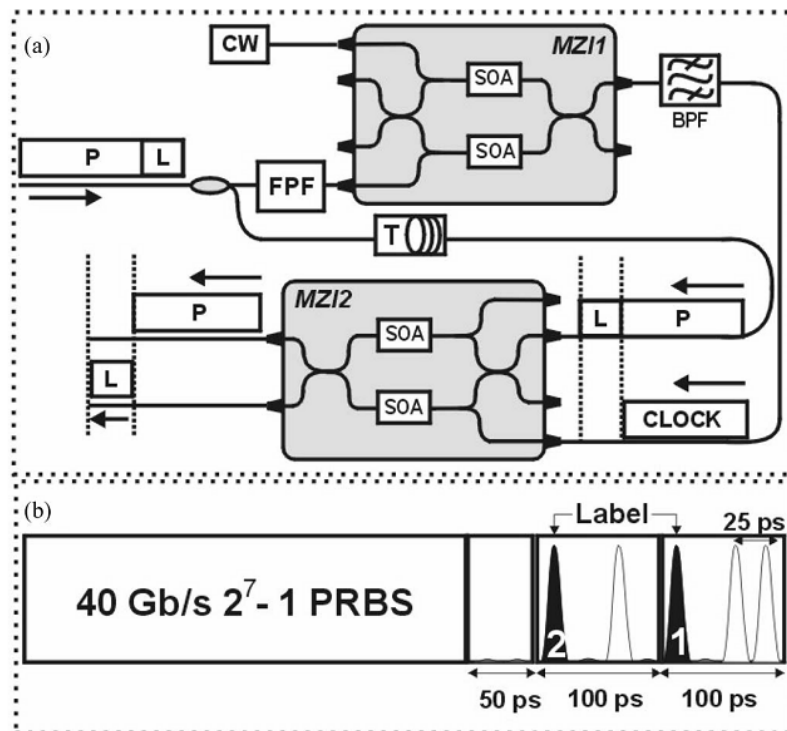
Απαραίτητη προϋπόθεση για την πλήρη εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης των οπτικών δικτύων, στην οποία αποσκοπούν τα φωτονικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων, είναι η διεξαγωγή της διαδικασίας ενημέρωσης του κόμβου για την τελική διεύθυνση του σήματος απευθείας στο οπτικό επίπεδο, μέσω κατάλληλων οπτικών συστημάτων εξαγωγής και επεξεργασίας της επικεφαλίδας [15]. 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.

Μέχρι τώρα έχουν προταθεί μια σειρά από μεθόδους για τα οπτικά δίκτυα διαχωρισμού επικεφαλίδας ή ετικέτας από το φορτίο, η διαφοροποίηση των οποίων έγκειται στη δομή των πακέτων πληροφορίας (ανάλογα με τη διακριτότητα της επικεφαλίδας, στο πεδίο της συχνότητας ή στο πεδίο του χρόνου). 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 [15], [21]. Ο διαχωρισμός της, σε αυτήν την περίπτωση, γίνεται είτε με χρήση μικροκυματικών φίλτρων, είτε με χρήση οπτικών παθητικών διατάξεων με ιδιότητες φιλτραρίσματος σε στενή φασματική ζώνη. 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.

Η προαναφερθείσα δομή των πακέτων δεν αναταποκρίνεται στην ανάγκη για βέλτιστη εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, κάτι το οποίο θα συνέβαινε αν η επικεφαλίδα διαδιδόταν στην ίδια φέρουσα και με τον ίδιο ρυθμό 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).

Για τον οπτικό κόμβο μεταγωγής, ο οποίος έχει σχεδιαστεί για λειτουργία με τέτοιες δομές πακέτων, προτείνεται μία μέθοδος αυτοσυγχρονισμού για το διαχωρισμό της επικεφαλίδας από το φορτίο, η οποία βασίζεται στην ανάκτηση του ρολογιού των πακέτων και έχει ως μοναδική είσοδο το πακέτο πληροφορίας. Η προτεινόμενη μέθοδος παρουσιάζει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες μεθόδους, για ίδιες δομές πακέτων, «αυτο-συγχρονιζόμενων σχημάτων» (self-synchronization schemes) που βασίζονται στην παραγωγή παλμοσειράς χρονικής διάρκειας ίσης με αυτήν του πεδίου της επικεφαλίδας, και άρα παρουσιάζουν πολυπλοκότητά που αυξάνει, καθώς αυξάνει το μέγεθος της επικεφαλίδας, ή μεθόδους που βασίζονται στη χρήση διαφορετικής κωδικοποίησης του πεδίου της διεύθυνσης από το πεδίο του φορτίου, με αποτέλεσμα τον περιορισμό της ελευθερίας

και της ευελιξίας της δομής των πακέτων δεδομένων [3]. Το προτεινόμενο κύκλωμα διαχωρισμού επικεφαλίδας φορτίου, αφενός ανταποκρίνεται στην απαίτηση για μετάδοση της επικεφαλίδας στον ίδιο ρυθμό μετάδοσης και στην ίδια φέρουσα συχνότητα με το φορτίο του πακέτου, ούτως ώστε να παρέχεται η δυνατότητα για βέλτιστη εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, αφετέρου η πολυπλοκότητά του είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος του πεδίου της επικεφαλίδας. Παρουσιάζει τη δυνατότητα να λειτουργεί με μοναδική απαίτηση την είσοδο του πακέτου



Σχήμα 2.6: Σχηματικό διάγραμμα (α) της λειτουργίας του κυκλώματος διαχωρισμού επικεφαλίδας/φορτίου με τη χρήση δύο οπτικών πυλών SOA-MZI (β) τη μορφή του οπτικού πακέτου πληροφορίας.

πληροφορίας, και με βάση τη δυνατότητα ανάκτησης του πακέτου ρολογιού, μπορεί να παρέχει την επιθυμητή παλμική χρονική συνάρτηση για επέμβαση σε χρονικά πεδία του αρχικού οπτικού πακέτου.

Σε αυτό το σημείο θα επιχειρήσουμε να παρουσιάσουμε συνοπτικά, μιας και λεπτομερέστερα στοιχεία και πειραματικά αποτελέσματα περιλαμβάνονται στο υπόλοιπο μέρος της εργασίας, το προτεινόμενο κύκλωμα διαχωρισμού για τον οπτικό κόμβο μεταγωγής. Το κύκλωμα αποτελείται από δύο υπομονάδες: το προηγουμένως περιγεγραμμένο οπτικό κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού πακέτων πληροφορίας και μια πρόσθετη οπτική πύλη υψηλής ταχύτητας λειτουργίας, και οι δύο πύλες SOA-MZI (υλοποιούνται στη βάση του συμβολομέτρου Mach-Zender), που μπορούν να λειτουργήσουν στα 40 Gb/s. Τα εισερχόμενα πακέτα δεδομένων χωρίζονται σε δύο μέρη. Ένα από αυτά χρησιμοποιείται ως είσοδος στο κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού

(MZI1), ενώ το άλλο για να εισαχθεί στο MZI2 ως σήμα δεδομένων. Το εξαγόμενο οπτικό πακέτο ρολογιού «ακολουθεί» τη διάρκεια του αρχικού πακέτου πληροφορίας και χρησιμοποιείται ως σήμα ελέγχου στο MZI2. Για την εξαγωγή της ετικέτας, το MZI2 διαμορφώνεται έτσι ώστε να εκτελεί μία απλή Boolean λειτουργία AND μεταξύ του αρχικού εισερχόμενου πακέτου και μίας χρονικά καθυστερημένης εκδοχής του ανακτημένου πακέτου ρολογιού από οπτικό φιλτράρισμα. Η επιτυχής διαδικασία διαχωρισμού ετικέτας/φορτίου έγκειται στην κατάλληλη τοποθέτηση στο πεδίο του χρόνου, τόσο του αρχικού πακέτου, όσο και του ανακτημένου πακέτου ρολογιού, λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη και τον απαιτούμενο χρόνο ανάκτησης. Υπό αυτήν την έννοια, το πακέτου ρολογιού υπόκειται σε χρονική καθυστέρηση μέσω μιας γραμμής ODL, έτσι ώστε μόνο τα bits που απαρτίζουν το φορτίο του αρχικού πακέτου πληροφορίας να εμπίπτουν στο παράθυρο μεταγωγής, όπως αυτό διαμορφώνεται από το ανακτημένο σήμα ρολογιού, και έτσι αυτά τα bits να μεταγονται από την έξοδο της πύλης (θύρα μεταγωγής).

3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Θεωρητική μελέτη του κυκλώματος αμιγούς οπτικού διαχωρισμού επικεφαλίδας/φορτίου και των στοιχείων - υποσυστημάτων που το συγκροτούν

3.1 Οι συμβολομετρικές διατάξεις ως το δομικό στοιχείο των οπτικών κυκλωμάτων

Η ανάγκη για αποδοτικότερη χρήση των δικτύων επικοινωνιών και για ολοένα και υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης πληροφορίας οδήγησε στην εξέλιξη των αμιγώς οπτικών μέσων. Ήδη οι ηλεκτρονικές διατάξεις έχουν προσεγγίσει τα πρακτικά όρια λειτουργίας τους, και η οπτο-ηλεκτρο-οπτική μετατροπή (O/E/O conversion) του σήματος είναι αναπόφευκτο να μειώνει τις επιδόσεις του δικτύου και να προκαλεί συμφόρηση [13], [15]. Είναι αναγκαία, επομένως, η υλοποίηση κυκλωμάτων ικανών να επιτελούν τις απαραίτητες διεργασίες ψηφιακής επεξεργασίας του σήματος απευθείας στο οπτικό επίπεδο.

Η πρόοδος αυτή είναι άμεσα συνδεδεμένη με την αξιοποίηση των οπτικών συμβολομετρικών διατάξεων (optical interferometers) με ημιαγωγίμους οπτικούς ενισχυτές (Semiconductor Optical Amplifiers - SOAs), οι οποίες υιοθετήθηκαν ως οι κύριες διατάξεις οπτικών διακοπών και ως τα βασικά δομικά στοιχεία μεταγωγής της φωτονικής τεχνολογίας [28]. Η λειτουργία αυτών των οπτικών πυλών βασίζεται στο φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης φάσης (Cross-Phase Modulation - XPM) μέσα στους ημιαγωγίμους οπτικούς ενισχυτές, το οποίο εκμεταλλεύεται την ισχυρή μη γραμμικότητα των ημιαγωγών και την ταχύτατη χρονική απόκριση αυτής. Αυτά τα δύο χαρακτηριστικά προσδίδουν στις οπτικές συμβολομετρικές διατάξεις τη δυνατότητα για λειτουργία τους με χαμηλές ενέργειες μεταγωγής (της τάξης μερικών fJ), και σε υψηλές ταχύτητες μετάδοσης, παρέχοντας σαφές πλεονέκτημα έναντι των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Επιπλέον, η υιοθέτηση των συμβολομετρικών διατάξεων καθιστά δυνατή την ολοκλήρωση των διακοπών σε συμπαγείς συσκευασίες, παρέχοντας τη δυνατότητα για διαδοχική σύνδεση πολλαπλών διακοπών και για την υλοποίηση σύνθετων οπτικών κυκλωμάτων επεξεργασίας, τα οποία προσαρμόζονται εύκολα σε μια πληθώρα δικτυακών εφαρμογών. Στο τελευταίο έρχεται να προστεθεί, η πρώτη υβριδική ολοκλήρωση συμβολομετρικών διατάξεων (συγκεκριμένα του συμβολόμετρου Mach-Zehnder [40]), καθιστώντας δυνατή, πλέον, την υλοποίηση διαφορετικών οπτικών λειτουργιών από την ίδια συσκευή και θέτοντας τους όρους για τη μελλοντική υψηλής κλίμακας φωτονική ολοκλήρωση.

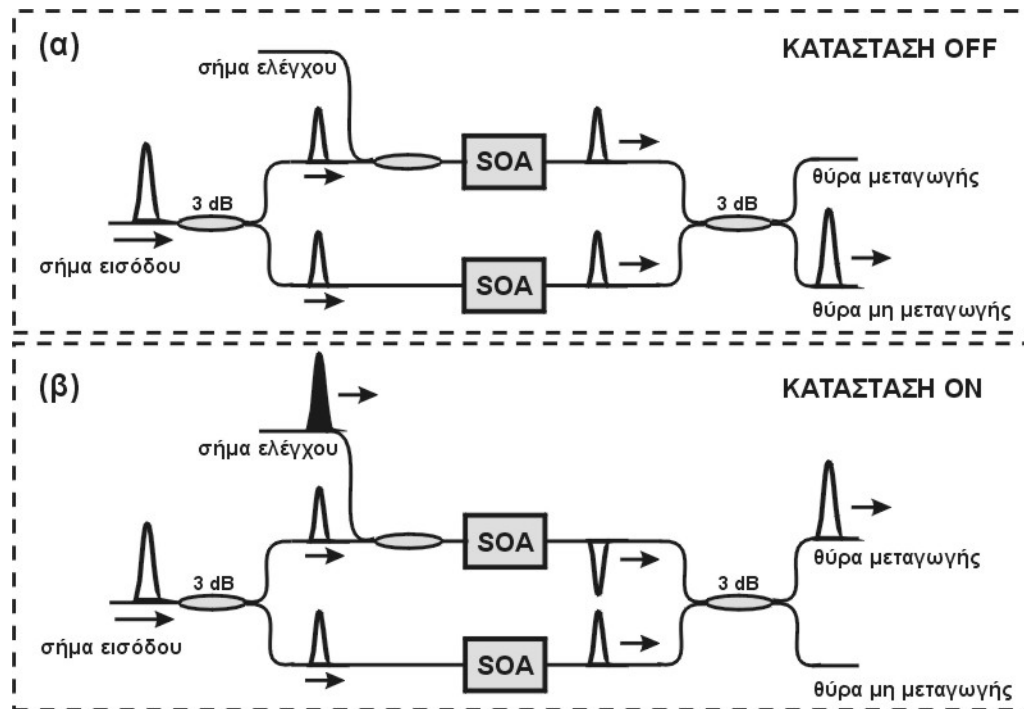
Κατά αντιστοιχία με τα ηλεκτρονικά κυκλώματα επεξεργασίας σήματος, μπορούμε να πούμε ότι το κύκλωμα ψαλιδισμού είναι ένα από τα κυκλώματα, τα οποία εμφανίζουν έντονη συνάφεια με τα ενεργά στοιχεία μεταγωγής χωρίς να έχουν υλοποιηθεί ακόμη στην οπτική τους εκδοχή. Η υλοποίηση των κυκλωμάτων αυτών απαιτεί την χρήση ψηφιακών διακοπτών (digital switches) ή αλλιώς ψηφιακών πυλών (digital gates), οι οποίοι έχουν επωμιστεί στα σύγχρονα ψηφιακά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα έναν από τους πιο κρίσιμους ρόλους στην προσπάθεια για μετάδοση και αναγνώριση της ψηφιακής πληροφορίας χωρίς σφάλματα. Οι διακόπτες είναι, στην ουσία, τα στοιχεία απόφασης (decision elements), τα οποία οφείλουν να διακρίνουν αν τα εισερχόμενα δυφία (bits) είναι της μορφής '1' (άσσου) ή '0' (μηδέν). Η απόφαση αυτή λαμβάνεται με γνώμονα μια συγκεκριμένη στάθμη τάσης (για τα ηλεκτρονικά κυκλώματα) ή ισχύος (για τα οπτικά κυκλώματα), την οποία ο διακόπτης θεωρεί ως κατώφλι (threshold). Σύμφωνα με τα παραπάνω, ένας διακόπτης χαρακτηρίζεται από δύο καταστάσεις λειτουργίας ή, αλλιώς, καταστάσεις μεταγωγής: Από την κατάσταση ON, όπου ο διακόπτης αναγνωρίζει στην είσοδο στάθμη τάσης ή ισχύος μεγαλύτερη του κατωφλίου απόφασης και αποδίδει στην έξοδο παλμό, ο οποίος αντιστοιχεί σε λογικό '1', και από την κατάσταση OFF, όπου ο διακόπτης αναγνωρίζει στην είσοδο στάθμη τάσης ή ισχύος χαμηλότερη του κατωφλίου και αποδίδει στην έξοδο το λογικό '0'. Στα ηλεκτρονικά ψηφιακά κυκλώματα το βασικό δομικό στοιχείο, που λειτουργεί σαν ψηφιακός διακόπτης, είναι το **τρανζίστορ (transistor)**. Το ανάλογο του ηλεκτρονικού τρανζίστορ στα ψηφιακά οπτικά κυκλώματα το αποτελούν οι **οπτικές συμβολομετρικές διατάξεις**, οι οποίες έκαναν την εμφάνισή τους μόλις πριν δύο δεκαετίες περίπου.

Έχουν προταθεί αρκετές συμβολομετρικές διατάξεις για την υλοποίηση οπτικών κυκλωμάτων. Οι κυριότερες από αυτές είναι: το συμβολόμετρο Mach-Zehnder (Mach-Zehnder Interferometer), συνδεσμολογίες κλειστού βρόχου όπως ο μη γραμμικός καθρέφτης βρόχου ίνας (Nonlinear Optical Loop Mirror-NOLM), ο καθρέφτης βρόχου με ημιαγωγίμο οπτικό ενισχυτή (Semiconductor Laser Amplifier Loop Mirror-SLALOM ή Terahertz Optical Asymmetric Demultiplexer-TOAD), το μη γραμμικό συμβολόμετρο υπερυψηλών ταχυτήτων UNI (Ultra-fast Non-linear Interferometer) -συμβολόμετρο μονού βραχίονα- καθώς και ο συμβολομετρικός διακόπτης Michelson με ημιαγωγίμους οπτικούς ενισχυτές [3].

Στην παρούσα διπλωματική θα ασχοληθούμε με το συμβολόμετρο Mach-Zehnder.

3.2 Το συμβολόμετρο Mach-Zehnder (Mach-Zehnder Interferometer) με ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή-SOA

Η δομή ενός διακόπτη τύπου Mach-Zehnder (Mach-Zehnder Interferometer - MZI) με ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή (SOA) φαίνεται στο σχ. 3.1.



Σχήμα 3.1: Ο διακόπτης Mach-Zehnder σε κατάσταση (α) μη μεταγωγής-OFF και (β) μεταγωγής-ON.

Το συμβολόμετρο MZI διαθέτει δύο βραχίονες με έναν SOA τοποθετημένο σε κάθε βραχίονα. Το σήμα εισόδου εισέρχεται στο διακόπτη και διαχωρίζεται σε δύο ίσες συνιστώσες με τη βοήθεια ενός 3 dB οπτικού συζεύκτη. Κάθε συνιστώσα διαδίδεται μέσα από τον αντίστοιχο βραχίονα με τον ενισχυτή, και στην έξοδο του διακόπτη οι δύο συνιστώσες επανενώνονται και συμβάλλουν με τη βοήθεια ενός δεύτερου 3 dB οπτικού συζεύκτη. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι δύο οπτικοί 3 dB συζεύκτες, εκτός του διαχωρισμού της οπτικής δέσμης σε δύο συνιστώσες ίδιας ισχύος, εισάγουν και μια διαφορά φάσης ίση με $\pi/2$ μεταξύ των δύο συνιστωσών, που εμφανίζονται στην έξοδό του. Το σήμα ελέγχου εισάγεται στο διακόπτη και, συγκεκριμένα, στο SOA του πάνω βραχίονα, μέσω ενός επιπλέον οπτικού συζεύκτη, ο οποίος είναι τοποθετημένος στον πάνω βραχίονα, ακριβώς πριν τον ημιαγωγό. Αποτέλεσμα αυτού είναι το σήμα ελέγχου να επιδρά μόνο στη μία από τις δύο χωρικές συνιστώσες του σήματος εισόδου.

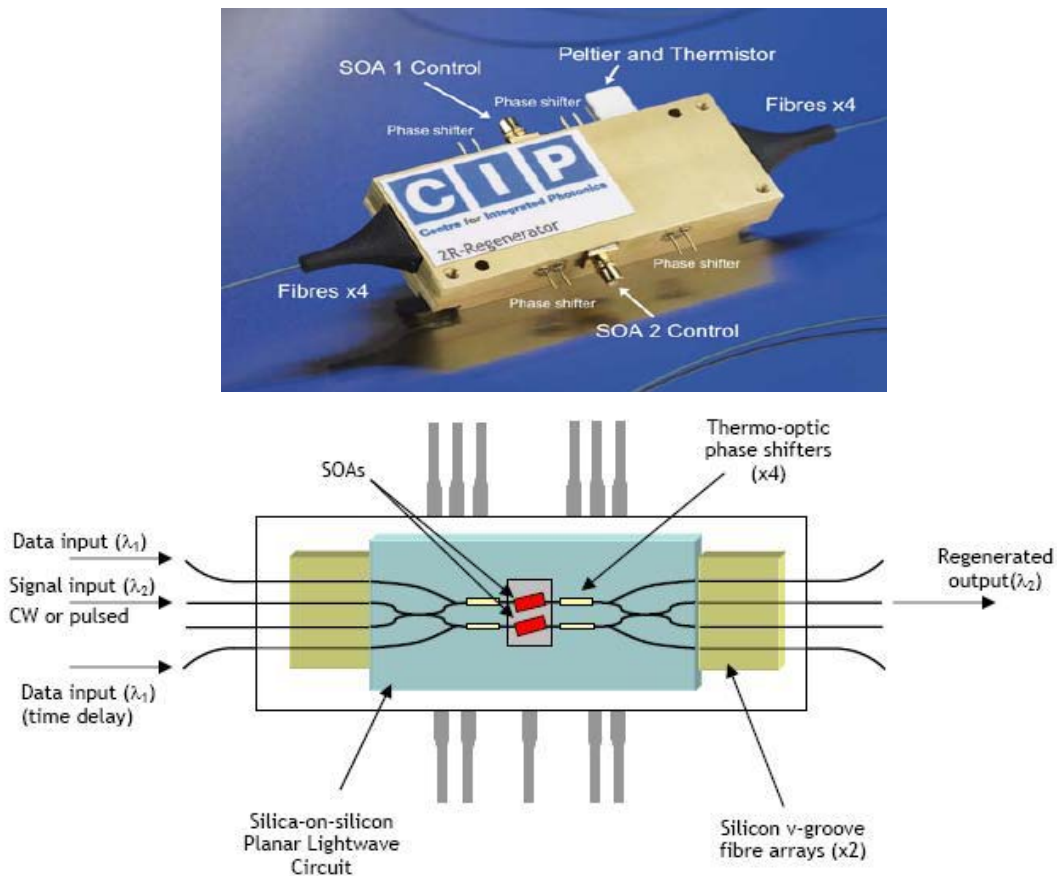
Στο σχήμα 3.1(a) περιγράφεται η λειτουργία του σε κατάσταση μη μεταγωγής ή αλλιώς στην κατάσταση OFF, απουσία, δηλαδή, σήματος ελέγχου. Το σήμα ρολογιού διασπάται στο συζεύκτη εισόδου σε δύο πεδία, τα οποία αποκτούν διαφορά φάσης $\pi/2$ μεταξύ τους, διαδίδονται μέσα από τους δυο βραχίονες με τους αντίστοιχους SOAs, και φτάνουν στις εισόδους του συζεύκτη εξόδου έχοντας την ίδια ακριβώς σχέση φάσης, $\pi/2$. Στο συζεύκτη εξόδου επανεισάγεται ολίσθηση φάσης κατά $\pi/2$ μεταξύ των οπτικών δεσμών, αλλά κατά αντίθετο τρόπο από ό,τι στο συζεύκτη εισόδου, με αποτέλεσμα στη μια θύρα εξόδου του διακόπτη να υπάρχει διαφορά φάσης π μεταξύ των δύο συνιστωσών, και επομένως πλήρως αναιρετική συμβολή, ενώ στην άλλη θύρα εξόδου η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο συνιστωσών είναι 0, οπότε η συμβολή είναι πλήρως προσθετική. Το σύνολο, λοιπόν, του σήματος εισόδου εξέρχεται από τη θύρα, στην οποία γίνεται πλήρως προσθετική συμβολή και η οποία ονομάζεται **θύρα μη μεταγωγής (Unswitched-port)**, ενώ η άλλη θύρα, στην οποία γίνεται πλήρως αναιρετική συμβολή, αποδίδει μηδενική οπτική ισχύ.

Ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση μεταγωγής, όταν εισέρχεται οπτικός παλμός σήματος ελέγχου στον ένα από τους δύο βραχίονες, και η κατάσταση αυτή περιγράφεται στο σχήμα 3.1(β). Οι δύο συνιστώσες του σήματος εισόδου φτάνουν στους αντίστοιχους SOAs με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, όπως περιγράφηκε στην κατάσταση μη μεταγωγής του συμβολομέτρου. Εκεί, η μεν μία, που διαδίδεται μέσα από τον ημιαγωγό που δεν δέχεται σήμα ελέγχου, θεωρητικά διατηρεί την αρχική της φάση, η δεύτερη συνιστώσα όμως «συνταξιδεύει» μες στο SOA με τον ισχυρό παλμό ελέγχου, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται ο δείκτης διάθλασης του ενισχυτή. Αποτέλεσμα της μεταβολής του δείκτη διάθλασης του ενισχυτή είναι η ολίσθηση τη φάσης της συνιστώσας του σήματος ρολογιού στην έξοδο του SOA κατά π , σε σχέση με τη φάση της ίδιας συνιστώσας στην είσοδο, λόγω του φαινομένου της ετεροδιαμόρφωσης φάσης (XPM). Έτσι, στο συζεύκτη εξόδου οι δύο οπτικές δέσμες του σήματος ρολογιού συμβάλλουν με μια σχετική διαφορά φάσης π , συγκριτικά με την κατάσταση μη μεταγωγής, οπότε στη θύρα μη μεταγωγής η συμβολή είναι τώρα πλήρως αναιρετική, ενώ στην άλλη θύρα είναι πλήρως προσθετική. Κατά συνέπεια, όλο το σήμα ρολογιού εξέρχεται τώρα από τη δεύτερη θύρα εξόδου, η οποία και ονομάζεται **θύρα μεταγωγής (Switch-port)**, και ο διακόπτης άλλαξε κατάσταση και βρίσκεται, πλέον, σε κατάσταση μεταγωγής, ή αλλιώς στην κατάσταση ON.

Ο διακόπτης Mach-Zender παρουσιάστηκε παραπάνω, και αποτυπώθηκε και στο σχήμα, σύμφωνα με το μοντέλο της ομόρροπης συνδεσμολογίας, όσον αφορά το σήμα ελέγχου και το σήμα ρολογιού. Η ομόρροπη διάδοση των δύο σημάτων στο διακόπτη και στον οπτικό ημιαγωγό ενισχυτή SOA δημιουργεί αναπόφευκτα ένα ανεπιθύμητο ποσοστό πρόσθετης ισχύος του σήματος ελέγχου στην έξοδο του διακόπτη. Για το διαχωρισμό των δύο σημάτων, μια ευρέως διαδεδομένη λύση είναι η

αλλαγή της γεωμετρίας του διακόπτη σε αντίρροπη συνδεσμολογία, όπου το σήμα ελέγχου διαδίδεται μες στο SOA σε αντίθετη κατεύθυνση από αυτήν του σήματος εισόδου. Άλλες λύσεις που έχουν προταθεί είναι η χρήση διαφορετικών μηκών κύματος για τα δύο σήματα ή η χρησιμοποίηση κυματοδηγών SOA πολλαπλών τρόπων διάδοσης. Για τη μαθηματική ανάλυση του διακόπτη Mach-Zehnder που θα ακολουθήσει σε επόμενη παράγραφο θα χρησιμοποιηθεί η γεωμετρία της αντίρροπης συνδεσμολογίας.

Ο διακόπτης Mach-Zehnder είναι ο πρώτος, και μέχρι πριν λίγο καιρό ήταν και ο μοναδικός μεταξύ των οπτικών διακοπών, που αναφέρθηκαν προηγούμενα, ο οποίος έχει ολοκληρωθεί σε ένα και μόνο πλινθίο. Έχει δε ήδη επιτευχθεί κατά το πολύ πρόσφατο παρελθόν η υβριδική ολοκλήρωση τεσσάρων διακοπών MZI, όπως θα παρουσιαστεί εκτενέστερα σε επόμενη παράγραφο.



Σχήμα 3.2: Φωτογραφία ενός μεμονωμένου ολοκληρωμένου συμβολόμετρου τύπου Mach-Zehnder.

Ο διακόπτης Mach-Zehnder έχει χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα δικτυακών εφαρμογών, με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Πολύ συνοπτικά, οι εφαρμογές αυτές περιλαμβάνουν την αποπολυπλεξία οπτικού καναλιού σε OTDM οπτικούς κόμβους, την αναγέννηση οπτικού σήματος, τη μετατροπή μήκους κύματος, καθώς και την υλοποίηση αμιγώς οπτικών πυλών, που επιτελούν λογικές Boolean

συναρτήσεις σε υψηλές ταχύτητες λειτουργίας. Όπως περιγράφηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, το συμβολόμετρο Mach-Zehnder μπορεί να αποτελέσει το θεμελιώδες δομικό στοιχείο για την υλοποίηση του οπτικού κόμβου μεταγωγής, εξασφαλίζοντας τη δυνατότητα διεκπεραίωσης όλων των απαιτούμενων λειτουργιών του κόμβου σε αμιγώς οπτικό επίπεδο.

3.2.3 Χαρακτηριστικά του Mach-Zehnder συμβολόμετρου

Η λειτουργία κάθε συμβολομετρικής διάταξης κρίνεται με βάση τις επιδόσεις της σε μια σειρά από χαρακτηριστικά μεγέθη, τα οποία αποτελούν τα κριτήρια αξιολόγησης ενός οπτικού διακόπτη. Τα σημαντικότερα από αυτά τα μεγέθη είναι, ο λόγος αντίθεσης ή ON-OFF του διακόπτη, ο λόγος ισχύος μεταξύ των θυρών του συμβολόμετρου, ο θόρυβος στην έξοδο, η σταθερότητα λειτουργίας, το παράθυρο μεταγωγής, που σχετίζεται άμεσα με την ταχύτητα λειτουργίας, η ενέργεια μεταγωγής, η εισαγόμενη χρονική καθυστέρηση η δυνατότητα πολλαπλών συνδέσεων σε σειρά (cascadability) και η δυνατότητα ολοκλήρωσης του διακόπτη σε συμπαγή συσκευασία. Παρακάτω επιχειρείται μία συνοπτική ανάλυση της κάθε μιας, μιας και οι περισσότερες από αυτές θα χρησιμοποιηθούν για την περιγραφή των επιδόσεων των κυκλωμάτων που υλοποιήθηκαν.

- **Λόγος αντίθεσης ή ON-OFF (contrast ή extinction ratio)**, ο οποίος αποτελεί ένα πολύ σημαντικό κριτήριο για την ποιότητα του οπτικού σήματος στην έξοδο του διακόπτη. Ο λόγος αυτός ισούται με το πηλίκο της ισχύος του σήματος, που έχει μεταχθεί στην θύρα μετάδοσης παρουσία σήματος ελέγχου, προς την ισχύ του ανεπιθύμητου σήματος, που μεταγεται στη θύρα μετάδοσης ακόμα και όταν δεν υπάρχει σήμα ελέγχου. Στην ουσία εκφράζει τον λόγο αντίθεσης του σήματος εξόδου. Για ελαχιστοποίηση του ρυθμού σφαλμάτων ο λόγος αυτός πρέπει να έχει όσο γίνεται μεγαλύτερη τιμή.
- **Λόγος ισχύος μεταξύ των θυρών του συμβολόμετρου**, ο οποίος είναι ουσιαστικά το πηλίκο με αριθμητή την ισχύ της θύρας μεταγωγής και παρονομαστή την ισχύ στην θύρα μη μεταγωγής. Ο λόγος αυτός δείχνει κατά πόσο κυματοδηγείται η οπτική ισχύς στην κατάλληλη έξοδο του συμβολόμετρου. Συγκεκριμένα σε κατάσταση ON του συμβολομετρικού διακόπτη επιθυμούμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο λόγο ισχύος μεταξύ των θυρών ώστε να διέρχεται όλη η ισχύς από την θύρα μεταγωγής ενώ για την κατάσταση OFF θέλουμε όσο το δυνατόν μικρότερο λόγο ισχύος δηλαδή η ισχύς να διέρχεται από την θύρα μη μεταγωγής. Επειδή η μελέτη των διατάξεων σε αυτή τη διπλωματική εργασία γίνεται στην κατάσταση μεταγωγή

του διακόπτη (κατάσταση ON) επιθυμούμε όσο το δυνατόν υψηλότερο λόγο ισχύος μεταξύ των θυρών του διακόπτη.

- **Θόρυβος (noise)**, η παρουσία του οποίου εξαρτάται από το αν η εκάστοτε συνδεσμολογία οπτικού διακόπτη χρησιμοποιεί κάποια πηγή θορύβου ή όχι. Οι οπτικοί διακόπτες, που χρησιμοποιούν οπτική ίνα σαν μη γραμμικό μέσο, προφανώς δεν προσθέτουν θόρυβο στο σήμα εξόδου, ενώ, αντίθετα, οι διακόπτες με ημιαγώγιμο οπτικό ενισχυτή αλλοιώνουν την εικόνα θορύβου του σήματος λόγω της αυθόρμητης εκπομπής φωτονίων. Η επίδραση του θορύβου ενός οπτικού σήματος είναι πολύ σημαντική σε ένα δίκτυο, αφού υποβιβάζει την απόδοση αυτού. Ο θόρυβος καθορίζεται από δύο δείκτες. Ο πρώτος είναι ο σηματοθορυβικός λόγος (Signal to Noise Ratio-SNR) και ο δεύτερος είναι ο δείκτης θορύβου (Noise Figure-NF).
- **Σταθερότητα λειτουργίας (stability)**, η οποία είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό για την αξιολόγηση των οπτικών διακοπών και την ενδεχόμενη εφαρμογή τους σε δικτυακό περιβάλλον. Η λειτουργία του διακόπτη προφανώς επηρεάζεται από περιβαλλοντικές διακυμάνσεις (π.χ. θερμοκρασιακές μεταβολές) λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της οπτικής ίνας. Η ελαχιστοποίηση της αστάθειας λειτουργίας, είτε λόγω μεταβολών των οπτικών σημάτων, που εισέρχονται στο διακόπτη, είτε λόγω των εγγενών χαρακτηριστικών του διακόπτη, κρίνεται απολύτως απαραίτητη, τουλάχιστον όσον αφορά την εφαρμογή τους σε εμπορικά διαθέσιμα οπτικά συστήματα. Οι δύο σημαντικότεροι παράγοντες βελτίωσης της σταθερότητας λειτουργίας ενός διακόπτη είναι η χαμηλή πολωτική ευαισθησία των δομικών του στοιχείων, καθώς και οι μικρές φυσικές του διαστάσεις. Αναφορικά με το δεύτερο παράγοντα, σαφές πλεονέκτημα παρέχουν οι οπτικοί διακόπτες, που είναι ολοκληρωμένοι σε συμπαγείς συσκευασίες.
- **Παράθυρο μεταγωγής (switching window)**, το οποίο ορίζεται ως το χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο η κατάσταση του διακόπτη παραμένει ON, μέχρι ο διακόπτης να επανέλθει σε κατάσταση OFF μετά το πέρας της αλληλεπίδρασης της δέσμης ελέγχου με το μη γραμμικό μέσο. Όσο μικρότερο είναι το παράθυρο μεταγωγής, τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα λειτουργίας του διακόπτη, με αποτέλεσμα το χρονικό εύρος του παραθύρου μεταγωγής να καθορίζει και **τη μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας του διακόπτη**. Το χρονικό εύρος του παραθύρου μεταγωγής καθορίζει, επίσης, την ανεκτικότητα, που επιδεικνύει ο διακόπτης στη χρονική ολίσθηση (timing jitter) των παλμών του σήματος ελέγχου. Το εύρος του παραθύρου μεταγωγής εξαρτάται, γενικά, από την ταχύτητα διέγερσης και επαναφοράς της μη γραμμικότητας, από τα χαρακτηριστικά των παλμών ελέγχου και από τη συνδεσμολογία του διακόπτη. Ο κλασικός τρόπος μέτρησής του γίνεται με εφαρμογή ενός σήματος συνεχούς κύματος (CW - continuous wave signal) ως

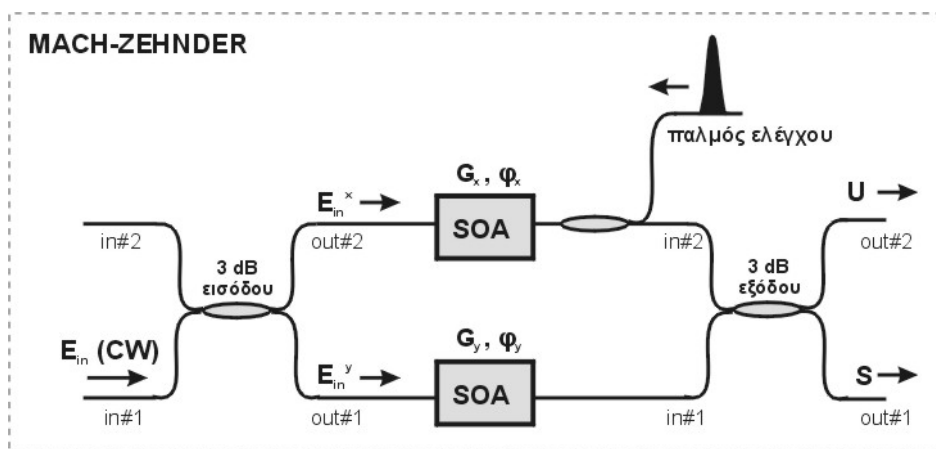
σήμα ρολογιού στο διακόπτη, και παλμικού ως σήμα ελέγχου (τυπική διάταξη μετατροπής μήκους κύματος). Η μορφή του μεταγώμενου (switched) οπτικού σήματος στο μήκος κύματος του σήματος ρολογιού αποτελεί το παράθυρο μεταγωγής.

- **Ενέργεια μεταγωγής (switching energy) ή κατανάλωση ισχύος (power consumption)**, η οποία είναι η ενέργεια των παλμών ελέγχου, που απαιτείται για την διέγερση της μη γραμμικότητας και την αλλαγή της κατάστασης μεταγωγής του διακόπτη. Η ενέργεια αυτή είναι επιθυμητό να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη, ώστε να μπορεί να επιτευχθεί μεταγωγή σε υπερυψηλές ταχύτητες μετάδοσης με χαμηλή παρεχόμενη μέση ισχύ από τους διαθέσιμους οπτικούς ενισχυτές EDFA, και να διατηρείται η κατανάλωση ισχύος του κυκλώματος χαμηλή, για να μπορεί το κύκλωμα να χρησιμοποιηθεί σε πραγματικές εφαρμογές. Η ενέργεια μεταγωγής εξαρτάται κυρίως από το πόσο ισχυρή είναι η μη γραμμικότητα του υλικού.
- **Χρονική καθυστέρηση (delay)**, η οποία είναι το χρονικό διάστημα, που απαιτείται, για να διαδοθεί το εισερχόμενο σήμα από την είσοδο ως την έξοδο του διακόπτη. Ιδανικά, κάθε διακόπτης οφείλει να εισάγει όσο γίνεται μικρότερη καθυστέρηση, ούτως ώστε να αποφεύγεται η συμφόρηση στη ροή δεδομένων του δικτύου και η εισαγωγή επιπλέον χρονικών καθυστερήσεων στη μετάδοση του σήματος. Προφανώς, η κατασκευή του διακόπτη από διακριτά στοιχεία με προσαρτήσεις οπτικής ίνας επιβαρύνει τον χρόνο διάδοσης του οπτικού σήματος μέσα από αυτόν, λόγω του μεγάλου μήκους των διακριτών στοιχείων και της ίνας, και σίγουρα η λύση ενός ολοκληρωμένου οπτικού διακόπτη είναι προτιμητέα.
- **Διαδοχική σύνδεση πολλαπλών διακοπών (cascadability)**, η οποία αφορά στην ικανότητα ενός διακόπτη να οδηγεί απευθείας, από την έξοδό του, την θύρα εισόδου ενός άλλου. Η ικανότητα αυτή αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα κριτήρια για την αξιολόγηση της απόδοσης των οπτικών πυλών, δεδομένου ότι καθορίζεται από όλα τα προαναφερθέντα κριτήρια. Η ανάγκη για διαδοχική σύνδεση πολλαπλών διακοπών είναι μεγάλη, αφού αν μια πύλη δεν μπορεί να οδηγήσει μία άλλη καθίσταται ανέφικτη η σχεδίαση σύνθετων αμιγώς οπτικών κυκλωμάτων, τα οποία απαιτούν τη χρήση ενός μεγάλου αριθμού πυλών.
- **Δυνατότητα ολοκλήρωσης (integrability) των διακοπών σε συμπαγείς συσκευασίες με το μικρότερο δυνατό μέγεθος**, η οποία έχει καθοριστικό ρόλο στην απόδοση των οπτικών διακοπών και στην αξιολόγηση αυτών για πιθανή χρήση τους σε πραγματικές δικτυακές εφαρμογές. Το σενάριο για υλοποίηση των οπτικών διακοπών σε διατάξεις με μέγεθος ανάλογο αυτού των αντίστοιχων ηλεκτρονικών φαντάζει ακόμη απίθανο, αλλά η τεχνολογία της φωτονικής ολοκλήρωσης, τα τελευταία

χρόνια, έχει κάνει πολύ σημαντικά βήματα προόδου. Ήδη ο διακόπτης τύπου Mach-Zehnder έχει παρουσιαστεί σε ολοκληρωμένη μορφή εδώ και μερικά χρόνια με τελευταίο επίτευγμα την ολοκλήρωση τεσσάρων MZI σε ένα μόνο πλίνθιο, και πλέον είναι εμπορικά διαθέσιμος [βλέπε παράγραφο 3.6].

3.3 Μαθηματική ανάλυση του MZI

Για τη θεωρητική ανάλυση του διακόπτη Mach-Zehnder για λειτουργία του στην περιοχή έντονου κορεσμού, θεωρούμε τη διάταξη του σχήματος 3.3.



Σχήμα 3.3: Διάταξη Mach-Zehnder με δύο SOAs και είσοδο οπτικό CW σήμα σε αντίρροπη συνδεσμολογία.

Ως σήμα ρολογιού στο διακόπτη εισάγεται ένα οπτικό CW σήμα, του οποίου το πεδίο και η ισχύς $P_{in} = P_{CW}$ δίνονται από τις σχέσεις:

$$\vec{E}_{in} = E_{in} e^{-j\omega t} \hat{p} \quad (3.1)$$

όπου \hat{p} είναι το διάνυσμα του πεδίου

$$P_{in} = P_{CW} = \vec{E}_{in} \cdot \vec{E}_{in}^* = |E_{in}|^2 \quad (3.2)$$

Στην ανάλυση, που ακολουθεί, θεωρούμε ότι τα πεδία είναι γραμμικά πολωμένα και διατηρούν σταθερή την πόλωση καθόλη τη διάρκεια διάδοσής τους μέσα από το διακόπτη. Επομένως, οι δύο συνιστώσες του σήματος ρολογιού, που

προκύπτουν στις δύο εξόδους out#1 και out#2 του 3 dB οπτικού συζεύκτη εισόδου, έχουν η κάθε μία οπτική ισχύ ίση με $P_{CW}/2$. Το πεδίο της κάθε μιας δίνεται από την έκφραση:

$$E_{in}^x = E_{in} \frac{\sqrt{2}}{2} e^{-j\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)} \quad (3.3)$$

$$E_{in}^y = E_{in} \frac{\sqrt{2}}{2} e^{-j\omega t}$$

Στις προηγούμενες σχέσεις, καθώς και στις σχέσεις που ακολουθούν, ο δείκτης x αντιστοιχεί στη συνιστώσα του σήματος εισόδου, που διαδίδεται στον πάνω βραχίονα του συμβολομέτρου, ενώ ο δείκτης y στη συνιστώσα, που διαδίδεται στον κάτω βραχίονα. Η επιπλέον φάση $\pi/2$, που εισάγεται, όπως φαίνεται, στην E_{in}^x συνιστώσα, αντιστοιχεί στη διαφορά φάσης, που εισάγει ο 3 dB οπτικός συζεύκτης ισχύος, την οποία στην προκειμένη περίπτωση θεωρήσαμε ότι εισάγεται στην έξοδο 2 (out#2) του συζεύκτη, που συνδέεται με τον πάνω βραχίονα. Αν θεωρήσουμε ως G_x και G_y το κέρδος ισχύος του κάθε ενισχυτή και ως φ_x και φ_y τη φάση, που εισάγει ο κάθε ενισχυτής στην αντίστοιχη πεδιακή συνιστώσα, τότε οι δύο πεδιακές συνιστώσες στην έξοδο, ακριβώς, κάθε ημιαγωγού, αλλά και ακριβώς πριν τον οπτικό συζεύκτη εξόδου, θα δίνονται από τις σχέσεις:

$$E^x = \sqrt{G_x} E_{in} \frac{\sqrt{2}}{2} \exp\left[-j\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \varphi_x\right)\right] \quad (3.4)$$

$$E^y = \sqrt{G_y} E_{in} \frac{\sqrt{2}}{2} \exp[-j(\omega t + \varphi_y)] \quad (3.5)$$

Στον 3 dB οπτικό συζεύκτη εξόδου, κάθε μια πεδιακή συνιστώσα διαχωρίζεται σε δύο νέες πεδιακές συνιστώσες, με αντίστοιχο τρόπο όπως στο συζεύκτη εισόδου. Πιο συγκεκριμένα, η E^x συνιστώσα διασπάται στις δύο εξόδους του συζεύκτη, τις οποίες ονομάζουμε S και U, σε δύο πεδία ίδιας ισχύος, των οποίων οι εκφράσεις δίνονται από τις σχέσεις:

$$E_S^x = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{G_x} E_{in} \frac{\sqrt{2}}{2} \exp\left[-j\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \varphi_x + \frac{\pi}{2}\right)\right] = \frac{1}{2} \sqrt{G_x} E_{in} \exp[-j(\omega t + \pi + \varphi_x)] \quad (3.6)$$

$$E_U^x = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{G_x} E_{in} \frac{\sqrt{2}}{2} \exp\left[-j\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \varphi_x\right)\right] = \frac{1}{2} \sqrt{G_x} E_{in} \exp\left[-j\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \varphi_x\right)\right] \quad (3.7)$$

Στις προηγούμενες σχέσεις παρατηρούμε την εμφάνιση ενός παράγοντα $\frac{\sqrt{2}}{2}$, ο οποίος αντιστοιχεί στο λόγο σύζευξης του συζεύκτη, καθώς, επίσης, και την εμφάνιση μιας επιπλέον φάσης $\pi/2$ στο πεδίο που εξέρχεται από την S-θύρα, η οποία αντιστοιχεί στη φάση, που εισάγει ο 3 dB συζεύκτης εξόδου. Πρέπει να σημειώσουμε, όμως, ότι, όπως φαίνεται και στις σχέσεις 3.10 και 3.11, η φάση $\pi/2$ για την E^x συνιστώσα εισάγεται τώρα στην έξοδο 1 (out#1) του συζεύκτη εξόδου, σε αντίθεση με την είσοδο του διακόπτη, όπου η διαφορά φάσης στο συζεύκτη εισόδου εμφανίζεται στη θύρα εξόδου 2 (out#2). Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι η E^x συνιστώσα εισέρχεται από τη θύρα εισόδου 2 (in#2) του συζεύκτη εξόδου, ενώ το σήμα στην είσοδο εισάγεται από τη θύρα εισόδου 1 (in#1) του συζεύκτη εισόδου, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.3.

