



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**Ανάπτυξη Tb/s φωτονικών δρομολογητών με μικρο-
οπτικά κυκλώματα σε πυρίτιο.**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
του
ΧΡΗΣΤΟΥ Ι. ΣΤΑΜΑΤΙΑΔΗ**

Αθήνα, Φεβρουάριος 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

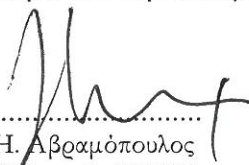
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

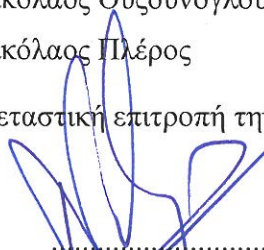
**Ανάπτυξη Tb/s φωτονικών δρομολογητών με μικρο-
οπτικά κυκλώματα σε πυρίτιο.**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΤΟΥ
ΧΡΗΣΤΟΥ Ι. ΣΤΑΜΑΤΙΑΔΗ

Συμβουλευτική Επιτροπή : Ηρακλής Αβραμόπουλος
Νικόλαος Ουζούνογλου
Νικόλαος Πλέρος

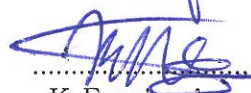
Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 9^η Φεβρουαρίου 2012.



.....
Η. Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.


.....
Ν. Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.


.....
Ν. Πλέρος
Λέκτορας Α.Π.Θ.


.....
Κ. Δέρβος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.


.....
Κ. Γιαννόπουλος
Λέκτορας Παν/μίου
Πελοποννήσου


.....
Ε. Βαρβαρίγος
Καθηγητής Παν/μίου Πατρών


.....
Α. Παναγόπουλος
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2012

.....

Χρήστος Ι. Σταματιάδης

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

Copyright © Χρήστος Ι. Σταματιάδης, 2012.

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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διατριβή επικεντρώνεται στην ανάπτυξη οπτικών συστημάτων υπερυψηλής ταχύτητας χρησιμοποιώντας μικρο-οπτικά κυκλώματα σε πυρίτιο. Τέσσερα συστήματα οπτικής επεξεργασίας αναπτύσσονται και αξιολογούνται για την εκτέλεση των ακόλουθων λειτουργιών δρομολόγησης. Η ανίχνευση επικεφαλίδας υλοποιείται με μικρο-οπτικούς συντονιστές δακτυλίου (MRRs) οι οποίοι χρησιμοποιούνται ως ρυθμιζόμενα φίλτρα υψηλής ανάλυσης. Η παραγωγή σημάτων ελέγχου επιτυγχάνεται με υβριδικά ολοκληρωμένους οπτικούς μανδαλωτές (Optical Flip-Flops) χρησιμοποιώντας συζευγμένα συμβολόμετρα Mach-Zehnder. Η μετατροπή μήκους κύματος σε ταχύτητες ρυθμοδότησης 160Gb/s υλοποιείται με ένα φωτονικό κύκλωμα σε πυρίτιο ενσωματώνοντας έναν ημιαγωγίμο οπτικό ενισχυτή (SOA) και δύο μονολιθικά ολοκληρωμένα συμβολόμετρα καθυστέρησης (DIs). Η δρομολόγηση των πακέτων πληροφορίας επιτυγχάνεται με συστοιχία φραγμάτων περίθλασης (AWGs) και με δομές συντονιστών δακτυλίου ανώτερης τάξης. Η επίλυση σύγκρουσης πακέτων υλοποιείται με ένα συμβολόμετρο Mach-Zehnder και δύο μετατροπείς μήκους κύματος (SOA-DI). Για την πειραματική επίδειξη των προηγούμενων φωτονικών διατάξεων, αναπτύσσεται ένα σύστημα αξιολόγησης υψίρρυθμων σημάτων εξυπηρετώντας ταχύτητες ρυθμοδότησης έως 160 Gb/s.

Λέξεις-Κλειδιά

Οπτικά δίκτυα, Αμιγώς οπτική επεξεργασία σήματος, Οπτική μεταγωγή πακέτων, Φωτονική δρομολόγηση, Αμιγώς οπτική μετατροπή μήκους κύματος, Εξαγωγή επικεφαλίδας πακέτου, Επίλυση σύγκρουσης πακέτων, Υβριδική φωτονική ολοκλήρωση, Οπτικοί μανδαλωτές, Ημιαγωγίμος οπτικός ενισχυτής, Μικρο-οπτικοί συντονιστές δακτυλίου, Συμβολόμετρα καθυστέρησης.

ABSTRACT

The thesis focuses on the development of high-speed all-optical systems using silicon photonic integrated components. Four independent processing units have been assembled and evaluated enabling the following routing functionalities. Label detection is performed with high-resolution silicon micro-ring resonators that operate as reconfigurable optical demultiplexers. Control signal generation is performed with hybrid integrated optical flip-flops using Mach-Zehnder interferometric structures. Wavelength conversion at bit rates up to 160Gb/s is assisted by a compact silicon photonic circuit that incorporates a flip-chip adapted semiconductor optical amplifier (SOA) and two monolithically integrated delay interferometers (DIs). Wavelength routing is performed by arrayed waveguide gratings (AWG) and higher order ring-resonator based cross-connects. Packet contention resolution is implemented by a Mach-Zehnder interferometric structure and two SOA-DI wavelength converters. For the experimental demonstration of the previous photonic circuits, a high-speed system testbed is assembled accommodating data rates up to 160Gb/s.

Keywords

Optical networks, All-optical signal processing, Optical packet switching (OPS), Photonic routing, All-optical wavelength conversion, Packet label detection, Contention resolution, Hybrid photonic integration, Optical flip-flops, Semiconductor optical amplifier, Micro-ring resonators, Delay interferometers

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Πέρασαν κιόλας τέσσερα ακριβώς χρόνια από τότε που φιλοξενούσα στο σπίτι μου έναν πολύ καλό μου φίλο ο οποίος είχε περάσει απο το Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών (ΕΦΕ) και μιλούσε με τα καλύτερα λόγια για τις ερευνητικές δραστηριότητες, το προσωπικό και τον εξοπλισμό του εργαστηρίου. Παρόλες τις επίμονες προσπάθειες του να αλλάξω γραμμή ερευνητικής πλεύσης, είναι αλήθεια ότι ήμουν δύσπιστος και ολίγον τι προβληματισμένος με την καθαρά πειραματική φύση του ΕΦΕ. Δεν άργησα όμως να καταλάβω την δυναμική του στην υλοποίηση και αξιολόγηση καινοτόμων συστημάτων ψηφιακής επεξεργασίας σήματος και η πρώτη συνάντηση με τον διευθυντή και πρωτεργάτη του εργαστηρίου δεν άργησε να κλείσει.

Και ένα ωραίο πρωινό πέρασα αυτή την μπλε πόρτα στο ισόγειο του κτιρίου Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών (για οσους γνωρίζουν εκεί στο πίσω πάρκινγκ). Η πρώτη εικόνα του εργαστηρίου εντυπωσιακή με πλήθος μετρητικών οργάνων, ατελείωτα μέτρα οπτικής ίνας και μια ομάδα νέων ανθρώπων να πειραματίζεται και να δημιουργεί. Ύστερα από τις απαραίτητες συστάσεις ένας παλιός ερευνητής ανέλαβε να μου κάνει την καθιερωμένη περιήγηση στο χώρο. Με απλά και κατανοητά λόγια άρχισε να μου μιλάει για τις ομοιότητες που έχει το ποδόσφαιρο (ναι το ποδόσφαιρο!!!!) με τους οπτικούς δρομολογητές και τη μεταγωγή πακέτων. Στη συνέχεια μου εξηγούσε τι εφαρμογές θα μπορούσε να έχει η φωτονική ολοκλήρωση στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα νέας γενιάς δείχνοντάς μου κάποια αντιπροσωπευτικά κυκλώματα σε πυρίτιο. Και εκεί που η συζήτηση είχε ανάψει μπαίνει στο εργαστήριο ο καθηγητής Ηρακλής Αβραμόπουλος και πέφτουν τα απαραίτητα προειδοποιητικά σινιάλα.

«Μμμμ Χρήστο καλημέρα έλα μέσα στο γραφείο να τα πούμε». Έτσι κάπως άρχισε η γνωριμία και η συνύπαρξή μας με τον επιβλέποντα καθηγητή μου. Αναλύσαμε τη διαδρομή του εργαστηρίου, θέσαμε τους μελλοντικούς στόχους, συζητήσαμε τις υποχρεώσεις και διευθετήσαμε κάποιες δυσκολίες. Όλα στη αρχή φάνταζαν σκούρα αλλά ο χρόνος έμελλε να δείξει αν τελικά θα μπορούσα να τα καταφέρω. Δώσαμε τα χέρια και από την επομένη έπιασα δουλειά. Ο δρόμος θα ήταν μακρύς, επίπονος και γεμάτος εμπόδια.

Ύστερα από ένα ταξίδι τεσσάρων περίπου χρόνων οι εμπειρίες πολλές, οι προσωπικές κατακτήσεις σημαντικές, οι τεχνικές γνώσεις ξεχωριστές και οι επιτυχίες αξιόλογες. Το εργαστήριο ήταν για μένα ένα παραγωγικό περιβάλλον μέσα στο οποίο επινόησα και εκπλήρωσα στόχους και φιλοδοξίες ζωής. Ήταν η

αρένα που ανέδειξε ακόμα και τις πιο απόμακρες πτυχές δημιουργικής ενασχόλησής μου. Ήταν ο χώρος που με ωρίμασε ερευνητικά, δοκίμασε τις αντοχές μου και ανταπέδωσε το πείσμα και την υπομονή μου. Σε αυτή την μακρόχρονη πορεία και μέσα από σκληρή προσωπική δουλειά, καινούριες πειραματικές τεχνικές αναπτύχθηκαν, υψηλότερες ταχύτητες διάδοσης επιτεύχθηκαν ενώ παράλληλα νέα συστήματα αξιολόγησης υλοποιήθηκαν και αξιοποιήθηκαν. Ο δρόμος προς την επίτευξη αυτού του σκοπού τις περισσότερες φορές ήταν μοναχικός αλλά πάντοτε είχα τη στήριξη συγκεκριμένων συνεργατών, φίλων και γνωστών.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου για την επιστημονική καθοδήγηση που μου προσέφερε, την εμπιστοσύνη με την οποία με περιέβαλε και τη στήριξη που μου παρείχε τις δύσκολες στιγμές. Ένα ειλικρινές ευχαριστώ για την υπομονή του, τη συμπαράστασή του και την ουσιαστική βοήθειά του για όλα όσα προσπάθησα με πείσμα και επιμονή. Παρόλες τις διαφωνίες και τις εντάσεις που είχαμε, πάντα θα αναγνωρίζω τη βοήθεια που μου παρείχε στην υλοποίηση ενός προσωπικού στόχου που δεν ήταν τίποτε άλλο από την δημιουργία ενός υψίρρυθμου συστήματος αξιολόγησης οπτικών σημάτων.

Στη συνέχεια θα ήθελα να αναφερθώ στον φίλο μου και συνεργάτη Λεόντιο Σταμπουλίδη. Αν και δεν μπορέσαμε εν γένει να δουλέψουμε μαζί για αρκετό χρονικό διάστημα, ήταν η αφορμή και η αιτία να γνωρίσω τον κόσμο της φωτονικής δρομολόγησης και ολοκλήρωσης. Ήταν η προτροπή για μια σειρά από προσωπικές κατακτήσεις και επιτυχίες. Χωρίς τις συμβουλές του και τις προτάσεις του, η προσωπική μου ωρίμανση και ανέλιξη ποτέ δε θα ήταν τόσο ουσιαστική.

Δεν μπορώ να ξεχάσω τους φίλους μου απο το εργαστήριο με τους οποίους περάσαμε πολλά και καταφέραμε ακόμα περισσότερα. Με τον Γιάννη τον Λαζάρου δουλέψαμε πάνω σε πολλές εφαρμογές, στήσαμε πολλές ιδιοκατασκευές, πειραματιστήκαμε σε καινούριες τεχνικές, ταξιδέψαμε σε απομακρυσμένες περιοχές και ξενυχτήσαμε πολλές φορές. Ένα μεγάλο ευχαριστώ για τη συμπαράσταση και εμπιστοσύνη του όλο αυτον τον καιρό. Δεν μπορώ να παραλείψω και τον Δημήτρη τον Καλαβρουζιώτη με τον οποίο συνεργάστηκα δυνατά και μαχητικά σε πολλές περιπτώσεις. Το ταξίδι μας στην Ιταλία για πειραματικό σκοπό ήταν ίσως μια από τις πιο ευχάριστες, παραγωγικές και δημιουργικές στιγμές. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω και τα υπόλοιπα μέλη του εργαστηρίου για την "αρμονική" συνύπαρξή μας όλο αυτό τον καιρό.

Για το τέλος κράτησα τις πιο βαθιές ευχαριστίες για τους γονείς μου Γιάννη και Ευαγγελία και την αδερφή μου Νίκη που ήταν πάντα στήριγμα σε κάθε καινούριο

ξεκίνημά μου. Χωρίς την αγάπη και την υπομονή τους η προσπάθεια θα ήταν πολύ πιο δύσκολη. Ένα θερμό ευχαριστώ επίσης στη σύντροφό μου Βασιλική που όλα αυτά τα χρόνια ήταν πλάι μου και ομόρφαινε με την παρουσία της την καθημερινότητά μου. Χωρίς το χαμόγελό της, την ανωτερότητά της και την ζεστή φιλοξενία της το αποτέλεσμα αυτής της προσπάθειας θα ήταν εντελώς διαφορετικό.

Χρήστος Σταματιάδης

Αθήνα, Φεβρουάριος 2012

Στους γονείς μου

Γιάννη και Ευαγγελία

Στην αδερφή μου

Νίκη

Στη σύντροφό μου

Βασιλική

Στο φίλο μου που δε ζει

Μιχάλη

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	6
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	7
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	12
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΜΗΣΕΩΝ	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	17
Τηλεπικοινωνιακή κίνηση, οπτικά δίκτυα και αρχιτεκτονικές δρομολόγησης.....	17
1.1 Εισαγωγή	17
1.2 Διαδικτυακή κίνηση πληροφορίας και αύξηση ευρυζωνικότητας.....	18
1.3 Κέντρα διαχείρισης δεδομένων	20
1.4 Μητροπολιτικά δίκτυα	22
1.5 Δίκτυα κορμού.....	25
1.6 Ηλεκτρονικές μορφές δρομολόγησης.....	27
1.7 Κατανάλωση ισχύος στα ηλεκτρονικά συστήματα δρομολόγησης.....	31
1.8 Οπτική μεταγωγή σε δρομολογητές δικτύου.....	34
1.9 Προς την τεχνολογία της φωτονικής ολοκλήρωσης	36
1.10 Κίνητρο και δομή της διατριβής	39
Αναφορές.....	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	47
Οπτικοί μετατροπείς μήκους κύματος με χρήση ημιαγωγικών οπτικών ενισχυτών και μικρο- συντονιστών δακτυλίου σε πυρίτιο.....	47
2.1 Εισαγωγή	47
2.2 Αρχή λειτουργίας του ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή.....	48
2.3 Οπτική μετατροπή μήκους κύματος με χρήση ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή	52
2.4 Αρχή λειτουργίας οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος με χρήση ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή και οπτικού φίλτρου	54
2.5 Αρχή λειτουργίας συντονιστή δακτυλίου	56
2.6 Τετραπλός οπτικός μετατροπέας μήκους κύματος χρησιμοποιώντας ημιαγωγικούς ενισχυτές και $Si_3N_4-SiO_2$ συντονιστές δακτυλίου	66
2.6.1 Αρχή λειτουργίας του τετραπλού αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος	68
2.6.2 Κατασκευή των $Si_3N_4-SiO_2$ συντονιστών δακτυλίου και συμβολομέτρων καθυστέρησης	69
2.6.3 Χαρακτηρισμός των $Si_3N_4-SiO_2$ συντονιστών δακτυλίου και συμβολομέτρων καθυστέρησης	72
2.6.4 Πειραματική αξιολόγηση του τετραπλού αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος	75
2.7 Οπτικός μετατροπέας μήκους κύματος υπερυψηλών ταχυτήτων χρησιμοποιώντας ημιαγωγικούς ενισχυτές και συντονιστές δακτυλίου πυριτίου ανώτερης τάξης	79
2.7.1 Σχεδιασμός συντονιστών δακτυλίου ανώτερης τάξης για οπτική μετατροπή μήκους κύματος	80
2.7.2 Κατασκευή συντονιστών δακτυλίου πυριτίου ανώτερης τάξης για οπτική μετατροπή μήκους κύματος	83
2.7.3 Κατασκευή συντονιστών δακτυλίου πυριτίου ανώτερης τάξης με θερμαντικά στοιχεία και συζεύκτες περίθλασης	85
2.7.4 Χαρακτηρισμός των συντονιστών δακτυλίου πυριτίου ανώτερης τάξης	86
2.7.5 Πειραματική αξιολόγηση των συντονιστών δακτυλίου πυριτίου για αμιγώς οπτική μετατροπή μήκους κύματος.....	90
Αναφορές.....	95
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	101

Οπτικός μετατροπέας μήκους κύματος με χρήση ενός υβριδικά ολοκληρωμένου φωτονικού κυκλώματος σε πυρίτιο.....	101
3.1 Εισαγωγή.....	101
3.2 Αρχή λειτουργίας και κατασκευή του υβριδικά ολοκληρωμένου μετατροπέα μήκους κύματος σε πυρίτιο.....	103
3.3 Χαρακτηρισμός του υβριδικά ολοκληρωμένου φωτονικού κυκλώματος.....	105
3.4 Πειραματική αξιολόγηση του υβριδικά ολοκληρωμένου φωτονικού κυκλώματος.....	106
3.5 Συσχευασία του υβριδικά ολοκληρωμένου μετατροπέα μήκους κύματος.....	110
3.6 Πειραματική αξιολόγηση του υβριδικά ολοκληρωμένου μετατροπέα μήκους κύματος σε πραγματικές συνθήκες δικτύου.....	114
3.6.1 Εισαγωγή.....	114
3.6.2 Πειραματική διάταξη οπτικού δικτύου μεταγωγής.....	115
3.6.3 Οπτική μετάδοση βίντεο και φωνής χρησιμοποιώντας τον ολοκληρωμένο μετατροπέα μήκους κύματος.....	117
3.6.4 Οπτική μετάδοση και μεταγωγή δεδομένων σε ταχύτητες 40Gb/s χρησιμοποιώντας τον ολοκληρωμένο μετατροπέα μήκους κύματος.....	120
<i>Αναφορές</i>	123
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	126
Μεταγωγή πακέτων πληροφορίας σε υψίρρυθμες ταχύτητες λειτουργίας με χρήση φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων σε πυρίτιο.....	126
4.1 Εισαγωγή.....	126
4.2 Υψίρρυθμο κύκλωμα δρομολόγησης με χρήση φωτονικών και ηλεκτρονικών στοιχείων.....	127
4.3 Αμιγώς οπτικό κύκλωμα δρομολόγησης με χρήση φωτονικών και ηλεκτρονικών στοιχείων.....	128
4.4 Φωτονικά ολοκληρωμένα στοιχεία για την εκτέλεση διάφορων λειτουργιών δρομολόγησης.....	130
4.5 Πειραματική αξιολόγηση ενός κυκλώματος μεταγωγής πακέτων πληροφορίας σε υψίρρυθμες ταχύτητες λειτουργίας.....	137
<i>Αναφορές</i>	144
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	147
ΑΜΙΓΩΣ ΟΠΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗΣ ΠΑΚΕΤΩΝ.....	147
5.1 Εισαγωγή.....	147
5.2 Τεχνικές επίλυσης σύγκρουσης πακέτων πληροφορίας.....	148
5.3 Αμιγώς οπτική επίλυση σύγκρουσης πακέτων χρησιμοποιώντας έναν οπτικό μανδαλωτή και μετατροπείς μήκους κύματος σε σειρά.....	152
5.3.1 Εισαγωγή.....	152
5.3.2 Αρχή λειτουργίας κυκλώματος επίλυσης σύγκρουσης πακέτων.....	153
5.3.3 Πειραματική αξιολόγηση του κυκλώματος επίλυσης σύγκρουσης πακέτων πληροφορίας ...	155
<i>Αναφορές</i>	160
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	164
Σύνοψη αποτελεσμάτων και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	164
6.1 Σύνοψη και αποτίμηση αποτελεσμάτων.....	165
6.1.1 Μετατροπείς μήκους κύματος με χρήση ημιαγωγικών οπτικών ενισχυτών και συντονιστών δακτυλίου ανώτερης τάξης.....	165
6.1.2 Αμιγώς οπτικοί μετατροπείς μήκους κύματος με χρήση ημιαγωγικών οπτικών ενισχυτών, συμβολομέτρων καθυστέρησης και τεχνικών υβριδικής ολοκλήρωσης σε υπόστρωμα SOI .	167
6.1.3 Αμιγώς οπτικά συστήματα δρομολόγησης σε υπερυψηλές ταχύτητες λειτουργίας χρησιμοποιώντας ολοκληρωμένα φωτονικά στοιχεία σε πυρίτιο.....	168
6.1.4 Αμιγώς οπτικά συστήματα επίλυσης σύγκρουσης πακέτων χρησιμοποιώντας μετατροπείς μηκών κύματος υπερυψηλών ταχυτήτων.....	169

6.1.5	Πλεονεκτήματα χρήσης οπτικών στοιχείων επεξεργασίας σήματος.....	169
6.2	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	170
6.2.1	Προς την υλοποίηση αμιγώς οπτικών μονάδων μνήμης.....	170
6.2.2	Προς την υλοποίηση πλασματικών ολοκληρωμένων διατάξεων.....	171
6.2.3	Προς τη χρήση εναλλακτικών μορφών διαμόρφωσης.....	172
	<i>Αναφορές</i>	174
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	176
	Δημοσιεύσεις σε έγκριτα περιοδικά και διεθνή επιστημονικά συνέδρια.....	176
	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	181
	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	185

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΜΗΣΕΩΝ

ASE	Amplified-Spontaneous Emission
AWG	Arrayed-Waveguide Grating
BER	Bit-Error Rate
B-2-B	Back-to-Back
CW	Continuous Wave
DCF	Dispersion Compensating Fiber
DFB (laser)	Distributed Feedback (laser)
DI	Delay Interferometer
DPSK	Differential Phase-Shift Keying
DQPSK	Differential Quadrature Phase-Shift Keying
EAM	Electro-Absorption Modulator
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier
ER	Extinction Ratio
FDM	Frequency-Division Multiplexing
FSR	Free-Spectral Range
FWHM	Full-Width at Half Maximum
FWM	Four-Wave Mixing
HNLF	Highly-Nonlinear Fiber
ISI	Inter-Symbol Interference
MLL	Mode-Locked Laser
MZ	Mach-Zehnder
MZI	Mach-Zehnder Interferometer
NOLM	Nonlinear Optical Loop Mirror
NRZ	Nonreturn-to-Zero
NRZ-PSK	Nonreturn-to-Zero Phase-Shift Keying
OADM	Optical Add-Drop Multiplexer
OBPF	Optical Band-Pass Filter
ODL	Optical Delay Line
OOK	On-Off Keying
OPS	Optical Packet Switching
OSNR	Optical Signal-to-Noise Ratio
OTDM	Optical Time Division Multiplexing
OXC	Optical Cross-Connect
PBS	Polarization Beam Splitter
PPG	Pulse-Pattern Generator
PRBS	Pseudo-random Binary Sequence
PS	Phase Shifter
PSK	Phase-Shift Keying
Q-factor	Quality-Factor
RZ	Return-to-Zero
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SMF	Single-Mode Fiber
SOA	Semiconductor Optical Amplifier
SPM	Self-Phase Modulation
UNI	Ultra-fast Nonlinear Interferometer
WDM	Wavelength-Division Multiplexing
XGM	Cross-Gain Modulation
XPM	Cross-Phase Modulation
DWDM	Dense-Wavelength-Division-Multiplexing

FEC	Forward Error Correction
QoS	Quality of Service
GMPLS	Generalized Multi Protocol Label Switching
MSTP	Multi Service Transport Platform
ICT	Information Communication Technology
ISP	Internet Service Provider
OCS	Optical Circuit Switching
OBS	Optical Burst Switching
IC	Integrated Circuit
PIC	Photonic Integrated Circuit
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
AOWC	All Optical Wavelength Converter
PEC	Proximity Effect Corrections
ICPRIE	Inductively Coupled Plasma Reactive Ion Etching
SOG	Spin on Glass
WC	Wavelength Conversion
SOI	Silicon on Insulator
DAC	Digital to Analog Converter
ADC	Analog to Digital Converter
OFF	Optical Flip Flop
RAM	Random Access Memory

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Τηλεπικοινωνιακή κίνηση, οπτικά δίκτυα και αρχιτεκτονικές δρομολόγησης

1.1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη και η επιτυχία του πρωτοκόλου διαδικτύωσης (Internet Protocol-IP) για την ανταλλαγή δεδομένων και την παροχή υπηρεσιών ώθησε τα τελευταία χρόνια τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους προς την κατεύθυνση μιας κοινής και καθολικής πλατφόρμας δικτύωσης. Η ζήτηση και παροχή ευρυζωνικότητας ήταν η αφορμή για την ανάπτυξη και χρήση αποδοτικότερων, οικονομικότερων και πιο ενεργειακών συστημάτων μετάδοσης και μεταγωγής δεδομένων. Με την έκρηξη της τηλεπικοινωνιακής κίνησης η εξάπλωση των ηλεκτρονικών μορφών δρομολόγησης είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση των ποσοστών ισχύων κατανάλωσης, τη διάχυση θερμότητας και τη χωρική επέκταση των διαδικτυακών σταθμών βάσης.

Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, ήταν απαραίτητη η σχεδίαση και βελτιστοποίηση νέων συστημάτων δρομολόγησης με διαφορετική αρχιτεκτονική και υποδομή. Σε αυτό συνέβαλε ουσιαστικά η ανάπτυξη της φωτονικής τεχνολογίας που αποτέλεσε τη λύση για την κάλυψη των μελλοντικών απαιτήσεων εύρους ζώνης με παράλληλη μείωση του κόστους και ενεργειακής κατανάλωσης. Αν και τα οφέλη της ήταν γνωστά εδώ και δεκαετίες, οι πρακτικές εφαρμογές λιγοστές και μεμονωμένες λόγω της απόλυτης κυριαρχίας των ηλεκτρονικών. Η ανάγκη διακίνησης όμως ολοένα και περισσότερης πληροφορίας μέσω των ηλεκτρονικών διατάξεων επέφερε τον κορεσμό με αποτέλεσμα τη στροφή στις οπτικές επικοινωνίες, τη φωτονική ολοκλήρωση και την εδραίωση τεχνικών μετάδοσης όπως αυτό της πολυπλεξίας διαφορετικών μηκών κύματος (Dense Wavelength Division Multiplexing-DWDM networks) [1.1].