Η αντίστοιχη έκφραση για την E^y συνιστώσα περιλαμβάνει πάλι έναν παράγοντα $\frac{\sqrt{2}}{2}$ και μια εισαγόμενη φάση $\pi/2$, με τη διαφορά ότι η φάση $\pi/2$ για την E^y συνιστώσα εισάγεται στη θύρα εξόδου 2 (out#2) του συζεύκτη εξόδου, αφού η y - πεδιακή συνιστώσα εισέρχεται από τη θύρα εισόδου 1 (in#1) αυτού του συζεύκτη.

$$E_S^y = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{G_y} E_{in} \frac{\sqrt{2}}{2} \exp[-j(\omega t + \varphi_y)] = \frac{1}{2} \sqrt{G_y} E_{in} \exp[-j(\omega t + \varphi_y)] \quad (3.8)$$

$$E_U^y = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{G_y} E_{in} \frac{\sqrt{2}}{2} \exp\left[-j\left(\omega t + \varphi_y + \frac{\pi}{2}\right)\right] = \frac{1}{2} \sqrt{G_y} E_{in} \exp\left[-j\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \varphi_y\right)\right] \quad (3.9)$$

Στις δύο θύρες εξόδου, S και U, το συνολικό πεδίο δίνεται από την υπέρθεση των αντίστοιχων εξόδων των δύο πεδιακών συνιστωσών. Πιο συγκεκριμένα, το πεδίο και η οπτική ισχύς στη θύρα S δίνονται από τις σχέσεις:

$$E^S = E_S^x + E_S^y = \frac{1}{2} E_{in} \left\{ \sqrt{G_x} \exp[-j(\omega t + \pi + \varphi_x)] + \sqrt{G_y} \exp[-j(\omega t + \varphi_y)] \right\} \quad (3.10)$$

$$P_S = |E^S|^2 = |E_S^x + E_S^y|^2 = (E_S^x + E_S^y)(E_S^x + E_S^y)^* \quad (3.11)$$

ενώ οι αντίστοιχες εκφράσεις για τη θύρα U είναι:

$$E^U = E_U^x + E_U^y = \frac{1}{2} E_{in} \left\{ \sqrt{G_x} \exp \left[-j \left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \varphi_x \right) \right] + \sqrt{G_y} \exp \left[-j \left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \varphi_y \right) \right] \right\} \quad (3.12)$$

$$P_U = |E^U|^2 = |E_U^x + E_U^y|^2 = (E_U^x + E_U^y)(E_U^x + E_U^y)^* \quad (3.13)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις 3.10 και 3.12 στις εκφράσεις των σχέσεων 3.11 και 3.13, αντίστοιχα, και μετά από μερικούς απλούς μαθηματικούς υπολογισμούς και κατάλληλους μετασχηματισμούς, οι εκφράσεις για την οπτική ισχύ στις θύρες S και U προκύπτουν:

$$\begin{aligned} P_S &= \frac{1}{4} E_{in}^2 \left[G_x + G_y - 2\sqrt{G_x G_y} \cos(\varphi_x - \varphi_y) \right] = \\ &= \frac{1}{4} E_{in}^2 \left[(\sqrt{G_x} - \sqrt{G_y})^2 + 4\sqrt{G_x G_y} \sin^2 \left(\frac{\Delta\varphi}{2} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} P_U &= \frac{1}{4} E_{in}^2 \left[G_x + G_y + 2\sqrt{G_x G_y} \cos(\varphi_x - \varphi_y) \right] = \\ &= \frac{1}{4} E_{in}^2 \left[(\sqrt{G_x} + \sqrt{G_y})^2 + 4\sqrt{G_x G_y} \cos^2 \left(\frac{\Delta\varphi}{2} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.15)$$

Ο ημιαγωγός του κάτω βραχίονα λειτουργεί σε μια σταθερή, μόνιμη κατάσταση, αφού η συνδεσμολογία δεν επιτρέπει την είσοδο παλμού ελέγχου σ' αυτόν. Το κέρδος του G_y στη μόνιμη κατάσταση υπολογίζεται από την έκφραση [3]:

$$G_y(t) = G_{CW} = G_0 \cdot \exp \left[- (G_{CW} - 1) P_{CW} / 2P_{sat} \right] \quad (3.16)$$

Το κέρδος G_x του ημιαγωγού του πάνω βραχίονα είναι επίσης ίσο με G_{CW} για όσο χρονικό διάστημα δεν εισέρχεται οπτικός παλμός ελέγχου. Όταν, όμως, εισάγεται παλμός ελέγχου με ισχύ κορυφής P_p και κυματομορφή ισχύος $a(t)$ μέσα στο SOA του πάνω βραχίονα, τότε το κέρδος G_x του ενισχυτή κορένεται, και η τιμή του για κάθε χρονική στιγμή κατά τον κορεσμό του υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} G_x(t) &= \left[1 - \left(1 - \frac{1}{G_{CW}} \right) \exp \left(- \int_{-\infty}^t P_{in}(t') dt' / U_{sat} \right) \right]^{-1} = \\ &= \left[1 - \left(1 - \frac{1}{G_{CW}} \right) \exp \left(- P_p \int_{-\infty}^t a(t') dt' / U_{sat} \right) \right]^{-1} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Με βάση τα παραπάνω οι αντίστοιχες εκφράσεις για τη φάση $\varphi_x(t)$ και $\varphi_y(t)$, που αποκτά κάθε συνιστώσα του σήματος ρολογιού μετά τη διέλευσή της μέσα από τον ενισχυτή, καθώς και η έκφραση για τη διαφορά φάσης τους $\Delta\varphi(t)$, προκύπτει ότι δίνονται από τις σχέσεις [3]:

$$\varphi_x(t) = -\frac{\alpha}{2} \ln[G_x(t)] \quad (3.18)$$

$$\varphi_y(t) = -\frac{\alpha}{2} \ln[G_{CW}] \quad (3.19)$$

$$\Delta\varphi(t) = \varphi_x(t) - \varphi_y(t) = -\frac{\alpha}{2} \ln \left[\frac{G_x(t)}{G_{CW}} \right] \quad (3.20)$$

Με αντικατάσταση των σχέσεων 3.16, 3.17 και 3.20 στις εκφράσεις των σχέσεων 3.14 και 3.15, οι οποίες εκφράζουν τη συνάρτηση μεταφοράς για τις δύο θύρες εξόδου του διακόπτη, οι ισχύεις των σημάτων, που εξέρχονται του διακόπτη από τις δύο θύρες εξόδου του, εκφράζονται ως:

$$\begin{aligned} P_S(t) &= \frac{1}{4} P_{CW} \left[G_x(t) + G_{CW} - 2\sqrt{G_x(t) \cdot G_{CW}} \cos \left(-\frac{\alpha}{2} \ln \left(\frac{G_x(t)}{G_{CW}} \right) \right) \right] = \\ &= \frac{1}{4} P_{CW} \left[(\sqrt{G_x(t)} - \sqrt{G_{CW}})^2 + 4\sqrt{G_x(t) \cdot G_{CW}} \sin^2 \left(-\frac{\alpha}{4} \ln \left(\frac{G_x(t)}{G_{CW}} \right) \right) \right] \end{aligned} \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned}
P_U(t) &= \frac{1}{4} P_{CW} \left[G_x(t) + G_{CW} + 2\sqrt{G_x(t) \cdot G_{CW}} \cos \left(-\frac{\alpha}{2} \ln \left(\frac{G_x(t)}{G_{CW}} \right) \right) \right] = \\
&= \frac{1}{4} P_{CW} \left[(\sqrt{G_x(t)} - \sqrt{G_{CW}})^2 + 4\sqrt{G_x(t) \cdot G_{CW}} \cos^2 \left(-\frac{\alpha}{4} \ln \left(\frac{G_x(t)}{G_{CW}} \right) \right) \right]
\end{aligned} \tag{3.22}$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τη διαδικασία εύρεσης της συνάρτησης μεταφοράς του διακόπτη θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη δύο περιορισμοί [3].

A. Το αρχικό κέρδος G_{CW} πρέπει πάντα να έχει τιμή τέτοια, ώστε να υπάρχει το περιθώριο για επίτευξη ολίσθησης φάσης κατά π με κατάλληλη επιλογή της τιμής ενέργειας του παλμού ελέγχου, οπότε να είναι δυνατή η λειτουργία του διακόπτη στην περιοχή βέλτιστης μεταγωγικής λειτουργίας.

B. Ο ενισχυτής σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να αποτελέσει στοιχείο απώλειας ισχύος, οπότε στην έσχατη περίπτωση ο ενισχυτής λειτουργεί στο σημείο διαφάνειάς του, όπου το κέρδος του ενισχυτή είναι ίσο με τη μονάδα.

Βάσει αυτών προκύπτει και η ελάχιστη επιτρεπτή τιμή του κέρδους G_{CW} , η οποία και δίνεται από τη σχέση:

$$G_{CW} = \exp(2\pi / \alpha) \tag{3.23}$$

Όπως παρατηρείται, η τιμή αυτή εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από τον παράγοντα διεύρυνσης φασματικής γραμμής a .

Για την συναγωγή συμπερασμάτων, όσον αφορά την επίδραση του οπτικού διακόπτη στη διαμόρφωση πλάτους των παλμών του σήματος ελέγχου, χρειάζεται η εξαγωγή της συνάρτησης μεταφοράς του κυκλώματος στο *πεδίο της συχνότητας*.

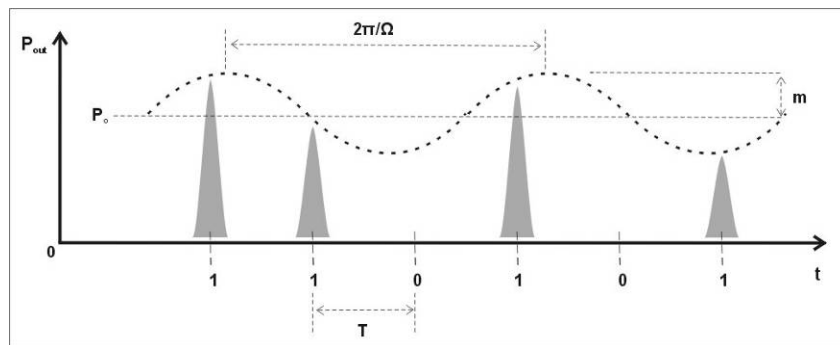
Για την εξαγωγή της συνάρτησης μεταφοράς του οπτικού κυκλώματος ψαλιδισμού στο πεδίο της συχνότητας, θεωρούμε ως σήμα ελέγχου στο διακόπτη του σχ. 3.18 μια ακολουθία παλμών δεδομένων τύπου επιστροφής στο μηδέν (RZ format) με έντονη διαμόρφωση μεταξύ των κορυφών των παλμών, όπου το πλάτος κορυφής του k -οστού παλμού και η αντίστοιχη κυματομορφή ισχύος του εκφράζονται ως

$$P_p^k = P_0 [1 + m \cdot \cos(\Omega \cdot k \cdot T)] \tag{3.24}$$

και

$$P_{in}^k(t) = P_0(1 + m \cdot \cos(\Omega \cdot k \cdot T)) \cdot a(t) \quad (3.25)$$

Στις προηγούμενες σχέσεις, $a(t)$ είναι η βασική κυματομορφή των παλμών (π.χ. τύπου Gauss), T είναι η περίοδος δυφίου (bit period) του σήματος, P_0 είναι η μέση



Σχήμα 3.4: Ενδεικτική παλμική ακολουθία σήματος ελέγχου στο διακόπτη. T : περίοδος δυφίων (bit period) P_0 : μέση ισχύς κορυφής, Ω : συχνότητα αργής διαμόρφωσης πλάτους, και m : δείκτης βάθους διαμόρφωσης.

ισχύς κορυφής της παλμοσειράς, Ω είναι η συχνότητα της συνιστώσας, που ευθύνεται για τη διαμόρφωση πλάτους της ακολουθίας, και m είναι ο δείκτης βάθους διαμόρφωσης. Η γραφική αναπαράσταση των μεγεθών, που υπεισέρχονται στην 3.25, δίνεται στο σχήμα 3.4.

Η συνάρτηση μεταφοράς στο πεδίο της συχνότητας προκύπτει από τη σχέση μεταξύ του δείκτη βάθους διαμόρφωσης $m_{o/p}$ της παλμοσειράς εξόδου με το δείκτη βάθους διαμόρφωσης m της παλμοσειράς εισόδου, η οποία και είναι: [3]

$$m_{o/p} = \frac{\left(1 + \exp\left(\frac{\pi}{\alpha}\right)\right) \cdot \exp\left(-\frac{2\pi}{\alpha}\right) \cdot \left(1 - G_{CW} \cdot \exp\left(-\frac{2\pi}{\alpha}\right)\right)}{1 + \exp\left(-\frac{2\pi}{\alpha}\right) + 2 \cdot \exp\left(-\frac{\pi}{\alpha}\right)} \cdot \ln \left(\frac{1 - \frac{1}{G_{CW}}}{1 - \frac{1}{G_{CW}} \cdot \exp\left(\frac{2\pi}{\alpha}\right)} \right) \cdot m \quad (3.26)$$

Η σχέση αυτή αποτελεί τη συνάρτηση μεταφοράς του διακόπτη στο πεδίο της συχνότητας, καθώς εκφράζει το πλάτος κάθε φασματικής συνιστώσας στη συχνότητα Ω , που επιδρά στη διαμόρφωση πλάτους της παλμοσειράς στην έξοδο του διακόπτη, σε συνάρτηση του πλάτους m της αντίστοιχης συνιστώσας της παλμοσειράς ελέγχου κατά την είσοδό της στο διακόπτη. Η σχέση 3.26 δείχνει, μάλιστα, ότι το πλάτος

εξόδου κάθε φασματικής συνιστώσας Ω εξαρτάται απολύτως γραμμικά από το αντίστοιχο πλάτος εισόδου της συνιστώσας, και, επιπλέον, ο γραμμικός παράγοντας, που συνδέει αυτά τα δύο μεγέθη, εξαρτάται μόνο από το κέρδος μόνιμης κατάστασης G_{CW} και τον παράγοντα διεύρυνσης φασματικής γραμμής a .

Το γεγονός ότι το μέγεθος $m_{o/p}$, όπως αυτό υπολογίζεται από τη σχέση 3.26, είναι πάντα αρνητικό, εκφράζει απλά το γεγονός ότι η φάση της συχνοτικής συνιστώσας Ω στην έξοδο του διακόπτη διαφέρει κατά π με την φάση της αντίστοιχης συχνότητας στην είσοδο (αφού $-1 = \exp(j\pi)$), και δεν περιέχει πληροφορία για το πλάτος ισχύος της συχνοτικής συνιστώσας Ω .

Από την παραπάνω ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας, και όσον αφορά τη διαμόρφωση πλάτους, προκύπτει ότι η διαμόρφωση πλάτους της παλμοσειράς στην έξοδο του διακόπτη είναι πάντα μικρότερη από τη διαμόρφωση πλάτους στην είσοδο. Το τελευταίο μπορεί να φανεί πιο εύκολα από τη μελέτη της μείωσης σε λογαριθμική κλίμακα (dB) της διαμόρφωσης πλάτους της παλμοσειράς ελέγχου στην έξοδο του διακόπτη, η οποία υπολογίζεται με τη βοήθεια της σχέσης

$$AMR = 10 \cdot \log |m_{o/p}/m| \quad (3.27),$$

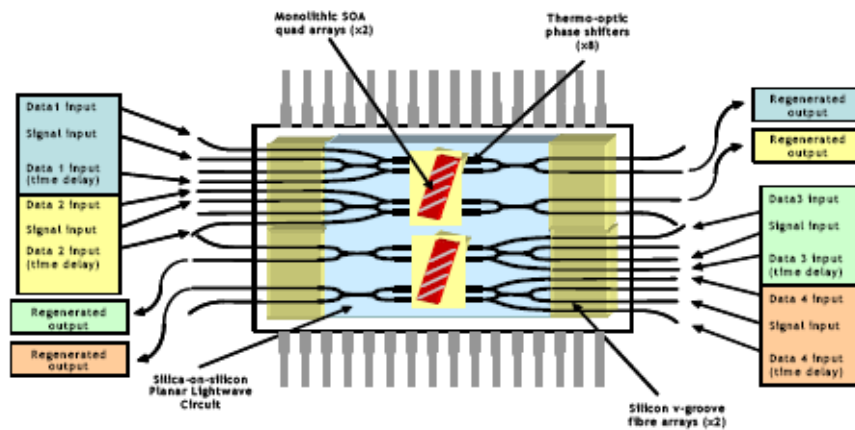
όπου ο AMR (Amplitude Modulation Reduction), δείκτης μείωσης της διαμόρφωσης πλάτους, προκύπτει πάντα αρνητικός [3].

Σαν συμπέρασμα από τη μαθηματική ανάλυση που προηγήθηκε μπορούμε να πούμε ότι η συνάρτηση μεταφοράς ισχύος επιβεβαιώνει το πρώτο από τα δύο κύρια χαρακτηριστικά ενός κυκλώματος ψαλιδισμού, το οποίο είναι ο παραλληλισμός της συνάρτησης μεταφοράς ισχύος του κυκλώματος με τον οριζόντιο άξονα τιμών μετά από κάποιο όριο ισχύος εισόδου. Το δεύτερο κύριο χαρακτηριστικό των κυκλωμάτων ψαλιδισμού, το οποίο είναι άμεση απόρροια του πρώτου σχετίζεται με την ικανότητα του κυκλώματος ψαλιδισμού να «αφαιρεί» τη διαμόρφωση πλάτους των εισερχόμενων παλμών.

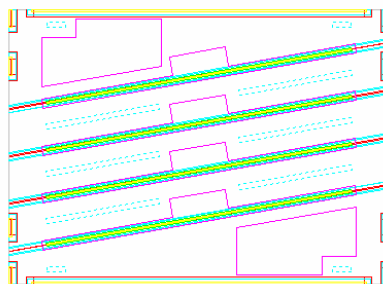
3.4 Το υβριδικά ολοκληρωμένο συμβολόμετρο MZI

Παρόλο που η διαδικασία ολοκλήρωσης των συμβολομετρικών διατάξεων δε βρίσκεται σε τέτοιο στάδιο που να καθιστά άμεση την δημιουργία και εφαρμογή ενός οπτικού VLSI συστήματος, μπορεί να πει κανείς ότι το επίπεδο της έρευνας αλλά και της υλοποίησης σε αυτό τον τομέα δείχνει ότι είναι δυνατή η υψηλή ολοκλήρωση σε οπτικό επίπεδο.

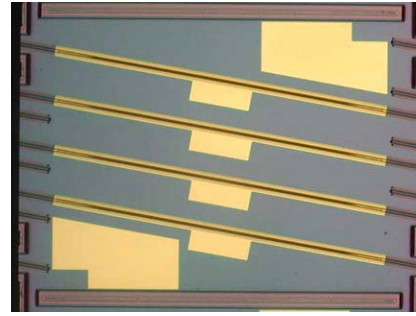
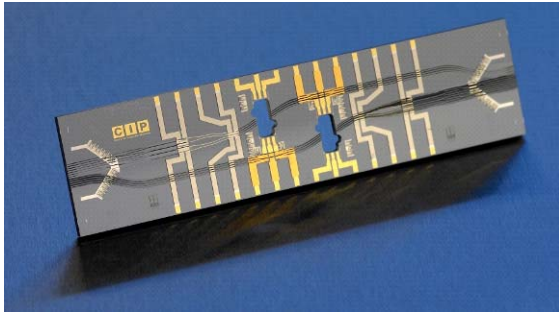
Ήδη έχουν κατασκευαστεί οι πρώτες υβριδικά ολοκληρωμένες συμβολομετρικές διατάξεις τεσσάρων στοιχείων (τετραπλά MZI) για την εφαρμογή τους σε ευρωπαϊκά προγράμματα όπως το IST-MUFINS [40], [41]. Συνοπτικά μπορούμε να αναφέρουμε ότι οι συσκευές υβριδικής ολοκλήρωσης τεσσάρων στοιχείων SOA-MZI αποτελούνται από δύο ζεύγη συμβολομέτρων MZI τοποθετημένα ώστε να λειτουργούν προς αντίθετες κατευθύνσεις (σχήμα 3.5). Το δομικό στοιχείο των συσκευών αυτών είναι η διάταξη των ολοκληρωμένων τεσσάρων ημιαγωγίμων οπτικών ενισχυτών (quad SOA array), η οποία βασίζεται σε πολύ παρόμοιο σχέδιο με αυτό της διάταξης των δύο SOA (twin SOA array) που χρησιμοποιείται σε ένα απλό συμβολόμετρο SOA-MZI (σχήμα 3.6). Παρακάτω παραθέτονται μια σειρά από σχέδια που απεικονίζουν τα στοιχεία που συγκροτούν το υβριδικά ολοκληρωμένο τετραπλό Mach-Zender (quad HMZI) και το οποίο θα αποτελέσει το βασικό στοιχείο στην πειραματική μας διάταξη.



Σχήμα 3.5: Σχηματικό διάγραμμα του υβριδικά ολοκληρωμένου MZI τεσσάρων στοιχείων. Δύο ζεύγη MZI είναι τοποθετημένα κατά αντίθετο τρόπο.

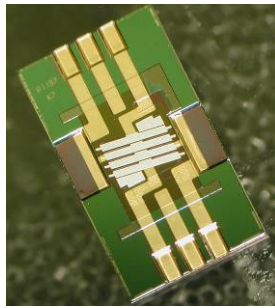


Σχήμα 3.6: Σχηματικό διάγραμμα της διάταξης μονολιθικής ολοκλήρωσης τεσσάρων ημιαγωγίμων οπτικών ενισχυτών (monolithic quad SOA array).

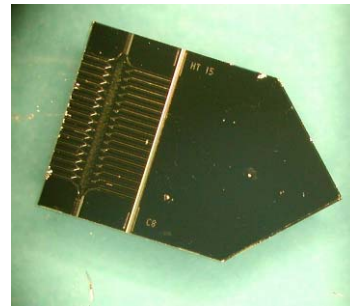


Φωτογραφία της μητρικής (motherboard) του ολοκληρωμένου MZI τεσσάρων στοιχείων. Οι δύο κοιλότητες των διατάξεων των τεσσάρων SOA (quad SOA arrays) φαίνονται σαν τρύπες μέσω της μητρικής.

Φωτογραφία της διάταξης μονολιθικής ολοκλήρωσης τεσσάρων ημιαγωγικών οπτικών ενισχυτών (monolithic quad SOA).



Φωτογραφία της κατασκευασμένης θυγατρικής (fabricated quad SOA daughterboard). Οι διαστάσεις είναι $\sim 7\text{mm} \times 3.5\text{mm}$

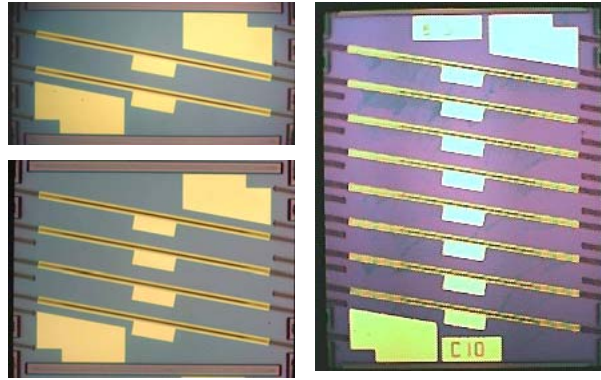


Φωτογραφία ενός V-groove adaptor για την κυματοδότηση του φωτός μέσα στο MZI

Σχήμα 3.7: Φωτογραφίες από τμήματα του ολοκληρωμένου τετραπλού HMZI διακόπτη



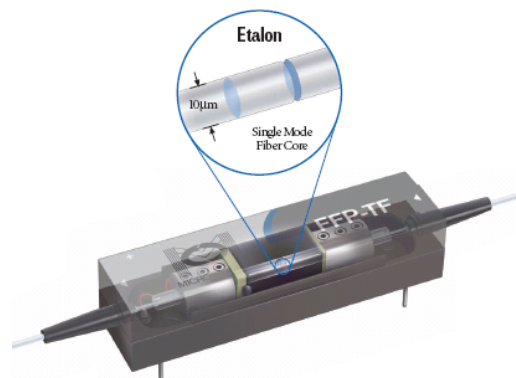
Σχήμα 3.8: Φωτογραφία του ολοκληρωμένου εμπορικά διαθέσιμου τετραπλού HMZI διακόπτη. Οι διαστάσεις είναι περίπου 90mm (L) \times 31mm (W) \times 13mm (D).



Σχήμα 3.9: Φωτογραφίες των διατάξεων μονολιθικής ολοκλήρωσης ημιαγωγικών οπτικών ενισχυτών SOA της CIP (δύο, τεσσάρων και οχτώ - τμή, quad and octo).

3.5 Το φίλτρο Fabry-Perot

Το φίλτρο, ή αλλιώς συμβολόμετρο Fabry-Perot αποτελείται από μία κοιλότητα, η οποία σχηματίζεται μεταξύ δύο παράλληλων ανακλαστικών επιφανειών (καθρεπτών) [2].



Σχήμα 3.10: Φωτογραφία ενός φίλτρου Fabry-Perot.

Η αρχή λειτουργίας του συμβολομέτρου βασίζεται στην προσθετική συμβολή των ανακλώμενων οπτικών δεσμών της αρχικής δέσμης φωτός. Πιο συγκεκριμένα, η αρχική προσπίπτουσα οπτική δέσμη εισέρχεται στο διηλεκτρικό της κοιλότητας Fabry-Perot και υφίσταται διαδοχικές ανακλάσεις στις εσωτερικές επιφάνειες των καθρεπτών. Θεωρώντας ότι το οπτικό πεδίο του προσπίπτοντος σήματος εισόδου είναι της μορφής

$$\tilde{E}_{in} = E_{in} \cdot e^{-j\omega t} \quad (3.28)$$

και ότι κάθε ανακλαστική επιφάνεια έχει συντελεστή ανακλαστικότητας ίσο με R , τότε το ποσοστό του πεδίου, που εισέρχεται στο συμβολόμετρο μέσω της πρώτης ανακλαστικής επιφάνειας, είναι

$$\tilde{E} = \sqrt{1-R} \cdot E_{in} \cdot e^{-j\omega t} \quad (3.29)$$

Το πεδίο αυτό ταξιδεύει μέσα στην κοιλότητα μήκους L του φίλτρου μέχρι να συναντήσει το δεύτερο κάτοπτρο, οπότε τότε ένα ποσοστό του εξέρχεται του φίλτρου, ενώ το υπόλοιπο οπτικό πεδίο ανακλάται από το κάτοπτρο πίσω και μέσα, ξανά, στην κοιλότητα. Το πεδίο, που εξέρχεται μετά από αυτήν την πρώτη διέλευση μέσα από την κοιλότητα, είναι

$$\tilde{E}_0 = (1-R) \cdot E_{in} \cdot e^{-(j\omega t + kL)} \quad (3.30)$$

όπου k η σταθερά διάδοσης μέσα από το διηλεκτρικό υλικό της κοιλότητας του φίλτρου. Το υπόλοιπο τμήμα του οπτικού πεδίου, το οποίο ανακλάται ξανά μέσα στην κοιλότητα, υφίσταται συνολικά δύο διαδοχικές ανακλάσεις μέχρι να ξαναφτάσει στο κάτοπτρο εξόδου, οπότε το πεδίο, που προκύπτει στην έξοδο από τη δύο φορές ανακλώμενη δέσμη, είναι

$$\tilde{E}_1 = (1-R) \cdot R \cdot E_{in} \cdot e^{-(j\omega t + kL + 2kL)} \quad (3.31)$$

Με αντίστοιχη διαδικασία, το πεδίο εξόδου, που προκύπτει από την n -ιοστή ανακλώμενη δέσμη φωτός, βρίσκεται ότι είναι

$$\tilde{E}_n = (1-R) \cdot R^n \cdot E_{in} \cdot e^{-(j\omega t + kL + n \cdot 2kL)} \quad (3.32)$$

Η σταθερά διάδοσης k , ως γνωστόν, γράφεται ως συνάρτηση της συχνότητας f του πεδίου σύμφωνα με τη σχέση $k = \frac{2\pi n}{c} f$, όπου n σ' αυτή τη σχέση ο δείκτης διάθλασης του διηλεκτρικού του φίλτρου. Κάνοντας χρήση αυτής της σχέσης, η συνάρτηση μεταφοράς ισχύος ως προς τη συχνότητα του φίλτρου Fabry-Perot δίνεται από την έκφραση

$$T(f) = \left| \frac{\tilde{E}_{out}}{\tilde{E}_{in}} \right|^2 = \left| (1-R) \cdot \sum_{n=0}^{\infty} R^n \cdot e^{-n \cdot \frac{4\pi L}{c} \cdot f} \right|^2 = \left| \frac{1-R}{1-R \cdot e^{-\frac{4\pi L}{c} \cdot f}} \right|^2 \quad (3.33)$$

Ορίζοντας την παράμετρο του φίλτρου ελεύθερη φασματική περιοχή (Free Spectral Region) ως $FSR=c/2nL$, η τελευταία σχέση ξαναγράφεται ως

$$T(f) = \frac{1}{1 + \left(\frac{2 \cdot \sqrt{R}}{1-R} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot f}{FSR}\right) \right)^2} \quad (3.34)$$

Η τελευταία σχέση ορίζει τη συνθήκη πλήρους προσθετικής συμβολής των δεσμών φωτός στην έξοδο του φίλτρου, η οποία λαμβάνει χώρα όταν το διπλάσιο του οπτικού δρόμου μεταξύ των δύο κατόπτρων είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος της οπτικής δέσμης. Σε αυτήν την περίπτωση, στην έξοδο του φίλτρου εξέρχεται το σύνολο της ισχύος του αρχικά προσπίπτοντος οπτικού πεδίου. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση, η συμβολή δεν είναι πλήρως προσθετική, οπότε μόνο ένα ποσοστό του αρχικού οπτικού πεδίου εξέρχεται του φίλτρου.

Η σχέση 3.34 περιγράφει, επομένως, μια περιοδική συνάρτηση ως προς τη συχνότητα, η οποία εμφανίζει κορυφές μετάδοσης σε κάθε τιμή συχνότητας, στην οποία υπάρχει πλήρως προσθετική συμβολή στην έξοδο του φίλτρου. Το φασματικό 3-dB εύρος κάθε φασματικής κορυφής της σχέσης 3.34 εύκολα βρίσκεται ότι είναι ίσο με

$$B = \frac{2 \cdot FSR}{\pi} \cdot \arcsin\left(\frac{1-R}{2\sqrt{R}}\right) \quad (3.35),$$

που δείχνει ότι το εύρος ζώνης μειώνεται, καθώς αυξάνει η ανακλαστικότητα των κατόπτρων. Μια βασική παράμετρος του φίλτρου, η οποία συνδέει την ελεύθερη φασματική περιοχή με το εύρος ζώνης κάθε κορυφής, είναι η λεπτότητα (finesse – F) του φίλτρου, η οποία δίνεται από τη σχέση

$$F = \frac{FSR}{B} = \frac{\pi}{2 \cdot \arcsin\left(\frac{1-R}{2\sqrt{R}}\right)} \quad (3.36)$$

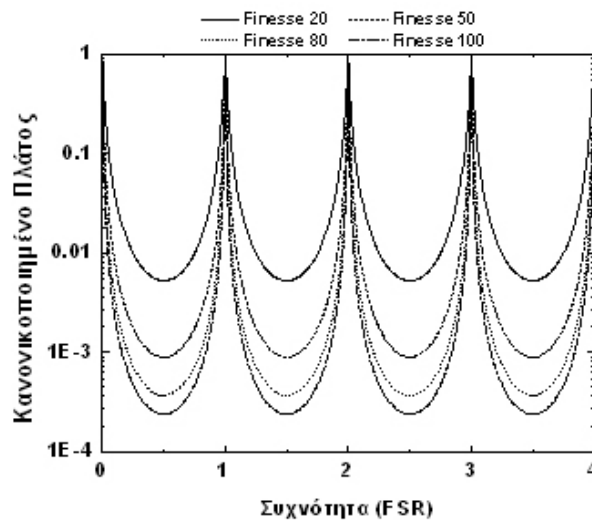
Για μεγάλες τιμές ανακλαστικότητας η λεπτότητα προσεγγίζεται από τη σχέση

$$F \cong \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \quad (3.37)$$

Η λεπτότητα σχετίζεται άμεσα με το γνωστό παράγοντα Q , ο οποίος χαρακτηρίζει κάθε στοιχείο φιλτραρίσματος και υποδεικνύει την ικανότητά του να απομονώνει και να φιλτράρει το επιθυμητό φασματικό περιεχόμενο. Η σχέση, που συνδέει τη λεπτότητα με τον παράγοντα Q , είναι η

$$Q \cong \frac{F}{\sqrt{3}} \quad (3.38)$$

και δείχνει ότι τα δύο μεγέθη είναι ευθέως ανάλογα.



Σχήμα 3.11: Συνάρτηση μεταφοράς του Fabry-Perot φίλτρου για διάφορες τιμές λεπτότητας.

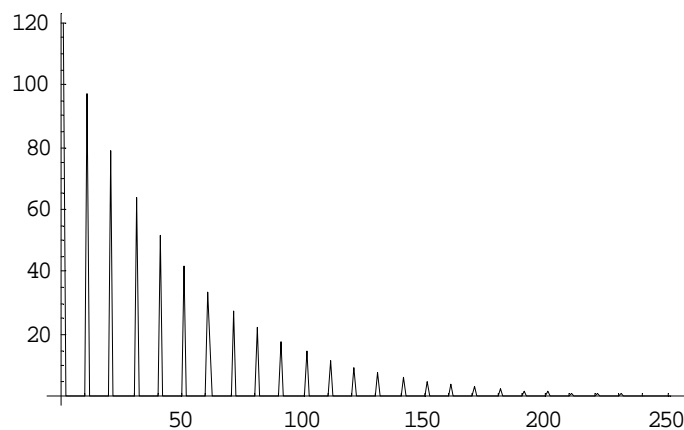
Σκοπός του φίλτρου Fabry-Perot στο κύκλωμα οπτικής ανάκτησης ρολογιού είναι η επιπλέον εμφάνιση ποσοστού οπτικής ισχύος σε εκείνα τα χρονικά σημεία της ακολουθίας δεδομένων, όπου οι παλμοί είναι μηδενικοί. Η μετατροπή, δηλαδή, των μηδενικών της αρχικής ακολουθίας δεδομένων σε λογικά '1'. Αυτό συμβαίνει μέσω των ανακλάσεων που συντελούνται μεταξύ των κατόπτρων του φίλτρου.

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

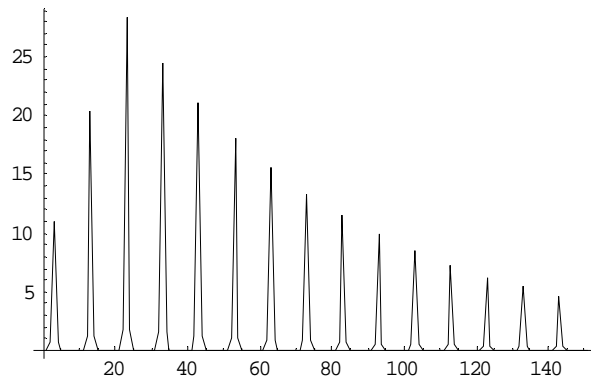
ελεύθερης φασματικής περιοχής (FSR). Συνεπώς, αν θέλουμε να ανακτήσουμε ένα ρολόι με συγκεκριμένη συχνότητα, επιλέγουμε ένα φίλτρο Fabry-Perot με την κατάλληλη τιμή FSR, ή ισοδύναμα με το αντίστοιχο μήκος της κοιλότητας.

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 3.12. 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 3.12: 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 παρουσιάζουμε την έξοδο του φίλτρου αν στην είσοδο έχουμε τρεις διαδοχικούς παλμούς.



Σχήμα 3.13: Έξοδος του Fabry-Perot στο πεδίο του χρόνου για είσοδο τριών διαδοχικών παλμών

Παρατηρούμε ότι το αποτέλεσμα που παίρνουμε από το φίλτρο Fabry-Perot είναι μεν το ζητούμενο ρολόι, αλλά παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση στα πλάτη των παλμών. Εκ πρώτης όψεως το πρόβλημα δείχνει να βελτιώνεται αν επιλέξουμε μεγάλη τιμή ανακλαστικότητας για τα κάτοπτρα. Στην περίπτωση αυτή επιτυγχάνουμε πολύ πιο αργή μεταβολή στο πλάτος των παλμών, αλλά μεγαλώνει η «ουρά» μετά το πέρας του πακέτου. Έτσι στην πράξη αυτό που τελικά επιδιώκουμε είναι μία ισορροπία ανάμεσα στα δύο αυτά αντικρουόμενα χαρακτηριστικά, ώστε και να περιορίσουμε την «ουρά» και η διακύμανση του πλάτους να είναι εντός των ορίων ανοχής της επόμενης βαθμίδας (MZI), για να μπορεί να λειτουργήσει κι αυτή ικανοποιητικά.

3.6 Το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού πακέτων: το φίλτρο Fabry-Perot ακολουθούμενο από ένα οπτικό κύκλωμα ψαλιδισμού, με χρήση οπτικής πύλης MZI

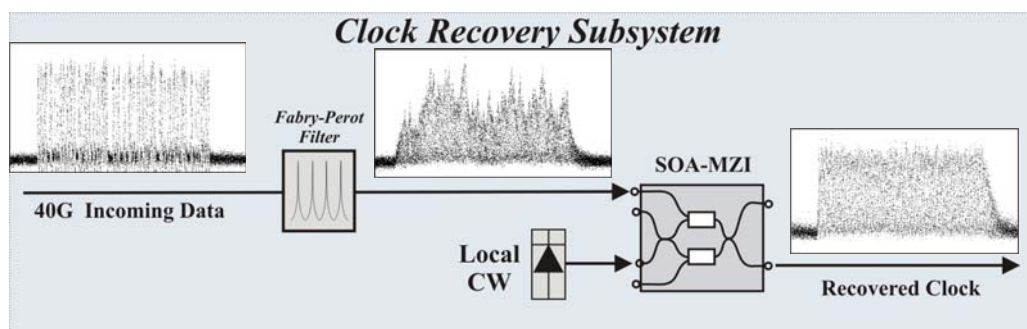
Μία πολύ σημαντική λειτουργία που επίσης μπορεί να επιτελεστεί στο οπτικό επίπεδο, είναι η ανάκτηση του ρολογιού του συστήματος (clock recovery). Το ρολόι είναι ουσιαστικά η συχνότητα λειτουργίας μίας ψηφιακής επικοινωνίας και η ανάκτησή του είναι απαραίτητη για το συγχρονισμό των ψηφιακών κυκλωμάτων, 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 μία 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. 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 αυτο-παλλόμενα DFB lasers. Αυτές απαιτούν μεγάλα χρονικά περιθώρια μεταξύ των πακέτων, οπότε δεν είναι κατάλληλες 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 (FFP) και ενός οπτικού συμβολόμετρου Mach-Zehnder, το οποίο και θα παρουσιαστεί στη συνέχεια. Ένα τέτοιο κύκλωμα (φίλτρο FP και οπτική πύλη MZI) λειτούργησε ως υπό-μονάδα ανάκτησης ρολογιού στο πείραμα εξαγωγής επικεφαλίδας οπτικών πακέτων δεδομένων, του επόμενου κεφαλαίου.

Το δομικό διάγραμμα του προτεινόμενου κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.14: Δομικό διάγραμμα του οπτικού κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού

Το κύκλωμα αποτελείται από το οπτικό φίλτρο Fabry-Perot με κατάλληλα επιλεγμένη τιμή λεπτότητας ($finesse - F$), και από το κύκλωμα οπτικού ψαλιδισμού, το οποίο συνίσταται, ως γνωστόν, από μια οπτική πύλη με είσοδο ένα ισχυρό CW σήμα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, επιλέξαμε κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού, στο οποίο χρησιμοποιήθηκε ως οπτική πύλη το συμβολόμετρο Mach-Zender (MZI), δεδομένου ότι αντίστοιχο κύκλωμα υλοποιήθηκε στα πλαίσια του πειραματικού μέρους. Στο κύκλωμα θεωρούμε ότι εισάγονται οπτικά πακέτα δεδομένων με χρονική διάρκεια T_p και ρυθμό επανάληψης δυφίων f_{data} .

Για το φίλτρο Fabry-Perot απαιτείται να πληρούνται οι τρεις βασικές προϋποθέσεις για τη λειτουργία του ως κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού, οι οποίες συνοπτικά είναι οι εξής:

- Μια από τις φασματικές κορυφές μετάδοσης του φίλτρου συμπίπτει με την κεντρική συχνότητα του φέροντος μήκους κύματος του σήματος δεδομένων.
- Η ελεύθερη φασματική περιοχή του φίλτρου είναι ίση με τη βασική συχνότητα ρολογιού (line-rate) στο ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων. Επομένως στο διάγραμμα του σχήματος 3.14, η ελεύθερη φασματική περιοχή του φίλτρου FSR θεωρείται ίση με f_{data} .
- Το φασματικό εύρος των αρμονικών συνιστωσών της πηγής δεδομένων είναι μικρότερο του εύρους ζώνης των φασματικών κορυφών μετάδοσης του φίλτρου.

Επιπλέον, για την ανάκτηση ρολογιού από πακέτα μικρής χρονικής διάρκειας απαιτείται το φίλτρο να έχει μικρές χρονικές σταθερές απόκρισης και σβέσης, ώστε να είναι εφικτή η λειτουργία του με κάθε μεμονωμένο εισερχόμενο πακέτο. Η απαίτηση για μικρές χρονικές σταθερές απόκρισης σχετίζεται άμεσα με τον παράγοντα Q , και επομένως με τη λεπτότητα F , του φίλτρου Fabry-Perot. Κατά συνέπεια, η λεπτότητα F του φίλτρου επιλέγεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι, μεν, η ελάχιστη δυνατή, αλλά ταυτόχρονα να επαρκεί για να «γεμίσει» με παλμούς ρολογιού ακόμα και το χρονικό τμήμα του πακέτου εισόδου με το μέγιστο αριθμό συνεχόμενων μηδενικών.

Η επιλογή χαμηλής λεπτότητας για το φίλτρο Fabry-Perot επιτρέπει την παραγωγή σήματος ρολογιού στην έξοδο του φίλτρου με χρονική διάρκεια παραπλήσια της διάρκειας T_p του αρχικού πακέτου δεδομένων εισόδου. Ταυτόχρονα, όμως, συνεπάγεται περισσότερο έντονη διαμόρφωση πλάτους μεταξύ των παραγόμενων παλμών ρολογιού.

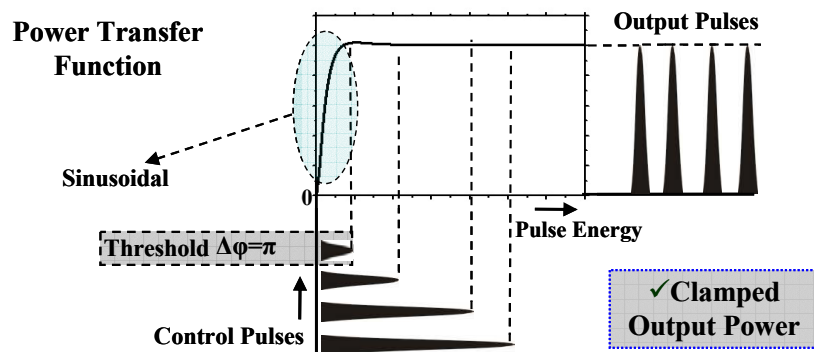
Επομένως, για τη διάταξη του σχήματος 3.14, στην έξοδο του φίλτρου Fabry-Perot χαμηλής λεπτότητας προκύπτει ένα υποτυπώδες οπτικό σήμα ρολογιού σε μορφή πακέτων και ρυθμό επανάληψης παλμών f_{data} , με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Χρονική διάρκεια του πακέτου ρολογιού περίπου ίση με τη χρονική διάρκεια του αρχικού πακέτου T_p . Πιο συγκεκριμένα, η χρονική διάρκεια θα είναι ελαφρώς μεγαλύτερη της τιμής T_p .
- Έντονη διαμόρφωση πλάτους μεταξύ των παλμών του οπτικού σήματος ρολογιού.

Για την απαλοιφή της διαμόρφωσης πλάτους αυτού του σήματος χρησιμοποιείται στην έξοδο του φίλτρου ένα οπτικό κύκλωμα ψαλιδισμού, το οποίο αποτελείται από μία οπτική πύλη MZI με είσοδο ένα ισχυρό CW σήμα. Το διαμορφωμένο κατά πλάτος σήμα ρολογιού εισέρχεται ως σήμα ελέγχου στην οπτική πύλη του κυκλώματος ψαλιδισμού, αφού η ισχύς του ρυθμιστεί κατάλληλα, ώστε η ισχύς κορυφής κάθε παλμού του να είναι μεγαλύτερη του κατωφλίου ισχύος του κυκλώματος ψαλιδισμού. Με αυτόν τον τρόπο, στη θύρα μεταγωγής S της πύλης του κυκλώματος ψαλιδισμού παράγεται ένα πακέτο ρολογιού για κάθε αντίστοιχο πακέτο δεδομένων, του οποίου οι παλμοί έχουν ίσα πλάτη μεταξύ τους, η χρονική του διάρκεια είναι ελαφρώς μεγαλύτερη του χρόνου T_p του αρχικού πακέτου δεδομένων, και το μήκος κύματός του είναι το μήκος κύματος του CW σήματος εισόδου της πύλης.