Ύστερα από πολλά χρόνια έρευνας και μελέτης και χωρίς ακόμα να είναι απόλυτα κατανοητός ο ρόλος των οπτικών στις τηλεπικοινωνίες, είναι κοινή πεποίθηση ότι οι φωτονικές τεχνολογίες αρχίζουν να διεισδύουν αργά και σταθερά σε αρχιτεκτονικές δρομολογητών υψηλής χωρητικότητας [1.2][1.3]. Οι

κύριες προσπάθειες εστιάζονται στην κατασκευή ενός φωτονικού δρομολογητή μικρού μεγέθους με ταχύτητες μεταγωγής Tb/s και χαμηλές απαιτήσεις ενεργειακής κατανάλωσης. Λόγω τεχνικών δυσκολιών ολοκλήρωσης, κυματοδότησης και οπτικής αξιολόγησης δεν έχει καταστεί εφικτή η υλοποίηση του εγχειρήματος αυτού. Οι κύριοι περιορισμοί αφορούν προβλήματα ενσωμάτωσης και επεκτασιμότητας των ολοκληρωμένων οπτικών στοιχείων, εφαρμογής και διαχείρισης λειτουργιών ελέγχου και τέλος της χρήσης αλγορίθμων διόρθωσης λαθών (Forward Error Correction-FEC) για την τελική επεξεργασία των δεδομένων.

Αν και η δημιουργία και κατασκευή διατάξεων φωτονικής δρομολόγησης βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο εξέλιξης, σημαντικά βήματα έχουν επιτευχθεί στο χώρο της φωτονικής τεχνολογίας. Η μονολιθική ολοκλήρωση σε υπόστρωμα InP καθώς επίσης και οι υβριδικές πολυστοιχειακές μορφές οπτικής ολοκλήρωσης έχουν προχωρήσει και ωριμάσει αρκετά έτσι ώστε να επιτρέπουν την υλοποίηση αμιγώς οπτικών διακοπών μέχρι και ευρείας κλίμακας φωτονικών συστημάτων. Παράλληλα, οι σύγχρονες τάσεις κατασκευής κυκλωμάτων σε πυρίτιο [1.4][1.5] έχουν ανοίξει νέες τεχνολογικές προοπτικές επιδρώντας καταλυτικά στη δημιουργία οπτικών στοιχείων μικρού κόστους, χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης και συμπαγούς δομής. Με την περαιτέρω ανάπτυξη των υβριδικών μορφών ολοκλήρωσης δόθηκε επίσης η δυνατότητα ένταξης InP ηλεκτρο-οπτικών στοιχείων πάνω σε υπόστρωμα πυριτίου [1.6] εξυπηρετώντας μια σειρά από φωτονικές διεργασίες όπως μετατροπή μήκους κύματος, ανίχνευση επικεφαλίδας, οπτική πολυπλεξία και αποπολυπλεξία.

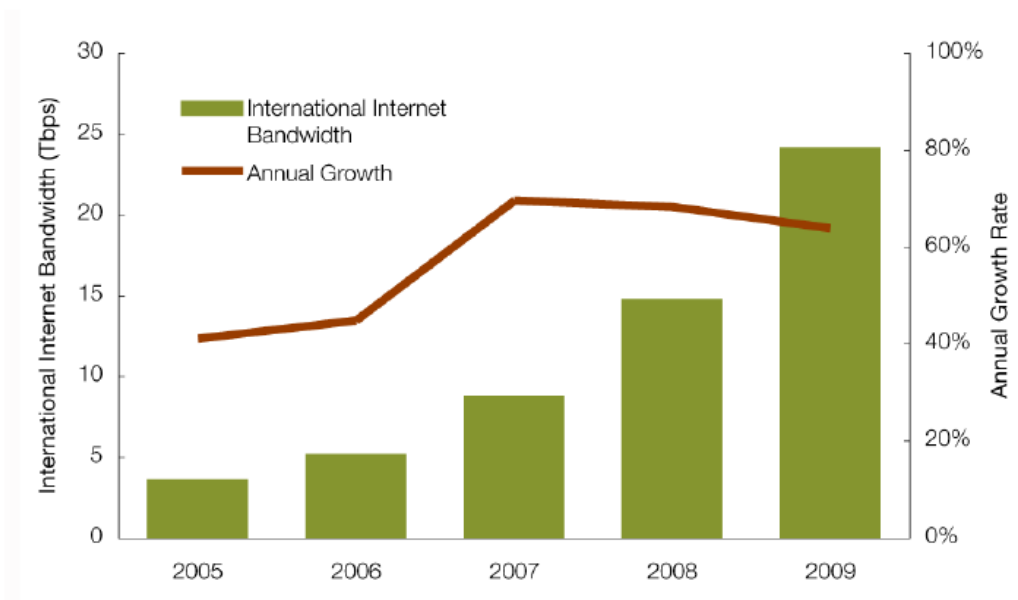
1.2 Διαδικτυακή κίνηση πληροφορίας και αύξηση ευρυζωνικότητας

Παρόλη την ύφεση και τη συρρίκνωση πολλών οικονομιών του κόσμου, τα δίκτυα που αποτελούσαν το παγκόσμιο κορμό του διαδικτύου συνέχισαν την επέκτασή και εξάπλωση τους. Ο όγκος της διακινούμενης πληροφορίας εκτινάχθηκε στα ύψη το 2009, με ετήσιους τριψήφιους ρυθμούς ανάπτυξης σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες. Οι παγκόσμιοι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι ανταποκρίθηκαν σε αυτή την έκρηξη πληροφοριακής κίνησης με την ενσωμάτωση και διασύνδεση ηλεκτρονικών συστημάτων μεγάλης χωρητικότητας.

Η στατιστική υπηρεσία «TeleGeography» [1.7] έδωσε στη δημοσιότητα τον όγκο διακίνησης πληροφορίας την περίοδο 2003-2009. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 1. Από το 2007, ο ετήσιος ρυθμός αύξησης της τηλεπικοινωνιακής κίνησης έχει υπερβεί το 60 %. Το 2009, το εύρος ζώνης του διαδικτύου αυξήθηκε 64 % σε παγκόσμιο επίπεδο, με τους πάροχους επικοινωνίας να αναβαθμίζουν τα δίκτυά τους για να διαχειριστούν τον αυξανόμενο όγκο πληροφορίας. Ειδικότερα, το

2009, οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι πρόσθεσαν 9,4 Tbps χωρητικότητα, που υπερβαίνει το αντίστοιχο ποσοστό 8,7 Tbps τα προηγούμενα δύο χρόνια.

International Internet Bandwidth, 2005–2009



Notes: Data represent Internet bandwidth connected across international borders as of mid-year. Domestic routes are excluded.

Source: TeleGeography research

© 2009 PriMetrica, Inc.

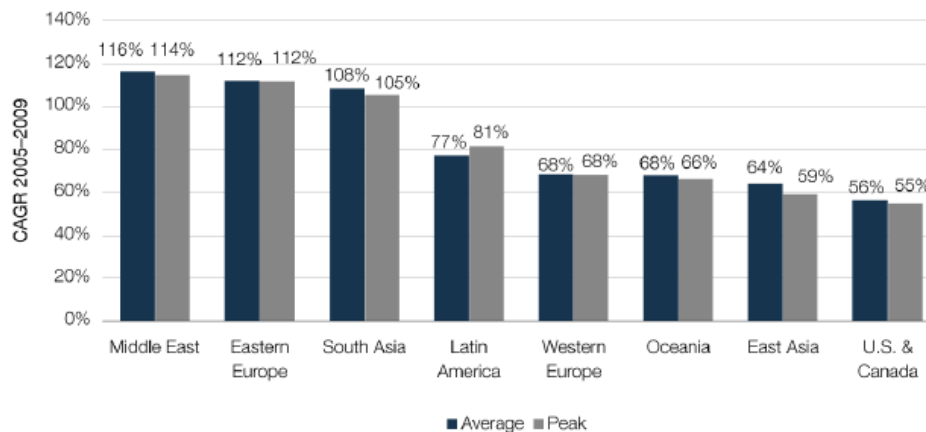
Σχήμα 1: Παγκόσμια έρευνα τηλεπικοινωνιακής κίνησης το διάστημα 2005-2009

Στην πραγματικότητα, η διεθνής ζήτηση αυξήθηκε το 2009, καθώς ο μέσος όρος άγγιξε το 74 %, ποσοστό μεγαλύτερο από το 55 % το 2008 ενώ ο συνολικός όγκος της κίνησης αυξήθηκε 79 % το 2009, σε σύγκριση με 61 % το 2008. Στη Νότια Ασία, τη Μέση Ανατολή και την Ανατολική Ευρώπη η αύξηση ήταν πολύ πιο αισθητή. Μεταξύ 2005 και 2009, και οι τρεις γεωγραφικές περιοχές παρουσίασαν τηλεπικοινωνιακή κίνηση κορυφής περισσότερο από 100 % ετησίως. Αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 2. Η κίνηση στο διαδίκτυο αυξήθηκε με βραδύτερο ρυθμό σε εσωτερικές ζεύξεις των ΗΠΑ, σε σύγκριση με τις διεθνείς ζεύξεις προς τις Ηνωμένες Πολιτείες. Για τις 20 διαδρομές υψηλότερης ζήτησης των ΗΠΑ, η μέση κίνηση στο διαδίκτυο αυξήθηκε 36 % μεταξύ 2008 και 2009, ενώ η κίνηση κορυφής αυξήθηκε 33 %.

Ο ρυθμός αύξησης της πληροφοριακής κίνησης τα τελευταία χρόνια υπερέβη σημαντικά το ποσοστό ανάπτυξης και εγκατάστασης νέων συστημάτων δρομολόγησης. Οι πρώτες ενδείξεις είναι ανησυχητικές για το αν θα μπορέσουν τα δίκτυα επόμενης γενιάς να ανταπεξέλθουν στις αυξητικές τάσεις τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Η προώθηση νέων διαδικτυακών εφαρμογών εγείρει ερωτήματα για την αποτελεσματικότητα των σημερινών ηλεκτρονικών δομών αποθήκευσης και επεξεργασίας δεδομένων. Είναι ευρέως αποδεκτό ότι η

πλατφόρμα τηλεπικοινωνιακής δικτύωσης οφείλει να υποστεί ριζικές αλλαγές για την εξυπηρέτηση νέων χρηστών και υπηρεσιών.

Average and Peak Traffic Growth by Region, 2005–2009 (CAGR)



Notes: Data reflect utilization of Internet bandwidth connected across international borders including links between countries in each region. Data is the compound annual growth rate between mid-2005 and mid-2009.

Source: TeleGeography research

© 2009 PriMetrica, Inc.

Σχήμα 2: Τηλεπικοινωνιακή κίνηση ανά γεωγραφικό διαμέρισμα

1.3 Κέντρα διαχείρισης δεδομένων

Είναι γεγονός ότι ο όγκος δεδομένων που αποθηκεύονται στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά κέντρα αυξάνεται διαρκώς και αυτό έχει ως συνέπεια τη χρήση και διασύνδεση μεγάλου αριθμού ηλεκτρονικών εξυπηρετητών για τη διαχείριση της πληροφοριακής κίνησης. Στα κεντρικά δίκτυα επεξεργασίας ο αριθμός των εξυπηρετητών πλησιάζει τους 100000, ενώ παράλληλα υπάρχει αυξανόμενη ζήτηση για εύρος ζώνης, ιδιαίτερα για εφαρμογές όπως μετάδοση και επεξεργασία βίντεο, χρηματοπιστωτικές υπηρεσίες, ιατρική απεικόνιση, συλλογή και αποθήκευση δεδομένων [1.8]. Παράλληλα με την ανάγκη αύξησης της δικτυακής χωρητικότητας είναι κοινή πεποίθηση ότι η κατανάλωση ισχύος οφείλει να μειωθεί αισθητά λόγω του υψηλού ενεργειακού κόστους και της αδυναμίας πρακτικής διαχείρισης [1.9]. Το 2006, τα κέντρα εξυπηρέτησης τηλεπικοινωνιακής κίνησης κατανάλωναν το 1,5% της ηλεκτρικής ενέργειας στις ΗΠΑ, ποσοστό το οποίο διπλασιάστηκε από το 2000 [1.10].

Τα σύγχρονα κέντρα διαχείρισης δεδομένων απαιτούν επίσης ταχύτερη πρόσβαση στις μονάδες αποθήκευσης που περιλαμβάνουν συνήθως συστοιχίες από ηλεκτρονικούς εξυπηρετητές και δίσκους αποθήκευσης. Σε έναν

υπερυπολογιστή ή κέντρο διαχείρισης, τα πακέτα δεδομένων που μεταφέρονται μεταξύ των υπολογιστικών κόμβων είναι της τάξης εκατοντάδων terabytes ή petabytes. Ο χρόνος μετάδοσης και επεξεργασίας διαρκεί συχνά περισσότερο από το κανονικό όταν ο κόμβος έχει περιορισμένη αποθηκευτική ικανότητα [1.11] με αποτέλεσμα τον περιορισμό της απόδοσης των εφαρμογών. Σε ένα τυπικό κέντρο εξυπηρέτησης με 10 GbE συνδέσεις, θα χρειαστούν περίπου 22 ώρες για να μεταφερθεί ένα αρχείο 100 TByte από τη μονάδα αποθήκευσης στο σύστημα ηλεκτρονικής επεξεργασίας του.

Υπό αυτό το πρίσμα η έλευση των οπτικών συστημάτων επικοινωνίας με τα σημαντικά πλεονεκτήματα εύρους ζώνης ήταν καθοριστική στην εξέλιξη των διαδικτυακών κέντρων μετάδοσης. Σήμερα τα οπτικά κυκλώματα διασύνδεσης (optical interconnects) αρχίζουν να χρησιμοποιούνται σε υπερυπολογιστές υψηλής απόδοσης [1.12] χωρίς να κρίνεται αναγκαία η χρήση ηλεκτρικών διεπαφών. Επίσης για τις τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις αντί ηλεκτρικών μορφών μετάδοσης χρησιμοποιούνται ενεργά καλώδια οπτικών ινών μικρότερου όγκου, χαμηλότερου βάρους και υψηλής ταχύτητας. Ωστόσο, παρά την πρόσφατη εμπορική επιτυχία και χρήση των οπτικών μορφών διασύνδεσης, η πρακτική εφαρμογή τους έχει περιοριστεί λόγω του σχετικά υψηλού κόστους. Ως εκ τούτου, παρά τη σημαντική πρόοδο στους πολυπύρηνους επεξεργαστές με τις αυξημένες υπολογιστικές ικανότητες, οι πραγματικές επιδόσεις του συνολικού δικτύου δεν είναι ακόμα οι αναμενομένες λόγω των περιορισμών στις οπτικές μεθόδους διασύνδεσης.

Με τη συστηματική μελέτη, ερευνητική προσπάθεια και διαρκή εξέλιξη, τα οπτικά δίκτυα μετάδοσης, επεξεργασίας και μεταγωγής είναι εφικτό να προσφέρουν λύσεις για τη διαχείριση του ολοένα αυξανόμενου όγκου πληροφοριών. Επίσης είναι πολύ πιθανό τα αμιγώς φωτονικά κυκλώματα να αντικαταστήσουν τις σημερινές ηλεκτρονικές μορφές διάδοσης και διασύνδεσης για την εξυπηρέτηση ευρυζωνικών εφαρμογών και υπηρεσιών. Αν και η έρευνα είναι σε εξέλιξη, η εμπορική χρήση των οπτικών συστημάτων εμποδίζεται από δύο σημαντικούς παράγοντες. Σε πρώτη φάση από την έλλειψη οπτικών δομών αποθήκευσης και προσπέλασης και κατά δεύτερο λόγο από την απουσία φωτονικών τεχνολογιών πολυστοιχειακής ολοκλήρωσης [1.13][1.14]. Δεδομένης αυτής της κατάστασης, αρκετές ερευνητικές ομάδες έχουν προτείνει τη λύση υβριδικών αρχιτεκτονικών με στόχο τη συνύπαρξη τόσο ηλεκτρικών όσο και οπτικών συστημάτων μετάδοσης, αποθήκευσης και επεξεργασίας. Δεν είναι τυχαίο που η παγκοσμίου φήμης Intel στρέφεται προς αυτή την κατεύθυνση τονίζοντας με σαφήνεια ότι η οπτική είναι σήμερα μια εξειδικευμένη τεχνολογία αλλά το αύριο των νέων μορφών τηλεπικοινωνιακής μετάδοσης.

1.4 Μητροπολιτικά δίκτυα

Με την έκρηξη της ανταλλαγής δεδομένων, τη ζήτηση ευρυζωνικών εφαρμογών και τις συνεχώς αυξανόμενες ταχύτητες διάδοσης, τα μητροπολιτικά δίκτυα προχώρησαν σε πιο περίπλοκες δικτυακές αρχιτεκτονικές. Με το διπλασιασμό της πληροφοριακής κίνησης κάθε 3 μήνες και τις αυξημένες ανάγκες για διαχείριση και δρομολόγηση των δεδομένων απο και προς τα δίκτυα κορμού, τα μητροπολιτικά δίκτυα έπρεπε να εξελίξουν νέες δικτυακές δομές με διασφάλιση της ποιότητας των επικοινωνιών (Quality of service –QoS). Με περισσότερο όγκο δεδομένων να διακινείται μεταξύ των συστημάτων σε ταχύτερους ρυθμούς και από διαφορετικές διαδρομές, νέες αρχιτεκτονικές ήταν αναγκαίο να αναπτυχθούν εξασφαλίζοντας την ορθή κατανομή των πληροφοριών και την υψηλή ποιότητα των υπηρεσιών.

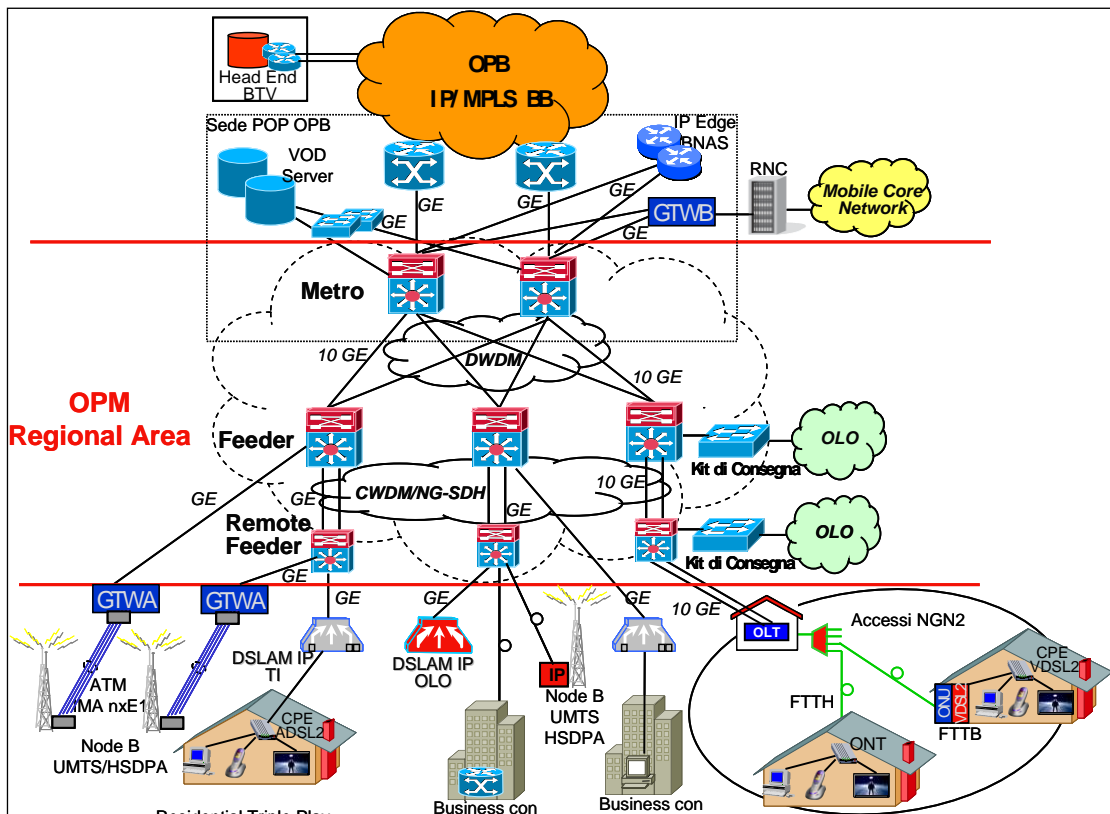
Σε αυτό το πλαίσιο, η εξέλιξη των μητροπολιτικών δικτύων απαιτούσε:

- ❖ Βελτιστοποίηση της χρήσης των διαθέσιμων υποδομών
- ❖ Μείωση του λειτουργικού κόστους
- ❖ Βελτίωση της ποιότητας και της αποδοτικότητας των υφιστάμενων και νέων υπηρεσιών

Μπροστά σε αυτή την ριζική αλλαγή υπήρχαν ενδοιασμοί τόσο από την πλευρά του χρήστη όσο και από την πλευρά των τηλεπικοινωνιακών παρόχων. Και αυτό γιατί εφαρμογές που εξυπηρετούσαν μεγάλο αριθμό πελατών ήταν πρακτικά δύσκολο να τροποποιηθούν για εμπορικούς κυρίως λόγους. Επιπλέον οι πάροχοι επικοινωνίας αδυνατούσαν να επενδύσουν σε νέες υποδομές δικτύων περιμένοντας την εμφάνιση νέων τεχνολογιών και υπηρεσιών. Παράλληλα όμως τα πρωτόκολλα δικτύωσης IP, Ethernet και SDH θεωρούνταν αξιόπιστες επιλογές δικτύωσης λόγω της παγосμίου φήμης, ευρείας χρήσης και κοινής αποδοχής τους. Για την επίτευξη της ευρυζωνικότητας παντού, οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι ήταν αναγκαίο να κινηθούν προς άλλες υπηρεσίες IP, για παράδειγμα μετάδοση βίντεο (Video Broadcasting), τηλεφωνία, σύγχρονες υπηρεσίες.

Μια διαδεδομένη τεχνική μεταφοράς δεδομένων είναι η πολυπλεξία μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing-WDM) [1.15] η οποία μπορεί να αυξήσει σημαντικά τη χωρητικότητα των οπτικών ινών. Με τη μέθοδο αυτή, υπάρχουν πολλαπλές δομές για τη μεταφορά πακέτων πληροφορίας σε μορφή Ethernet [1.16]. Ανεξάρτητα όμως από το φορέα μεταφοράς που χρησιμοποιείται, το Ethernet χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο ως βασικό πρωτόκολλο για τη διακίνηση δεδομένων, σύνδεση δικτύων και διαχείριση τοπολογιών. Επίσης υποστηρίζει την εξελισσόμενη αρχιτεκτονική μεταγωγής ετικέτας πολλαπλών πρωτοκόλλων (Multi Protocol Label Switching-MPLS) [1.17], καθιστώντας έτσι εφικτή την ιεράρχηση των διάφορων τηλεπικοινωνιακών δικτύων σε λογικές διαβαθμίσεις. Μέσω αυτής της λειτουργίας είναι δυνατή η σύγκλιση των διαφορετικών στρωμάτων διαδικτυακής επικοινωνίας (Σχήμα 3) σε επίπεδο:

- Δικτύου- με συγχώνευση των δικτύων κινητής και σταθερής τηλεφωνίας για την εξυπηρέτηση οικιακών ευρυζωνικών εφαρμογών και διάφορων υπηρεσιών
- Υποδομής- με ενσωμάτωση των διαφορετικών λειτουργιών δικτύου - για παράδειγμα, την επεξεργασία πακέτων και την οπτική μεταγωγή δεδομένων
- Υπηρεσίας- καθιστώντας τις διάφορες υπηρεσίες προσβάσιμες σε οποιαδήποτε μέσο μετάδοσης (τηλέφωνο, τηλεόραση, υπολογιστή)



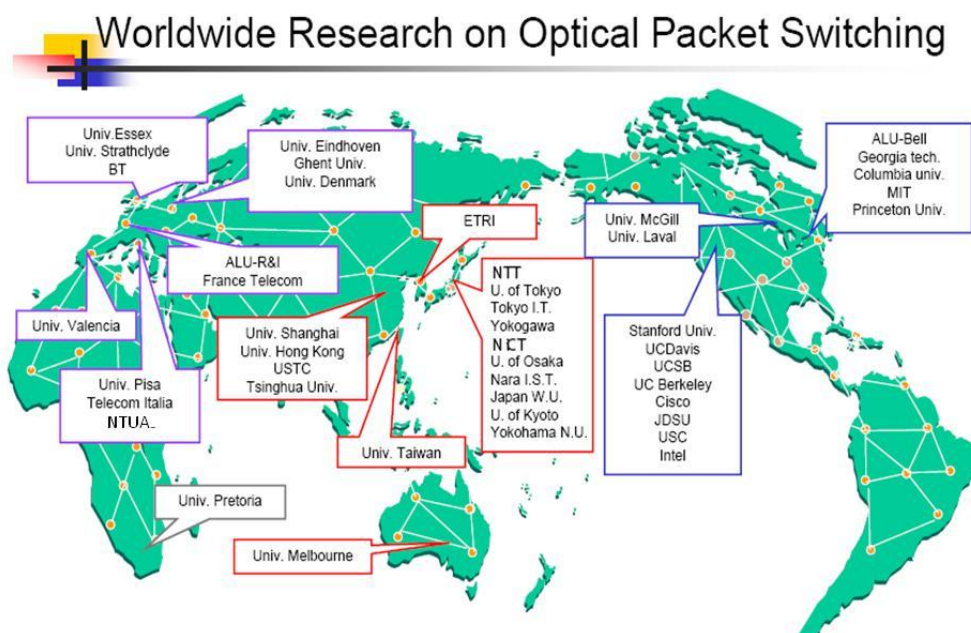
Σχήμα 3: Αρχιτεκτονική μητροπολιτικού δικτύου

Σε επίπεδο υποδομής, κυρίαρχη οπτική τεχνολογία για τα μητροπολιτικά δίκτυα είναι αυτή των πολλαπλών υπηρεσιών (Multi service provisioning platform-MSPP) ή (Multi service transport platform-MSTP), η οποία βασίζεται σε πρωτόκολλο NG-SDH [1.18] και Ethernet υποστηρίζοντας επιπλέον χαρακτηριστικά πολυπλεξίας κύματος (WDM). Συνήθως χρησιμοποιείται στο πρώτο στάδιο συγκέντρωσης των πακέτων πληροφορίας παρέχοντας επίσης δυνατότητες δρομολόγησης ανάλογα με τη μορφή της υποστηριζόμενης υπηρεσίας. Είναι ευρέως διαδεδομένη για τις επιχειρήσεις και τα κινητά δίκτυα δεδομένων. Σε δεύτερη φάση γίνεται χρήση πολυπλεξίας μήκους κύματος έως και 80 καναλιών, επεκτείνοντας σημαντικά την χωρητικότητα των οπτικών ινών επιτρέποντας τη μεταγωγή με χαμηλότερο κόστος ανά bit και ταχύτερη

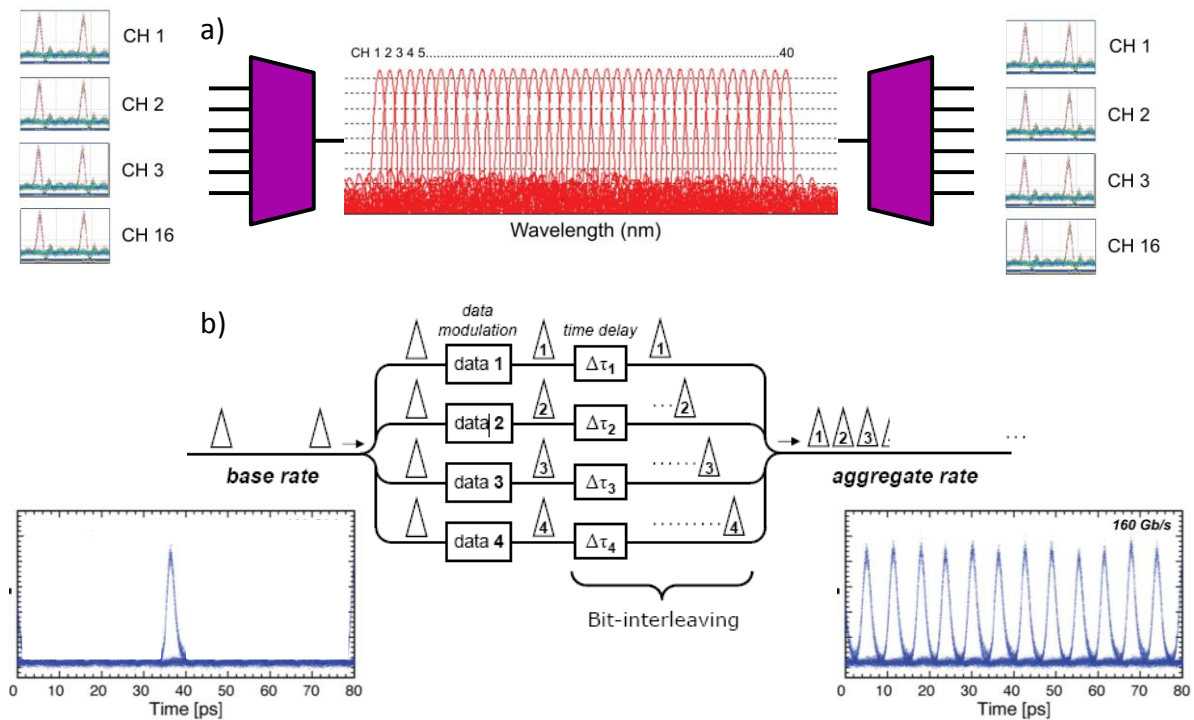
απόκριση από οποιαδήποτε άλλη τεχνολογία. Βασικές λειτουργίες όπως επεξεργασία, αποθήκευση, συγχρονισμός, διακίνηση και έλεγχος ποιότητας των δεδομένων υλοποιούνται πρακτικά με ηλεκτρονικά συστήματα επικοινωνίας ενώ αντίθετα η μεταφορά των πακέτων πληροφορίας μέσω πρωτοκόλλων IP και Ethernet πραγματοποιείται με τη χρήση οπτικών ινών.

Για την αμιγώς οπτική μεταγωγή και δρομολόγηση πακέτων οι προσπάθειες σε παγκόσμιο επίπεδο βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό και πειραματικό στάδιο όπως φαίνεται στο Σχήμα 4. Με το βλέμμα στραμμένο σε εφαρμογές υψηλού εύρους ζώνης, όπως IPTV, κάποιες εταιρείες κατασκευής προηγμένων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων προσανατολίστηκαν στη δημιουργία πρωτότυπων κόμβων επικοινωνίας και αρχιτεκτονικών μετάδοσης. Απώτερος σκοπός ήταν η ανάπτυξη και μελέτη αμιγώς φωτονικών μορφών δικτυακής δρομολόγησης και επεξεργασίας. Προς αυτή την κατεύθυνση δραστηριοποιήθηκε ενεργά από το 2000 η Yokogawa, πετυχαίνοντας να αναπτύξει ένα οπτικοηλεκτρονικό δίκτυο μεταγωγής πακέτων πληροφορίας σε ρυθμούς μετάδοσης 40Gb/s έτοιμο για ευρεία εμπορική χρήση [1.19]. Το εν λόγω σύστημα περιλαμβάνει 4 οπτικές πύλες με ταχύτητα μεταγωγής 1.4ns, υποστηρίζει διάφορα είδη διαμόρφωσης και καλύπτει σχεδόν όλη την C φασματική περιοχή μετάδοσης. Η δομή του περιλαμβάνει πρωτόκολλα Ethernet, συλλογή και διαχείριση δεδομένων, δημιουργία επικεφαλίδων και δρομολόγηση πακέτων πληροφορίας.

Άλλες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται ευρέως στις τηλεπικοινωνίες είναι αυτές της πολυπλεξίας κατά μήκος κύματος (Wavelength Division Multiplexing-WDM) και στο πεδίο του χρόνου (Optical Time Division Multiplexing-OTDM). Η τεχνική WDM είναι ουσιαστικά ίδια με την πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας



Σχήμα 4: Ερευνητικές προσπάθειες παγκοσμίως για την αμιγώς οπτική μεταγωγή πακέτων πληροφορίας [1.19]



Σχήμα 5: a) Τεχνική πολυπλεξίας μήκους κύματος (WDM), b) Τεχνική πολυπλεξίας χρόνου (OTDM)

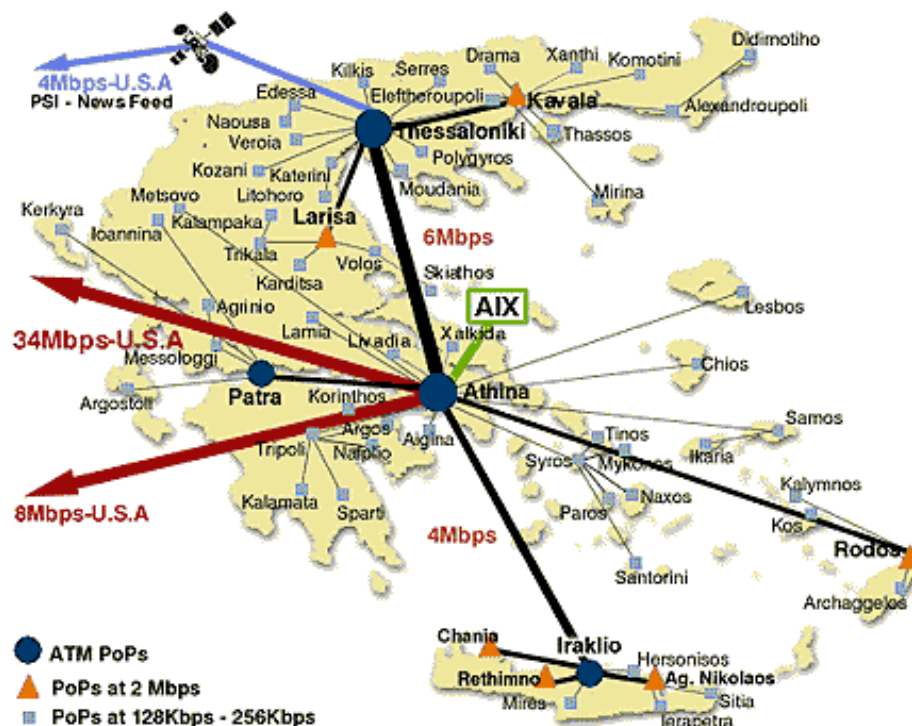
(Frequency Division Multiplexing-FDM) και στηρίζεται στη μετάδοση με ταυτόχρονη μετάδοση πολλών φερουσών μηκών κύματος μέσα από την ίδια ίνα. Ένα σχηματικό διάγραμμα της διαδικασίας πολυπλεξίας κατά μήκος κύματος φαίνεται στο Σχήμα 5 a). Από την άλλη η τεχνική OTDM στηρίζεται σε χρονικούς πολυπλέκτες που παρεμβάλλουν τα δυφία εισερχομένης ροής δεδομένων χαμηλής ταχύτητας με οπτικό τρόπο για τη δημιουργία κυματομορφής υψηλού ρυθμού μετάδοσης. Ένα σχηματικό διάγραμμα της διαδικασίας πολυπλεξίας χρόνου φαίνεται στο Σχήμα 5 b)

1.5 Δίκτυα κορμού

Τα δίκτυα κορμού χρησιμοποιούνται κυρίως από τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους για τη διασύνδεση των μητροπολιτικών δικτύων (Σχήμα 6). Αποτελούνται από τρία διακριτά στρώματα: το οπτικό σύστημα μεταφοράς (οπτικές ίνες), τα συστήματα πυκνής πολυπλεξίας μήκους κύματος (Dense Wavelength Division Multiplexing-DWDM) και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας SDH και IP. Όσον αφορά το σύστημα μετάδοσης τρία διαφορετικά είδη οπτικών ινών χρησιμοποιούνται: α) ITU-T G.653 για μονοκάναλο SDH με πολύ χαμηλές τιμές απώλειας και διασποράς, β) ITU-T G.655 για τις νέες τεχνολογίες πολυπλεξίας μήκους κύματος και γ) ITU-T G.652 για τοπικά κυρίως δίκτυα υποδομών.

Στις αρχές του 2009 ένας μεγάλος αριθμός συστημάτων πολυπλεξίας DWDM αναπτύχθηκε εξυπηρετώντας πολλές τηλεπικοινωνιακές συνδέσεις μήκους έως και 1200 χιλιόμετρα χωρίς ενδιάμεση ηλεκτρική αναγέννηση. Οι ρυθμοί μετάδοσης κυμαίνονταν έως και 10Gb/s ενώ όλες οι λειτουργίες μεταγωγής υλοποιούνταν στα υψηλότερα στρώματα δικτύου IP και SDH. Οι κύριοι περιορισμοί αυτής της τοπολογίας ήταν ότι με την αλληλουχία 2 ή 3 DWDM συστημάτων η ηλεκτρική αναγέννηση ήταν επιβεβλημένη αυξάνοντας σημαντικά το κόστος και το χρόνο επεξεργασίας των δεδομένων. Κατά δεύτερο λόγο η έλλειψη μηχανισμών προστασίας στο επίπεδο της πολυπλεξίας DWDM δεν καθιστούσε εφικτή την εκτροπή των δεδομένων σε περίπτωση βλάβης ή συντήρησης του δικτύου.

Για την επίλυση αυτών των προβλημάτων ήταν αναγκαία η υλοποίηση των λειτουργιών εκτροπής, δρομολόγησης και αποκατάστασης στο οπτικό πεδίο για περισσότερη ευελιξία στη διαχείριση και λειτουργία του δικτύου. Αυτό μπορούσε να πραγματοποιηθεί με οπτικούς μετατροπείς μήκους κύματος, φράγματα περιθλάσης και επιλεκτικούς διακόπτες. Τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνικής εμφανή καθώς ήταν δυνατή η διακίνηση δεδομένων σε υψηλότερους ρυθμούς διάδοσης με χρήση φωτονικών στοιχείων μικρού μεγέθους και χαμηλότερης ενεργειακής κατανάλωσης. Δεδομένου όμως των πρώιμων κυκλωμάτων οπτικής επεξεργασίας και τεχνικών φωτονικής ολοκλήρωσης, οι πάροχοι υπηρεσιών δεν μπορούσαν να επενδύσουν σε μια ριζική επανασχεδίαση και δόμηση του δικτύου τους. Υπό αυτό το πρίσμα οι ηλεκτρονικοί δρομολογητές εξακολούθησαν να μονοπωλούν το ενδιαφέρον στη διαχείριση των δεδομένων.



Σχήμα 6: Τοπολογία δικτύου με τις βασικές ζεύξεις κορμού

1.6 Ηλεκτρονικές μορφές δρομολόγησης

Η πιο ανεπτυγμένη μορφή ηλεκτρονικής δρομολόγησης είναι ο Cisco CRS-1 με χωρητικότητα που φθάνει έως 92 Tbit/s χρησιμοποιώντας 1152 κάρτες ρυθμοδότησης 40 Gb/s και κεντρικές μονάδες μεταγωγής [1.20]. Ο Cisco CRS-1 περιλαμβάνει κάρτες επεξεργασίας και μετάδοσης οι οποίες μπορούν να διασυνδεθούν με κεντρικούς μεταγωγείς και να σχηματίσουν συστήματα δρομολόγησης συγκεκριμένης χωρητικότητας. Στη συνέχεια τα υποσυστήματα αυτά μπορούν να συνδεθούν περαιτέρω διασφαλίζοντας μεγαλύτερες ταχύτητες ηλεκτρονικής επεξεργασίας. Με αυτή την λογική ο Cisco CRS-1 μπορεί να αναπτυχθεί σε δύο βασικές μορφές:

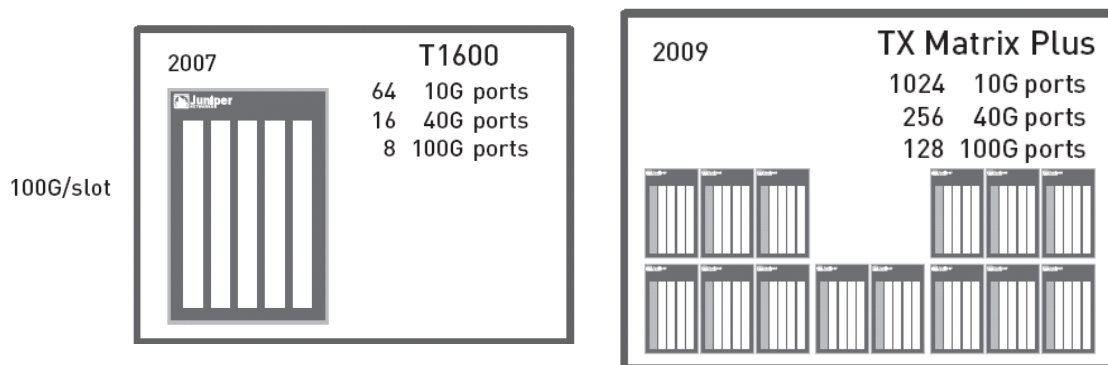
- ❖ Σύστημα μονής διάταξης (Single Shelf) περιλαμβάνοντας υποδοχές για 4, 8, ή 16 κάρτες των 40Gb/s υποστηρίζοντας ταχύτητες μεταγωγής 320 Gb/s, 640 G/s, ή 1.28 Tb/s. (Στους υπολογισμούς θεωρείται αμφίδρομη επικοινωνία $1 \times 16 \times 40 \times 2 = 1.28 \text{Tb/s}$)
- ❖ Σύστημα πολλαπλής διάταξης (Multi Shelf) με διασύνδεση έως και 72 συστημάτων μονής διάταξης υποστηρίζοντας ταχύτητες μεταγωγής έως και 92Tb/s (Στους υπολογισμούς θεωρείται αμφίδρομη επικοινωνία $72 \times 16 \times 40 \times 2 \sim 92 \text{Tb/s}$)



Σχήμα 7: Δομή του ηλεκτρονικού δρομολογητή Cisco CRS-1

Μια επίσης εξελιγμένη μορφή ηλεκτρονικής δρομολόγησης είναι ο Juniper Tx Matrix Plus με μέγιστη χωρητικότητα που αγγίζει τα 25.6 Tbit/s [1.21]. Όπως στην περίπτωση του Cisco CRS-1, ο Juniper μπορεί να αναπτυχθεί σε 2 βασικές μορφές:

- ❖ Σύστημα μονής διάταξης (Juniper T1600) περιλαμβάνοντας υποδοχές για 64 κάρτες ρυθμοδότησης 10Gb/s, 16 κάρτες ρυθμοδότησης 40Gb/s ή 8 κάρτες ρυθμοδότησης 100Gb/s, υποστηρίζοντας ταχύτητες μεταγωγής 1.28Tb/s και 1.6Tb/s αντίστοιχα. (Στους υπολογισμούς θεωρείται αμφίδρομη επικοινωνία $8 \times 100 \times 2 = 1.6 \text{Tb/s}$)
- ❖ Σύστημα πολλαπλής διάταξης (Juniper Matrix Plus) με διασύνδεση έως και 8 συστημάτων μονής διάταξης υποστηρίζοντας ταχύτητες μεταγωγής έως και 25.6Tb/s (Στους υπολογισμούς θεωρείται αμφίδρομη επικοινωνία $16 \times 8 \times 100 \times 2 = 25.6 \text{Tb/s}$)



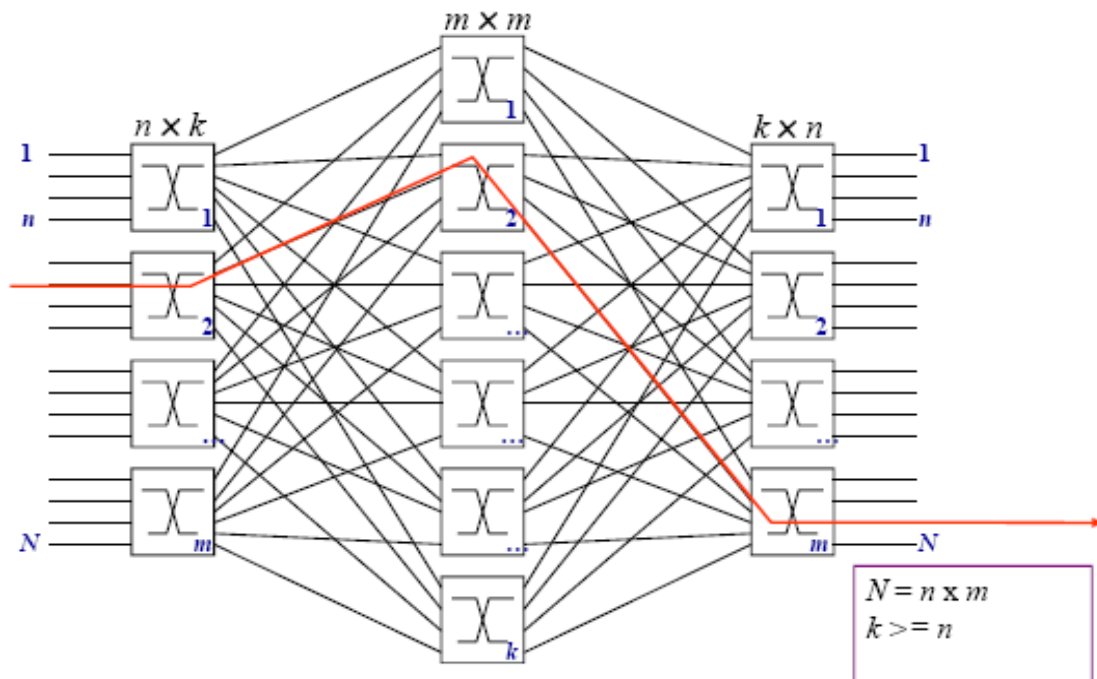
Σχήμα 8: Δομή του ηλεκτρονικού δρομολογητή Juniper Matrix Plus

Η χρήση συστημάτων πολλαπλής διάταξης είναι η πιο αποτελεσματική μέθοδος για τη διάδοση και επεξεργασία μεγάλου όγκου πληροφοριών. Για τη διασύνδεση εκατοντάδων ή χιλιάδων διακοπών και θυρών λειτουργίας, είναι αναγκαία η υλοποίηση αρχιτεκτονικών μεταγωγής πολλαπλών σταδίων. Το δίκτυο Benes [1.22] θεωρείται ακόμα και σήμερα ένα χαμηλού κόστους σύστημα μεταγωγής που μπορεί να λειτουργεί χωρίς ενδεχόμενο σύγκρουσης πακέτων πληροφορίας. Προσφέρει μάλιστα δυνατότητες αναδιευθέτησης, κατανομής και επαναδρομολόγησης των συνδέσεων επικοινωνίας στην περίπτωση που οι ζεύξεις απαιτήσουν αλλαγή της πορείας των πακέτων πληροφορίας.

Η αρχιτεκτονική Benes μπορεί να θεωρηθεί ως ένα απλοποιημένο δίκτυο Clos [1.23] πολλαπλών σταδίων. Τα δίκτυα Clos (Σχήμα 9) χρησιμοποιούνται όταν οι φυσικές ανάγκες μεταγωγής υπερβαίνουν σε χωρητικότητα τις δυνατότητες λειτουργίας του διακόπτη. Το βασικό πλεονέκτημά τους είναι ότι ο αριθμός των συνδέσεων που απαιτούνται για την σύνθεση του τελικού συστήματος δρομολόγησης είναι σημαντικά μικρότερος από τα συστήματα ευθείας ανάπτυξης. Τα δίκτυα Clos αποτελούνται από τρία στάδια: α) το στάδιο εισόδου, β) το ενδιάμεσο στάδιο και γ) το στάδιο εξόδου. Κάθε βαθμίδα μεταγωγής αποτελείται από μια σειρά από διακόπτες που διασυνδέονται μεταξύ τους με συγκεκριμένη δομή. Κάθε πακέτο πληροφορίας που εισέρχεται στο στάδιο εισόδου μπορεί να δρομολογηθεί σε οποιονδήποτε διαθέσιμο διακόπτη του μεσαίου σταδίου και στη συνέχεια στο μεταγωγέα εξόδου. Η ενδιάμεση βαθμίδα μεταγωγής επιτελεί την πιο κρίσιμη λειτουργία δρομολόγησης και αναλαμβάνει να εξυπηρετήσει μια νέα σύνδεση, αν υπάρχει διαθέσιμη ζεύξη τόσο με το μεταγωγέα εισόδου όσο και με το μεταγωγέα εξόδου.

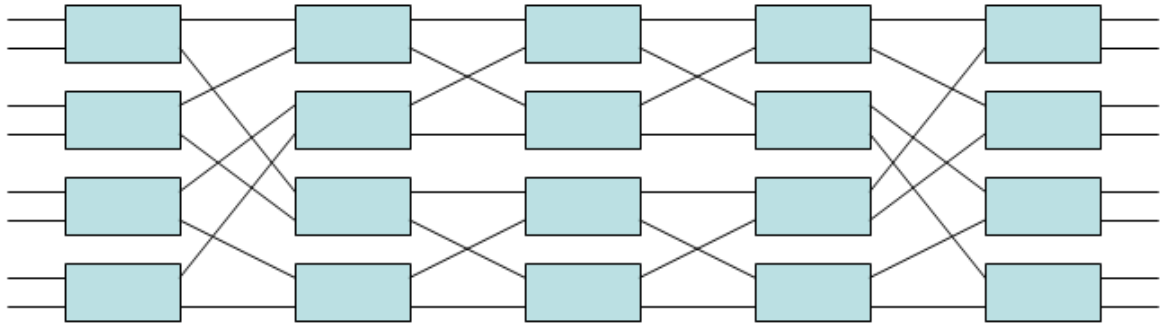
Τα Clos δίκτυα ορίζονται από τρεις ακέραιους αριθμούς n , k , και m . Κάθε διακόπτης της βαθμίδας εισόδου έχει k πόρτες εξόδου που διασυνδέονται με τους k μεταγωγείς της ενδιάμεσης βαθμίδας επεξεργασίας. Ο αριθμός n αντιπροσωπεύει τις θύρες που τροφοδοτούν κάθε έναν από τους k διακόπτες εισόδου ενώ μόνο μια σύνδεση υφίσταται μεταξύ του διακόπτη εισόδου και του διακόπτη ενδιάμεσης βαθμίδας. Στο τελευταίο στάδιο μεταγωγής υπάρχουν m διακόπτες εξόδου με k εισόδους και n εξόδους ενώ μόνο μια σύνδεση υφίσταται μεταξύ του διακόπτη ενδιάμεσης βαθμίδας και του διακόπτη εξόδου. Έχει ήδη

αποδειχθεί ότι με $k \geq n$, το δίκτυο Clos μπορεί να υποστηρίξει μη συγκρουόμενη μετάδοση πληροφορίας. Αυτό πραγματοποιείται για κάθε ζεύξη με τη χρήση κατάλληλων διαδρομών για τη διασύνδεση των θυρών εισόδου-εξόδου μέσω της ενδιάμεσης βαθμίδα μεταγωγής. Πιο συγκεκριμένα αυτό σημαίνει ότι μια ελεύθερη είσοδος στη βαθμίδα μεταγωγής εισόδου μπορεί πάντα να συνδέεται με μια ελεύθερη έξοδο στην βαθμίδα μεταγωγής εξόδου όταν οι υπάρχουσες ζεύξεις μπορούν να αναδιευθετηθούν με τη χρήση των διακοπών ενδιάμεσης βαθμίδας. Αν $k \geq 2n-1$, μια νέα σύνδεση μπορεί πάντα να προστεθεί, χωρίς την εκ νέου ρύθμιση των διαδρομών μετάδοσης .