Η παραπάνω λειτουργία γίνεται εύκολα κατανοητή με τη βοήθεια του σχήματος 3.15.

Το σχήμα αυτό απεικονίζει, μέσω της γνωστής συνάρτησης μεταφοράς του οπτικού κυκλώματος ψαλιδισμού, την έξοδο μίας οπτικής πύλης MZI, όταν στην πύλη εισέρχεται ως σήμα ελέγχου το σήμα εξόδου του φίλτρου Fabry-Perot. Το κύκλωμα ψαλιδισμού αποκρίνεται μόνο στους υπάρχοντες παλμούς της εξόδου του Fabry-Perot, οπότε διατηρείται το καθ' όλα επιθυμητό μικρό χρονικό εύρος του ανακτημένου σήματος ρολογιού, που προκύπτει στην έξοδο του φίλτρου. Επιπλέον, το κύκλωμα ψαλιδισμού μετατρέπει κάθε εισερχόμενο παλμό σε παλμό εξόδου με συγκεκριμένη και σταθερή στάθμη ισχύος, επιτυγχάνοντας εξίσωση πλάτους μεταξύ των παλμών ρολογιού.



Σχήμα 3.15: Χαρακτηριστική εξόδου του MZI ως προς την ισχύ του Σήματος Ελέγχου

Συμπερασματικά, οι ρόλοι των δύο διακριτών δομικών στοιχείων της διάταξης του προτεινόμενου κυκλώματος, όπως αυτό φαίνεται στο σχήμα 3.14, είναι:

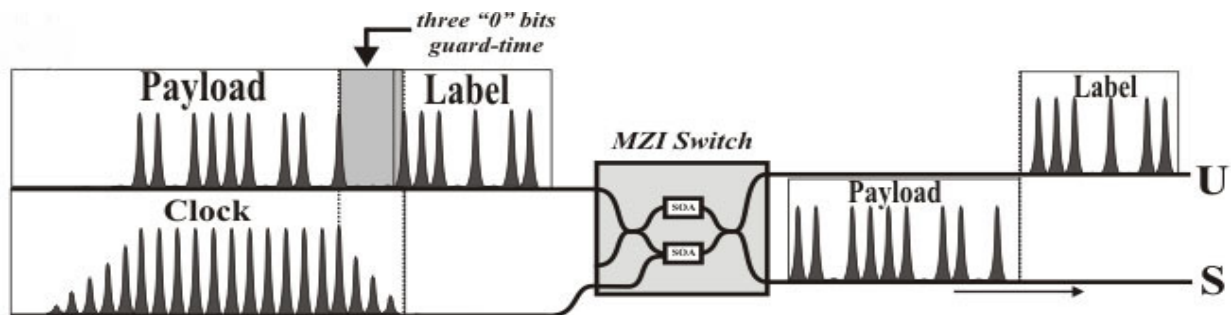
- Το φίλτρο Fabry-Perot με FSR ίσο με το ρυθμό δεδομένων και με μικρή λεπτότητα F ανακτά σε μικρό χρονικό διάστημα ένα υποτυπώδες σήμα πακέτου ρολογιού για κάθε αντίστοιχο αρχικό πακέτο δεδομένων. Το σήμα αυτό «σβήνει», επίσης, πολύ γρήγορα μετά τη διέλευση του πακέτου δεδομένων από το φίλτρο, με αποτέλεσμα το υποτυπώδες πακέτο ρολογιού να έχει περίπου την ίδια χρονική διάρκεια με το αντίστοιχο αρχικό πακέτο δεδομένων.
- Το κύκλωμα ψαλιδισμού αίρει τη διαμόρφωση πλάτους μεταξύ των παλμών ρολογιού, που προκύπτουν στην έξοδο του φίλτρου Fabry-Perot, χωρίς να αλλοιώνει τη χρονική διάρκεια και το περιεχόμενο του σήματος εξόδου του φίλτρου.

3.7 Υλοποίηση λειτουργίας λογικού AND με τη χρήση MZI

Η λειτουργία λογικού AND αποτελεί δομικό στοιχείο για ένα κύκλωμα αυτοσυγχρονισμού, που επιτελεί τη διαδικασία διαχωρισμού της επικεφαλίδας από το φορτίο ενός οπτικού πακέτου πληροφορίας. Η υλοποίηση που προτείνεται στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας αλλά και εξετάστηκε και πειραματικά, είναι αυτή με τη χρήση του οπτικού συμβολόμετρου Mach-Zender. Η λειτουργία της λογικής πράξης AND έγκειται στη συνδεσμολογία και τα χαρακτηριστικά των ημιαγωγίμων οπτικών ενισχυτών (SOA) του διακόπτη. Όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 3.2 η είσοδος ισχυρού οπτικού παλμού ως σήμα ελέγχου στο διακόπτη MZI οδηγεί στην ολίσθηση της φάσης της συνιστώσας του σήματος πληροφορίας που οδηγείται στον ίδιο SOA με το σήμα ελέγχου κατά $\pi/2$, προκαλώντας προσθετική συμβολή στη θύρα μεταγωγής (κατάσταση μεταγωγής). Η ταυτόχρονη είσοδος σήματος πληροφορίας και σήματος ελέγχου, με τη συνδεσμολογία που αναφέρεται στην παράγραφο 3.2, έχει ως αποτέλεσμα την έξοδο του παλμού πληροφορίας στη θύρα μεταγωγής. Αν λοιπόν, η ταυτόχρονη είσοδος στο συμβολόμετρο δεν περιοριστεί μονάχα σε δύο παλμούς, αλλά σε παλμοσειρές, μία εκ των οποίων θα αποτελεί το ανακτημένο σήμα ρολογιού του πακέτου πληροφορίας (παλμοσειρά αποτελούμενη από μη μηδενικούς παλμούς ίδιας ισχύος), ενώ η άλλη το ίδιο το πακέτο πληροφορίας (παλμοσειρά αποτελούμενη από μηδενικούς και μη παλμούς ανάλογα με την πληροφορία που μεταφέρει το πακέτο), το αποτέλεσμα θα είναι να μεταγώνται παλμοί μόνο στη περίπτωση ταυτόχρονης εισόδου παλμών από τις δύο

παλμοσειρές (λογική πράξη AND στη θύρα μεταγωγής –λογική πράξη NAND στη θύρα μη μεταγωγής).

Η επίτευξη της εξαγωγής της επικεφαλίδας ενός οπτικού πακέτου πληροφορίας, σε ένα κύκλωμα αυτοσυγχρονισμού, συνίσταται στην εκτέλεση της λογικής πράξης AND μεταξύ του ανακτημένου σήματος ρολογιού και εκείνου του μέρους του πακέτου που αντιστοιχεί στο φορτίο (Payload). Κατά συνέπεια, αποτελεί αναγκασία προϋπόθεση για ένα τέτοιο κύκλωμα το κομμάτι του φορτίου να εμπίπτει χρονικά με το σήμα ρολογιού, ούτως ώστε το φορτίο να εξέρχεται της θύρας μεταγωγής ενώ η επικεφαλίδα της θύρας μη μεταγωγής.



Σχήμα 3.16: Αρχή λειτουργίας του MZI για την υλοποίηση της πράξης AND

4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Πειραματική μελέτη του κυκλώματος διαχωρισμού επικεφαλίδας με τη χρήση υβριδικά ολοκληρωμένου MZI τεσσάρων στοιχείων

4.1 Στόχος και αξία του κυκλώματος διαχωρισμού επικεφαλίδας/φορτίου.

Για την επιτυχή δρομολόγηση των δεδομένων σε έναν κόμβο είναι απαραίτητη προϋπόθεση ο κόμβος να ενημερώνεται για τον τελικό προορισμό του εισερχόμενου σήματος. Η πληροφορία του τελικού προορισμού σε αυτά τα δίκτυα περιέχεται στην επικεφαλίδα (header) ή διεύθυνση (address) του πακέτου. Κατά συνέπεια, ο κόμβος καλείται να διαχωρίσει την επικεφαλίδα από το φορτίο του πακέτου, το οποίο περιέχει τα χρήσιμα δεδομένα, και στη συνέχεια να επεξεργαστεί και να αναγνωρίσει το περιεχόμενο της διαχωρισμένης πληροφορίας. Το πρώτο στάδιο αυτής της διαδικασίας υλοποιείται, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενες παραγράφους, με την χρήση κατάλληλων κυκλωμάτων όπως είναι τα κυκλώματα διαχωρισμού επικεφαλίδας/φορτίου. Το ίδιο ισχύει και στα δίκτυα μεταγωγής ετικέτας, όπου κάθε πακέτο φέρει πλέον της επικεφαλίδας του και μια μικρότερη σε μέγεθος ετικέτα, η οποία περιέχει την πληροφορία για τον τελικό προορισμό του πακέτου μέσα σε ένα περιορισμένου μεγέθους τμήμα του δικτύου. Σε αυτήν την περίπτωση είναι επιβεβλημένος ο διαχωρισμός και η επεξεργασία της ετικέτας κατ'αντιστοιχία με τις αντίστοιχες διαδικασίες για την επικεφαλίδα. Για το υπόλοιπο αυτού του κεφαλαίου η χρήση του όρου επικεφαλίδα περιλαμβάνει και την έννοια της ετικέτας.

Οι τεχνικές για τη διαδικασία εξαγωγής της επικεφαλίδας οπτικών πακέτων που εφαρμόζονται στα σημερινά οπτικά δίκτυα, βασίζονται στην διαφοροποίηση της επικεφαλίδας από το φορτίο, το οποίο μπορεί να αναγνωριστεί και να αξιοποιηθεί από το κύκλωμα διαχωρισμού επικεφαλίδας/φορτίου (μήκος κύματος, υποφέρουσα συχνότητα, χρονική κατανομή, και κωδικοποίηση). Το προτεινόμενο κύκλωμα, το οποίο και εφαρμόστηκε στο πείραμα, αφορά πακέτα στα οποία η επικεφαλίδα προηγείται χρονικά του φορτίου και εντάσσεται στα κυκλώματα αυτοσυγχρονισμού.

Με βάση την εμπειρία από τη λειτουργία των προηγούμενων οπτικών κυκλωμάτων εξαγωγής της επικεφαλίδας η αντιμετώπιση, με ολοκληρωμένο τρόπο, του προβλήματος του διαχωρισμού της επικεφαλίδας από το φορτίο των οπτικών πακέτων οφείλει να κινείται στους παρακάτω άξονες: Η λειτουργία του κυκλώματος διαχωρισμού επικεφαλίδας/φορτίου πρέπει, καταρχήν, να ανταποκρίνεται στην

απαίτηση για μετάδοση της επικεφαλίδας στον ίδιο ρυθμό μετάδοσης και στην ίδια φέρουσα συχνότητα με το φορτίο του πακέτου, ούτως ώστε να παρέχεται η δυνατότητα για βέλτιστη εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Επιπλέον, η πολυπλοκότητα της διαδικασίας διαχωρισμού της επικεφαλίδας οφείλει να είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος του πεδίου της επικεφαλίδας, ενώ, ταυτόχρονα, οι απαιτήσεις της διαδικασίας σε προστατευτικές ζώνες δυφίων είναι επιθυμητό να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα. Βασικό ρόλο σ' αυτήν την προσπάθεια μπορεί να διαδραματίσει το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού πακέτων, το οποίο παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η λειτουργία αυτού του κυκλώματος, η οποία συνίσταται στην ανάκτηση ενός σήματος πακέτου ρολογιού με χρονικά χαρακτηριστικά παραπλήσια αυτών του αρχικού πακέτου δεδομένων, με μοναδική απαίτηση για τη λειτουργία του κυκλώματος το αρχικό πακέτο δεδομένων ως είσοδο, παρέχει την επιθυμητή παλμική χρονική συνάρτηση για επέμβαση σε χρονικά πεδία του αρχικού οπτικού πακέτου.

Στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας αξιοποιήθηκαν οι δυνατότητες του κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού πακέτων και αναπτύχθηκε ένα πρωτότυπο κύκλωμα διαχωρισμού επικεφαλίδας/φορτίου από οπτικά πακέτα δεδομένων στα 40 Gb/s, το οποίο παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο. 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 (MZI) που λειτουργεί ως κύκλωμα ψαλιδισμού, σε συνδυασμό με τρία ακόμα MZI τα οποία και συνδέονται με το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού σειριακά. Και τα τέσσερα MZI λειτουργούν σε μία ενιαία συσκευή υβριδικής ολοκλήρωσης (4 elements hybrid integrated MZI). Η Τρίτη 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 που προκύπτει στην έξοδο του δεύτερου 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 ως 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 κύκλωμά μας. Το τελευταίο MZI λειτουργεί ως ένας 40:10 Gb/s αποπολυπλέκτης. 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

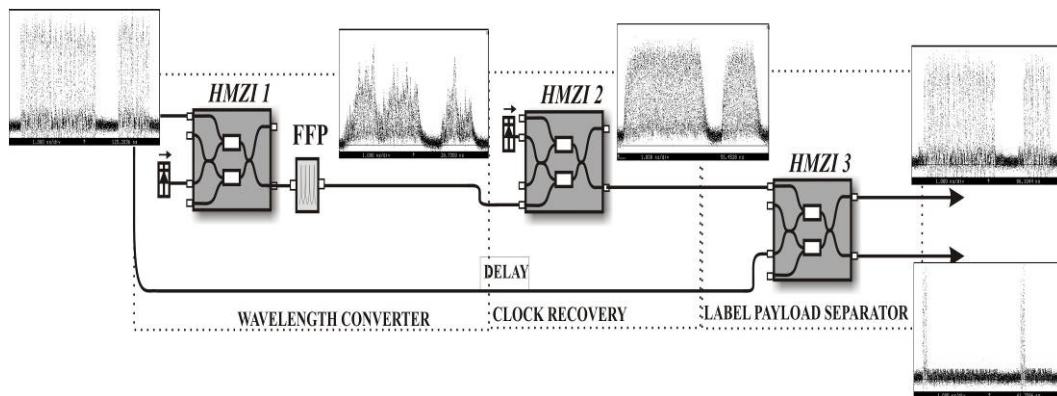
ανεξαρτησία του συστήματος σε θέματα που αφορούν τη διαμόρφωση των δεδομένων (data format).

Το κύκλωμα διαχωρισμού επικεφαλίδας/φορτίου διατηρεί όλα τα ελκυστικά χαρακτηριστικά του κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού, όπως 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. 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 στην πύλη διαχωρισμού (πράξη AND) για την εκ νέου επιτυχή λειτουργία του. Επιπλέον, δεδομένου 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. Τέλος, το κύκλωμα μπορεί, εν δυνάμει, να κατασκευαστεί σε συμπαγή μορφή με χρήση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων διακοπών 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.

4.2 Το κύκλωμα εξαγωγής επικεφαλίδας οπτικών πακέτων και η αρχή λειτουργίας του

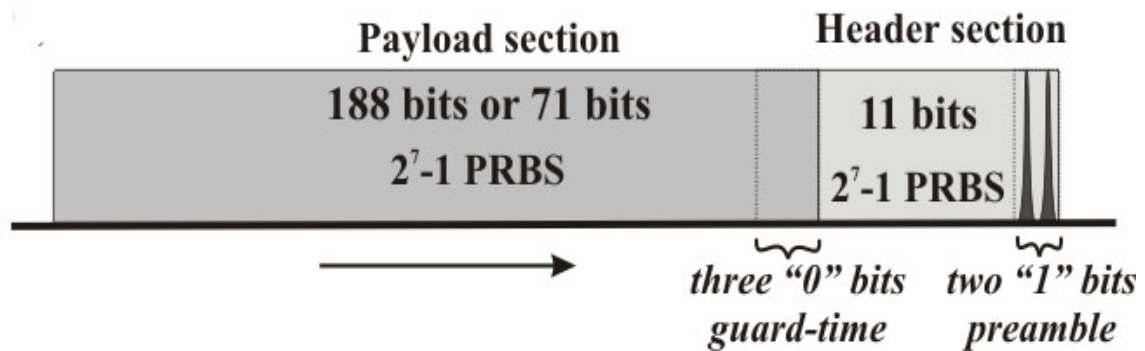
Το κύκλωμα που υλοποιήθηκε αποτελείται από έξι τμήματα τοποθετημένα σε σειρά μεταξύ τους. Το πρώτο μέρος περιλαμβάνει την παραγωγή του σήματος εισόδου, δηλαδή των πακέτων με την ψευδο-τυχαία ακολουθία bits. Η διαδικασία της αφαίρεσης της επικεφαλίδας επιτελείται ουσιαστικά στα επόμενα τρία τμήματα της διάταξης, ενώ στα τελευταία δύο στάδια πραγματοποιείται πρώτα ο υποβιβασμός της συχνότητας με την χρήση ενός οπτικού διακόπτη MZI (40:10 Gb/s DEMUX), και κατόπιν γίνεται η ανίχνευση λαθών προκειμένου να χαρακτηριστεί η απόδοση του συστήματος. Στο δεύτερο κατά σειρά μέρος του συστήματος χρησιμοποιούμε άλλη μια πύλη MZI η οποία λειτουργεί ως μετατροπέας μήκους κύματος (*wavelength*

converter) προκειμένου το Fabry Perot φίλτρο να λειτουργεί με τον βέλτιστο τρόπο προσδίδοντας ευστάθεια και ανεκτικότητα στο σύστημα μας, σε οποιοδήποτε μήκος κύματος και αν έχει το εισερχόμενο πακέτο. Στο τρίτο μέρος χρησιμοποιούμε το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού του προηγούμενου κεφαλαίου, ώστε να κατασκευάσουμε ρολόι από κάθε πακέτο, στο μήκος περίπου του πακέτου αυτού. Τέλος, στο τέταρτο κομμάτι του κυκλώματος χρησιμοποιούμε το ρολόι αυτό για να οδηγήσουμε την AND πύλη μας, που έχει σαν εισόδο το καθυστερημένο πακέτο και σαν σήμα ελέγχου το διαμορφωμένο ρολόι του αντίστοιχου πακέτου εισόδου. Οι δε έξοδοι της AND πύλης εξάγουν: στη θύρα μεταγωγής (switched port) το φορτίο (payload) και στη θύρα μη μεταγωγής (un-switched port) την εξαγόμενη επικεφαλίδα (header). Τα παραπάνω φαίνονται καλύτερα στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 4.1: Αρχή Λειτουργίας της διάταξης

Η λειτουργία του κυκλώματος ελέγχθηκε για διάφορα μήκη πακέτων με τα ίδια αποτελέσματα, καθώς η λογική του δουλεύει σε επίπεδο bits. Η γενική μορφή του κάθε πακέτου φαίνεται στο σχήμα 4.2. Θεωρήσαμε έναν συγκεκριμένο αριθμό bits από την αρχή του κάθε πακέτου ως επικεφαλίδα και τα υπόλοιπα bits σαν πληροφορία. Επίσης, μεταξύ επικεφαλίδας και φορτίου θεωρήσαμε μία περιοχή μια περιοχή η οποία περιέχει προστατευτικά δυφία, της οποίας τη χρησιμότητα θα εξηγήσουμε παρακάτω.



Σχήμα 4.2: Η μορφή των πακέτων που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα

Από το δομικό διάγραμμα του κυκλώματος διαχωρισμού επικεφαλίδας/φορτίου (σχήμα 4.3) παρατηρούμε πως η εξαγωγή της επικεφαλίδας του πακέτου δεδομένων εκτελείται με την υλοποίηση της λογικής λειτουργίας AND μέσα στον οπτικό διακόπτη. Το αρχικό πακέτο πληροφορίας εισάγεται σε μία θύρα εισόδου του διακόπτη, ενώ ως σήμα ελέγχου εισάγεται το ανακτημένο ρολόι. Η κατασκευή των πακέτων ρολογιού εκτελείται στο τρίτο κατά σειρά τμήμα της διάταξής μας, μετά την παραγωγή του σήματος των πακέτων και τη μετατροπή του μήκους κύματος (δεύτερο MZI στο σχήμα 4.1), το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού, με τον τρόπο ακριβώς που περιγράφηκε σε παράγραφο του προηγούμενου κεφαλαίου.

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι για αν επιτύχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα με το κύκλωμά μας, είναι απαραίτητο να επιτευχθεί ο κατάλληλος συγχρονισμός ανάμεσα στα σήματα Εισόδου και Ελέγχου. Όπως υποδηλώνεται και στα σχήματα 4.1 και 4.3, το ανακτημένο ρολόι εισέρχεται στο MZI με καθυστέρηση ίση ακριβώς με το μήκος της επικεφαλίδας αυτού, ώστε να παίξει το ρόλο του Σήματος Ελέγχου. Το 'πακέτο ρολογιού', όμως, που παράγεται με τη βοήθεια του συμβολομέτρου Fabry-Perot και της πύλης έχει απαραίτητα κάποιο χρόνο ανύψωσης και πτώσης (*rise and fall time*). Συγκεκριμένα, από μετρήσεις που έγιναν στο κύκλωμά μας, ο χρόνος ανύψωσης για την ανάκτηση του ρολογιού ήταν 5 bits ενώ ο χρόνος πτώσης περίπου 14 bits. Προκειμένου να επιτύχουμε μικρό χρόνο ανύψωσης πρέπει τα πρώτα bits της επικεφαλίδας να είναι όλα '1', ώστε το Fabry-Perot να έχει χαμηλό χρόνο απόκρισης στην έξοδό του. Για να εξασφαλίσουμε μια τέτοια ακολουθία από '1', ορίζουμε μία περιοχή guardband με '1' στην αρχή κάθε πακέτου, με μήκος που εξαρτάται από το χρόνο ανύψωσης του κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού.

Επίσης, ο χρόνος ανύψωσης του παραγόμενου ρολογιού, έχει αντίκτυπο και στη διαδικασία της μεταγωγής. Οι πρώτοι ασθενέστεροι άσσοι που γεννιούνται, όταν εισάγονται στον οπτικό διακόπτη μεταγωγής MZI δεν προκαλούν την επιθυμητή στροφή φάσης των 180° στη συγχρονισμένη συνιστώσα των Σημάτων Εισόδου.

Έτσι, για να αρχίσει να γίνεται σωστά η μεταγωγή πρέπει να παρέλθει χρόνος περίπου ίσος με το χρόνο ανύψωσης. Στο διάστημα αυτό, επειδή η έξοδος του διακόπτη σε τυχαία εισόδο δεν είναι ντετερμινιστική, φροντίζουμε ώστε να υπάρχει μία ακολουθία από '0', οπότε και η έξοδος στη θύρα μεταγωγής θα είναι '0'. Αυτό επιτυγχάνεται με την εισαγωγή ενός προστατευτικών δυφίων από μηδενικά αμέσως πριν τα bits των δεδομένων στο πακέτο. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζουμε και την αποφυγή απώλειας των πρώτων bits της πληροφορίας (payload), εξαιτίας ενδεχόμενης ατελούς μεταγωγής των προπορευόμενων παλμών του φορτίου από τους πρώτους, όχι υψηλής ποιότητας παλμούς του σήματος ελέγχου, που αντιστοιχούν στον απαιτούμενο χρόνο ανάκτησης ρολογιού.