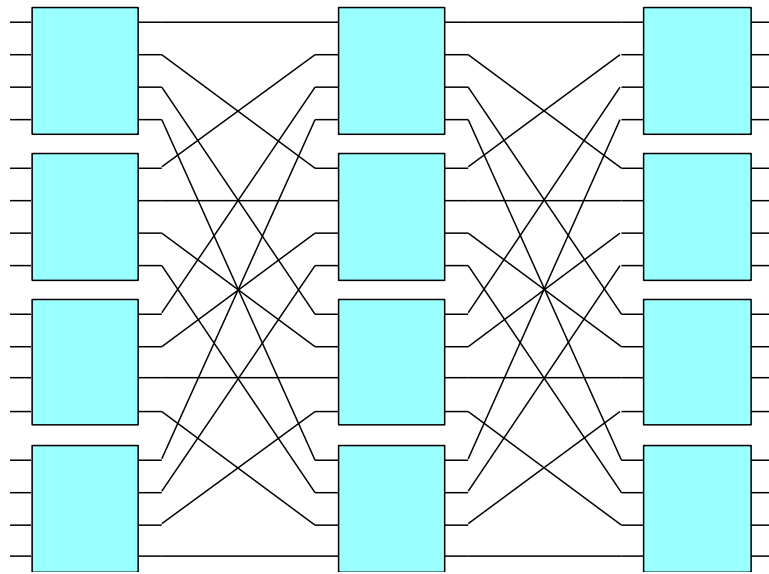


Σχήμα 9: Δομή ενός μη συγκρουόμενου Clos δικτύου 3 σταδίων

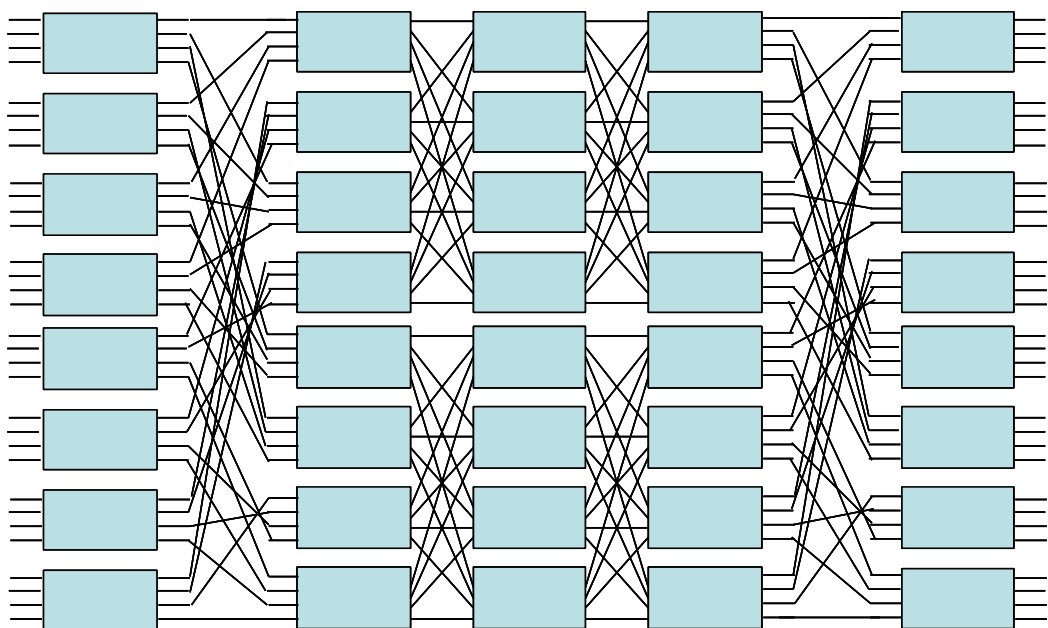
Τα Clos δίκτυα μπορούν επίσης να αναπτυχθούν σε οποιοδήποτε αριθμό σταδίων. Με την αντικατάσταση κάθε βαθμίδας μεταγωγής με ένα δίκτυο 3 σταδίων, Clos δίκτυα 5, 7, 9, 11.. βαθμίδων είναι δυνατόν να επιτευχθούν. Το Σχήμα 10 παρουσιάζει ένα Clos δίκτυο πέντε σταδίων όπου οι τρεις κεντρικές μονάδες μεταγωγής αποτελούνται από δύο 4×4 Clos δίκτυα χρησιμοποιώντας 2×2 διακόπτες επεξεργασίας. Ένα Clos δίκτυο με $k = n = 2$ και δυνατότητα αναδιευθέτησης των διαδρομών ονομάζεται δίκτυο Benes με αριθμό εισόδων-εξόδων $N = m \times n = 2m$. Τα δίκτυα αυτά έχουν $2\log_2 N - 1$ στάδια όπου το καθένα περιέχει $N/2$ 2×2 διακόπτες. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται διακόπτες 4×4 , ένα δίκτυο Clos 3 σταδίων μπορεί να υλοποιηθεί όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 11. Αντίστοιχα ένα δίκτυο Clos με $k = n = 4$ και δυνατότητες ανακατομής των διαδρομών χρησιμοποιεί $N = 32$ εισόδους και εξόδους και είναι κατασκευασμένο από $2\log_2 32 - 1$ στάδια όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 12.



Σχήμα 10: Clos δίκτυο με 5 στάδια μεταγωγής



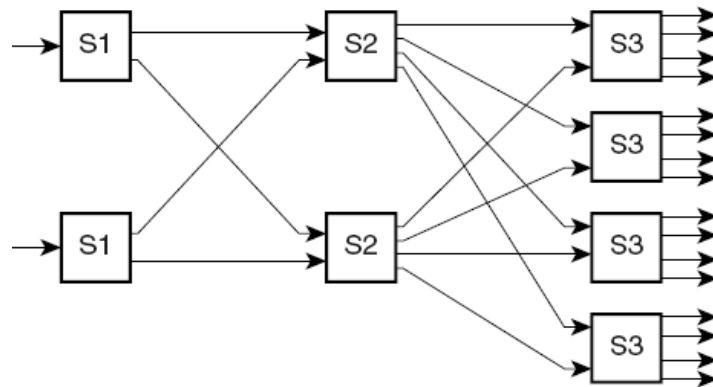
Σχήμα 11: Clos δίκτυο με 4x4 διακόπτες μεταγωγής



Σχήμα 12: Clos δίκτυο με 32 πόρτες εισόδου ανεπτυγμένο με 5 στάδια 4x4 διακοπών μεταγωγής

Για τους ηλεκτρονικούς δρομολογητές CISCO και JUNIPER η μεταγωγή δεδομένων πραγματοποιείται με πολλαπούς διακόπτες και κεντρικές μονάδες μεταγωγής σε αρχιτεκτονική δικτύου Benes 3 σταδίων. Ανάλογα με το αν οι κάρτες επεξεργασίας λειτουργούν σε σύστημα μονής ή πολλαπλής διάταξης, διαφορετικά κυκλώματα μεταγωγής χρησιμοποιούνται. Τρεις είναι οι κύριες βαθμίδες διαχείρισης της πληροφορίας με την καθεμιά να επιτελεί διαφορετική λειτουργία [1.24] όπως φαίνεται στο Σχήμα 13. Πιο συγκεκριμένα:

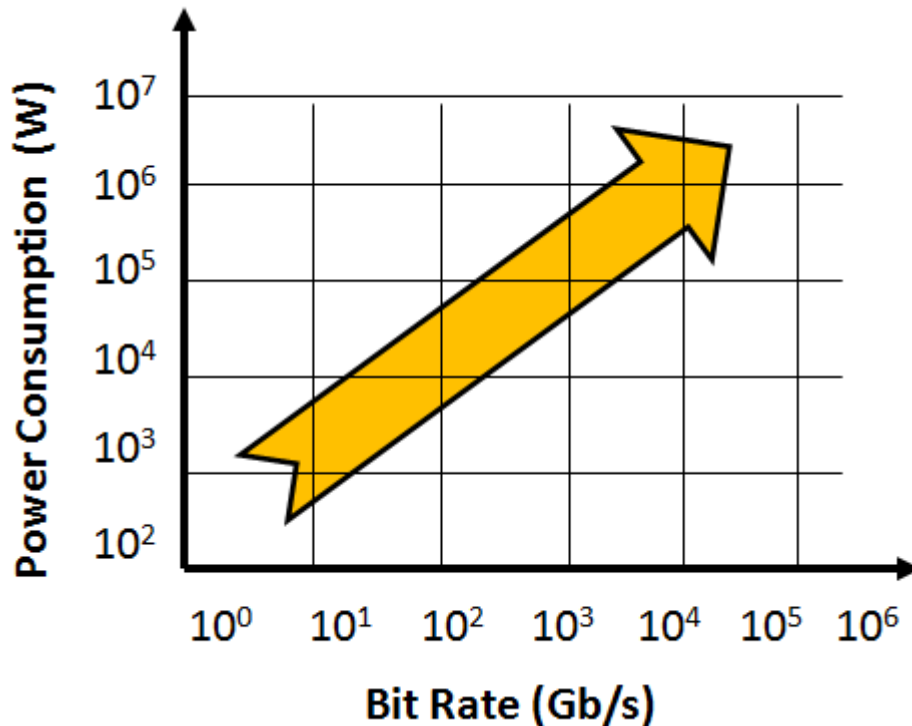
- ❖ Βαθμίδα (S1)-Λαμβάνει, διακρίτοποιεί και διανέμει την τηλεπικοινωνιακή κίνηση στο δεύτερο στάδιο (S2) της μονάδας επεξεργασίας
- ❖ Βαθμίδα (S2)-Πραγματοποιεί μεταγωγή και δρομολόγηση δεδομένων με κατάλληλους διακόπτες
- ❖ Βαθμίδα (S3)-Πραγματοποιεί την μεταγωγή και δρομολόγηση στις κάρτες επεξεργασίας εξόδου



Σχήμα 13: Αρχιτεκτονική της ηλεκτρονικής μονάδας επεξεργασίας και μεταγωγής

1.7 Κατανάλωση ισχύος στα ηλεκτρονικά συστήματα δρομολόγησης

Τα τελευταία χρόνια με τη ραγδαία αύξηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης και την παροχή ολοένα και περισσότερων ευρυζωνικών εφαρμογών, η ενεργειακή κατανάλωση στα κέντρα διαχείρισης των πληροφοριών εκτοξεύτηκε γραμμικά ενώ παράλληλα το κόστος λειτουργίας και συντήρησης των δικτύων εκτινάχθηκε στα ύψη. Σύμφωνα με κάποιους υπολογισμούς, η τεχνολογία που χρησιμοποιείται στις τηλεπικοινωνίες (Information and Communication Technology-ICT), είναι υπεύθυνη για το 2% έως 10% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας ενώ εκτιμάται ότι οι εκπομπές ρύπων θα διπλασιαστούν ως το 2020 φθάνοντας τους 1,43 Gt διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) σε παγκόσμιο επίπεδο [1.25]. Στο Σχήμα 14 απεικονίζεται η ισχύς που απαιτείται από διάφορες κατηγορίες ηλεκτρονικών δρομολογητών ως συνάρτηση της συνολικής χωρητικότητας μεταγωγής. Είναι αξιοσημείωτο ότι η κατανάλωση ενέργειας είναι σχεδόν γραμμική με την απόδοση, με τις εξελιγμένες μορφές δρομολόγησης να καταναλώνουν σήμερα πάνω από 10 KW ισχύος κατά μέσο όρο.



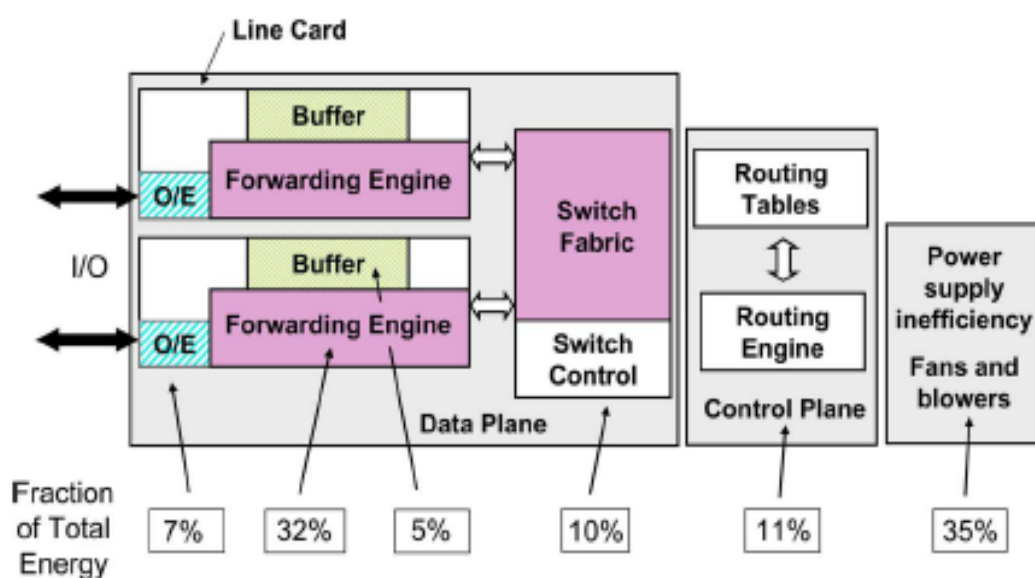
Σχήμα 14: Κατανάλωση ισχύος συναρτήσει της χωρητικότητας των ηλεκτρονικών συστημάτων δρομολόγησης

Με δεδομένη αυτή την ενεργειακή έκρηξη οι πάροχοι υπηρεσιών είναι υπεύθυνοι για το 37% των παγκόσμιων ρύπων στο χώρο των τηλεπικοινωνιών, ενώ τα κέντρα δεδομένων και τερματικών σταθμών για το υπόλοιπο ποσοστό. Στην Ιταλία, για παράδειγμα, ο κρατικός φορέας επικοινωνίας είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος καταναλωτής ηλεκτρικής ενέργειας μετά το εθνικό σιδηροδρομικό δίκτυο. Σε έναν τυπικό πάροχο υπηρεσιών διαδικτύου (Internet Service Provider-ISP), η κατανάλωση ενέργειας μόνο στο δίκτυο κορμού υπολογίζεται πάνω από 12 GWh το χρόνο, καθιστώντας αδύνατη τη διάθεση εύρους ζώνης 100 Mbit/s στους χρήστες λόγω των υψηλών ποσοστών ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία των εκατομμύρια ηλεκτρονικών μορφών επεξεργασίας και μετάδοσης.

Για την εξοικονόμηση ενέργειας στον τομέα των δικτυακών επικοινωνιών είναι αναγκαία η χρήση νέων τεχνολογιών και αρχιτεκτονικών. Στο σχεδιασμό των συστημάτων νέας γενιάς, η ενεργειακή αποδοτικότητα έχει πρωτεύοντα ρόλο στη δομή, το κόστος λειτουργίας και τη συνολική χωρητικότητα της τελικής διάταξης. Αν και η ενεργειακή απόδοση των ηλεκτρονικών δρομολογητών έχει βελτιωθεί με την πάροδο των χρόνων, τα ποσοστά ισχύος που καταναλώνουν παραμένουν σε ιδιαίτερα υψηλές τιμές. Πρόσφατες έρευνες έχουν δείξει ότι οι εξελιγμένες μορφές μεταγωγής στην περιοχή 1 Tbit / s, καταναλώνουν περίπου 10 nJ ανά bit με βάση τη συνολική τους χωρητικότητα [1.26]. Στο Σχήμα 15 φαίνονται τα κύρια λειτουργικά τμήματα ενός ηλεκτρονικού δρομολογητή και τα αντίστοιχα ποσά ισχύος που καταναλώνουν. Τα βασικά δομικά στοιχεία είναι:

- ❖ Οι κάρτες επεξεργασίας (Line cards): Αναλαμβάνουν τη διαχείριση της εισερχομένης και εξερχομένης τηλεπικοινωνιακής κίνησης, συνδέονται με το οπτικό δίκτυο μέσω οπτο-ηλεκτρονικών (O/E) και ηλεκτρο-οπτικών (E/O) διεπαφών και υποστηρίζουν την αποθήκευση των δεδομένων σε ανεξάρτητες ηλεκτρονικές μνήμες (buffering)
- ❖ Η κεντρική μονάδα μεταγωγής (Switching Fabric): Διασυνδέει τις κάρτες επεξεργασίας μέσω ενός ηλεκτρονικού πίνακα μεταγωγής και αναλαμβάνει τη μετάδοση των δεδομένων από τις κάρτες εισόδου στις κατάλληλες κάρτες εξόδου.
- ❖ Η κεντρική μονάδα ελέγχου (Control Plane): Αποτελείται από πίνακες δρομολόγησης (Routing Tables) και είναι υπεύθυνη για τη ροή των πακέτων πληροφορίας ανάλογα με τις αιτήσεις δρομολόγησης που δέχεται από τις κάρτες επεξεργασίας.
- ❖ Το σύστημα ψύξης: Περιλαμβάνει μια συστοιχία από ανεμιστήρες που λειτουργούν στις 4000 στροφές για απαγωγή θερμότητας από τα κυκλώματα δρομολόγησης.

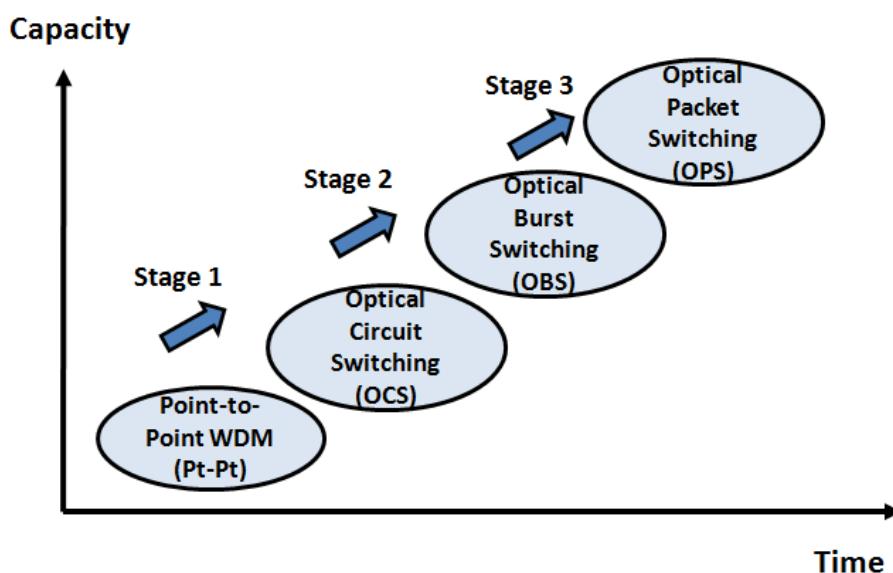
Μεταξύ των διάφορων λειτουργιών που επιτελούνται κατά τη διαδικασία μεταγωγής, είναι εμφανές ότι το σημαντικότερο ποσοστό ισχύος καταναλώνεται στις βαθμίδες διανομής των δεδομένων (32% της συνολικής ισχύος) και στα συστήματα ψύξης και απαγωγής θερμότητας (35% του συνόλου). Αντίθετα η κύρια μονάδα μεταγωγής χρειάζεται για τη λειτουργία της μόνο το 10% της συνολικής ισχύος.



Σχήμα 15: Ενεργειακή κατανάλωση των βαθμίδων λειτουργίας ενός ηλεκτρονικού δρομολογητή [1.26]

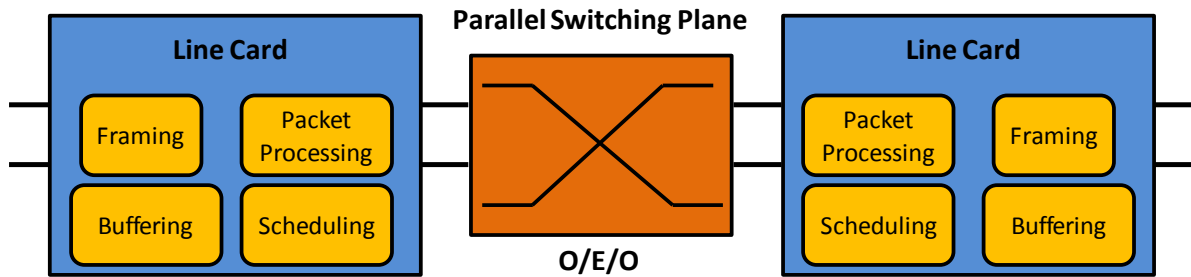
1.8 Οπτική μεταγωγή σε δρομολογητές δικτύου

Οι κεντρικοί κόμβοι σε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο περιλαμβάνουν ένα σημαντικό αριθμό ηλεκτρονικών δρομολογητών οι οποίοι διασυνδέονται με τεχνικές πολυπλεξίας κύματος (WDM). Μέσω αυτής της αρχιτεκτονικής τα σημερινά δίκτυα εξελίσσονται από σημειακές ζεύξεις πολυπλεξίας (point-to-point) σε οπτικά κυκλώματα μεταγωγής (Optical Circuit Switching-OCS) παρέχοντας μεγαλύτερη χωρητικότητα και εξυπηρετώντας μεγαλύτερο αριθμό χρηστών και ευρυζωνικών υπηρεσιών. Στο δεύτερο στάδιο εξέλιξης, όπως φαίνεται στο σχήμα Σχήμα 16, τα συστήματα μεταγωγής εκρηκτικής ροής (Optical Burst Switching-OBS) διαδέχονται τα κυκλώματα OCS, ενώ στο τελευταίο στάδιο κυριαρχούν οι διατάξεις αμιγώς οπτικής μεταγωγής πακέτων πληροφορίας μεταξύ των κόμβων του δικτύου. Η μετάβαση από το στάδιο 1 στο 2 είναι αρκετά σαφής και υπό εξέλιξη, ενώ το τρίτο στάδιο βρίσκεται ακόμα στο στάδιο της έρευνας και πειραματικής εφαρμογής.



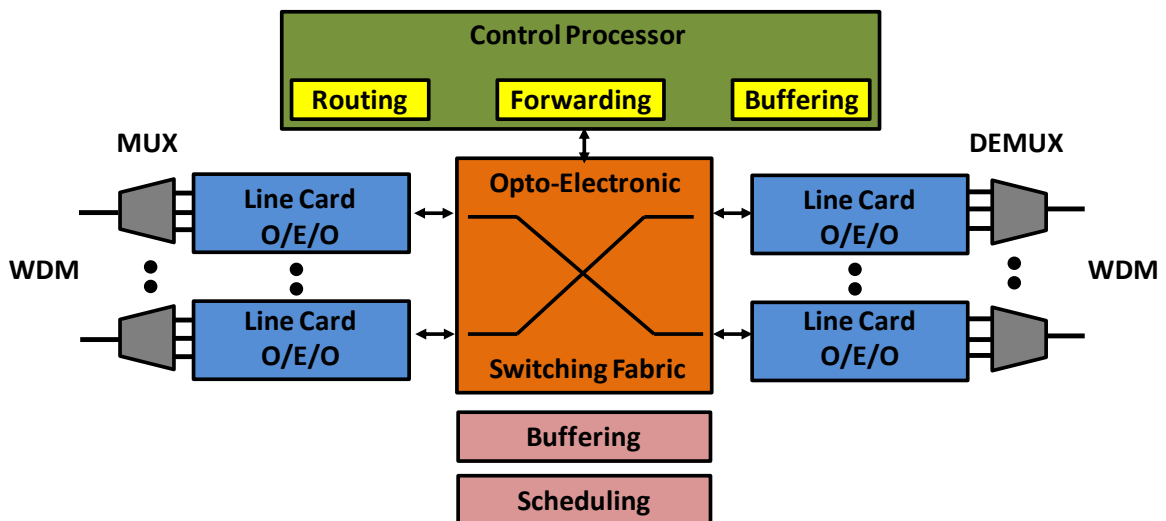
Σχήμα 16: Εξέλιξη των οπτικών τεχνικών μεταγωγής στα δίκτυα πολυπλεξίας μήκους κύματος [1.26]

Τα τελευταία χρόνια έχει προταθεί η χρήση οπτικών ολοκληρωμένων μονάδων μεταγωγής για την απλοποίηση των συστημάτων δρομολόγησης, τη μείωση της ενεργειακής τους κατανάλωσης και την αύξηση της συνολικής χωρητικότητας τους [1.2]. Το Σχήμα 17 απεικονίζει την αρχιτεκτονική ενός ηλεκτρονικού δρομολογητή που μπορεί να διασυνδέει παράλληλα έναν μεγάλο αριθμό καρτών επεξεργασίας και μονάδων μεταγωγής. Τα επιμέρους συστήματα αναπτύσσονται σε παράλληλη συστοιχία, συνδέονται με πολύτροπα καλώδια οπτικών ινών και επικοινωνούν με μια κεντρική μονάδα μεταγωγής και μετάδοσης. Στους δρομολογητές αυτούς, ξεχωριστές θυρίδες χρησιμοποιούνται για τις κάρτες επεξεργασίας και ξεχωριστές θυρίδες για τις κάρτες μεταγωγής.



Σχήμα 17: Αρχιτεκτονική ηλεκτρονικού δρομολογητή

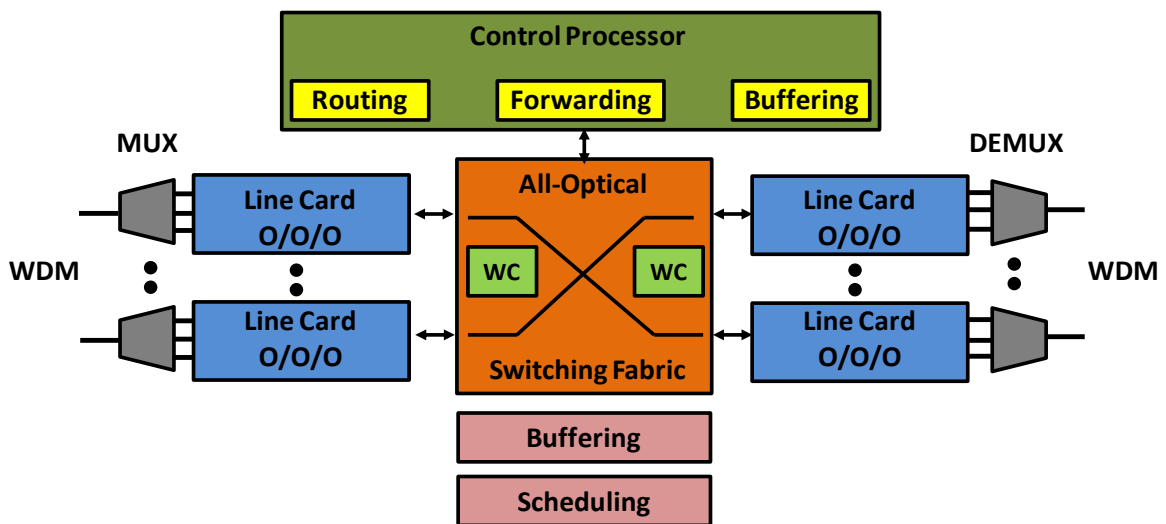
Το αμέσως επόμενο βήμα είναι η αντικατάσταση της μονάδας μεταγωγής (Switching Plane) ή μέρος αυτής με ένα οπτικό κύκλωμα μεταγωγής. Η συνολική δομή εξακολουθεί να παραμένει στην ίδια μορφή με τροποποιήσεις που εστιάζονται στη διασύνδεση των συστημάτων μετάδοσης (αντικατάσταση των συνδέσεων χαμηλής ρυθμοδότησης με υψηλής ταχύτητας οπτικά καλώδια) και στην αρχιτεκτονική των σταδίων μεταγωγής (χρήση μιας οπτικής μήτρας στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας για εξασφάλιση μέγιστης χωρητικότητας). Για τον έλεγχο της δρομολόγησης (Routing), της μετάδοσης (Forwarding) και της αποθήκευσης (Buffering), ένας κεντρικός επεξεργαστής χρησιμοποιείται (Control Processor) ο οποίος αναλαμβάνει τη ροή των πακέτων πληροφορίας ανάλογα με τις αιτήσεις των καρτών επεξεργασίας. Η οπτική αποθήκευση των πακέτων πληροφορίας αποτελεί σημαντικό πρόβλημα στη διαχείριση των δεδομένων, αλλά υπάρχουν υβριδικές λύσεις που επιτελούν οπτοηλεκτρονική μετατροπή και διαδοχική αποθήκευση. Η προτεινόμενη τοπολογία απεικονίζεται στο Σχήμα 18.



Σχήμα 18: Υβριδική μορφή οπτοηλεκτρονικού δρομολογητή

Με δεδομένες τις βασικές αδυναμίες των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων στην κατασκευή επεκτάσιμων Tb/s συστημάτων δρομολόγησης, η στροφή προς τη φωτονική τεχνολογία ήταν μονόδρομος. Το τελικό στάδιο εξέλιξης θα μπορούσε να είναι μια αμιγώς οπτική μορφή δρομολόγησης όπως φαίνεται στο Σχήμα 19

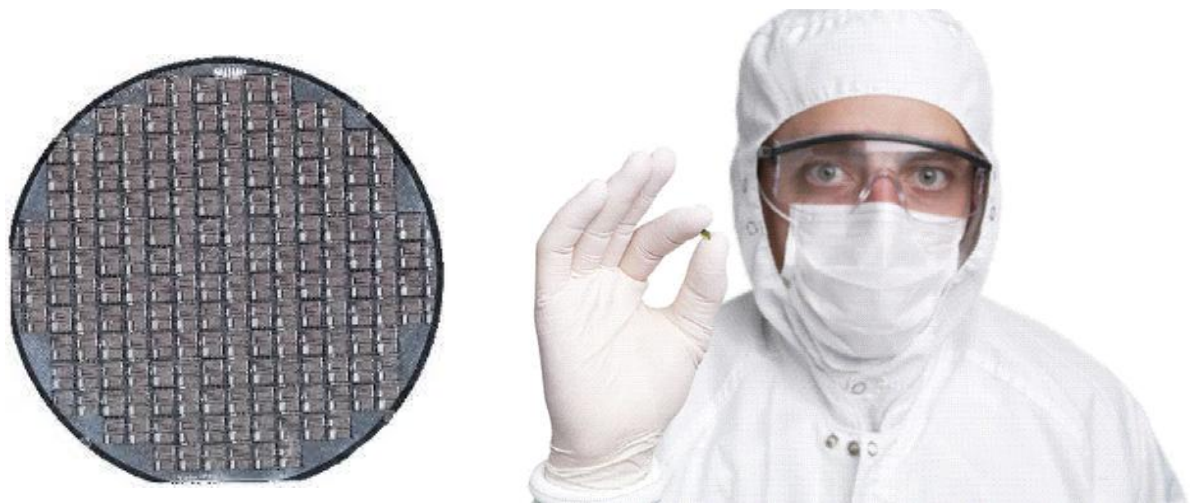
χωρίς τη χρήση οπτο-ηλεκτρικών βαθμίδων επεξεργασίας. Για να επιτευχθεί μια τέτοια τοπολογία είναι απαραίτητη η ανάπτυξη μιας σειράς λειτουργιών στο οπτικό πεδίο. Πιο συγκεκριμένα είναι αναγκαία η χρήση ολοκληρωμένων φωτονικών στοιχείων για τη δημιουργία κυκλωμάτων οπτικής πολυπλεξίας, αποπολυπλεξίας, μετατροπής μήκους κύματος, δρομολόγησης, αποθήκευσης, αναγέννησης, διαχείρισης και επίλυσης σύγκρουσης πακέτων. Μπορεί οι διατάξεις αυτές να βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο ερευνητικής μελέτης, ωστόσο από τις αρχές της δεκαετίας του '90 έχουν γίνει σημαντικά βήματα εξέλιξής τους με τη ραγδαία ανάπτυξη και επένδυση στις τεχνικές φωτονικής ολοκλήρωσης. Απώτερος στόχος και σκοπός των ερευνητικών προσπαθειών είναι η δημιουργία μίας οπτικής πλατφόρμας δρομολόγησης μικρού μεγέθους, χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης και υπερυψηλών ταχυτήτων ικανή να εξυπηρετήσει την τηλεπικοινωνιακή έκρηξη που παρατηρείται στις δικτυακές εφαρμογές και υπηρεσίες.



Σχήμα 19: Αμιγώς οπτικός δρομολογητής δικτύου

1.9 Προς την τεχνολογία της φωτονικής ολοκλήρωσης

Ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (Integrated Circuit- IC) είναι μια διάταξη μικρού μεγέθους η οποία αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό ηλεκτρονικών στοιχείων που κατασκευάζονται, συναρμολογούνται και διασυνδέονται σε ένα κοινό υπόστρωμα με σκοπό να επιτελέσουν μια συγκεκριμένη λειτουργία. Το 1943 ήταν το έτος που έκανε την εμφάνισή του το πρώτο τρανζίστορ και 11 χρόνια μετά άρχισε η εποχή των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων [1.27]. Ο Gordon Moore είχε προβλέψει εκθετική αύξηση του αριθμού των τρανζίστορ σε κυκλώματα IC με διπλασιασμό περίπου κάθε δύο έτη [1.28]. Με την ευρείας κλίμακα ολοκλήρωση και τη μαζική παραγωγή, επήλθε τεράστια μείωση στο μέγεθος και το κόστος των ηλεκτρονικών διατάξεων, με παράλληλη βελτίωση στην απόδοση και τις



Σχήμα 20: Φωτονική ολοκλήρωση σε υπόστρωμα πυριτίου

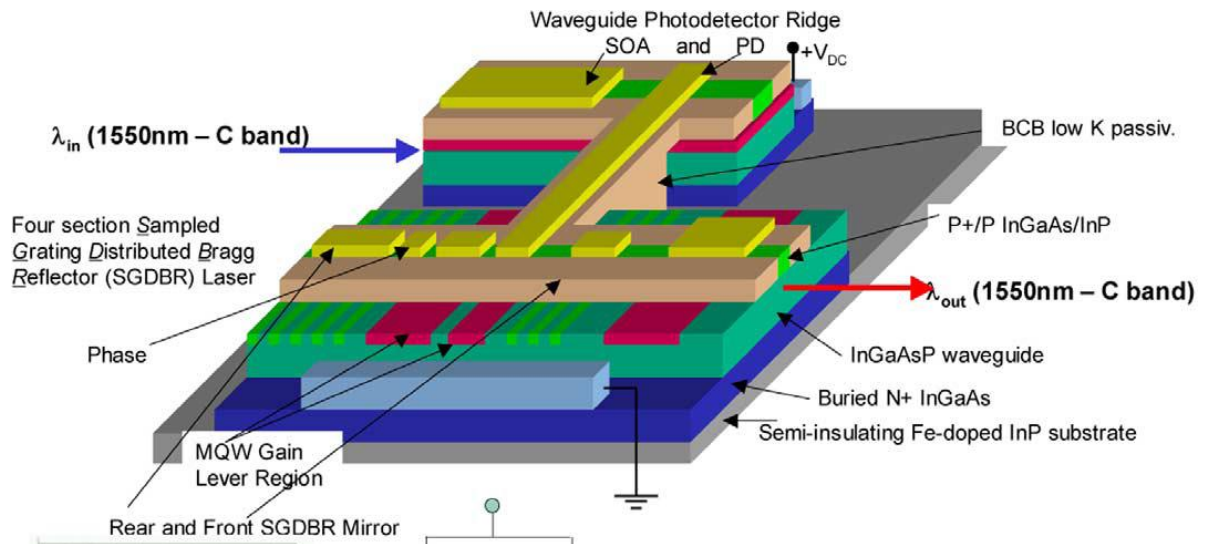
εφαρμογές. Ο πρώτος υπολογιστής UNIVAC το 1951 ζύγιζε 13 τόνους και καταλάμβανε περισσότερα από 35,5 m² ενώ η ταχύτητα του ρολογιού του έφτανε τα 2,25 MHz [1.29]. Πενήντα πέντε χρόνια αργότερα, ένας προσωπικός υπολογιστής επιδεικνύει σαφώς μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ (x1000), ζυγίζει κάτω από 1 kg και παρέχει υπηρεσίες φορητότητας. Η εκθετική πρόοδος της τεχνολογίας στις υπολογιστικές συσκευές (ταχύτητα υπολογιστών ανά μονάδα κόστους) ήταν επίτευγμα του περασμένου αιώνα ενώ στόχος και σκοπός για την εποχή που διανύουμε είναι η ολοκλήρωση ημιαγωγικών διατάξεων τόσο απο τεχνολογικής όσο και από οικονομικής πλευράς.

Ενώ τα κυκλώματα ICs αναφέρονται σε μικροηλεκτρονικές διατάξεις, ο αντίστοιχος όρος στις οπτικές διατάξεις είναι τα φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα (Photonic Integrated Circuits-PICs), τα οποία μεταφέρουν την πληροφορία πάνω σε οπτικά μήκη κύματος τόσο στην υπεριώδη όσο και στην υπέρυθη περιοχή (Σχήμα 20). Αν και η ανάπτυξη και εξέλιξη των φωτονικών κυκλωμάτων μπορεί να προβλεφθεί από έναν αντίστοιχο νόμο του Moore [1.30][1.31], παράμετροι που συσχετίζονται με το κόστος, την πυκνότητα ολοκλήρωσης, τη λειτουργικότητα και την πολυπλοκότητα, υποδηλώνουν ότι τα ολοκληρωμένα φωτονικά κυκλώματα είναι γενιές πίσω από τα αντίστοιχα ηλεκτρονικά. Ο λόγος που οι φωτονικές διατάξεις εξελίχθηκαν με πιο βραδύ ρυθμό εστιάζεται μερικώς στην τεχνολογία κατασκευής και μερικώς στο υλικό επεξεργασίας. Μπορεί το πρώτο τρανζίστορ και δύο από τα πρώτα ολοκληρωμένα κυκλώματα να κατασκευάστηκαν σε γερμάνιο (Ge), το πυρίτιο (Si) ωστόσο γρήγορα έγινε το κυρίαρχο υλικό για τη δημιουργία των ηλεκτρονικών διατάξεων. Το πυρίτιο είναι το δεύτερο πιο άφθονο στοιχείο στη γη και υπερτερεί του γερμανίου και των άλλων σύνθετων ημιαγωγών λόγω του ευρύ διάκενου, της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας, της κρυσταλλικής ποιότητας-καθαρότητας και των άριστων μηχανικών ιδιοτήτων του.

Σε αντίθεση με τα ηλεκτρονικά κυκλώματα πυριτίου, τα αντίστοιχα φωτονικά κατασκευάζονται με πληθώρα υλικών συμπεριλαμβανομένων των ημιαγωγικών στοιχείων πυριτίου (Si) και γερμανίου (Ge), πιο σύνθετων ημιαγωγών όπως InP, GaAs, διηλεκτρικών SiO₂ και SiN₃, πολυμερών και μη γραμμικών κρυσταλλικών δομών όπως LiNbO₃. Ανάλογα με τις ιδιότητες τους, διαφορετική είναι η χρήση τους στην κατασκευή των φωτονικών δομών. Για παράδειγμα το InP και GaAs είναι το επιθυμητό υλικό για την παραγωγή πηγών φωτός (Light sources), ενώ το διοξείδιο του πυριτίου και το πυρίτιο προτιμάται για την κατασκευή κυματοδηγών χαμηλής απώλειας. Η ασυμβατότητα των υλικών και των τεχνικών επεξεργασίας αποτελεί το μεγαλύτερο εμπόδιο για τη δημιουργία μιας κοινής πλατφόρμας φωτονικής ολοκλήρωσης. Όπως και στην περίπτωση των ηλεκτρικών κυκλωμάτων υπήρχαν αμφιβολίες για το ποιο υλικό Si, InP ή GaAs θα μπορούσε να ενσωματώσει τα ηλεκτρονικά υψηλής απόδοσης, το ίδιο συμβαίνει και με τα οπτικά ολοκληρωμένα κυκλώματα.

Το πυρίτιο εξακολουθεί να διατηρεί την κυριαρχία του στον κόσμο των ηλεκτρονικών παρά την εμπορική επιτυχία κάποιων εταιρειών με την επιλογή των πιο σύνθετων ημιαγωγών. Η εδραίωση του πυριτίου είχε ως αποτέλεσμα μια πιο ορθολογική ανάπτυξη της τεχνολογίας μειώνοντας δραστικά τις αβεβαιότητες στις ερευνητικές προσπάθειες και επενδύσεις. Τον τελευταίο μισό αιώνα με την ανάπτυξη νέων σχεδιαστικών εργαλείων, αποδοτικών αρχιτεκτονικών, καινούριους τρόπους ολοκλήρωσης, επεξεργασίας και συσκευασίας, η βιομηχανία ηλεκτρικών κυκλωμάτων στις ΗΠΑ ξεπέρασε σε τζίρο τα 200 δισεκατομμύρια δολάρια ανά έτος. Οι ετήσιες επενδύσεις για έρευνα και ανάπτυξη ηλεκτρονικών συστημάτων κυμαίνονται σήμερα περίπου στα 45 δισεκατομμύρια δολάρια ανά έτος ενώ το επίπεδο δαπανών για τη δημιουργία ολοκληρωμένων φωτονικών κυκλωμάτων είναι αρκετά πιο μικρό λόγω του μειωμένου όγκου παραγωγής.

Είναι, επομένως, σημαντικό να καθοριστεί ένα υλικό κοινής αποδοχής για την ανάπτυξη μεγάλου αριθμού οπτικών διατάξεων. Οι τεχνικές ολοκλήρωσης σε InP και πυρίτιο (Si) ξεχωρίζουν και ανταγωνίζονται μεταξύ τους για το ποια τελικώς θα επικρατήσει στο χώρο της φωτονικής τεχνολογίας. Η παγκοσμίου φήμης Infinera τα τελευταία χρόνια επένδυσε σημαντικά στην τεχνολογία InP και πέτυχε να κατασκευάσει πομποδέκτες 40 καναλιών συνολικής χωρητικότητας 400Gb/s [1.32]. Η Luxtera από την άλλη πλευρά εστίασε το ερευνητικό και εμπορικό της ενδιαφέρον στην τεχνολογία CMOS κατασκευάζοντας οπτοηλεκτρονικούς πομποδέκτες σε πυρίτιο στα 40Gb/s [1.33]. Προς το παρόν η ανάπτυξη οπτικών κυκλωμάτων κινείται σε παράλληλες κατευθύνσεις με τις πλατφόρμες ολοκλήρωσης InP και Si να κυριαρχούν. Ωστόσο οι μελλοντικές απαιτήσεις για περισσότερη χωρητικότητα, χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση και μικρότερο αποτύπωμα, ίσως οδηγήσουν τελικά στην υιοθέτηση υβριδικών μορφών ολοκλήρωσης με τη συνύπαρξη πολυστοιχειακών διατάξεων σε ένα κοινό υπόστρωμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 21.



Σχήμα 21: Πολυστοιχειακή μορφή φωτονικής ολοκλήρωσης

1.10 Κίνητρο και δομή της διατριβής

Ένα δίκτυο τηλεπικοινωνιών στηρίζεται αποκλειστικά σε δύο λειτουργίες: τη μετάδοση και επεξεργασία των πακέτων πληροφορίας [1.34]. Η αποστολή των δεδομένων πραγματοποιείται με πολυκάναλα συστήματα διάδοσης ενώ η διαχείρισή τους με ενδιάμεσους κόμβους του δικτύου. Σε αυτούς τους κόμβους η μεταγωγή υλοποιείται κατά τέτοιο τρόπο έτσι ώστε τα bit πληροφορίας να δρομολογούνται από την προέλευση στον προορισμό τους κατά μήκος προκαθορισμένων διαδρομών. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται δρομολόγηση και μπορεί να εφαρμοστεί είτε στο ηλεκτρικό είτε στο οπτικό πεδίο. Η χρήση ηλεκτρικών συστημάτων και πολύπλοκων αλγορίθμων αποτελεί πλέον μια διαδεδομένη μορφή τηλεπικοινωνιακής δικτύωσης που σε συνδυασμό μάλιστα με τις οπτικές μορφές μετάδοσης, η αποδοτικότητα βελτιώνεται σημαντικά. Η δεδομένη ωστόσο χωρητικότητα των ηλεκτρονικών συσκευών και η ανάγκη πολυάριθμων οπτοηλεκτρικών μετατροπών αποτελεί εμπόδιο στην εξυπηρέτηση ολοένα και περισσότερων χρηστών και ευρυζωνικών υπηρεσιών. Σήμερα οι ηλεκτρονικοί δρομολογητές υψηλής χωρητικότητας καταναλώνουν μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ισχύος και καλύπτουν σημαντικές εκτάσεις επιφανείας στα κέντρα διαχείρισης δεδομένων. Είναι ενδεικτικό ότι ο Cisco CRS-1 με δυνατότητες μεταγωγής έως και 92 Tb / s καταλαμβάνει χώρο 100m², καταναλώνει 1 MW ηλεκτρική ενέργεια και ζυγίζει περίπου 60 τόνους.

Υπό αυτό το πρίσμα η στροφή προς τη φωτονική τεχνολογία [1.35] και τις οπτικές αρχιτεκτονικές δρομολόγησης αποτέλεσε αντικείμενο έντονης ερευνητικής και πειραματικής μελέτης. Για την υλοποίηση αμιγώς οπτικών διατάξεων επεξεργασίας, οι πρώτες προσπάθειες εστιάστηκαν στη χρήση μη γραμμικών οπτικών ινών με χαμηλές απώλειες μετάδοσης και υψηλές ταχύτητες

λειτουργίας. Μπορεί τα κυκλώματα αυτά να ήταν ευέλικτα στη διασύνδεσή τους, ωστόσο η πολυπλοκότητά τους, το μέγεθος τους και η μειωμένη χρηστικότητά τους αποτελούσαν σημαντικά εμπόδια για την ευρεία εφαρμογή τους. Μάλιστα για τη διέγερση των μη γραμμικών φαινομένων απαιτούνταν υψηλές τιμές οπτικής ισχύος καθιστώντας τη χρήση τους ενεργειακά ασύμφορη και πρακτικά μη επεκτάσιμη [1.36]. Σε επόμενο στάδιο μελετήθηκε η μίξη τεσσάρων φωτονίων (Four Wave Mixing-FWM) σε περιοδικές δομές LiNbO₃ (PPLN) για τη δημιουργία διατάξεων οπτικής λογικής, μετατροπής μήκους κύματος και μεταγωγής. Τα πλεονεκτήματα της τεχνικής αυτής ήταν η διαφάνεια λειτουργίας, το χαμηλό επίπεδο θορύβου, η υψηλή αποδοτικότητα καθώς επίσης και η μεταβλητότητα στο μηχανισμό μετατροπής μήκους κύματος [1.37]. Ωστόσο, τα βασικά μειονεκτήματα ήταν η εξάρτηση από την πόλωση, η χρήση υψηλής οπτικής ισχύος και οι δυσκολίες στην κατασκευή των επιμέρους κυκλωμάτων [1.38].

Πρόσφατα οι ημιαγώγιμοι οπτικοί ενισχυτές (Semiconductor Optical Amplifiers-SOAs) αποτέλεσαν το κύριο συστατικό υλοποίησης φωτονικών κυκλωμάτων επεξεργασίας σήματος. Πιο συγκεκριμένα λόγω της δομής των ημιαγωγών και των έντονων μη γραμμικών φαινομένων, η οπτική ισχύς που χρησιμοποιείται για τις μεταβολές κέρδους και φάσης είναι πολύ μικρή με αποτέλεσμα τη χαμηλή ενεργειακή κατανάλωσή τους. Επίσης οι SOAs σαν οπτικά στοιχεία έχουν μικρό αποτύπωμα (~1.3mm μήκος) και μπορούν να ολοκληρωθούν μέσω CMOS τεχνολογίας με άλλες φωτονικές συσκευές, άλλα υποστρώματα και διαφορετικά υλικά [1.39]. Ο βασικός όμως περιορισμός έγκειται στο γεγονός ότι η ανάκαμψη των φορέων τους είναι της τάξης των 10 έως 100ps με αποτέλεσμα την παραμόρφωση των μεταδιδόμενων σημάτων σε υψηλές ταχύτητες λειτουργίας. Για την αντιμετώπιση των περιορισμών αυτών έχουν προταθεί τελευταία τεχνικές φιλτραρίσματος που αναλαμβάνουν τη μετάδοση συγκεκριμένων φασματικών συνιστωσών με σημαντική επιτάχυνση του συνολικού μηχανισμού λειτουργίας [1.40]. Το μεγάλο μέγεθος όμως των οπτικών φίλτρων, η ανάγκη διασύνδεσης διακριτών στοιχείων και οι δυσκολίες στην υλοποίηση αρχιτεκτονικών πολυπλεξίας κύματος είχαν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη φίλτρων νανοτεχνολογίας με δυνατότητα συνολοκλήρωσης τους με ημιαγώγιμους οπτικούς ενισχυτές.

Το κίνητρο της διατριβής αυτής εστιάζεται αρχικά στην υλοποίηση φωτονικών κυκλωμάτων μετατροπής μήκους κύματος με μικρό αποτύπωμα και χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση. Η συνδεσμολογία που χρησιμοποιείται περιλαμβάνει έναν SOA και μια διάταξη φίλτρου. Σε αντίθεση με προηγούμενες μελέτες που χρησιμοποιούν εμπορικά διαθέσιμα φίλτρα, στην παρούσα ερευνητική προσπάθεια αναπτύσσονται συντονιστές δακτυλίου εξασφαλίζοντας περιοδικότητα στη συνάρτηση μεταφοράς, δυνατότητα μαζικής ολοκλήρωσης και αποδοτικότερη λειτουργία. Σε δεύτερο στάδιο γίνεται προσπάθεια υβριδικής ολοκλήρωσης του ημιαγώγιμου ενισχυτή σε υπόστρωμα πυριτίου μαζί με μονολιθικά ολοκληρωμένα συμβολόμετρα καθυστέρησης (Delay Interferometers-DIs). Μέσω αυτής της τεχνικής υλοποιείται ένας μετατροπέας μήκους κύματος

που καλύπτει μόλις 300mm^2 επιφανείας και μπορεί να διαχειρίζεται μετάδοση δεδομένων έως και 160Gb/s .

Στη συνέχεια σχεδιάζεται και υλοποιείται μια φωτονική διάταξη δρομολόγησης δεδομένων χρησιμοποιώντας αποκλειστικά και μόνο οπτικά κυκλώματα επεξεργασίας. Πιο συγκεκριμένα διασυνδέονται οπτικοί μετατροπείς μήκους κύματος, συντονιστές δακτυλίου και φράγματα περίθλασης για την αμιγώς οπτική μεταγωγή των πακέτων πληροφορίας. Λόγω της χρήσης οπτικών και ολοκληρώσιμων διακοπών καθώς επίσης και υλικών υψηλού δείκτη διάθλασης είναι εφικτή η διαχείριση πληροφοριών σε υψηλότερες ταχύτητες από εκείνες των ηλεκτρονικών με συνολικό όγκο επιφανείας αισθητά πιο μικρό. Με την αρχιτεκτονική αυτή αποφεύγονται οι οπτοηλεκτρονικές μετατροπές στις μονάδες επεξεργασίας, επιταχύνεται η διαδικασία διανομής και μετάδοσης των πακέτων πληροφορίας, ενώ παράλληλα με τη χρήση τεχνολογιών CMOS ολοκλήρωσης τα επιμέρους κυκλώματα μπορούν να διασυνδεθούν σε ένα κοινό υπόστρωμα δημιουργώντας πλήρως οπτικές κάρτες επεξεργασίας.

Η δομή της διατριβής έχει ως εξής:

- Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η προσομοίωση, ο σχεδιασμός και η πειραματική αξιολόγηση αμιγώς οπτικών διατάξεων μετατροπής μήκους κύματος για ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων μέχρι 160Gb/s χρησιμοποιώντας ημιαγωγικούς οπτικούς ενισχυτές (SOAs) και οπτικούς συντονιστές δακτυλίου ανώτερης τάξης (Micro Ring Resonators). Για την υλοποίηση των παραπάνω κυκλωμάτων χρησιμοποιείται μια πηγή παραγωγής στενών παλμών $<400\text{fs}$ με ρυθμό μετάδοσης 10Gb/s , οπτική πολυπλεξία στο χρόνο $\times 16$ (OTDM) για τη δημιουργία υψίρρυθμου οπτικού σήματος 160Gb/s και οπτική αποπολυπλεξία $/16$ του τελικού μετατρεπόμενου μήκους κύματος για αξιολόγηση της απόδοσης του. Η εν λόγω πειραματική μελέτη αναδεικνύει τη δυνατότητα ολοκλήρωσης πολλαπλών οπτικών μετατροπέων μήκους κύματος στην ίδια δομή πυριτίου με στόχο τη δημιουργία συμπαγών οπτικών διατάξεων μεταγωγής πακέτων και ευφυών συστημάτων φωτονικής δρομολόγησης.
- Στο Κεφάλαιο 3 σχεδιάζεται, μοντελοποιείται και αξιολογείται οπτικό κύκλωμα μετατροπής μήκους κύματος με χρήση ημιαγωγικών οπτικών ενισχυτών (SOAs) και συμβολομέτρων καθυστέρησης. Με την κατάλληλη χρήση πειραματικών μεθόδων μελετάται η ανάκαμψη κέρδους των ημιαγωγικών ενισχυτών σε υπερυψηλές ταχύτητες δεδομένων και στη συνέχεια ερευνείται η επίδραση των συμβολομέτρων καθυστέρησης στο μηχανισμό μετατροπής μήκους κύματος. Για τον πειραματικό χαρακτηρισμό της υπό μελέτης διάταξης, κατασκευάζεται σε πυρίτιο ένα φωτονικό κύκλωμα αποτελούμενο από έναν ημιαγωγικό ενισχυτή και δύο συμβολόμετρα καθυστέρησης σε διάταξη συστοιχίας. Για την αξιολόγηση της απόδοσης του ολοκληρωμένου κυκλώματος αναπτύσσεται ένα υψίρρυθμο οπτικό σύστημα μετάδοσης στα

160Gb/s το οποίο αναδεικνύει τα όρια λειτουργίας των επιμέρους στοιχείων, τη συνολική χωρητικότητα του μετατροπέα μήκους κύματος και τα οφέλη της υβριδικής φωτονικής ολοκλήρωσης. Στη συνέχεια αξιολογείται η απόδοση του ολοκληρωμένου μετατροπέα μήκους κύματος σε πραγματικές συνθήκες δικτύου. Πιο αναλυτικά ο μετατροπέας μήκους κύματος συνδέεται σε ένα πυκνό οπτικό δίκτυο με στόχο τη δρομολόγηση και μετάδοση δεδομένων βίντεο και φωνής μέσω του οπτικού διακόπτη. Για την πειραματική ανάλυση το οπτικό κύκλωμα μετατροπής μήκους κύματος διασυνδέεται μεταξύ δύο ηλεκτρονικών δρομολογητών που έχουν ως στόχο τη μετάδοση και λήψη των δεδομένων σε ταχύτητες έως και 40Gb/s. Ανάλογα με το μήκος κύματος τροφοδότησης του διακόπτη και με τη χρήση κατάλληλων φραγμάτων περίθλασης το σήμα μετάδοσης ακολουθεί διαφορετικές οπτικές διαδρομές με διαφορετικά χαρακτηριστικά λειτουργίας.