Τέλος, η χρονική ολίσθηση του 'πακέτου ρολογιού' κατά το μήκος της επικεφαλίδας καθώς και ο χρόνος πτώσης του ρολογιού λόγω των ανακλάσεων στο Fabry-Perot που εξακολουθούν να συμβαίνουν και μετά το πέρασ του πακέτου εισόδου, υπαγορεύουν κάποιο χρονικό διάστημα απραξίας ανάμεσα σε δύο διαδοχικά πακέτα εισόδου. Το χρονικό αυτό διάστημα απαιτείται για να «ξεκλειδώσει» το κύκλωμα από το ρολόι του προηγούμενου πακέτου και να μπορεί να συγχρονιστεί με το επόμενο, και ισούται με το χρόνο που αντιστοιχεί στο μήκος της επικεφαλίδας συν τον χρόνο πτώσης του ρολογιού.

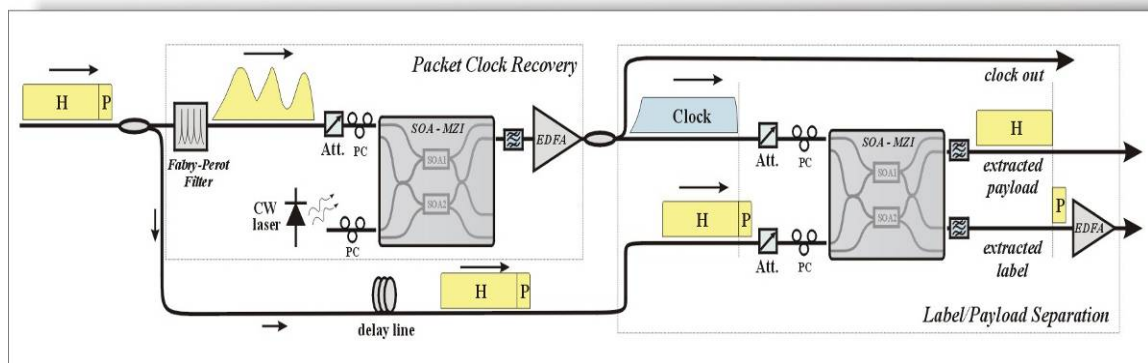
Στο κύκλωμα που υλοποιήσαμε εισάγαμε δύο πακέτα μήκους 188 δυφίων και 71 διφύων αντίστοιχα, σε ότι αφορά το payload με διάστημα 40 διφύων ανάμεσά τους. Ο ρυθμός μετάδοσης ήταν 40 Gbps, με αποτέλεσμα κάθε bit να αντιστοιχεί σε 0.025 ns. Όπως περιγράφηκε παραπάνω, το κάθε πακέτο περιείχε δύο άσσους στην αρχή και τρία μηδενικά πριν τα δεδομένα (payload), αποτέλεσμα του πολύ μικρού χρόνου ανύψωσης και πτώσης του παραγόμενου ρολογιού. Αυτή η πολύ καλή επίδοση της διάταξης ανάκτησης ρολογιού που κατασκευάσαμε μας έδωσε τη δυνατότητα να υλοποιήσουμε το κύκλωμα εξαγωγής επικεφαλίδας χωρίς την ανάγκη μεγάλων guardbands, που θα είχαν σαν αποτέλεσμα την σπατάλη εύρους ζώνης.

4.3 Δομικό διάγραμμα του κυκλώματος

Το δομικό διάγραμμα του προτεινόμενου κυκλώματος διαχωρισμού επικεφαλίδας/φορτίου για οπτικά πακέτα δεδομένων φαίνεται στο σχήμα 4.3.

Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενες παραγράφους, η εξαγωγή της επικεφαλίδας επιτυγχάνεται όταν το φορτίο του πακέτου δεδομένων εμπίπτει στο χρονικό παράθυρο μεταγωγής, που δημιουργούν οι παλμοί ελέγχου του πακέτου ρολογιού στην τελευταία πύλη. Πιο συγκεκριμένα, η λειτουργία, την οποία επιτελεί η δεύτερη πύλη, είναι μια απλή AND λογική πράξη μεταξύ των δύο εισόδων του, της οποίας το αποτέλεσμα, όπως είναι γνωστό, είναι το λογικό '1' μόνο όταν και οι δύο

είσοδοι του διακόπτη είναι λογικοί άσσοι, ενώ σε οποιονδήποτε άλλο συνδυασμό λογικών εισόδων το αποτέλεσμα της AND είναι το λογικό '0'. Επομένως, ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση μη μεταγωγής (OFF) για όλη τη διάρκεια της επικεφαλίδας του πακέτου, καθώς το σήμα ελέγχου του διακόπτη για αυτό το χρονικό διάστημα είναι ακολουθία μηδενικών, με αποτέλεσμα η επικεφαλίδα να εξέρχεται αυτούσια από τη θύρα μη μεταγωγής U του MZI. Αντίθετα, ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση μεταγωγής (ON) για τη χρονική διάρκεια του φορτίου του πακέτου, εφόσον κατά το χρονικό αυτό διάστημα εισάγεται στο διακόπτη το ανακτημένο πακέτο ρολογιού ως σήμα ελέγχου. Ως αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας, τα δυφία του φορτίου του πακέτου δεδομένων μεταγόνται, και εξέρχονται από τη θύρα μεταγωγής S του MZI. Κατά συνέπεια, στις δύο θύρες εξόδου του MZI εμφανίζονται επιτυχώς διαχωρισμένα η επικεφαλίδα και το φορτίο, αντίστοιχα, του αρχικού πακέτου δεδομένων.

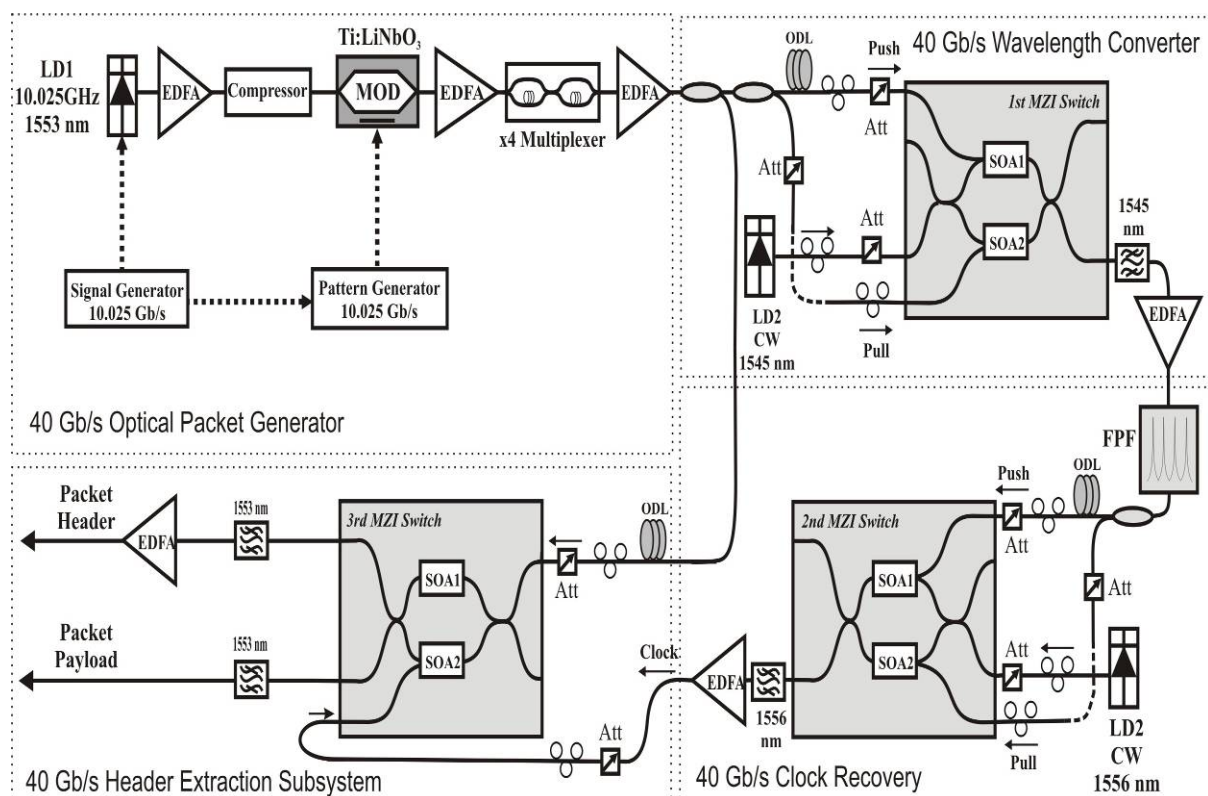


Σχήμα 4.3: Δομικό διάγραμμα και αρχή λειτουργίας του κυκλώματος διαχωρισμού επικεφαλίδας/φορτίου.

Το προτεινόμενο κύκλωμα διαχωρισμού επικεφαλίδας/φορτίου βασίζει, επομένως, τη λειτουργία του σε μεγάλο βαθμό στη λειτουργία του κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού πακέτων. Άμεση συνέπεια αυτού είναι το γεγονός ότι το κύκλωμα εξαγωγής επικεφαλίδας διατηρεί τα ελκυστικά χαρακτηριστικά του κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού, όπως είναι η ικανότητα λειτουργίας του σε επίπεδο μεμονωμένου πακέτου, ακόμα και στην περίπτωση, που τα εισερχόμενα οπτικά πακέτα δεδομένων είναι πολύ μικρού μεγέθους και ασύγχρονης ροής. Ένα, επιπλέον, σημαντικό χαρακτηριστικό αυτής της τεχνικής εξαγωγής της επικεφαλίδας είναι το γεγονός, ότι η πολυπλοκότητά της δεν αυξάνει σε ενδεχόμενη μεταβολή της χρονικής διάρκειας της επικεφαλίδας του εισερχόμενου πακέτου. Σε τέτοια περίπτωση, αρκεί μια αντίστοιχη μεταβολή στη χρονική καθυστέρηση τ , που εισάγεται στο ανακτημένο πακέτο ρολογιού, και το κύκλωμα εξακολουθεί να διαχωρίζει επιτυχώς την επικεφαλίδα από το φορτίο του πακέτου.

4.4 Πειραματική διάταξη

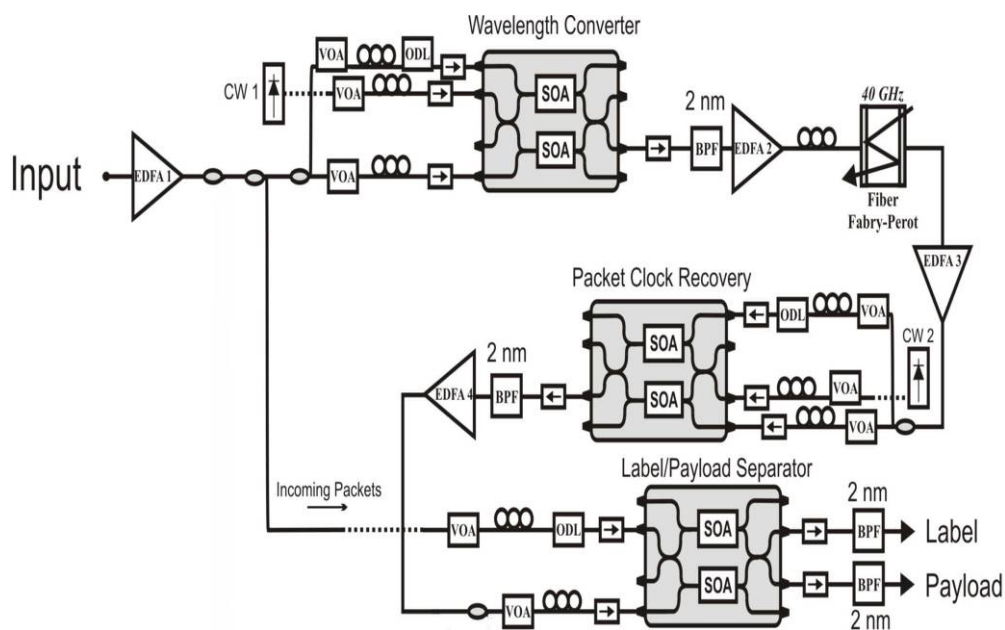
Η πειραματική διάταξη παρουσιάζεται στα σχέδια 4.4 και 4.9. Αυτή αποτελείται από την γεννήτρια οπτικών πακέτων πληροφορίας στα 40 Gb/s, το κύκλωμα μετατροπής μήκους κύματος, το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού πακέτων, τη μονάδα διαχωρισμού επικεφαλίδας/φορτίου και τον αποπολυπλέκτη από τα 40 στα 10 Gb/s. Και οι τέσσερις λειτουργίες που επιτελούν οι προαναφερθείσες υπομονάδες της πειραματικής διάταξης (εκτός της γεννήτριας των πακέτων) υλοποιούνται με τη χρήση του οπτικού συμβολόμετρου Mach-Zender (MZI), όπως φαίνεται στα σχήμα 4.9. Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το υβριδικά ολοκληρωμένο MZI τεσσάρων στοιχείων (4 elements hybrid integrated MZI).



Σχήμα 4.4: Πειραματική διάταξη του κυκλώματος διαχωρισμού επικεφαλίδας / φορτίου στα 40 Gb/s.


4.5 Περιγραφή των στοιχείων της διάταξης

Σε αυτή την παράγραφο θα επιχειρήσουμε να δώσουμε μια σύντομη περιγραφή των στοιχείων που συγκροτούν την πειραματική διάταξη, πέραν του θεμελιώδους δομικού στοιχείου της διάταξης, που είναι το οπτικό συμβολόμετρο Mach-Zender. Τα εν λόγω στοιχεία είναι παθητικά και ενεργητικά οπτικά στοιχεία που συντελούν στη λειτουργία του κυκλώματος. Η τοποθέτησή τους στο κύκλωμα φαίνεται στα σχήματα 4.4-4.5.





Σχήμα 4.5: Αναλυτική περιγραφή της διάταξης εξαγωγής επικεφαλίδας πακέτων.


PC – Polarization Controller (Ελεγκτής Πόλωσης) . Πρόκειται για ένα στοιχείο που μας επιτρέπει να στρέφουμε με συστηματικό τρόπο τη γωνία πόλωσης του πολωμένου φωτός που προσπίπτει σε αυτό. Αποτελείται από συνδυασμό πλακιδίων καθυστέρησης φάσης $\lambda/2$ και $\lambda/4$. Στα πλακίδια αυτά οι συνιστώσες του φωτός αποκτούν διαφορετική καθυστέρηση, ανάλογα με τον άξονα διάδοσης που τους αντιστοιχεί. Η διαφορά φάσης που εισάγεται φτάνει τις 180° και 90° αντίστοιχα. Στρέφοντας τα πλακίδια αλλάζουμε τη γωνία με την οποία το φως προσπίπτει πάνω τους, μεταβάλλοντας αντίστοιχα τις δύο συνιστώσες και ρυθμίζοντας άρα τη διαφορά φάσης που θα αποκτήσουν. Με τον τρόπο αυτό μεταβάλλουμε την πολωτική κατάσταση του φωτός.


 **Ενισχυτής με ίνα Ερβίου (EDFA):** Ο EDFA είναι ένας ενισχυτής κατασκευασμένος από ίνα νοθευμένη με ιόντα ερβίου. Το φαινόμενο στο οποίο βασίζει τη λειτουργία του είναι η Απορρόφηση Διεγερμένων Καταστάσεων (ESA – Excited State Absorption). Σύμφωνα με αυτό, η ισχύς άντλησης απορροφάται από κάποια ανεπιθύμητη μετάπτωση που συμβαίνει να βρίσκεται ακριβώς ή πολύ κοντά στο κατάλληλο μήκος κύματος. Συγκεκριμένα, το ιόν Ερβίου απορροφά ένα φωτόνιο άντλησης και μεταβαίνει σε διεγερμένη στάθμη, όπου όμως αντί να αποδιεγερθεί εξαναγκασμένα από φωτόνιο σήματος, απορροφά ένα ακόμα φωτόνιο άντλησης και μεταβαίνει σε ακόμα υψηλότερη στάθμη, οπότε και τελικά αποδιεγείρεται δίνοντας φωτόνια μικρότερου μήκους κύματος. Η άντληση γίνεται στα 980nm ή στα 1480 nm.

Η κυριότερη συνιστώσα θορύβου στους Ενισχυτές Ερβίου είναι η Ενισχυμένη Αυθόρμητη Εκπομπή (ASE – Amplified Spontaneous Emission). Κατά το φαινόμενο αυτό, ένα διεγερμένο ιόν αποδιεγείρεται εξαναγκασμένα χωρίς την πρόσπτωση φωτονίου σήματος. Το ασύμφωνο φωτόνιο που παράγεται ενισχύεται κινούμενο και προς τα δύο τερματικά άκρα, με αποτέλεσμα στην έξοδο να έχουμε σήμα άσχετο με το πραγματικό, που μπορεί και να μην υπάρχει. Για την αποκοπή του θορύβου πάντα στην έξοδο του ενισχυτή χρησιμοποιούμε φίλτρο.

 **Φίλτρο (BFP):** Αποκόπτει όλες τις συχνότητες πέρα από ένα εύρος γύρω από τη φέρουσα του σήματος. Χρησιμοποιείται σε σημεία που θέλουμε να αποκλείσουμε κάποια ανεπιθύμητα μήκη κύματος.

 **Εξασθενητής (VOA):** Χρησιμοποιείται για να μειώσει την οπτική ισχύ του σήματος. Μεγάλη ισχύς μπορεί να έχει καταστροφικά αποτελέσματα σε κάποιες διατάξεις.

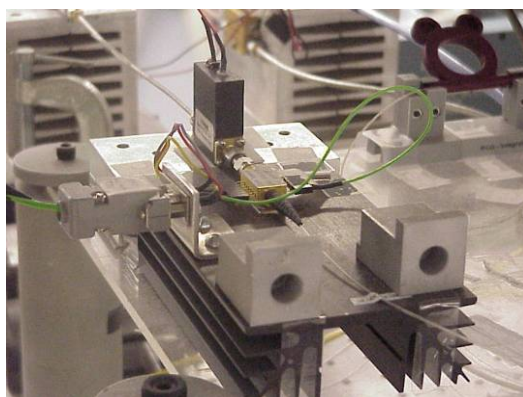
 **Απομονωτής (isolator):** Επιτρέπει τη διέλευση του φωτός μόνο προς μία κατεύθυνση. Η λειτουργία του στηρίζεται στη στροφή Faraday, δηλαδή τη μεταβολή της πολωτικής κατάστασης ενός κύματος όταν αυτό διαδίδεται σε κατάλληλο υλικό. Το φως πρώτα περνάει από έναν πολωτή, και στη συνέχεια αφού διαδοθεί στο υλικό, η πόλωσή του στρέφεται κατά 45°. Αν ξαναδιαδοθεί με την αντίθετη κατεύθυνση, τότε στρέφεται άλλες 45° προς την ίδια φορά, οπότε συναντά κάθετα τον πολωτή και δεν μπορεί να τον διαπεράσει.

 **Συζεύκτης (coupler).** Πρόκειται για παθητικά στοιχεία που μετάνουν με διάφορους τρόπους την ισχύ που τους εισάγεται. Έχουν τέσσερις θύρες και η ισχύς που εισέρχεται από τη μία θύρα εξέρχεται από δύο άλλες σε συγκεκριμένο ποσοστό, που είναι χαρακτηριστικό του κάθε συζεύκτη.

4.6 Παραγωγή των σημάτων

Η πρώτη μονάδα του κυκλώματος διαχωρισμού επικεφαλίδας/φορτίου συγκροτεί την γεννήτρια των οπτικών πακέτων. Αυτή αποτελείται από μια σειρά στοιχείων και διατάξεων, που σχετίζονται με την πηγή οπτικών και ηλεκτρικών σημάτων και τη διαδικασία της διαμόρφωσης που απαιτείται για τη δημιουργία των πακέτων.

4.6.1 Παραγωγή Παλμών με Δίοδο Laser DFB



Σχήμα 4.6: Απεικόνιση DFB Laser

Για την παραγωγή της παλμοσειράς εισόδου χρησιμοποιήσαμε μία δίοδο laser καταμεμημένης ανάδρασης (Distributed Feedback Semiconductor Diode – DFB). Η δίοδος αυτή εκπέμπει σε μήκος κύματος 1553 nm και για να παράγει παλμούς λειτουργεί με τη μέθοδο της διαμόρφωσης απολαβής (Gain Switching). Η τεχνική αυτή συνίσταται στην υπέρθεση ενός RF ημιτονικού σήματος στο DC ρεύμα τροφοδοσίας της δίοδου. Το DC ρεύμα ρυθμίζεται έτσι ώστε να πολώνει τη δίοδο στη στάθμη έναρξης εκπομπής της σύμφωνης ακτινοβολίας (lasing threshold). Ο ρόλος του ημιτονικού σήματος είναι η αυξομείωση του συνολικού ρεύματος γύρω από το κατώφλι αυτό, με αποτέλεσμα η δίοδος να μην εκπέμπει όταν βρίσκεται κάτω από αυτό. Λόγω της μη γραμμικής χαρακτηριστικής της δίοδου, η ημιτονική μεταβολή του ρεύματος τροφοδοσίας διαμορφώνει την περιβάλλουσα της οπτικής ακτινοβολίας σε παλμούς Gauss με περίοδο ίση με εκείνη του RF σήματος. Το σήμα RF που χρησιμοποιήθηκε είχε συχνότητα 10.025 GHz λόγω περιορισμών στα χαρακτηριστικά της δίοδου. Οι παλμοί που παρήχθησαν στη συχνότητα αυτή πέρασαν από έναν τετραπλασιαστή συχνότητας, ώστε να επιτευχθεί ο επιθυμητός ρυθμός μετάδοσης. Η τιμή του DC ρεύματος ήταν 50 mA ενώ η ισχύς του RF ήταν 2,5 dBm.

Η υπέρθεση των δύο σημάτων DC και RF στη δίοδο γίνεται με τη βοήθεια του Bias-T. Πρόκειται για ένα στοιχείο με δύο εισόδους και μία έξοδο, το οποίο με τη βοήθεια ενός πηνίου αποκόπτει ενδεχόμενη RF συνιστώσα από το τροφοδοτικό ενώ

με χρήση ενός πυκνωτή απορρίπτει ενδεχόμενη DC συνιστώσα από την RF γεννήτρια. Επίσης, στην έξοδο της γεννήτριας έχει τοποθετηθεί ένας απομονωτής για την προστασία της διόδου. Η τοποθέτησή του εκεί είναι επιβεβλημένη, γιατί οποιαδήποτε ανεπιθύμητη ανάκλαση από τη διάταξη διαδοθεί στο εσωτερικό της διόδου μπορεί να την οδηγήσει σε ανεξέλεγκτες ταλαντώσεις με αποτέλεσμα την καταστροφή της.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η διόδος DFB πρέπει απαραίτητα να συνδέεται με έναν ελεγκτή θερμοκρασίας, για την απαγωγή της θερμότητας που αναπτύσσεται επάνω της μέσω του φαινομένου Peltie. Έτσι ρυθμίζουμε τη θερμοκρασία στους 20°C, διότι αν ξεπεραστεί αυτό το επίπεδο αφενός αυξάνεται το ρεύμα κατωφλίου της διόδου, αφετέρου προκαλείται πρόωρη γήρανσή της.