- Στο Κεφάλαιο 4 μελετείται η δια-συνδεσιμότητα των αμιγώς οπτικών μετατροπέων μήκους κύματος με κυκλώματα εξαγωγής επικεφαλίδας και οπτικών μανδαλωτών για την αξιολόγηση αρχιτεκτονικών φωτονικής δρομολόγησης. Πιο συγκεκριμένα πακέτα πληροφορίας σε ρυθμούς μετάδοσης 160Gb/s μαζί με επικεφαλίδες διαφορετικού μήκους κύματος χρησιμοποιούνται σε ένα υψίρρυθμο σύστημα οπτικής μεταγωγής και επεξεργασίας. Για την εξαγωγή της επικεφαλίδας γίνεται χρήση οπτικών συντονιστών δακτυλίου ανώτερης τάξης ενώ για τη δημιουργία σημάτων ελέγχου οπτικοί μανδαλωτές. Στην πειραματική υλοποίηση της εν λόγω διάταξης οι οπτικοί μετατροπείς μήκους κύματος αναλαμβάνουν την επεξεργασία των εισερχόμενων πακέτων πληροφορίας κατόπιν ανίχνευσης των επικεφαλίδων τους και ενεργοποίησης των αντίστοιχων οπτικών μανδαλωτών. Μετά τη δρομολόγηση των δεδομένων μέσω φραγμάτων περίθλασης, τα τελικά σήματα αξιολογούνται με μετρήσεις λαθών. Τα αποτελέσματα αποκάλυπτουν τα προτερήματα της φωτονικής ολοκλήρωσης στη δημιουργία αμιγώς οπτικών συστημάτων οπτικής επεξεργασίας σε υπερυψηλές ταχύτητες ρυθμοδότησης.
- Τέλος στο Κεφάλαιο 5 σχεδιάζεται και υλοποιείται μια οπτική διάταξη επίλυσης σύγκρουσης πακέτων επικεφαλίδας βασισμένη αποκλειστικά σε μετατροπείς μήκους κύματος. Συγκεκριμένα, για την υλοποίηση του κυκλώματος χρησιμοποιείται ένα υβριδικά ολοκληρωμένο flip-flop, αποτελούμενο από δύο συζευγμένα συμβολόμετρα MZI και δύο μετατροπείς μήκους κύματος με χρήση ημιαγώγιμων ενισχυτών και συντονιστών δακτυλίου. Το αμιγώς οπτικό κύκλωμα σύγκρουσης πακέτων αξιολογείται πειραματικά σε ρυθμούς μετάδοσης 40Gb/s κατά τη διαδικασία οπτικής μεταγωγής και επεξεργασίας.

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος ICT-BOOM [1.41] το οποίο είχε ως σκοπό την ανάπτυξη ενός αμιγώς οπτικού δρομολογητή χρησιμοποιώντας μικρο-οπτικά κυκλώματα σε πυρίτιο. Στο πρόγραμμα αυτό συμμετείχαν και συνεργάστηκαν 9 ερευνητικές ομάδες, με συντονιστή της προσπάθειας το Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών (ΕΦΕ) του Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Τα φωτονικά στοιχεία που δημιουργήθηκαν περιλάμβαναν έναν οπτικό μετατροπέα μήκους κύματος υπερυψηλών ταχυτήτων, ένα λέιζερ ηλεκτροδιαμόρφωσης και μικρο-δομές συντονιστών δακτυλίου. Το ΕΦΕ ασχολήθηκε με το σχεδιασμό, την προσομοίωση, την αξιολόγηση και τη συσκευασία όλων των επιμέρους οπτικών στοιχείων που συνθέτουν τον αμιγώς φωτονικό δρομολογητή. Για την κατασκευή του οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος συνεργάστηκαν 2 ερευνητικές ομάδες από τη Γερμανία και συγκεκριμένα το Πολυτεχνείο του Βερολίνου (Technical University of Berlin-TUB) και το Ερευνητικό Ινστιτούτο ΗΗΙ (Heinrich Hertz Institute-HHI). Το TUB μελέτησε τις μεθόδους υβριδικής ολοκλήρωσης των ημιαγωγίμων οπτικών ενισχυτών πάνω σε υποστρώματα πυριτίου, ενώ το ΗΗΙ ασχολήθηκε με την κατασκευή και επεξεργασία της πλατφόρμας ολοκλήρωσης. Για την ανάπτυξη των συντονιστών δακτυλίου ανώτερης τάξης συνεργάστηκαν μια εταιρεία από την Ολλανδία (LioniX B.V) και μια εταιρεία από τη Γερμανία (AMO-GmbH). Η LioniX κατασκεύασε συντονιστές δακτυλίου σε υπόστρωμα Si_3N_4 χαμηλού δείκτη διάθλασης (low-index contrast), ενώ η AMO παρήγαγε συντονιστές δακτυλίου σε υπόστρωμα SOI υψηλού δείκτη διάθλασης (high-index contrast). Την κατασκευή όλων των ηλεκτρονικών στοιχείων ανέλαβε η εταιρεία από τη Γερμανία IHP (Innovation for High Performance microelectronics-IHP) ενώ τη μελέτη, προσομοίωση και ολοκλήρωση των φωτοδίοδων σε πυρίτιο, το Ερευνητικό Ινστιτούτο στο Βέλγιο IMEC (Interuniversity Microelectronics Centre-IMEC). Τελος για την πειραματική αξιολόγηση των επιμέρους φωτονικών συστημάτων συνεργάστηκαν το Πολυτεχνείο του Eindhoven (Technical University of Eindhoven-TUE) και το Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών του Μετσόβιου Πολυτεχνείου, ενώ για την τεχνο-οικονομική ανάλυση και αξιολόγηση των αρχιτεκτονικών δρομολόγησης συμμετείχε η ερευνητική ομάδα από την Ιταλία TILABs (Telecom Italia Laboratories-TILABs).

Αναφορές

- [1.1] Heavy reading, "Photonic Integration and the Future of Optical Networking", Vol.6, N.3, March 2008.
- [1.2] D. J. Blumenthal and M. Usami, "Tutorial on optical signal processing: the roadmap towards high speed optical Burst/Packet switching", Short Course, ECOC 2009, Austria
- [1.3] M. J. O'Mahony et Al., "The WASPNET optical packet switching node and its testbed realization", Photonics in switching, 2001
- [1.4] J.E. Bowers, A. W. Fang, H. Park, R. Jones, O. Cohen and Mario J. Paniccia, "Silicon Evanescent Lasers and Amplifiers", 2006 IEEE/LEOS Group IV Photonics Conference, Ottawa, Canada, September 13-15, 2006
- [1.5] A. W. Fang, H. Park, R. Jones, O. Cohen, M. J. Paniccia, and J. E. Bowers, "A continuous wave hybrid AlGaInAs-silicon evanescent laser", IEEE Photonics Technology Letters 18, 1143-1145 (2006)
- [1.6] Dries Van Thourhout , "III-V silicon heterogeneous integration", IPRM '08, Paris
- [1.7] Global internet geography executive summary, TeleGeography Research, www.telegeography.com
- [1.8] www.intel.com/research/platform/sp/hybridlaser.htm
- [1.9] M. Glick, "Optical interconnects in next generation data centers: an end to end view" IEEE Hot Interconnects, 2008
- [1.10] L. A. Barroso, J. Dean, U. Holzle, "Web search for a planet: the Google cluster architecture" IEEE Micro, March/April 2003, vol.23, N.2, pp. 22-28
- [1.11] "Report to congress on server and data center Energy efficiency", US Environmental Protection Agency, ENERGY STAR, August 2007
- [1.12] K. Barker et al. "On the Feasibility of Optical Circuit Switching for High Performance Computing Systems", in Proc. SC05, 2005
- [1.13] L. Schares, X. Zhang, R. Wagle, D. Rajan, P. Selo, S. P. Chang, J. Giles, K. H. adn D. Kuchta, J.Wolf and E. Schenfeld, "A reconfigurable interconnect fabric with optical circuit switch and software optimizer for stream computing systems", in Optical Fiber Comm. Conference (OFC), 2009
- [1.14] M. Glick, D. G. Andersen, M. Kaminsky, and L. Mummert, "Dynamically reconfigurable optical links for high-bandwidth data center networks", in Optical Fiber Comm. Conference (OFC), 2009
- [1.15] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, "Optical networks: A practical perspective", Academic Press Inc., NY, 2nd Ed.,2002.
- [1.16] D. E. Comer, Internetworking with TCP/IP – Principles, Protocols and Architecture, Prentice Hall
- [1.17] James E. Goldman & Phillip T. Rawles, Applied Data Communications, 2004, (ISBN 0-471-34640-3)
- [1.18] H. Rosilah, J. Irvine, and I. Glover, "Design and Analysis of Virtual Bus Transport Using Synchronous Digital Hierarchy/Synchronous Optical Networking," Journal of Computer Science, 4.12, 1003-1011. 2008.
- [1.19] Hiroachi Takeuchi, "Photonic Packet Router Project – towards future Optical Packet-switched Networks", 2008, EU-Japan Cooperation Forum on ICT research
- [1.20] www.cisco.com

- [1.21] www.juniper.net
- [1.22] V. Benes, "Optimal Rearrangeable Multistage Connecting Networks" Bell Systems, Technical Journal, vol. 43, no. 7, pp. 1641-1656, July 1964.
- [1.23] S. Iyer and N. McKeown, "Making Parallel Packet Switches Practical" in IEEE INFOCOM, March 2001.
- [1.24] A. Pattavina, "Switching Theory: Architectures and Performance in Broadband ATM Networks", John Wiley & Sons, 1998.
- [1.25] E. Bonetto, L. Chiaraviglio, D. Cuda, G. A. Gavilanes, F. Neri, "Optical Technologies Can Improve the Energy Efficiency of Networks", ECOC 2009, Vienna, Austria.
- [1.26] R. S Tucker, R. Parthiban, J. Baliga, K. Hinton, R. W. A. Ayre, and W. V. Sorin, "Evolution of WDM Optical IP Networks: A Cost and Energy Perspective" Journal of Lightwave Technology, Vol. 27, 2009, pp. 243-252
- [1.27] Plummer, J.D., Deal, M.D., and Griffin, P.B.: "Silicon VLSI technology: fundamentals, practice, and modeling" (Prentice Hall, New York, USA, 2000)
- [1.28] Moore, G.: "Cramming more components onto integrated circuits", Electronics Mag., 1965, 38, (8), pp. 114-117
- [1.29] http://en.wikipedia.org/wiki/UNIVAC_I
- [1.30] M.K. Smit, "Past and future of InP-based photonic integration". LEOS Annual Meeting, Newport Beach, CA, USA, 2008, pp. 51-52
- [1.31] L. Thylen, "A Moores law for photonics", Int. Symp. Biophotonics, Nanophotonics and Metamaterials, Hangzhou, China, 2006, pp. 256-263
- [1.32] www.infinera.com
- [1.33] www.luxtera.com
- [1.34] R. Ramaswami and K. Sivarajan, Optical networks: A practical perspective. UK: Morgan Kaufmann Publishers, 1998.
- [1.35] D. F. Welch, F. A. Kish, R. Nagarajan, C. H. Joyner, R. P. Schneider, V. G. Dominic, M. L. Mitchell, S. G. Grubb, T.-K. Chiang, D. Perkins, and A. C. Nilsson, "The realization of large-scale photonic integrated circuits and the associated impact on fiber-optic communication systems," J. Lightw. Technol., vol. 24, no. 12, pp. 4674-4683, Dec. 2006.
- [1.36] P. Bakopoulos, O. Zouraraki, K. Vysokinos, and H. Avramopoulos, "2x2 Exchange/Bypass Switch Using 0.8 m of Highly Nonlinear Bismuth Oxide Fiber," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.19, No. 10, pp. 723-726, May 2007
- [1.37] H. Lee, R. Lowe-Webb, T. J. Johnson, W. Yang, and P. C. Sercel, "Photoluminescence study of in situ annealed InAs quantum dots: Double-peak emission associated with bimodal size distribution", Appl. Phys. Lett., vol. 73, pp. 3556-3558, 1998.
- [1.38] M. Asobe, Y. Nishida, O. Tadanaga, H. Miyazawa, and H. Suzuki, "Wavelength conversion using quasi-phase matched Linbo3 waveguides", IEICE Trans. Electron., vol. E88-c(3), pp. 335-341, 2005.
- [1.39] S. L. Chuang, Physics of Optoelectronic Devices. Chichester: Wiley-Interscience, 1995.
- [1.40] Y. Liu, E. Tangdiongga, Z. Li, H. de Waardt, A. Koonen, G. D. Khoe, H. J. S. Dorren, X. Shu, and I. Bennion, "Error-free 320 Gb/s SOA-based wavelength conversion using optical filtering", Optical Fiber Communication Conference, vol. PD, 2006.
- [1.41] www.ict-boom.eu

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Οπτικοί μετατροπείς μήκους κύματος με χρήση ημιαγώγιμων οπτικών ενισχυτών και μικρο-συντονιστών δακτυλίου σε πυρίτιο

2.1 Εισαγωγή

Οι βασικοί περιορισμοί στη δομή και λειτουργία των σημερινών τηλεπικοινωνιακών δικτύων είναι η ταχύτητα επεξεργασίας, η κατανάλωση ισχύος και η χωρική κατανομή των οπτοηλεκτρονικών συσκευών. Για την εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης των οπτικών ινών και την εξυπηρέτηση μεγαλύτερου όγκου πληροφοριών, είναι αναγκαία η χρήση φωτονικών συσκευών με διαφάνεια στον τρόπο λειτουργίας, υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης και δυνατότητα μικρο-ολοκλήρωσης. Μπορεί η οπτική μετάδοση ψηφιακών σημάτων να είναι πλέον μια ώριμη τεχνολογία, ωστόσο η μεταγωγή των δεδομένων στα τηλεπικοινωνιακά κέντρα εξακολουθεί να βασίζεται κυρίως σε οπτο-ηλεκτρονικούς διακόπτες με ανώτατες ταχύτητες επεξεργασίας γραμμής στα 40 Gb/s.

Μια διεργασία με ιδιαίτερη σημασία στους κόμβους δρομολόγησης του δικτύου είναι η μετατροπή μήκους κύματος που χρησιμοποιείται ευρέως στις αρχιτεκτονικές πολυπλεξίας μήκους κύματος [2.1]. Η υλοποίησή της στηρίζεται μέχρι και σήμερα σε οπτοηλεκτρονικά συστήματα επεξεργασίας με χρήση κατάλληλων πομποδεκτών. Με την πρόοδο όμως της φωτονικής τεχνολογίας τα συστήματα αυτά εξελίχθηκαν σε αμιγώς οπτικές μονάδες επικοινωνίας με διαφάνεια λειτουργίας και Tb/s ταχύτητες επεξεργασίας εξασφαλίζοντας μη συγκρουόμενες συνθήκες μεταγωγής, μεγαλύτερη χωρητικότητα μετάδοσης και αποδοτικότερη χρήση του δικτύου τηλεπικοινωνιακής κίνησης [2.2]. Πολλές προσεγγίσεις έχουν προταθεί για τη μετατροπή μήκους κύματος με τη χρήση μη γραμμικών φαινομένων στηριζόμενα είτε σε οπτική μετάδοση είτε σε μίξη φωτονίων. Και στις δύο περιπτώσεις απαιτούνται δύο σήματα σε διαφορετικό μήκος κύματος: α) αυτό που φέρει την πληροφορία και β) αυτό στο οποίο θα μεταφερθεί η πληροφορία. Οι κυκλωματικές διατάξεις που στηρίζονται στα μη γραμμικά φαινόμενα οπτικής μετάδοσης βασίζονται σε φωτονικά στοιχεία των οποίων τα χαρακτηριστικά λειτουργίας μεταβάλλονται ανάλογα με την ένταση

του σήματος εισόδου. Η κατηγορία αυτή είναι κατάλληλη για τη μετατροπή μήκους κύματος οπτικών σημάτων διαμορφωμένα κατά πλάτος (On-Off keying format). Αντιθέτως για τη μετατροπή μήκους κύματος οπτικών σημάτων διαμορφωμένων κατά φάση (DPSK,QPSK) απαιτούνται τεχνικές μίξης φωτονίων χρησιμοποιώντας οπτικά στοιχεία με υψηλούς μη γραμμικούς συντελεστές διάδοσης [2.4][2.5].

2.2 Αρχή λειτουργίας του ημιαγωγίου οπτικού ενισχυτή

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

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

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

Στην προηγούμενη σχέση, I είναι το ρεύμα έγχυσης, e το φορτίο ηλεκτρονίου, V ο όγκος της ενεργού περιοχής, τ_c ο χρόνος ζωής των φορέων, Γ ο οπτικός παράγοντας σύμπτυξης οπτικής ισχύος (optical confinement factor), g ο παράγοντας κέρδους, N_T η πυκνότητα των φορέων στην περιοχή διαφάνειας του

ενισχυτή, A το εμβαδό διατομής της ενεργούς περιοχής του ημιαγωγού, h η σταθερά Planck, ω_0 η φέρουσα συχνότητα του εισερχόμενου οπτικού πεδίου και $P(z,t)$ η ισχύς του εισερχόμενου οπτικού σήματος. Ο πρώτος όρος του δεξιού σκέλους της σχέσης (2.1) αποδίδει τη διέγερση φορέων λόγω έγχυσης ρεύματος, ενώ ο δεύτερος και τρίτος όρος αποδίδουν την αποδιέγερση και, επομένως, τη μείωση των φορέων λόγω της αυθόρμητης και της εξαναγκασμένης επανασύνδεσης, αντίστοιχα.

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

$$\frac{dP(z,t)}{dz} = [\Gamma \cdot g \cdot [N(z,t) - N_T] - a_s] \cdot P(z,t) \quad (2.2)$$

Η σταθερά a_s εκφράζει τις εσωτερικές απώλειες ισχύος του ενισχυτή λόγω σκέδασης του κυματοδηγούμενου πεδίου. Οι εξισώσεις (2.1) και (2.2) αποτελούν τις δύο κλασικές εξισώσεις ροής του ενισχυτή. Στις δύο εξισώσεις ροής αγνοούνται τα ενδοζωνικά φαινόμενα (intraband effects) των φορέων, όπως δημιουργία φασματικής οπής (spectral hole burning), θέρμανση φορέων (carrier heating) και απορρόφηση ελεύθερων φορέων-απορρόφηση δύο φωτονίων (free carrier absorption – two photon absorption). Αυτά τα ενδοζωνικά φαινόμενα έχουν πολύ μικρούς χαρακτηριστικούς χρόνους απόκρισης, που κυμαίνονται από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες fsec [2.7]. Αποτέλεσμα των μικρών χρονικών σταθερών απόκρισης στην περίπτωση των οπτικών σημάτων διάρκειας μερικών psec είναι τα ενδοζωνικά φαινόμενα να επέρχονται σε σταθερή κατάσταση και να μην επηρεάζουν την απόκριση του ενισχυτή.

Το κέρδος ενίσχυσης ενός SOA μήκους L , θεωρώντας την περίπτωση ενίσχυσης οπτικού σήματος συνεχούς (CW) κύματος, ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος εξόδου από τον ενισχυτή προς την ισχύ εισόδου σε αυτόν. Το κέρδος περιγράφεται από τη σχέση:

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

Για τον αναλυτικό υπολογισμό του κέρδους του ημιαγωγού υπάρχουν δύο διαφορετικές περιπτώσεις, ανάλογα με την περιοχή λειτουργίας του SOA: α) η ακόρεστη (unsaturated) και η κορεσμένη (saturated) περιοχή, όπου έχουμε αντίστοιχα το κέρδος ασθενούς σήματος (small signal gain) και το κορεσμένο κέρδος (saturated gain) του ενισχυτή.

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

λαμβάνοντας υπόψη κάποιες συμβάσεις [2.6] το κέρδος του ενισχυτή σε κάθε χρονική στιγμή δίνεται από την σχέση:

$$G(t) = \exp[\Gamma \cdot g \cdot N_{tot}(t) - a_s \cdot L] \quad (2.4)$$

Θεωρώντας ότι ο ενισχυτής δέχεται ως είσοδο στενό οπτικό παλμό μη μηδενικής ισχύος, ενώ λειτουργεί στην περιοχή ασθενούς σήματος, το κυρίαρχο φαινόμενο, για όση χρονική διάρκεια διαδίδεται ο παλμός μέσα από τον ενισχυτή, είναι η αποδιέγερση των φορέων λόγω εξαναγκασμένης εκπομπής, δεδομένου ότι στο μικρό αυτό χρονικό διάστημα που χρειάζεται για να διαδοθεί ο παλμός μέσα από το SOA, η διέγερση φορέων λόγω έγχυσης ρεύματος και η αυθόρμητη εκπομπή φορέων συμβάλλουν σε πολύ μικρό βαθμό στη μεταβολή της πυκνότητας φορέων. Με την κατάλληλη επίλυση συγκεκριμένων εξισώσεων [2.6] το κέρδος κορεσμού του SOA από βραχύ οπτικό παλμό εκφράζεται από τη σχέση:

$$G(t) = \left[1 - \left(1 - \frac{1}{G_0} \right) \cdot \exp\left(-\frac{U_{in}(t)}{U_{sat}} \right) \right]^{-1} \quad (2.5)$$

όπου $U_{in}(t)$ είναι η ενέργεια του παλμού, που βρίσκεται μέσα στον ενισχυτή τη χρονική στιγμή t , ενώ U_{sat} είναι η ενέργεια κορεσμού του SOA.

Αμέσως μετά την έξοδο του στενού οπτικού παλμού από τον ενισχυτή, το κέρδος του ενισχυτή αρχίζει να ανακάμπτει, λόγω της διέγερσης φορέων από την έγχυση ρεύματος προς την αρχική του τιμή, η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η τιμή του κέρδους ασθενούς σήματος. Ως χρόνος ανάκαμψης του κέρδους του ενισχυτή ορίζεται το χρονικό διάστημα, που απαιτείται για να ανακάμψει το κέρδος από το 10% στο 90% της μέγιστης τιμής του G_0 . Η έκφραση του κέρδους για τη χρονική διάρκεια της ανάκαμψης [2.6] δίνεται από τη σχέση :

$$G(t) = G_0 \cdot \left[\frac{G(t_s)}{G_0} \right]^{\exp[-(t-t_s)/\tau_c]} \quad , t \geq t_s \quad (2.6)$$

Με βάση αυτή την αναλυτική έκφραση ανάκαμψης του κέρδους, προκύπτει ότι η χρονική σταθερά ανάκαμψης από το 10% στο 90% του G_0 συνδέεται με το χρόνο ζωής των φορέων μέσω της σχέσης:

$$\tau_r = \tau_c \cdot \ln\left(\frac{\ln 0,1}{\ln 0,9} \right) \cong 3,13 \cdot \tau_c \quad (2.7)$$

Τυπικές τιμές χρονικών σταθερών ανάκαμψης κέρδους για τους ημιαγωγούς είναι από μερικές δεκάδες ως μερικές εκατοντάδες psec. Η χρονική σταθερά ανάκαμψης του SOA είναι πολύ σημαντική παράμετρος για τη χρήση του ενισχυτή σε οπτικές μεταγωγικές διατάξεις, καθώς αυτή καθορίζει τη μέγιστη

ταχύτητα λειτουργίας του ενισχυτή. Για αύξηση της ταχύτητας λειτουργίας, είναι απαραίτητη η μείωση του χρόνου ανάκαμψης ή η χρήση τεχνικών οπτικής επεξεργασίας.

Αν ως είσοδος στον ενισχυτή θεωρηθεί οπτικό CW σήμα με σταθερή οπτική ισχύ P_{CW} στην είσοδο, τότε η πυκνότητα φορέων διαμορφώνεται πάλι σε μια μόνιμη σταθερή κατάσταση [2.6], όπως εκφράζεται στην παρακάτω σχέση:

$$G_{CW} = G_0 \cdot \exp[-(G_{CW} - 1)P_{CW}/P_{sat}] \quad (2.8)$$

Εφαρμόζοντας στον SOA ένα βραχύ αλλά ισχυρό οπτικό παλμό μαζί με το CW, το κέρδος του θα αρχίσει να μεταβάλλεται όπως παρακάτω:

$$G(t) = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{1}{G_{CW}}\right) \exp\left(-\frac{U_{in}}{U_{sat}}\right)} \quad (2.9)$$

Ο ημιαγωγίμος οπτικός ενισχυτής είναι ένα μη γραμμικό στοιχείο, το οποίο προκαλεί στροφή φάσης στα σήματα που διαδίδονται σε αυτόν. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μεταβολή του κέρδους του ενισχυτή, που οδηγεί σε μεταβολή του δείκτη διάθλασης του ημιαγωγού, ο οποίος εξαρτάται από τη συγκέντρωση φορέων μέσα στον ενισχυτή. Ο δείκτης διάθλασης των SOA είναι ένα μιγαδικό μέγεθος, του οποίου το πραγματικό μέρος περιγράφει τη συμπεριφορά της φάσης του εισερχόμενου οπτικού πεδίου, ενώ το φανταστικό του μέρος περιγράφει το κέρδος του υλικού.

$$\underline{n} = n' - jn'' \quad (2.10)$$

Η παράμετρος, που συσχετίζει τη μεταβολή στη φάση με το κέρδος του υλικού, είναι ο παράγοντας επαύξησης ή διεύρυνσης φασματικής γραμμής-α [2.6] (linewidth enhancement factor) και δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{dn'}{dN} = \alpha \frac{dn''}{dN} \quad (2.11)$$

Αποτέλεσμα της εξάρτησης της φάσης του πεδίου από το κέρδος, όταν το πεδίο, που διαδίδεται είναι ένας στενός οπτικός παλμός, είναι η εμφάνιση ολίσθησης συχνότητας (chirp), κατά μήκος του παλμού. Η μη γραμμική απόκριση κέρδους του ενισχυτή, κατά τον κορεσμό του, έχει ως αποτέλεσμα το προπορευόμενο χρονικά τμήμα του παλμού να αντιλαμβάνεται μεγαλύτερο κέρδος από το πίσω τμήμα του παλμού. Κατά συνέπεια, κάθε χρονικό τμήμα του παλμού αποκτά διαφορετική φάση, κατά τη διάδοσή του, και αντιλαμβάνεται διαφορετική συχνότητα ως φέρουσα. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας, είναι η αλλοίωση του σχήματος του παλμού, όπως επίσης και η αλλοίωση του φασματικού του

περιεχομένου, το οποίο, μάλιστα, διευρύνεται. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αυτοδιαμόρφωση φάσης (Self-Phase Modulation) [2.6]. Αν ο ενισχυτής χρησιμοποιηθεί ως μη γραμμικό μέσο και θεωρήσουμε ότι G_1 , G_2 είναι τα κέρδη που «βλέπουν» τα δύο σήματα στους οπτικούς δρόμους, η διαφορά φάσης δίνεται από την σχέση:

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = -\frac{\alpha}{2} \ln\left(\frac{G_1}{G_2}\right) \quad (2.12)$$

2.3 Οπτική μετατροπή μήκους κύματος με χρήση ημιαγωγίου οπτικού ενισχυτή

Ο ημιαγωγίος οπτικός ενισχυτής είναι μια γραμμική διάταξη, με δείκτη διάθλασης που σχετίζεται με το κέρδος κορεσμού του. Παρέχει μεγάλο εύρος ζώνης, σχετικά μικρό χρόνο ανάκαμψης φορέων, έντονη μη γραμικότητα και μικρό αποτύπωμα. Αρκετοί μηχανισμοί έχουν προταθεί για την υλοποίηση κυκλωμάτων αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση ετεροδιαμόρφωσης κέρδους (Cross Gain Modulation-XGM) [2.8], ετεροδιαμόρφωση φάσης (Cross Phase Modulation-XPM) [2.9], μη γραμμική περιστροφή πόλωσης [2.10] και μίξη τεσσάρων φωτονίων (Four Wave Mixing-FWM) [2.11].