Ωστόσο, η διόδος DFB δεν μπορεί από μόνη της να ανταποκριθεί στη ζήτηση για στενούς οπτικούς παλμούς που υπαγορεύεται από τις υψηλές ταχύτητες λειτουργίας των οπτικών διατάξεων. Πράγματι για τέτοιες εφαρμογές απαιτούνται αρκετά στενοί οπτικοί παλμοί, ενώ μία διόδος laser παράγει παλμούς με μεγαλύτερο εύρος. Για το λόγο αυτό στο κύκλωμα χρησιμοποιείται ένα DCF, η οποία έχει την ιδιότητα να παρουσιάζει αρνητική διασπορά στο μήκος κύματος λειτουργίας της διόδου, επιτυγχάνοντας έτσι τη συμπίεση των παλμών.

4.6.2 Διαμόρφωση Σήματος Από Ακολουθία PRBS



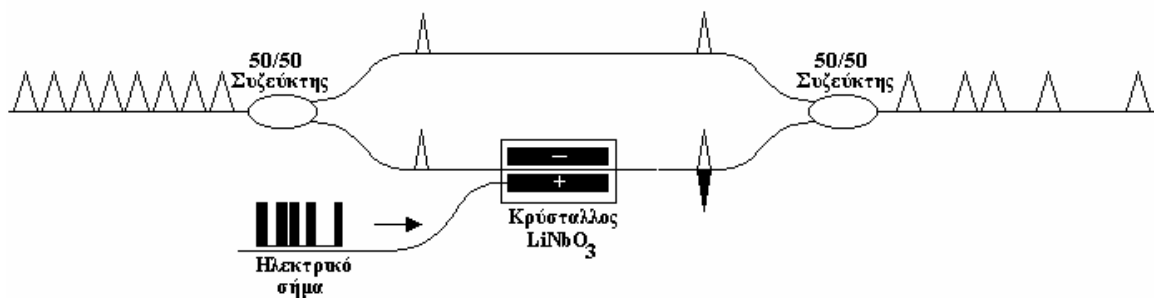
Σχήμα 4.7 : Απεικόνιση διαμορφωτή

Μετά την DCF ένα, έχουμε κατασκευάσει μία παλμοσειρά στα 10.025 GHz, δηλαδή μία απλή ακολουθία από άσσους. Επιθυμούμε πάνω στο σήμα αυτό να 'γράψουμε' μία συγκεκριμένη ακολουθία από bits, έτσι ώστε το αποτέλεσμα να προσομοιάζει ένα τυχαίο πακέτο πληροφορίας. Η λειτουργία αυτή μπορεί να επιτελεστεί με τη βοήθεια του ηλεκτροοπτικού διαμορφωτή.

Ο ηλεκτροοπτικός διαμορφωτής είναι ένα στοιχείο κατασκευασμένο από έναν κρύσταλλο Ti:LiNbO_3 . Το υλικό αυτό έχει την ιδιότητα να μεταβάλλει τη φάση του φωτός που το διατρέχει ανάλογα με την ηλεκτρική τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του.

Η λειτουργία του ηλεκτροοπτικού διαμορφωτή βασίζεται στο φαινόμενο της συμβολής. Συγκεκριμένα, το φως εισάγεται πρώτα σε έναν συζεύκτη 50/50, όπου χωρίζεται σε δύο ίσες συνιστώσες. Το στοιχείο Ti:LiNbO_3 τοποθετείται στον ένα κλάδο του συμβολομέτρου.

Ανάλογα με την τάση που εφαρμόζεται στο στοιχείο, είναι δυνατό να ρυθμιστεί η στροφή φάσης που θα υποστεί η αντίστοιχη συνιστώσα του φωτός. Συνεπώς μπορούμε για κάποια τιμή της τάσης να προκαλέσουμε είτε προσθετική συμβολή των δύο συνιστωσών (το σήμα εισόδου παρουσιάζεται και στην έξοδο) στον δεξιό συζεύκτη (σχήμα 4.8), είτε αναιρετική (στην έξοδο παρουσιάζονται λογικά '0').



Σχήμα 4.8 : Ηλεκτροοπτικός Διαμορφωτής

Με τη διαδικασία που περιγράψαμε παραπάνω μπορούμε να 'γράψουμε' τα μηδενικά μίας οποιασδήποτε ακολουθίας από bits πάνω στην αρχική παλμοσειρά. Στην πειραματική διάταξη σαν είσοδος επελέγη μία Ψευδο-Τυχαία Ακολουθία (Pseudo-Random Bit Sequence – PRBS) 2^7-1 που παρήχθη από κατάλληλο όργανο PRBS Generator. Έτσι καταφέραμε να κατασκευάσουμε ένα οπτικό σήμα PRBS στα 10.025 GHz, το οποίο στη συνέχεια ενισχύθηκε από έναν ενισχυτή EDFA.

4.6.3 Τελική διαμόρφωση του σήματος εισόδου

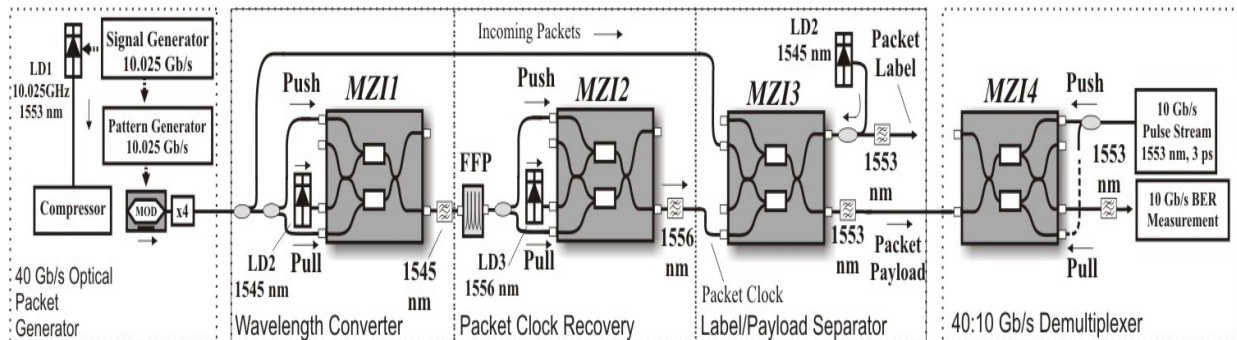
Όπως έχει ήδη περιγραφεί παραπάνω, η διόδος laser δημιούργησε μια ακολουθία παλμών Gauss με συχνότητα 10.025 GHz, τους οποίους στη συνέχεια καταφέραμε να συμπίεσουμε με τη χρήση ίνας DCF. Το οπτικό σήμα μας, αφού ενισχυθεί από τον EDFA περνά μέσα από ένα συμπιεστή (*compressor* - *συμβάλλει στην περαιτέρω συμπίεση των παλμών - το εύρος των παλμών μετά τη συμπίεση*

μετρήθηκε στα 3 psec) και φτάνει στον πρώτο ηλεκτρο-οπτικό διαμορφωτή, ο οποίος μετατρέπει την ακολουθία άσπων σε μία ψευδοτυχαία ακολουθία (10 Gb/s) από δυφία δεδομένων (PRBS 2^7-1) με τη διαδικασία που αναλύσαμε σε προηγούμενη ενότητα.

Μετά την έξοδο του από το διαμορφωτή, το σήμα ενισχύεται και οδηγείται σε έναν δεύτερο διαμορφωτή ο οποίος έχει στόχο τη μείωση του φαινομένου ασυμφωνίας φάσης μεταξύ διαδοχικών παλμών. Συγκεκριμένα, το DFB laser που χρησιμοποιήθηκε έχει βρεθεί ότι μπορεί να παράγει μια πεπερασμένη ακολουθία παλμών που βρίσκονται σε συμφωνία φάσης. Η διάρκεια για την οποία το laser μπορεί να δίνει απόλυτα συμφασικούς παλμούς λέγεται *coherence length*. Το συγκεκριμένο laser είχε coherence length που αντιστοιχεί σε 10 διαδοχικούς συμφασικούς παλμούς. Δεδομένου τώρα ότι τα άκρα των παλμών Gauss μειώνονται εκθετικά (*τείνουν ασυμπτωτικά στο μηδέν*), είναι δυνατή η επικάλυψη ενός παλμού από το γειτονικό του, ο οποίος να παρουσιάζει ασυμφωνία φάσης. Το γεγονός αυτό μπορεί να επιφέρει την παραμόρφωση της κορυφής των παλμών, λόγω της τυχαίας συμβολής των σημάτων. Ο ρόλος του διαμορφωτή είναι η καταπίεση των άκρων των παλμών Gauss ώστε να αποφευχθεί κατά το δυνατόν το φαινόμενο της τυχαίας συμβολής.

Η έξοδος του δεύτερου διαμορφωτή, φτάνει σε έναν συζεύκτη 90/10, ο οποίος οδηγεί το 90% της ισχύος του σήματος (το 10% χρησιμεύει σαν monitor) σε έναν τετραπλασιαστή συχνότητας. Με το πέρασμα από τον τετραπλασιαστή, το σήμα έρχεται στην επιθυμητή συχνότητα των 40,1 Gbps. Κατόπιν το σήμα ενισχύεται και φτάνει στον τρίτο διαμορφωτή ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη μετατροπή του σήματος σε πακέτα δεδομένων. Αυτό το επιτυγχάνει λόγω του γεγονότος ότι οδηγείται από μία γεννήτρια τετραγωνικών παλμών με περίοδο πολύ μεγαλύτερη από την περίοδο λειτουργίας του κυκλώματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργούνται πακέτα δεδομένων στα σημεία όπου οι παλμοί αυτοί είναι σε λογικό '1', ενώ δεν έχουμε δεδομένα όταν αυτοί είναι σε λογικό '0'. Μεταβάλλοντας τα χαρακτηριστικά των τετραγωνικών παλμών, είναι δυνατό να πάρουμε διαφορετικά μήκη πακέτων σε διαφορετικά χρονικά σημεία της ακολουθίας.

4.7 Εκτέλεση πειράματος



Σχήμα 4.9: Πειραματική διάταξη του κυκλώματος διαχωρισμού επικεφαλίδας/φορτίου στα 40 Gb/s και ενός 40:10 Gb/s αποπολυπλέκτη με τη χρήση υβριδικά ολοκληρωμένου MZI τεσσάρων στοιχείων (4 elements hybrid integrated MZI).

Σε αυτή την παράγραφο επιχειρείται μία συγκεντρωτική περιγραφή όλων των σταδίων του πειράματος από την αρχή μέχρι το τέλος της εκτέλεσής του. Θα αναφερθούν συνοπτικά η δομή, παράμετροι και τιμές, αρχή λειτουργίας, για όλα τα στάδια με διαδοχικό τρόπο (από τη δημιουργία των πακέτων δεδομένων μέχρι τη λήψη των τελικών μετρήσεων).

Μία διόδος λέιζερ DFB, που εκπέμπει σε μήκος κύματος 1553 nm, παράγει παλμούς πλάτους 7 ps στα 10.025 Gb/s μετά από γραμμική συμπίεση. Η παραγόμενη παλμοσειρά οδηγήθηκε σε μία μη γραμμική ίνα παλμικής συμπίεσης, για να μειωθεί το πλάτος των παλμών της σε 3 ps. Μετά την έξοδο από το συμπιεστή, πέρασε διαμέσου ενός Ti:LiNbO_3 ηλεκτροοπτικού διαμορφωτή, η διαμόρφωση του οποίου καθορίστηκε από την είσοδο μίας γεννήτριας πακέτων στα 10.025 Gb/s, και κατόπιν πολυπλέχτηκε στα 40,1 Gb/s, ούτως ώστε να λάβει τη μορφή πακέτων πληροφορίας που περιέχουν ψευδοτυχαία ακολουθία 2^7-1 PRBS. Η έξοδος από τον πολυπλέκτη χωρίστηκε σε δύο ίσα μέρη με το ένα να οδηγείται ως σήμα ελέγχου στη μονάδα μετατροπής μήκους κύματος και κατόπιν στο κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού, ενώ το άλλο μέρος εισήχθη ως σήμα εισόδου στη μονάδα διαχωρισμού επικεφαλίδας/φορτίου.

Η πρώτη υπομονάδα του κυκλώματος (wavelength conversion) χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να οριστούν οι, τοπικά ελεγχόμενες, παράμετροι σήματος για το μήκος κύματος, τη φάση του φέροντος και τη στάθμη ισχύος στο εισερχόμενο σήμα. Αποτελείται από το συμβολόμετρο *MZI1* που λειτουργεί ως μετατροπέας μήκους κύματος με την χρήση της push-pull αρχιτεκτονικής, και παρέχει στην έξοδό του ένα σήμα δεδομένων στα 40 Gb/s, σε μήκος κύματος 1545 nm και με πλάτος παλμού 7 ps. Στη συνέχεια, το σήμα εξόδου του *MZI1*, με το κατάλληλα τροποποιημένο μήκος κύματος, αφότου ενισχύθηκε, εισήχθη στο

κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού (CR – Clock Recovery), για να επιτευχθεί η αμιγώς οπτική εξαγωγή της κατάλληλης παλμικής χρονικής συνάρτησης. Το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού συγκροτείται από ένα φίλτρο Fabry-Perot (FFP) με χαμηλό συντελεστή Q, με ελεύθερη φασματική περιοχή (FSR) ίση με τη βασική συχνότητα – line rate (40.1 GHz) και με λεπτότητα (Finesse) ίση με την τιμή 27. Το φίλτρο FFP ακολουθείται από το συμβολόμετρο *MZI2*, το οποίο ενισχύεται από ένα CW (continuous wave) σήμα μήκους κύματος 1556 nm, προερχόμενο από την πηγή LD2 (σχήμα 4.9). Το φίλτρο FFP μετασχημάτισε κάθε πακέτο δεδομένων σε ένα σήμα ρολογιού με διάρκεια παρόμοια με αυτή του αντίστοιχου πακέτου εισόδου, προσδίδοντάς του ταυτόχρονα και έντονη διαμόρφωση πλάτους. Το εξερχόμενο σήμα, που προσομοιάζει σε σήμα ρολογιού εισάγεται στον οπτικό διακόπτη του CR κυκλώματος (*MZI2*), ο οποίος και θα λειτουργήσει ως κύκλωμα ψαλιδισμού, παράγοντας μία σειρά πακέτων ρολογιού, εξισωμένων στο πεδίο της ισχύος. Το συμβολόμετρο *MZI2* χρησιμοποιήθηκε με χρήση της push-pull αρχιτεκτονικής για να μειώσει το παράθυρο μεταγωγής του και να παρέχει παλμούς ρολογιού των 8 ps.

Η διαδικασία εξαγωγής της επικεφαλίδας από το φορτίο του πακέτου πληροφορίας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του συμβολόμετρου *MZI3*, που προετοιμάστηκε για να εκτελέσει τη λειτουργία AND (λογική πράξη ΚΑΙ) μεταξύ του αρχικού πακέτου και μίας χρονικά καθυστερημένης εκδοχής του αντίστοιχου ανακτημένου πακέτου ρολογιού. Ο επιτυχής διαχωρισμός επικεφαλίδας/φορτίου υλοποιείται μέσω της καθυστέρησης του πακέτου ρολογιού για ένα χρονικό διάστημα που αντιστοιχεί στο μέγεθος της επικεφαλίδας του αρχικού πακέτου πληροφορίας. Κατ' αυτό τον τρόπο, μόνο τα bits που αποτελούν το φορτίο του πακέτου πληροφορίας συμπίπτουν χρονικά στο παράθυρο μεταγωγής με τα αντίστοιχα bits του πακέτου ρολογιού, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται στη θύρα μεταγωγής (S) - (Switched port) του συμβολόμετρου *MZI*, ενώ τα bits της επικεφαλίδας να εμφανίζονται στη θύρα μη μεταγωγής (U) - (Unswitched port). Αυτή η διαδικασία απαιτεί τη χρήση συγκεκριμένων περιοχών ασφαλείας (guardband bits) στα αρχικά πακέτα πληροφορίας. Ο λόγος αντίθεσης (extinction ratio) στην έξοδο του *MZI3* βελτιώθηκε με την χρήση ενός cw σήματος στα 1545 nm με αντίθετη φορά διέλευσης από το *MZI*, ισχύος -14.5 dBm, που εξασφαλίστηκε από την πηγή LD2 (σχήμα 4.9).

Στο τελευταίο στάδιο ελήφθησαν μετρήσεις bit error rate (BER), αφού προηγουμένως συντελέστηκε αποπολυπλεξία των 40 Gb/s φορτίων των πακέτων σε 10 Gb/s ακολουθίες δεδομένων, χρησιμοποιώντας το συμβολόμετρο *MZI4* ως αποπολυπλέκτη. Το συμβολόμετρο *MZI4* χρησιμοποίησε την push-pull αρχιτεκτονική, με σήμα ελέγχου μία παλμοσειρά ρολογιού με περίοδο παλμών 3 ps και μήκος κύματος 1553 nm.

4.8 Αποτελέσματα και συμπεράσματα

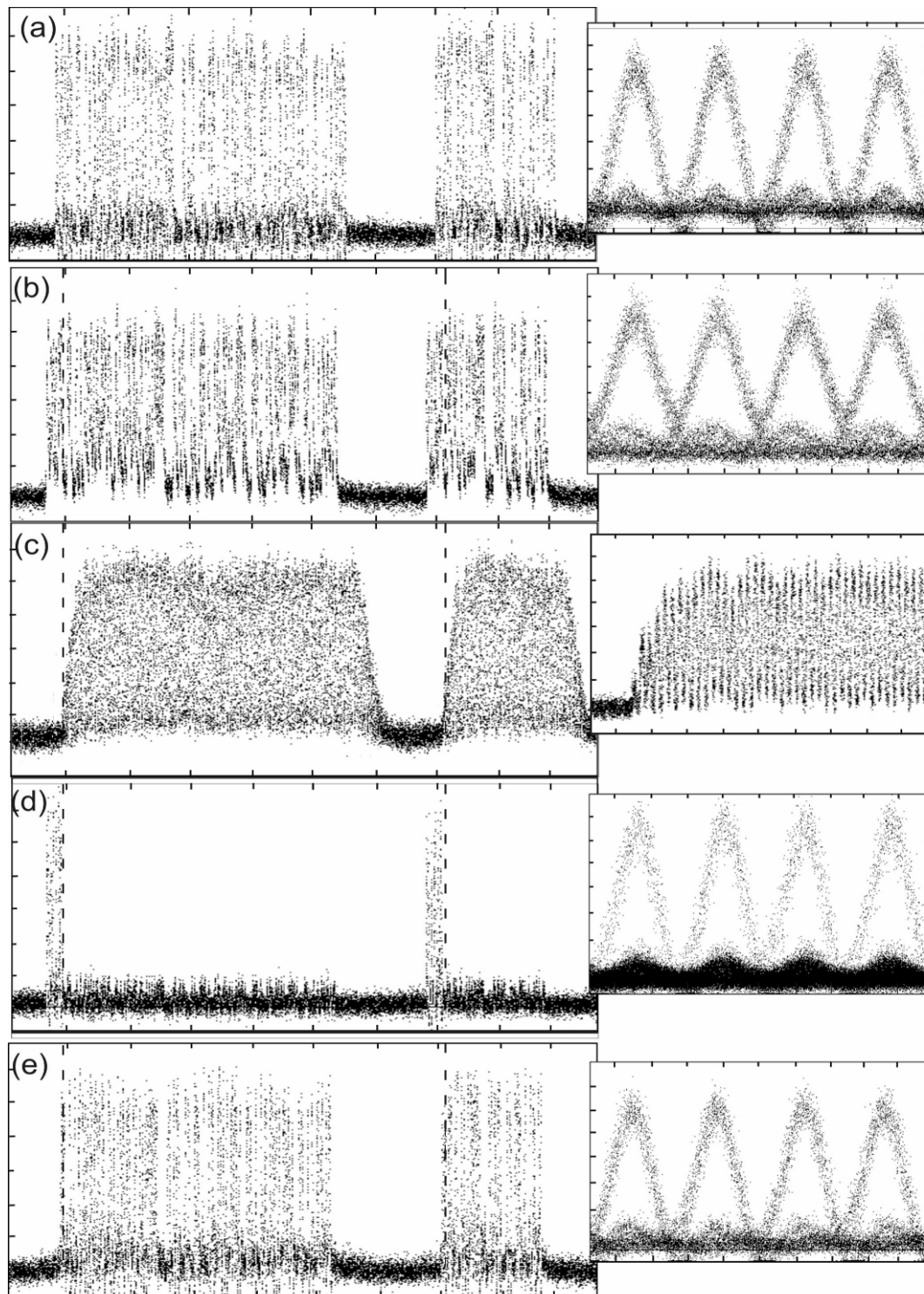
Στο σχήμα 4.10 φαίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα της διαδικασίας διαχωρισμού επικεφαλίδας/φορτίου μέσω των διαγραμμάτων trace και ματιού που ελήφθησαν σε κάθε στάδιο του κυκλώματος. Στο σχήμα 4.10(a) παρουσιάζονται δύο εισερχόμενα πακέτα πληροφορίας διαφορετικού χρονικού μήκους, ενώ στο σχήμα 4.10(b) παρουσιάζονται τα αντίστοιχα πακέτα στην έξοδο της πρώτης υπομονάδας του κυκλώματος *MZI1*, μετά τη μετατροπή του μήκους κύματος. Τα μήκη των εισερχόμενων πακέτων είναι 5 ns και 2.1 ns για την αριστερή και τη δεξιά μεριά του σχήματος αντίστοιχα, ενώ το χρονικό διάστημα μεταξύ τους είναι 1.5 ns. Στο σχήμα 4.10(c) αποτυπώνονται τα ανακτημένα πακέτα ρολογιού που λαμβάνονται στην έξοδο του σταδίου ανάκτησης ρολογιού. Τα ανακτημένα πακέτα ρολογιού εξασφαλίζουν την αναγκαιότητα για διάρκεια ίση με αυτήν των αντίστοιχων πακέτων πληροφορίας, αυξημένη κατά 5 bits στην αρχή τους και 14 bits στο τέλος τους. Όσον αφορά την πρώτη δέσμευση, αυτή αναφέρεται στον χρόνο που απαιτείται για το ανακτημένο πακέτο ρολογιού να 'κλειδώσει' το εισερχόμενο πακέτο, όπως εκτίθεται λεπτομερώς στο σχήμα 4.10(c). Η δεύτερη δέσμευση καθορίζει το χρόνο που απαιτείται από το CR (Clock Recovery) σήμα για να φτάσει το $1/e$ του FWHM μετά από κάθε πακέτο.

Τα σχήματα 4.10(d) και 4.10(e) παρουσιάζουν τα χωρισμένα, πλέον, φορτία και επικεφαλίδες των δύο πακέτων πληροφορίας, που λαμβάνονται στην έξοδο του *MZI3*. Τα ληφθέντα διαγράμματα ματιού αποδείχθηκαν πολύς καλής ποιότητας. Ο λόγος αντίθεσης (extinction ratio) για την εξαγόμενη επικεφαλίδα και το εξαγόμενο φορτίο ήταν 9 και 11 dB, αντίστοιχα. Ο πίνακας 1 συνοψίζει τις τιμές των ενεργειών μεταγωγής που απαιτούν οι 4 διακόπτες MZI του κυκλώματος.