Η ετεροδιαμόρφωση κέρδους (XGM) οφείλεται σε ένα σήμα εισόδου το οποίο μεταβάλλει το κέρδος του SOA λόγω διαφοροποίησης της πυκνότητας των φορέων του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη διαμόρφωση ενός άλλου σήματος σε διαφορετικό μήκος κύματος που μεταδίδεται μαζί με το σήμα εισόδου. Τα κυκλώματα μετατροπής μήκους κύματος που στηρίζονται στο φαινόμενο ετεροδιαμόρφωσης κέρδους έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι απλά στην τοπολογία τους καθώς απαιτούν μόνο τη χρήση ενός ημιαγωγίου ενισχυτή. Το μειονέκτημά τους όμως είναι η περιορισμένη ταχύτητα λειτουργίας λόγω του χρόνου ανάκαμψης κέρδους, η σχετικά μεγάλη ολίσθηση φάσης και η ασυμμετρία στη μετατροπή μήκους κύματος προς μεγαλύτερα ή μικρότερα μήκη κύματος [2.12].

Η ετεροδιαμόρφωση φάσης (XPM) προκαλείται από τις μεταβολές του κέρδους του ημιαγωγίου οπτικού ενισχυτή λόγω του μη μηδενικού παράγοντα επαύξησης ή διεύρυνσης φασματικής γραμμής. Στις διατάξεις μετατροπής μήκους κύματος με ετεροδιαμόρφωση φάσης χρησιμοποιούνται πιο περίπλοκες δομές, που αποτελούνται συνήθως από δύο SOAs σε συμβολομετρικές τοπολογίες για τη μετατροπή της διαμόρφωσης φάσης σε διαμόρφωση πλάτους. Τα πλεονεκτήματα είναι το υψηλό σημείο σβέσης (extinction ratio), η διατήρηση της πολικότητας και η μικρότερη ολίσθηση φάσης του σήματος εξόδου [2.12]. Κύριο όμως μειονέκτημα εξακολουθεί να είναι ο αργός χρόνος ανάκαμψης κέρδους που σχετίζεται με το χρόνο ανάκαμψης των φορέων του ημιαγωγίου ενισχυτή.

Η μίξη τεσσάρων φωτονίων (FWM) βασίζεται σε φαινόμενα έντονης μη γραμμικότητας και ενδείκνυται για την υλοποίηση κυκλωμάτων μετατροπής μήκους κύματος με πλήρη διαφάνεια. Με τη μεθοδολογία αυτή είναι εφικτή η χρήση διάφορων μορφών διαμόρφωσης και υψηλότερων ταχυτήτων μετάδοσης με μικρό όμως σηματοθορυβικό λόγο (Signal to Noise Ratio-SNR) των τελικών σημάτων εξόδου, εξάρτηση από την πόλωση και υψηλή κατανάλωση οπτικής ισχύος. Αν και σε πρώιμο στάδιο εξέλιξης η τεχνική αυτή έχει προσελκύσει το ερευνητικό και πειραματικό ενδιαφέρον παγκοσμίως λόγω της ευελιξίας και της αποτελεσματικότητας που παρέχει στη μεταγωγή και επεξεργασία ανώτερων και πολύπλοκων μορφών διαμόρφωσης.

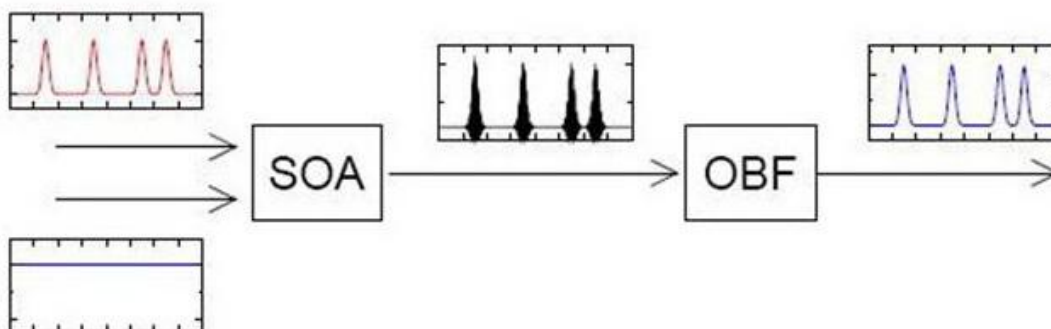
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως ένα από τα κύρια μειονεκτήματα της ετεροδιαμόρφωσης κέρδους και φάσης είναι η σχετικά μεγάλη ανάκαμψη των φορέων του ημιαγωγίου ενισχυτή που σε μεγάλο βαθμό καθορίζει την τελική ταχύτητα λειτουργίας του. Έχει παρατηρηθεί ότι η ανάκαμψη κέρδους μπορεί να επιταχυνθεί σημαντικά με τη χρήση μιας πηγής συνεχούς κύματος (CW) [2.13] ή ακόμα και ενός διαμορφωμένου σήματος [2.14]. Επίσης με την κατασκευή ημιαγωγίου ενισχυτή μεγαλύτερου μήκους η ανάκαμψη των φορέων μειώνεται αισθητά καθώς ο θόρυβος αυθόρμητης εκπομπής δρα ως μέσο κορεσμού [2.15]. Με τη χρήση μάλιστα φράγματος περιθλασης και ετεροδιαμόρφωση κέρδους έχει αναφερθεί μετατροπή μήκους κύματος έως 100Gb/s [2.16].

Παράλληλα με τις προσπάθειες για τη μείωση του χρόνου ανάκαμψης κέρδους αναπτύχθηκαν και τεχνικές οπτικής επεξεργασίας οι οποίες αύξησαν σε μεγάλο ποσοστό τα όρια λειτουργίας του ημιαγωγίου οπτικού ενισχυτή. Το πρώτο κύκλωμα το οποίο υλοποιήθηκε για το σκοπό αυτό αναφέρεται ως μη γραμμικό συμβολόμετρο UNI (Ultra fast Nonlinear Interferometer-UNI) το οποίο αποτελούνταν από έναν SOA και δύο μικρά κομμάτια ίνας διατήρησης της πόλωσης [2.17]. Αργότερα ήρθαν στο προσκήνιο συμμετρικές και ασύμμετρες συμβολομετρικές διατάξεις Mach-Zehnder, με χωρητικότητα έως 168Gb/s [2.18][2.19] οι οποίες βασίζονταν σε SOAs τοποθετημένους εντός ή εκτός των συμβολομέτρων. Οι τοπολογίες αυτές είχαν αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά καθώς οι επιδράσεις της αργής ανάκαμψης των φορέων μπορούσαν να αναιρεθούν από τη λειτουργία του συμβολομέτρου Mach-Zehnder αυξάνοντας έτσι σημαντικά τη συνολική ταχύτητα επεξεργασίας.

Πρόσφατα, για την επίτευξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης νέες μορφές οπτικής επεξεργασίας ήρθαν στο προσκήνιο κάνοντας χρήση ενός ημιαγωγίου οπτικού ενισχυτή και ενός οπτικού φίλτρου [2.20]. Με την επιλογή συγκεκριμένων φασματικών συνιστωσών μετά από το μηχανισμό ετεροδιαμόρφωσης κέρδους και φάσης, η διαδικασία μετατροπής μήκους κύματος μπορούσε να επιταχυνθεί αισθητά και να γίνει πρακτικά ανεξάρτητη από την ανάκαμψη των φορέων του ημιαγωγού. Επιπλέον λόγω της χρήσης μόνο ενός ενεργού στοιχείου στην κυκλωματική υλοποίηση, η συνολική διάταξη είχε χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση και μπορούσε να γίνει εύκολα ολοκληρώσιμη με τη χρήση φωτονικής τεχνολογίας CMOS.

2.4 Αρχή λειτουργίας οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος με χρήση ημιαγωγίου οπτικού ενισχυτή και οπτικού φίλτρου

Για την αμιγώς οπτική μετατροπή μήκους κύματος μέσα σε έναν ημιαγωγικό ενισχυτή είναι απαραίτητη η χρήση ενός διαμορφωμένου σήματος και μιας πηγής σταθερού μήκους κύματος (CW) όπως φαίνεται στο Σχήμα 22.

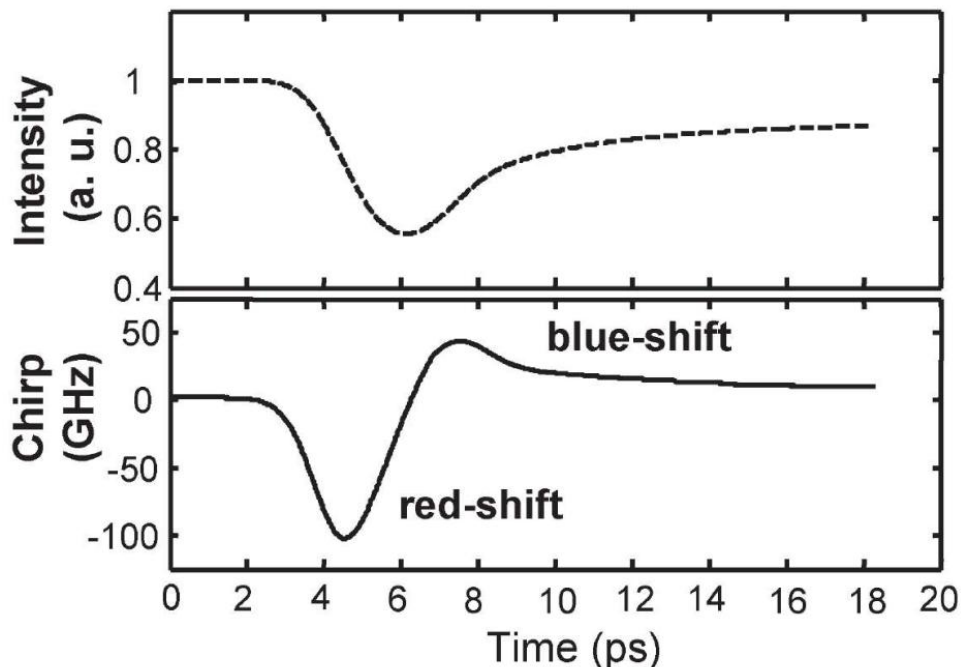


Σχήμα 22: Δομή αμιγώς μετατροπέα μήκους κύματος με χρήση οπτικού φίλτρου

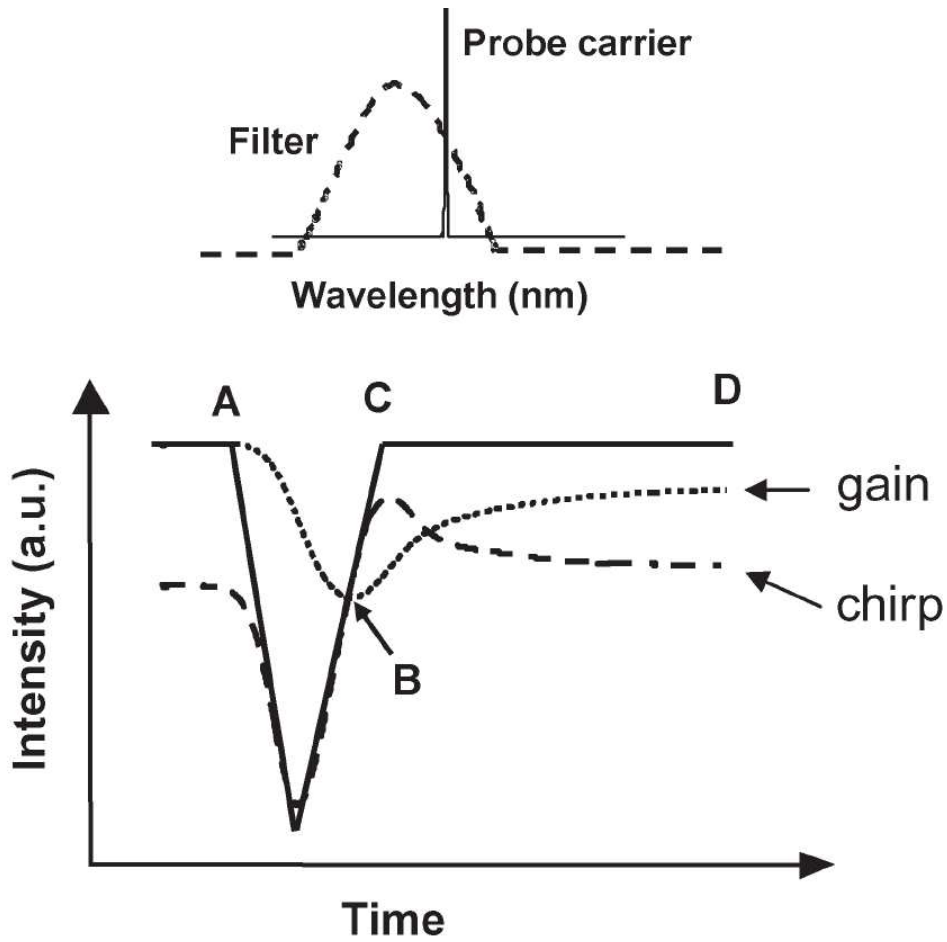
Τα δύο σήματα εισέρχονται ταυτόχρονα στον SOA και λόγω της ετεροδιαμόρφωσης κέρδους και φάσης, το φάσμα του CW διευρύνεται [2.21]. Η φασματική διεύρυνση είναι ασύμμετρη σε σχέση με την αρχική συχνότητα λόγω του μη μηδενικού παράγοντα επαύξησης ή διεύρυνσης φασματικής γραμμής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το διαμορφωμένο πλέον CW να παρουσιάζει ολίσθηση φάσης και κατ' επέκταση τετέρισμα (chirp). Το προπορευόμενο τμήμα του διαμορφωμένου παλμού είναι μετατοπισμένο προς τις κόκκινες φασματικές συνιστώσες (red shifted), ενώ το μέρος που έπεται είναι μετατοπισμένο προς τις μπλε φασματικές συνιστώσες (blue shifted). Το Σχήμα 23 απεικονίζει τη μεταβολή κέρδους του ημιαγωγίου ενισχυτή και τη μεταβολή chirp του μετατρεπόμενου σήματος παρουσία ισχυρού παλμού εισόδου. Η ισχύς εξόδου του τελικού μετατρεπόμενου κύματος εξελίσσεται παρόμοια με την ανάκαμψη κέρδους του SOA, όταν το οπτικό φίλτρο (Optical Bandpass Filter-OBF) είναι τοποθετημένο γύρω από την κεντρική φασματική συνιστώσα. Παρόλο που το κέρδος ανακάμπτει σε ένα μακρύ χρονικό διάστημα, το chirp εξελίσσεται δυναμικά εντός της διάρκειας του παλμού εισόδου. Είναι αυτό το βασικό χαρακτηριστικό της chirp που επιτρέπει την εξαιρετικά γρήγορη λειτουργία του μετατροπέα μήκους κύματος, ανεξάρτητα από τη σχετικά αργή ανάκαμψη των φορέων του SOA.

Εάν η συνάρτηση μεταφοράς του οπτικού φίλτρου είναι μετατοπισμένη προς τις μπλε φασματικές συνιστώσες, όπως φαίνεται στο σχήμα Σχήμα 24, τότε το μετατρεπόμενο σήμα εξόδου ανακάμπτει πολύ πιο γρήγορα συγκριτικά με την περίπτωση που φίλτρο βρίσκεται γύρω από την κεντρική φασματική συνιστώσα. Η βασική λειτουργία του μετατροπέα μήκους κύματος απεικονίζεται σχηματικά στο Σχήμα 24. Οι διακεκομμένες γραμμές, με τελεία και με παύλες είναι το κέρδος και το chirp του SOA αντίστοιχα. Όταν ο παλμός αρχίζει να διαδίδεται στο σημείο A, οι φορείς της ενεργού περιοχής μειώνονται και το κέρδος αγγίζει το ελάχιστο

ποσοστό του στο σημείο B. Στη χρονική περίοδο από το A στο B, το σήμα CW μετατοπίζεται προς τις κόκκινες "αργές" φασματικές συνιστώσες (red chirp). Αποτέλεσμα αυτού, είναι ότι το μετατοπισμένο προς τις μπλε φασματικές συνιστώσες οπτικό φίλτρο να απορρίπτει σε μεγάλο ποσοστό το "αργό" τμήμα του παλμού και ταυτόχρονα να περιορίζει την ισχύ εξόδου του. Με το πέρας της χρονικής διάρκειας του παλμού, η καμπύλη κέρδους του SOA αρχίζει να ανακάμπτει. Στο σημείο C η καμπύλη που προσδιορίζει το chirp του παλμού, εμφανίζει το μεγαλύτερο ρυθμό μεταβολής της και συνεπώς ο παλμός υφίσταται τη μεγαλύτερη μετατόπιση προς τις μπλε "ταχύτερες" φασματικές συνιστώσες (blue chirp). Εφόσον η κεντρική συχνότητα του οπτικού φίλτρου είναι μετατοπισμένη προς τις μπλε φασματικές συνιστώσες επιλέγεται αποκλειστικά η "γρήγορη" συνιστώσα του παλμού και εμφανίζεται στην έξοδό του. Καθώς η ανάκαμψη του κέρδους συνεχίζει, από το χρονικό σημείο C ως το D, η καμπύλη chirp σταθεροποιείται, το chirp του παλμού οδεύει προς το μηδέν και η ισχύς εξόδου του φίλτρου μειώνεται και πάλι, εφόσον απορρίπτεται ξανά το "αργό" τμήμα του παλμού. Με αυτόν τον τρόπο, η ισχύς εξόδου του οπτικού φίλτρου παραμένει καθ' όλη τη διάρκεια ανάκαμψης του SOA περίπου σταθερή. Η προηγούμενη περιγραφή εξηγεί πλήρως πως επίδραση του οπτικού φίλτρου εξαλείφει τα γραμμικά φαινόμενα παραμόρφωσης με τη μετατροπή των μεταβολών φάσης σε πλάτος [2.22][2.23].



Σχήμα 23: Μεταβολή του κέρδους και του τετερίσματος συναρτήσει του χρόνου παρουσία ισχυρού παλμού

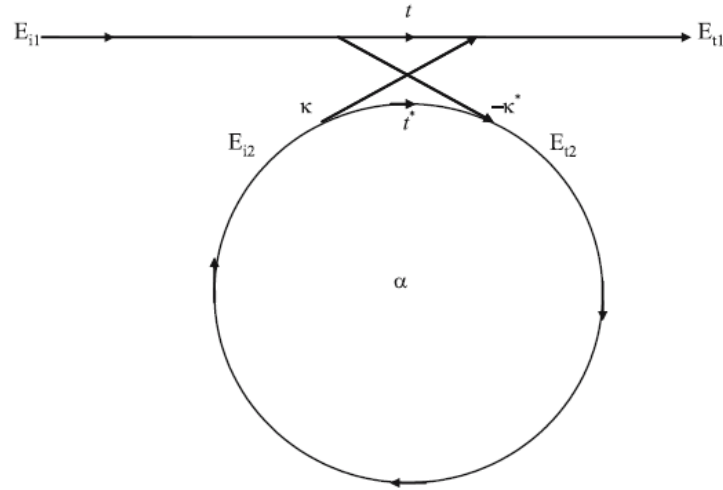


Σχήμα 24: Απεικόνιση της διαδικασίας επιτάχυνσης της ανάκαμψης του ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή

2.5 Αρχή λειτουργίας συντονιστή δακτυλίου

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, η αμιγώς οπτική μετατροπή μήκους κύματος σε υπερυψηλές ταχύτητες διάδοσης είναι εφικτή με τη διασύνδεση ενός ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή και ενός οπτικού φίλτρου. Ως μέσο επιλογής κατάλληλων φασματικών συνιστωσών μετά την ετεροδιαμόρφωση κέρδους και φάσης, είναι δυνατή η χρήση συντονιστών δακτυλίου με μικρό αποτύπωμα, περιοδικότητα στην απόκριση και ολοκληρώσιμη μορφή. Η βασική δομή τους αποτελείται από ένα δακτύλιο ακτίνας r και έναν κυματοδηγό όπως φαίνεται στο Σχήμα 25. Ορίζοντας ότι μόνο ένας ρυθμός διεγείρεται μέσα στο δακτύλιο, η σύζευξη γίνεται χωρίς απώλειες και ότι επικρατεί μόνο μια πόλωση [2.24], τότε η αλληλεπίδραση μεταξύ δακτυλίου κυματοδηγού ορίζεται από τη σχέση:

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t & \kappa \\ -\kappa^* & t^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Ei_1 \\ Ei_2 \end{pmatrix} \quad (2.13)$$



Σχήμα 25: Δομή συντονιστή δακτυλίου με έναν κυματοδηγό

Λόγω αμοιβαιότητας του πίνακα (2,13) ισχύει η σχέση:

$$|\kappa^2| + |t^2| = 1 \quad (2.14)$$

και θεωρώντας ότι $E_{i1}=1$, τότε το t κύμα κατά την περιστροφή του στο δακτύλιο δίνεται από:

$$E_{i2} = a \cdot e^{j\theta} E_{t2} \quad (2.15)$$

όπου α είναι ο συντελεστής απωλειών στο δακτύλιο, $\theta = \omega L / c$ ($L = 2\pi r$ η περιφέρεια του δακτυλίου), r η ακτίνα μετρημένη από το κέντρο του δακτυλίου έως το κέντρο του κυματοδηγού, c η ταχύτητα φάσης του ρυθμού δακτυλίου ($c = c_0 / n_{eff}$) και ω η γωνιακή συχνότητα ($\omega = k_0 c_0$). Η σταθερά διάδοσης εκφράζεται συναρτήσει του ενεργού δείκτη διάθλασης μέσω της σχέσης:

$$\beta = k \cdot n_{eff} = \frac{2\pi \cdot n_{eff}}{\lambda} \quad (2.16)$$

Και σε αυτή την περίπτωση ισχύει

$$\theta = \frac{\omega L}{c} = \frac{k c_0 L}{c} = k \cdot n_{eff} \cdot 2\pi r = \frac{2\pi \cdot n_{eff} \cdot 2\pi r}{\lambda} = 4\pi r^2 n_{eff} \frac{r}{\lambda} \quad (2.17)$$

Από τις σχέσεις (2.13) και (2.15) προκύπτει

$$E_{t1} = \frac{-a + t \cdot e^{-j\theta}}{-\alpha t^* + e^{-j\theta}} \quad (2.18)$$

$$E_{t2} = \frac{-\alpha \kappa^*}{-\alpha t^* + e^{-j\theta}} \quad (2.19)$$

$$Et_2 = \frac{-\kappa^*}{1 - \alpha t^* e^{j\theta}} \quad (2.20)$$

Η ισχύς μεταφοράς στην έξοδο του κυματοδηγού καθώς επίσης και η ισχύς που κυκλοφορεί στο εσωτερικό του δακτυλίου δίνονται από τις σχέσεις:

$$Pt_1 = |Et_1|^2 = \frac{a^2 + |t|^2 - 2a|t| \cos(\theta + \phi_\tau)}{1 + a^2|t|^2 - 2a|t| \cos(\theta + \phi_\tau)} \quad (2.21)$$

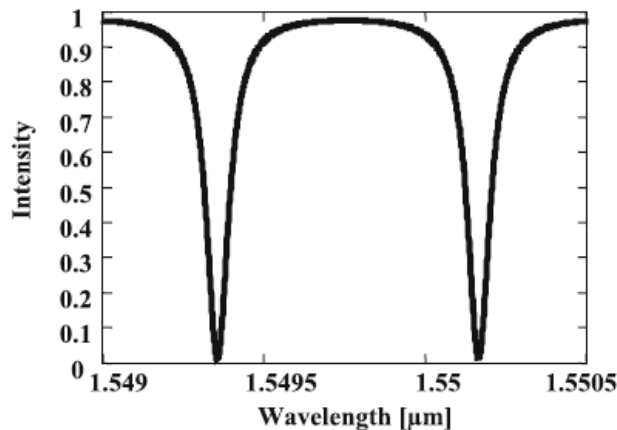
$$Pt_2 = |Et_2|^2 = \frac{a^2(1 - |t|^2)}{1 + a^2|t|^2 - 2a|t| \cos(\theta + \phi_\tau)} \quad (2.22)$$

όπου $t = |t| \exp(j\phi_\tau)$, $|t|$ αντιπροσωπεύει τις απώλειες σύζευξης και ϕ_τ τη φάση του συζεύκτη. Στην περίπτωση συντονισμού $(\theta + \phi_\tau) = 2\pi n$

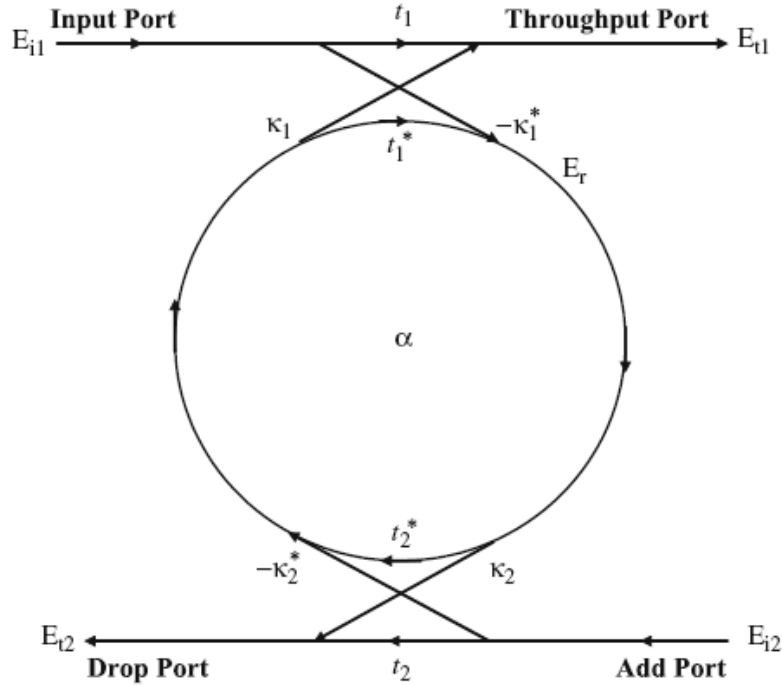
$$Pt_1 = |Et_1|^2 = \frac{(a - |t|)^2}{(1 - a|t|)^2} \quad (2.23)$$

$$Pt_2 = |Et_2|^2 = \frac{a^2(1 - |t|^2)}{(1 - a|t|)^2} \quad (2.24)$$

Μια ιδιόζουσα περίπτωση είναι αυτή κατά την οποία οι εσωτερικές απώλειες είναι ίσες με τις απώλειες σύζευξης $a = |t|$. Σε αυτή την περίπτωση η μεταδιδόμενη ισχύς είναι μηδέν. Αυτό είναι γνωστό στη βιβλιογραφία ως κρίσιμη σύζευξη και οφείλεται στην αναίρετική συμβολή. Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (2.13)-(2.24) μπορεί να εξαχθεί η χαρακτηριστική του συντονιστή δακτυλίου που απεικονίζεται στο Σχήμα 26.