TABLE I
POWER/ENERGY REQUIREMENTS OF MZI SWITCHES

MZI	Input	Control	
		Push	Pull (energy)
<i>MZI1</i> (WC)	7.4 dBm (CW)	61 fJ	15 fJ
<i>MZI2</i> (CR)	0 dBm (CW)	700 fJ	300 fJ
<i>MZI3</i> (AND)	7 fJ (pulse energy)	37 fJ	
<i>MZI4</i> (DEMUX)	3 fJ (pulse energy)	14 fJ	3 fJ

Πίνακας 1: Τιμές των ενεργειών μεταγωγής για τους διακόπτες *MZI1*, *MZI2*, *MZI3*, *MZI4*



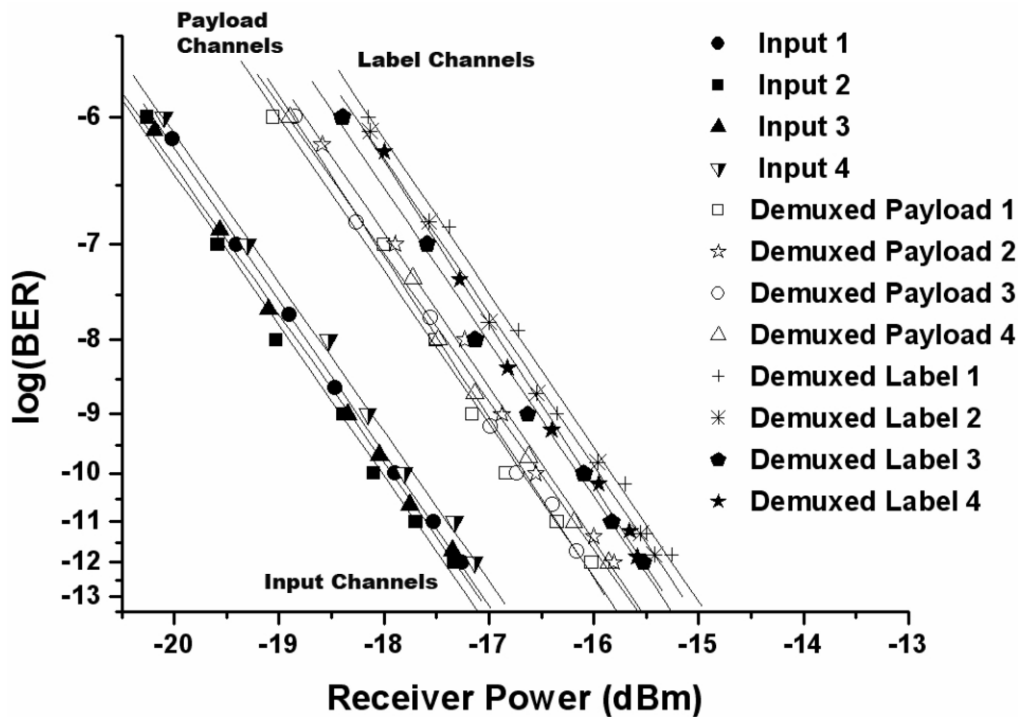
Σχήμα 4.10: Διαγράμματα παλμοσειράς και ματιού (a) των εισερχόμενων αρχικών πακέτων δεδομένων, (b) των πακέτων αφού έχουν υποστεί μετατροπή μήκους κύματος (c) τα ανακτημένα πακέτα ρολογιού και ο χρόνος ανύψωσής τους (d) οι εξαγόμενες επικεφαλίδες (e) τα εξαγόμενα φορτία. Οι κλίμακες του παλμογράφου είναι: 1 ns/div για τα traces, 200ps/div για τα trace του χρόνου ανύψωσης του ρολογιού και 10 ps/div για τα διαγράμματα ματιού.

Για την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων, όσον αφορά την αξιοπιστία του κυκλώματος, στο τελευταίο στάδιο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ρυθμού σφαλμάτων (BER). Η μέτρηση αυτή έγινε με τη βοήθεια μίας συσκευής που ονομάζεται μετρητής ρυθμού σφαλμάτων (*BERT- Bit Error Rate Tester*) και εικονίζεται στο σχήμα 4.11. Οι μετρήσεις BER έγιναν και για τα τέσσερα κανάλια στην είσοδο και την έξοδο του κυκλώματος σε ρυθμό 10 Gb/s. Στην έξοδο που χρειάστηκε αποπολυπλεξία των πακέτων χρησιμοποιήθηκε το τέταρτο συμβολόμετρο του ολοκληρωμένου *MZI4*, ως 40:10 Gb/s αποπολυπλέκτης, όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα.



Σχήμα 4.11: Μετρητής ρυθμού σφαλμάτων.

Στο σχήμα 4.12 παρουσιάζονται οι μετρήσεις του BER (bit error rate), που ελήφθησαν για τα τέσσερα κανάλια φορτίων και επικεφαλίδων των 10 Gb/s στην είσοδο και την έξοδο του κυκλώματος. Η λειτουργία χωρίς σφάλματα λήφθηκε και για τα 4 DEMUX κανάλια τόσο για το σήμα εισόδου όσο και για τις εξαγόμενες επικεφαλίδες και τα εναπομείναντα φορτία.



Σχήμα 4.12: Γραφική παράσταση ρυθμών σφαλμάτων των εξόδων του συστήματος συσχετιζόμενα με το εισερχόμενο σήμα.

Το ενεργειακό σφάλμα προκειμένου να λειτουργεί το σύστημα χωρίς λάθη είναι 1.6 dBm για την εξαγχθείσα επικεφαλίδα και 1.4 dBm για το φορτίο. Ο λόγος που υφίσταται ενεργειακό σφάλμα και στις δυο περιπτώσεις είναι τόσο στην ύπαρξη θορύβου στο σήμα κατά την διέλευση του μέσα από το σύστημα μας όσο και στην μη βέλτιστη λειτουργία της τελευταίας πύλης, σε ότι αφορά τον διαχωρισμό του φορτίου από την επικεφαλίδα. Ο θόρυβος που προστίθεται στο σύστημα προέρχεται από τους ενισχυτές που υπάρχουν είτε είναι SOAs είτε EDFAs.

Αν και το κύκλωμα του πειράματος μελετήθηκε με 2^7-1 ακολουθία PRBS, θα μπορούσε σε γενικές γραμμές να λειτουργήσει και με υψηλότερης τάξης ακολουθίες PRBS με κόστος, όμως, την αύξηση ζωνών ασφαλείας (guardbands) μεταξύ των πακέτων, με δεδομένο ότι ένα φίλτρο FFP με υψηλότερη λεπτότητα (finesse) θα ήταν αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί. Μια υψηλότερης τάξης PRBS περιέχει μακρύτερες ακολουθίες συνεχόμενων μηδενικών, οι οποίες απαιτούν φίλτρο αυξημένης μνήμης, και επομένως μεγαλύτερης λεπτότητας. Το κύκλωμα εξαγωγής επικεφαλίδας, που περιγράφηκε και μελετήθηκε πειραματικά, μπορεί να χειριστεί πακέτα μεταβλητού μήκους καθώς και πακέτα οποιουδήποτε μεγέθους. Προϋποθέτει, όμως, επικεφαλίδες με σταθερό μήκος και όχι μεταβλητό. Το μήκος των επικεφαλίδων καθορίζεται από τη σταθερή καθυστέρηση μεταξύ του πακέτου και του ανακτημένου πακέτου ρολογιού, και το μέγεθός τους δεν έχει επιπτώσεις στην πολυπλοκότητα του κυκλώματος.

Εν κατακλείδι, και με βάση τα εξαγόμενα αποτελέσματα, μπορούμε να πούμε ότι η συγκεκριμένη πρόταση και υλοποίηση ενός κυκλώματος αμιγούς οπτικής εξαγωγής επικεφαλίδας εκμεταλλεύεται πλήρως τα χαρακτηριστικά της γρήγορης ανάκτησης ρολογιού. Η δυνατότητα λειτουργίας του με μικρού μεγέθους οπτικά πακέτα, και με μοναδική είσοδο αυτή του σήματος των πακέτων δεδομένων, καθώς και οι μικρές απαιτήσεις του κυκλώματος σε προστατευτικές ζώνες δυφίων, αποτελούν τα χαρακτηριστικά αυτά. Η απλότητα στην υλοποίησή του (χρειάζεται μόνο ένα φίλτρο Fabry-Perot και τέσσερις οπτικές συμβολομετρικές πύλες), καθώς και η ανεξαρτησία της πολυπλοκότητάς του σε σχέση με ενδεχόμενη μεταβολή του μεγέθους της επικεφαλίδας, είναι μερικά επιπλέον πλεονεκτήματα του κυκλώματος.

Στα πλεονεκτήματα της τεχνικής συγκαταλέγεται, επίσης, η δυνατότητα του κυκλώματος να ανταποκρίνεται ακόμα και σε ασύγχρονες ροές πακέτων δεδομένων μεταβλητού μεγέθους φορτίου, η οποία είναι αποτέλεσμα της αντίστοιχης δυνατότητας του κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού. Η τελευταία ιδιότητα το καθιστά ιδανική λύση για οπτικά δίκτυα, που χρησιμοποιούν πακέτα μεταβλητού μεγέθους, όπως είναι, για παράδειγμα, τα δίκτυα IP, στα οποία το μέγεθος των πακέτων μπορεί να κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες ως μερικές χιλιάδες δυφία. Σημαντικό όφελος από τη λειτουργία του προτεινόμενου κυκλώματος μπορούν να αποκομίσουν, επίσης, τα οπτικά δίκτυα μεταγωγής ετικέτας, στα οποία η οπτική ετικέτα κάθε πακέτου είναι σημαντικά μικρότερη σε μέγεθος από την επικεφαλίδα και φέρει την πληροφορία για τον προορισμό του πακέτου δεδομένων μέσα σε ένα μικρότερης έκτασης τμήμα του δικτύου. Η αποδεδειγμένη ικανότητα του φίλτρου Fabry-Perot και των οπτικών πυλών MZI για λειτουργία τους σε ρυθμούς μετάδοσης μέχρι και 100 Gb/s υποδεικνύουν τη δυναμική της προτεινόμενης τεχνικής διαχωρισμού επικεφαλίδας/φορτίου για λειτουργία της σε ταχύτητες μεγαλύτερες των 40 Gb/s. Επίσης, το κύκλωμα υλοποιείται με χρήση ολοκληρωμένων διακοπών Mach-Zehnder, προσδίδοντας, στη συγκεκριμένη τεχνική, την προοπτική για εφαρμογή της σε ευρύτερο συστημικό περιβάλλον με περισσότερες λειτουργικές διαδικασίες, όπως είναι, για παράδειγμα, οι οπτικοί κόμβοι μεταγωγής πακέτων. Όπως περιγράφηκε και στο κεφάλαιο 2, το προτεινόμενο κύκλωμα αμιγώς οπτικής εξαγωγής πακέτων μπορεί να οδηγήσει σε μια ολοκληρωμένη και αποδοτική λύση ως υποσύστημα ενός AOLS κόμβου, που θα είναι σε θέση να παραγάγει ένα ανακτημένο σήμα ρολογιού και να διαχωρίζει την επικεφαλίδα από το φορτίο οπτικού πακέτου πληροφορίας.

Ο επιτυχής πειραματικός χαρακτηρισμός του κυκλώματος διαχωρισμού επικεφαλίδας/φορτίου προσφέρει νέα ώθηση στις ερευνητικές προσπάθειες υλοποίησης αμιγώς οπτικών δικτύων μεταγωγής πακέτων, καθώς καθίσταται γεγονός, πλέον, η υλοποίηση ενός βασικού τμήματος κάθε κόμβου σε τέτοιου είδους δίκτυα. Επίσης, το κύκλωμα εξαγωγής επικεφαλίδας είναι το πρώτο, το οποίο λειτούργησε με

χρήση τεσσάρων υβριδικά ολοκληρωμένων οπτικών διακοπών τύπου MZI, αποδεικνύοντας τη δυνατότητα λειτουργίας αυτών των πυλών σε διαδοχικά λειτουργικά στάδια και μάλιστα σε ενιαίες συσκευές ολοκλήρωσης, διευρύνοντας τους ορίζοντες των εφαρμογών των οπτικών κυκλωμάτων επεξεργασίας σήματος. Έμπρακτη απόδειξη των προηγούμενων αποτελεί η εφαρμογή της προτεινόμενης τεχνικής εξαγωγής της επικεφαλίδας για την εξαγωγή της παλιάς επικεφαλίδας και την ταυτόχρονη εισαγωγή της νέας διεύθυνσης του πακέτου, απαιτώντας μόνο μικρές τροποποιήσεις στη συνδεσμολογία του κυκλώματος που παρουσιάσαμε.

Αναφορές

- [1] Η. Αβραμόπουλου, "Φωτονική τεχνολογία για Τηλεπικοινωνίες", Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- [2] P. E. Green, Jr., "Fiber optic networks", Prentice-Hall Inc., NJ, Μετάφραση Κ. Καρούμπαλος, Ed. Α. Παπασωτηρίου & ΣΙΑ Ο. Ε., 1993.
- [3] Πλέρος, διδακτορική διατριβή «Ψηφιακά Συστήματα Υπερυψηλών Ταχυτήτων για Οπτικά Δίκτυα Μεταγωγής Πακέτων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Απρίλιος 2004.
- [4] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, "Optical networks: A practical perspective", Academic Press Inc., NY, 2nd Ed., 2002.
- [5] R. W. Smith, "Broadband Internet connections: A user's guide to DSL and cable", Addison-Wesley Pub Co., 1st Edition, 2002.
- [6] G. P. Agrawal, "Fiber-Optic Communication Systems", 2nd Ed., John Wiley & Sons Inc., NY, 1997.
- [7] I. P. Kaminow and T. L. Koch, "Optical fiber telecommunications IIIB", Academic Press Inc., NY, 1997.
- [8] Shun Yao et al., "All-optical packet switching for Metropolitan Area Networks: Opportunities and Challenges", IEEE Commun. Mag., Mar. 2001, pp. 142-148.
- [9] O. Kyas and G. Crawford, "ATM networks", Prentice Hall PTR, 1st Ed., 2002.
- [10] E. Rosen, A. Viswanathan, and R. Callon, "RFC 3031: Multiprotocol label switching architecture," *IETF Request of Comments*, 2001.
- [11] M. J. O' Mahony, "Optical multiplexing in fiber networks: Progress in WDM and OTDM", IEEE Commun. Mag., vol. 33, No. 12, pp. 82-88, 1995.
- [12] P. V. Hatton and F. C. Cheston, III, "WDM deployment in the local exchange network", IEEE Commun. Mag., vol. 36, No. 2, pp. 56-61, 1998.
- [13] S. Kawanishi, "Ultrahigh-speed optical time-division multiplexed transmission technology based on optical signal processing", IEEE J. Quantum Electron., vol. 34, No. 11, pp. 2064-2079, 1998.
- [14] D. M. Spirit, A. D. Ellis and P. E. Barnsley, "Optical time division multiplexing: systems and networks", IEEE Commun. Mag., vol. 32, No. 12, pp. 56-62, 1994.
- [15] D. Blumenthal et al., "All-Optical Label Swapping Networks and Technologies", J. of Lightwave Technology, Vol. 18, No. 12, pp. 2058-2075, Dec. 2000
- [16] J. Capmany et al., "Subcarrier multiplexed optical label swapping based on subcarrier multiplexing: a network paradigm for the implementation of optical

Internet", 5th International Conference on Transparent Optical Networks, 2003, Vol. 1, pp. 154-157, 29 June-3 July 2003

[17] M. Yoo and C. Qiao, "A novel switching paradigm for buffer-less WDM networks", Optical Fiber Communication Conference, 1999, and the International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication. OFC/IOOC '99, Vol. 3, pp. 177-179, Feb. 1999

[18] I. Baldine et al., "Just-in-time optical burst switching implementation in the atdnets all-optical networking testbed", IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '03) 2003, Vol. 5, pp. 2777-2781, Dec. 2003

[19] Chao Su, Lian-Kuan Chen, and Kwok-Wai Cheung, "Theory of Burst-Mode Receiver and Its Applications in Optical Multiaccess Networks", JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 15, NO. 4, APRIL 1997.

[20] F. Ramos, *Member, IEEE*, E. Kehayas, J. M. Martinez, R. Clavero, J. Marti, *Member, IEEE*, L. Stampoulidis, D. Tsiokos, H. Avramopoulos, J. Zhang, P. V. Holm-Nielsen, N. Chi, P. Jeppesen, *Member, IEEE*, N. Yan, I. Tafur Monroy, A. M. J. Koonen, M. T. Hill, Y. Liu, H. J. S. Dorren, *Member, IEEE*, R. Van Caenegem, D. Colle, *Member, IEEE*, M. Pickavet, *Member, IEEE*, and B. Ripoati, *Member, IEEE*, "IST-LASAGNE: Towards All-Optical Label Swapping Employing Optical Logic Gates and Optical Flip-Flops", JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 23, NO. 10, OCTOBER 2005 2993.

[21] K. G. Vlachos, I. T. Monroy, A. M. J. Koonen, C. Peucheret, and P. Jeppesen, "STOLAS: Switching technologies for optically labelled signals," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, no. 11, pp. 43-49, Nov. 2003.

[22] Y. Ueno, "All-optical signal processing for over 100 Gb/s optical-TDM networks," in *Lasers and Electro-Optics Society (LEOS) Annu. Meeting*, Tucson, AZ, Oct. 2003, pp. 380-381, TuY1.

[23] E. Kehayas, G. T. Kanellos, L. Stampoulidis, D. Tsiokos, N. Pleros, G. Guekos, and H. Avramopoulos, "Packet-format and network-traffic transparent optical signal processing," *J. Lightw. Technol.*, vol. 22, no. 11, pp. 2548-2556, Nov. 2004.

[24] L. Dittmann *et al.*, "The European IST project DAVID: A viable approach towards optical packet switching," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 21, no. 7, pp. 1026-1040, Sep. 2003.

[25] O. Moriwaki, T. Sakamoto, A. Okada, and M. Matsuoka, "Demonstration of optical label processing with timing pulse generator," *Electron. Lett.*, vol. 39, no. 9, pp. 730-731, May 2003.

- [26] C. Bintjas, N. Pleros, K. Yiannopoulos, G. Theophilopoulos, M. Kalyvas, H. Avramopoulos, and G. Guekos, "All-optical packet address and payload separation," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, no. 12, pp. 1728–1730, Dec. 2002.
- [27] J. M. Martinez, F. Ramos, J. Marti, J. Herrera, and R. Llorente, "All optical N-bit XOR gate with feedback for optical packet header processing," presented at the Eur. Conf. Optical Communication (ECOC), vol. 3, Copenhagen, Denmark, 2002, Paper P4.8.
- [28] H. J. S. Dorren, M. T. Hill, Y. Liu, N. Calabretta, A. Srivatsa, F. M. Huijskens, H. deWaardt, and G. D. Khoe, "Optical packet switching and buffering by using all-optical signal processing methods," *J. Lightw. Technol.*, vol. 21, no. 1, pp. 2–12, Jan. 2003.
- [29] C. Bintjas, K. Yiannopoulos, N. Pleros, G. Theophilopoulos, M. Kalyvas, H. Avramopoulos, and G. Guekos, "Clock recovery circuit for optical packets," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, no. 9, pp. 1363–1365, Sep. 2002.
- [30] J. Cheyns, J. Jennen, E. V. Breusegem, M. Pickavet, and P. Demeester, "Optical packet switches based on a single arrayed waveguide grating," in *Proc. IEEE Conf. High Performance Switching and Routing (HPSR)*, Torino, Italy, 2003, pp. 5–9, Paper 3872.
- [31] J. M. Martinez, F. Ramos, and J. Marti, "All-optical packet header processor based on cascaded SOA-MZIs," *Electron. Lett.*, vol. 40, no. 14, pp. 894–895, Jul. 2004.
- [32] T. Fjelde, D. Wolfson, A. Kloch, B. Dagens, A. Coquelin, I. Guillemot, F. Gaborit, F. Poingt, and M. Renaud, "Demonstration of 20 Gbit/s alloptical logic XOR in integrated SOA-based interferometric wavelength converter," *Electron. Lett.*, vol. 36, no. 22, pp. 1863–1864, Oct. 2000.
- [33] R. P. Webb, R. J. Manning, G. D. Maxwell, and A. J. Poustie, "40 Gbit/s all-optical XOR gate based on hybrid-integrated Mach–Zehnder interferometer," *Electron. Lett.*, vol. 39, no. 1, pp. 79–81, Jan. 2003.
- [34] M. T. Hill, H. de Waardt, G. D. Khoe, and H. J. S. Dorren, "All optical flip-flop based on coupled laser diodes," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 37, no. 3, pp. 405–413, Mar. 2001.
- [35], "Fast optical flip-flop by use of Mach–Zehnder interferometers," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 31, no. 6, pp. 414–415, 2001.
- [36] R. Clavero, F. Ramos, J. M. Martinez, and J. Marti, "All-optical flip-flop based on a single SOA-MZI," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 4, pp. 843–845, Apr. 2005.

- [37] Y. Liu, M. T. Hill, H. de Waardt, G. D. Khoe, D. Lenstra, and H. J. S. Dorren, "All-optical flip-flop memory based on two coupled polarization switches," *Electron. Lett.*, vol. 38, no. 16, pp. 904–906, Aug. 2002.
- [38] M. Takenaka and Y. Nakano, "Realization of all-optical flip-flop using directionally coupled bistable laser diode," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, no. 1, pp. 45–47, Jan. 2004.
- [39] M. T. Hill, H. J. S. Dorren, T. de Vries, X. J.M. Leijtens, J. H. den Besten, B. Smallbrugge, S. Oei, J. J. M. Binsma, G. D. Khoe, and M. K. Smit, "A fast low power optical memory based on coupled micro-ring lasers," *Nature*, vol. 432, no. 7014, pp. 206–209, 2004.
- [40] "IST-MUFINS, **M**ulti-**F**unctional **I**ntegrated Arrays of Interferometric **S**witches, D3.7 Report on the development of the 4-element MUFINS hybrid platforms at 40 Gb/s", 2006.
- [41] "RACTI – Clock and Data Recovery and Header Extraction circuits at 40 Gb/s".
- [42] P. Bakopoulos, D. Tsiokos, O. Zouraraki, H. Avramopoulos, G. Maxwell and A. Poustie, "Compact all-optical packet clock and data recovery circuit using generic integrated MZI swithes", 2005.
- [43] Π. Μπακόπουλος, Διπλωματική Εργασία, «Εξαγωγή και επανατοποθέτηση επικεφαλίδας οπτικών πακέτων πληροφορίας με αμιγώς οπτικό τρόπο», Ε.Μ.Π., Οκτώβριος 2003
- [44] Δ. Δημητρίου Διπλωματική Εργασία , «Αμιγώς οπτικό σύστημα εξίσωσης πακέτων για δέκτη εκρηκτικής ροής στα 40 Gb/s», Ε.Μ.Π., Μάιος 2006
- [45] 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. 2023-2026 Oct. 2006