Σχήμα 26: Απόκριση συντονιστή δακτυλίου με έναν κυματοδηγό



Σχήμα 27: Δομή συντονιστή δακτυλίου με έναν κυματοδηγό εισόδου και έναν κυματοδηγό εξόδου

Μια ευρέως διαδεδομένη διάταξη δακτυλίου είναι αυτή που απεικονίζεται στο Σχήμα 27 και η οποία αποτελείται από έναν κυματοδηγό εισόδου, έναν κυματοδηγό εξόδου και ένα συντονιστή δακτυλίου. Οι τέσσερις θύρες περιμετρικά του δακτυλίου αναφέρονται ως θύρα εισόδου, θύρα μετάδοσης, θύρα πτώσης και θύρα προσθήκης. Με βάση την προηγούμενη θεωρητική ανάλυση το πλάτος του ρυθμού στη θύρα μετάδοσης δίνεται από τη σχέση:

$$Et_1 = t_1 + \frac{-\kappa_1 - \kappa_1^* t_2^* a_{1/2}^2 e^{j\theta}}{1 - t_1^* t_2^* a_{1/2}^2 e^{j\theta}} = \frac{t_1 - t_2^* a_{1/2}^2 e^{j\theta}}{1 - t_1^* t_2^* a_{1/2}^2 e^{j\theta}} = \frac{t_1 - t_2^* a e^{j\theta}}{1 - t_1^* t_2^* a e^{j\theta}} \quad (2.25)$$

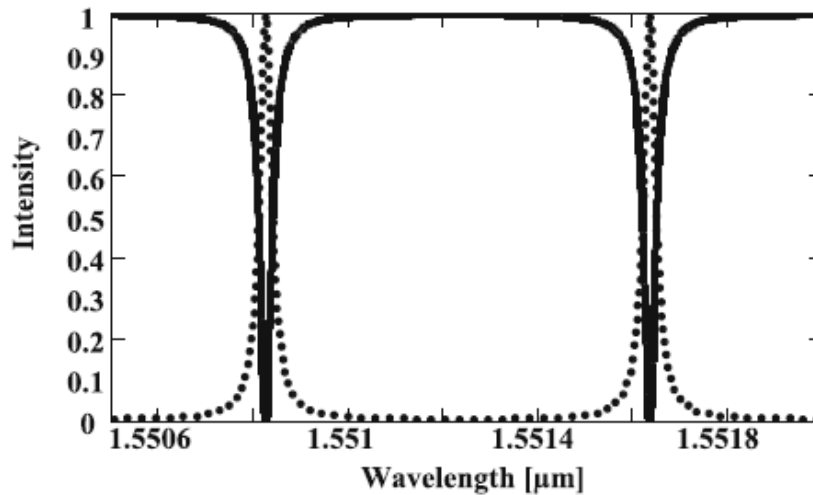
Στον υπολογισμό αυτό τα μεγέθη $a_{1/2}$ και $\theta_{1/2}$ αντιπροσωπεύουν την ημίσεια απώλεια περιστροφής και φάσης αντίστοιχα. Ο ρυθμός που επιζεί μέσα στο συντονιστή δακτυλίου συζευγνύεται στο δεύτερο κυματοδηγό δίνοντας τον ακόλουθο ρυθμό.

$$Et_2 = \frac{-\kappa_1^* \kappa_2 a_{1/2} e^{j\theta_{1/2}}}{1 - t_1^* t_2^* a e^{j\theta}} \quad (2.26)$$

Κατά το συντονισμό η ισχύς εξόδου στη θύρα πτώσης δίνεται από τη σχέση:

$$Pt_2 = |Et_2|^2 = \frac{(1 - |t_1|^2) \cdot (1 - |t_2|^2) \cdot a}{(1 - a|t_1 t_2|)^2} \quad (2.27)$$

Το πλάτος του ρυθμού E_{t1} στη θύρα μεταφοράς είναι ίσο με μηδέν για όμοιους συμμετρικούς συζεύκτες $t_1=t_2$ ($\alpha=t_1/t_2=1$), υποδηλώνοντας ότι το μήκος κύματος κατά το συντονισμό εξάγεται πλήρως από το δακτύλιο. Η συνθήκη $\alpha=1$ μπορεί να επιτευχθεί αν μέσα στο δακτύλιο υπάρχει πηγή κέρδους ικανή να εξισορροπήσει τις απώλειες του κυματοδηγού οδηγώντας έτσι σε μηδενική ένταση ισχύος στη θύρα μεταφοράς όπως φαίνεται στο Σχήμα 28.



Σχήμα 28: Απόκριση συντονιστή δακτυλίου με κυματοδηγό εισόδου-εξόδου (Με συνεχή γραμμή η απόκριση της θύρας μεταφοράς ενώ με τελείες της θύρας πτώσης)

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των συντονιστών δακτυλίου μπορούν να περιγραφούν με συγκεκριμένες παραμέτρους. Μια από αυτές είναι η απόσταση μεταξύ των κορυφών συντονισμού που ονομάζεται ελεύθερη φασματική περιοχή (Free Spectral Range-FSR) και υπολογίζεται κατά προσέγγιση από τη σχέση (2.16).

$$\frac{\partial \beta}{\partial \lambda} = -\frac{\beta}{\lambda} + k \frac{\partial n_{eff}}{\partial \lambda} \approx -\frac{\beta}{\lambda} \quad (2.28)$$

$$FSR = \Delta \lambda = -\frac{2\pi}{L} \left(\frac{\partial \beta}{\partial \lambda} \right)^{-1} \approx \frac{\lambda^2}{n_{eff} L} \quad (2.29)$$

Στην περίπτωση που η εξάρτηση μήκους κύματος του ενεργού δείκτη διάθλασης δεν μπορεί να παραλειφθεί, τότε οι σχέσεις (2.28) και (2.29) μπορούν να τροποποιηθούν ως εξής:

$$\frac{\partial \beta}{\partial \lambda} = -\frac{k}{\lambda} n_g \quad (2.30)$$

$$n_g = n_{eff} - \lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial \lambda} \quad (2.31)$$

$$FSR = \Delta \lambda = \frac{\lambda^2}{n_g L} \quad (2.32)$$

όπου n_g ο δείκτης διάθλασης ομάδας. Η επόμενη παράμετρος που χρησιμοποιείται στον χαρακτηρισμό των φίλτρων δακτυλίου είναι το εύρος ημίσειας ισχύος (Full Width at Half Maximum-FWHM). Από τις σχέσεις (2.26), (2.27) προκύπτει:

$$\left| \frac{-\kappa_1 * \kappa_2 \alpha_{1/2} e^{j\theta/2}}{1 - t_1 * t_2 a e^{j\theta}} \right|^2 = \frac{1 |\kappa_1|^2 |\kappa_2|^2 \alpha}{2 (1 - \alpha |t_1 t_2|)^2} \quad (2.33)$$

Θεωρώντας ότι οι συντελεστές σύζευξης είναι πραγματικοί, χωρίς απώλειες και τον όρο φάσης, τότε η (2.33) γράφεται:

$$\frac{(\kappa_1 \kappa_2 \alpha_{1/2})^2}{1 - 2t_1 t_2 a \cos(\theta) + (t_1 t_2 a)^2} = \frac{1 (\kappa_1 \kappa_2 \alpha_{1/2})^2}{2 (1 - t_1 t_2 a)^2} \quad (2.34)$$

Για μικρή τιμή του θ και χρησιμοποιώντας το πραγματικό μέρος του αναπτύγματος της σειράς Euler ισχύει:

$$\cos(\theta) = 1 - \frac{\theta^2}{2} \quad (2.35)$$

Από τη σχέση (2.34) προκύπτει:

$$\theta^2 = \frac{(1 - t_1 t_2 a)^2}{t_1 t_2 a} \quad (2.36)$$

Η σχέση (2,36) μπορεί να απλοποιηθεί περαιτέρω θεωρώντας την απώλεια στον δακτύλιο αμελητέα και τη σύζευξη σε απόλυτη συμμετρία ($t=t_1=t_2$).

$$\theta = \sqrt{\frac{(1 - t^2)^2}{t^2}} = \frac{1 - t^2}{t} \quad (2.37)$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (2.17) και (2.28) προκύπτει:

$$2\delta\lambda = \frac{\lambda^2}{\pi L n_{eff}} \frac{1 - t^2}{t} \quad (2.38)$$

$$FWHM = 2\delta\lambda = \frac{\kappa^2 \lambda^2}{\pi L n_{eff}} \quad (2.39)$$

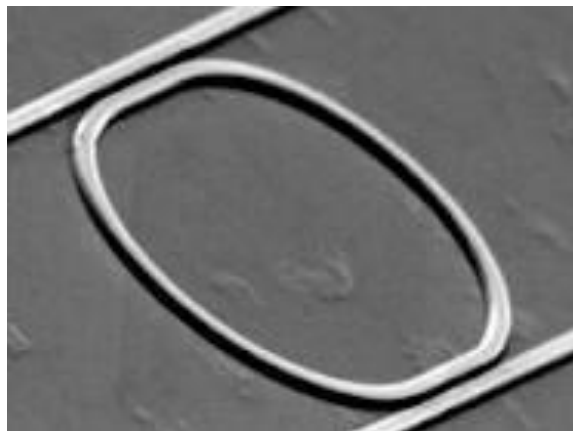
Μια άλλη παράμετρος που χρησιμοποιείται στην περιγραφή των φίλτρων δακτυλίου είναι η λεπτότητα (Finesse) η οποία ορίζεται ως η αναλογία του FSR ως προς το εύρος ημίσειας ισχύος της φασματικής απόκρισης.

$$F = \frac{FSR}{FWHM} = \frac{\Delta\lambda}{2\delta\lambda} = \pi \frac{t}{1-t^2} \quad (2.40)$$

Τέλος για το χαρακτηρισμό της οξύτητας ενός συντονισμού χρησιμοποιείται ο παράγοντας ποιότητας Q (Quality Factor) ο οποίος δίνεται από την αναλογία μήκος κύματος λειτουργίας ως προς το εύρος της φασματικής απόκρισης. Συμβολίζει μάλιστα την αποθηκευμένη ενέργεια στο φίλτρο δακτυλίου ως προς την ισχύ που χάνεται σε κάθε περιστροφή.

$$Q = \frac{\lambda}{2\delta\lambda} = \pi \frac{n_{eff} L}{\lambda} \frac{t}{1-t^2} = \frac{n_{eff} L}{\lambda} F \quad (2.41)$$

Οι προηγούμενες εξισώσεις περιγράφουν τη γενική αρχή λειτουργίας των συντονιστών δακτυλίου. Το διάστημα σύζευξης (coupling gap) μεταξύ του κυματοδηγού και του συντονιστή καθορίζεται από το ποσοστό και το διαθέσιμο μήκος σύζευξης. Συνήθως με πλευρική σύζευξη είναι απαραίτητη η χρήση μεγαλύτερου διαστήματος αλληλεπίδρασης καθώς έτσι αυξάνονται τα όρια ανοχής κατά την κατασκευή των οπτικών στοιχείων. Με δεδομένο συντελεστή σύζευξης, το διάστημα μεταξύ κυματοδηγού-δακτυλίου μπορεί να αυξηθεί αν το μήκος αλληλεπίδρασης μεγάλωσε σημαντικά [2.25]. Σε αυτή την περίπτωση η διάταξη συντονισμού μπορεί να πάρει τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 29. Τα διαστήματα σύζευξης είναι κατά πρόσεγγιση κυρίως τα ευθύγραμμα τμήματα του δακτυλίου που εφάπτονται στον κυματοδηγό εισόδου-εξόδου. Μέσα στην κοιλότητα ο ρυθμός αλλάζει αδιαβατικά κατά τη μετάβασή του από τα ευθύγραμμα στα καμπύλα τμήματα του αντηχείου. Για την αναλυτική περιγραφή των κυκλωμάτων αυτών είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός της διαφοράς φάσης στην περιοχή σύζευξης και της σχέσης μεταξύ των παραμέτρων t και κ . Η διαφορά φάσης έχει άμεση εξάρτηση από το μήκος σύζευξης και επηρεάζει τόσο το πλάτος όσο και τη φασματική απόκριση της κοιλότητας [2.26].



Σχήμα 29: Συντονιστής δακτυλίου με ευθύγραμμα τμήματα σύζευξης

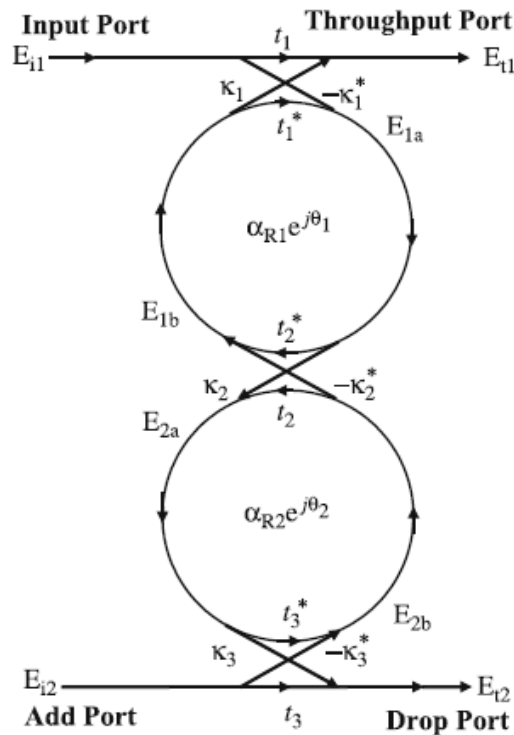
Για τη θύρα μεταφοράς και πτώσης αντίστοιχα ισχύουν οι σχέσεις:

$$Et_1 = \frac{t_1 e^{j\phi_1} - t_2 * a_{1/2}^2 e^{j\theta} (t_1 t_1 * e^{j2\phi_1} - \kappa_1 \kappa_1 * e^{-j2\phi_{k2}}) e^{j\phi_2}}{1 - t_1 * t_2 * a_{1/2}^2 e^{j\theta} e^{j\phi_1} e^{j\phi_2}} \quad (2.42)$$

$$E_{t2} = \frac{-\kappa_1 \kappa_2 a_{1/2} e^{j\theta/2} e^{-j\phi_{k1}} e^{-j\phi_{k2}}}{1 - t_1 * t_2 * a e^{j\theta} e^{j\phi_1} e^{j\phi_2}} \quad (2.43)$$

Η συνθήκη συντονισμού $(\theta + \phi_{t1} + \phi_{t2}) = 2\pi m$ έχει αλλάξει συγκριτικά με την (2.21) με τη συνάρτηση μεταφοράς εξόδου να εξαρτάται πλέον από τους συντελεστές t και κ . Η διαφορά φάσης δεν είναι μόνο σημαντική στους κατευθυντικούς συζεύκτες αλλά και στους πολυρυθμικούς (Multi Mode Interference-*MMI* couplers) [2.27]. Το μήκος των συζευκτών αυτών πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη $\pi/2$ μεταξύ των φάσεων μετάδοσης και σύζευξης έτσι ώστε η απόκριση τόσο στη θύρα μεταφοράς όσο και στη θύρα πτώσης να είναι συμμετρική.

Οι συντονιστές δακτυλίου ανώτερης τάξης προσφέρουν τη δυνατότητα υλοποίησης οπτικών φίλτρων με συναρτήσεις μεταφοράς υψηλού λόγου σβέσης. Δύο κοιλότητες συζευγμένες σε σειρά έχουν τη θύρα πτώσης και τη θύρα εισόδου στην ίδια κατεύθυνση γεγονός που είναι σημαντικό στη διασύνδεση πολυάριθμων 2×2 διακοπών. Στη σειριακή διάταξη το σήμα το οποίο πρέπει να μεταδοθεί από τη θύρα εισόδου στη θύρα πτώσης πρέπει να περάσει υποχρεωτικά και από τα δύο αντηχεία όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 30. Λόγω αυτής της σειριακής μεταφοράς ισχύος, οι φασματικές αποκρίσεις και των δύο ταλαντωτών θα πρέπει να συμπίπτουν σε ένα κοινό μήκος κύματος.



Σχήμα 30: Αντηχείο αποτελούμενο από 2 συζευγμένους συντονιστές δακτυλίου

Τα πεδία που περιγράφουν ένα αντηχείο αποτελούμενο από δύο συζευγμένους συντονιστές δακτυλίου (Σχήμα 30) είναι:

$$E_{1a} = -\kappa_1 * E_{i1} + t_1 * a_1 e^{j\frac{\theta_1}{2}} E_{1b} \quad (2.44)$$

$$E_{1b} = t_2 * a_1 e^{j\frac{\theta_1}{2}} E_{1a} - \kappa_2 * \alpha_2 e^{j\frac{\theta_1}{2}} E_{2b} \quad (2.45)$$

$$E_{2a} = \kappa_2 \alpha_1 e^{j\frac{\theta_2}{2}} E_{1a} + t_2 \alpha_2 e^{j\frac{\theta_2}{2}} E_{2b} \quad (2.46)$$

$$E_{2b} = \kappa_3 * E_{i2} + t_3 \alpha_2 e^{j\frac{\theta_2}{2}} E_{2a} \quad (2.47)$$

$$E_{i1} = t_1 E_{1a} + \kappa_1 \alpha_1 e^{j\frac{\theta_1}{2}} E_{1b} \quad (2.48)$$

$$E_{i2} = t_3 E_{2a} + \kappa_3 \alpha_2 e^{j\frac{\theta_2}{2}} E_{2b} \quad (2.49)$$

όπου οι συντελεστές α_1, α_2 αναπαριστούν τις απώλειες μισής περιστροφής στον πρώτο και δεύτερο συντονιστή δακτυλίου αντίστοιχα. Από τις σχέσεις (2.44) και (2.49) μπορούν να εξαχθούν οι συναρτήσεις μεταφοράς των θυρών πτώσης και μετάδοσης λαμβάνοντας υπόψη συμμετρικούς συζεύκτες χωρίς απώλειες ($t=t^*, \kappa=-\kappa^*$).

$$\frac{Et_1}{Ei_1} = \frac{-t_1 \kappa_1^2 \alpha_1 e^{j\theta_1} (t_3 \alpha_2 e^{j\theta_2} - t_2)}{1 - t_3 t_2 \alpha_2 e^{j\theta_2} - t_2 t_1 \alpha_1 e^{j\theta_1} + t_3 t_1 \alpha_1 \alpha_2 e^{j\theta_1} e^{j\theta_2}} \quad (2.50)$$

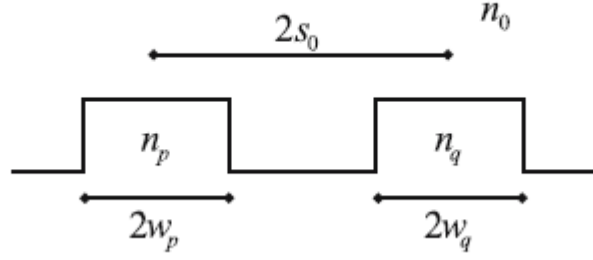
$$\frac{Et_2}{Ei_1} = \frac{\kappa_3 \kappa_2 \kappa_1 \alpha_1 \alpha_2 e^{j\frac{\theta_1}{2}} e^{j\frac{\theta_2}{2}}}{1 - t_3 t_2 \alpha_2 e^{j\theta_2} - t_2 t_1 \alpha_1 e^{j\theta_1} + t_3 t_1 \alpha_1 \alpha_2 e^{j\theta_1} e^{j\theta_2}} \quad (2.51)$$

Για την υλοποίηση αντηχείων ανώτερης τάξης με επίπεδη απόκριση κορυφής είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός των συντελεστών σύζευξης κ_1, κ_3 . Αρκετά θεωρητικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί για το σκοπό αυτό στηριζόμενα σε γεωμετρίες όπου δύο κυματοδηγοί πάχους $2w_p$ και $2w_q$ με δείκτες διάθλασης n_p, n_q συζευγνύονται μεταξύ τους σε απόσταση $2s_0$ [2.28]. Ο συντελεστής σύζευξης για τη δομή του Σχήμα 31 δίνεται κατά προσέγγιση από τη σχέση:

$$\kappa = \frac{\omega \epsilon_0 \cos(k_{p,q} w_q)}{2 \sqrt{P_p P_q} (k_{xp}^2 + a_q^2)} (n_p^2 - n_0^2) \sqrt{\frac{\pi R}{a_q}} e^{[a_q - (w_q - 2s_0)]} \times \{ a_q \cos(k_{xp} w_p) \sinh(a_q w_p) + k_{xp} \sin(k_{xp} w_p) \cosh(a_q w_p) \} \quad (2.52)$$

όπου

$$P_{p,q} = \frac{\beta_{p,q}}{2 \omega \mu_0} \left(w_{p,q} + \frac{1}{a_{p,q}} \right) \quad (2.53)$$



Σχήμα 31: Γεωμετρία δύο συζευγμένων κυματοδηγών

$$k_{xp,q} = \sqrt{n_{p,q}^2 k^2 - \beta_{p,q}^2} \quad (2.54)$$

$$a_{p,q} = \sqrt{\beta_{p,q}^2 - n_0^2 k^2} \quad (2.55)$$

$\beta_{p,q}$ είναι η ισχύς του διαδιδόμενου ρυθμού, $k_{xp,q}$ η εγκάρσια σταθερά διάδοσης του πυρήνα, $a_{p,q}$ είναι η σταθερά απόσβεσης στο στρώμα επένδυσης (cladding), $\beta_{p,q}$ είναι η σταθερά διάδοσης, ω η κυκλική συχνότητα και ϵ_0 η διηλεκτρική σταθερά στους κυματοδηγούς p,q. Ο δείκτης διάθλασης n_0 του περιβάλλοντος πεδίου ισούται με 1 (αέρας). Ο συντελεστής R ορίζεται ως ενεργός ακτίνα του δακτυλίου και δίνεται από τη σχέση:

$$R = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \quad (2.56)$$

όπου $r_{1,2}$ οι ακτίνες των δύο δακτυλίων οι οποίες ικανοποιούν τη συνθήκη ολίσθησης φάσης 2π με την ολοκλήρωση μιας περιστροφής μέσα στο αντηχείο.

$$m\lambda_m = 2\pi r_{1,2} n_{eff} \quad (2.57)$$

Για το σχεδιασμό μιας επίπεδης ζωνοπερατής φασματικής απόκρισης είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός της απώλειας ισχύος ο οποίος δίνεται από την αναλογία ισχύος εισόδου-εξόδου. Ο όρος αυτός εκφράζεται από το πολυώνυμο:

$$P_{LR} = \left| \frac{E_i}{E_{t2}} \right|^2 = 1 + \frac{1}{\mu_1^4 \mu_2^4} \left[\Delta\omega^4 + \left(\frac{\mu_1^4}{2} - 2\mu_2^2 \right) \Delta\omega^2 + \left(\mu_2^2 - \frac{\mu_1^4}{4} \right)^2 \right] \quad (2.58)$$

όπου $\Delta\omega = \omega - \omega_m$ είναι απόκλιση συχνότητας που συσχετίζεται με τη συχνότητα συντονισμού. Ο συντελεστής μ είναι το κλάσμα της ισχύος που συζευγνύεται και ορίζεται από τη σχέση:

$$\mu_1^2 = \frac{\kappa_1^2 \nu_{g1}}{2\pi r_1}, \mu_2^2 = \frac{\kappa_2^2 \nu_{g1} \nu_{g2}}{4\pi^2 r_1 r_2} \quad (2.59)$$

Η συνθήκη που ικανοποιεί μια επίπεδη φασματική απόκριση είναι η αναλογία απώλειας ισχύος να ισούται με μηδέν στη συχνότητα συντονισμού. Αυτό πραγματοποιείται όταν:

$$\mu_2^2 = 0.250\mu_1^4 \quad (2.60)$$

Και θεωρώντας όμοιους δακτύλιους ισχύει η σχέση:

$$\kappa_2^2 = 0.250\kappa_1^4 \quad (2.61)$$

Η διάταξη συντονιστή δακτυλίου δεύτερης τάξης κάνει εφικτή την επέκταση του συνολικού FSR διαλέγοντας διαφορετικές ακτίνες στους επιμέρους συντονιστές δακτυλίου. Σε αυτή την περίπτωση το φως περνά από τα δύο αντηχεία και καταλήγει στη θύρα πτώσης μόνο όταν οι συνθήκες συντονισμού και των δύο ταλαντωτών ικανοποιούνται.

2.6 Τετραπλός οπτικός μετατροπέας μήκους κύματος χρησιμοποιώντας ημιαγωγικούς ενισχυτές και $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ συντονιστές δακτυλίου

Για τη δημιουργία οπτικών δικτύων μεγάλης χωρητικότητας είναι αναγκαία η αμιγώς οπτική δρομολόγηση δεδομένων χρησιμοποιώντας ολοκληρωμένα φωτονικά κυκλώματα μικρού μεγέθους, χαμηλού κόστους και περιορισμένης ενεργειακής κατανάλωσης. Σε αυτό το πλαίσιο, οι ερευνητικές και πειραματικές προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί στην ανάπτυξη φωτονικών στοιχείων ικανών να επιτελέσουν λειτουργίες δρομολόγησης [2.29][2.30][2.31], αποθήκευσης [2.32], μετατροπής μήκους κύματος [2.33][2.34][2.35], μεταγωγής [2.36][2.37] και επίλυσης σύγκρουσης πακέτων [2.38][2.39][2.40]. Για την ανάπτυξη υψίρρυθμων συστημάτων δρομολόγησης είναι απαραίτητη η χρήση φωτονικών τεχνολογιών ολοκλήρωσης που να υποστηρίζουν πυκνή παράλληλη ολοκλήρωση στοιχείων για τοπολογίες πολυπλεξίας κύματος. Παράλληλα με τις ανάγκες πυκνής φωτονικής ολοκλήρωσης, τα οπτικά στοιχεία πρέπει να φέρουν μικρές απώλειες, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και να υλοποιούνται με φθηνές και αποδοτικές τεχνικές κατασκευής.

Ένα από τα βασικά υποσυστήματα των φωτονικών αρχιτεκτονικών δρομολόγησης είναι ο οπτικός μετατροπέας μήκους κύματος (Wavelength Converter-WC). Η ανάπτυξη συμπαγών, υψίρρυθμων και ενεργειακά αποδοτικών μονάδων μεταγωγής απαιτεί επεκτάσιμες μορφές οπτικών μετατροπέων μήκους κύματος (All-Optical Wavelength Converters-AOWCs) ικανών να συνθέσουν ευρυζωνικά φωτονικά συστήματα δρομολόγησης. Ως εκ τούτου, οι ερευνητικές δραστηριότητες έχουν εστιαστεί στη μονολιθική ή υβριδική υλοποίηση φωτονικών πλινθίων (photonic chips) με συστοιχίες μετατροπέων μήκους κύματος για την υποστήριξη δομών πολυπλεξίας κύματος. Μέχρι στιγμής έχει

επιδειχθεί ένας τετραπλός μετατροπέας μήκους κύματος στα 40 Gb/s σε ένα φωτονικό πλινθίο μεγέθους 15mm x 58mm, χρησιμοποιώντας τεχνολογία διοξειδίου του πυριτίου σε πυρίτιο (silica-on-silicon) [2.41]. Άλλοι ερευνητές παρουσίασαν πρόσφατα έναν InP οπτικό διακόπτη αποτελούμενο από 8 παράλληλους μετατροπείς μήκους κύματος με συνολικό αποτύπωμα 61.6mm² [2.42]. Και στις δύο περιπτώσεις οι μετατροπείς μήκους κύματος υλοποιήθηκαν με συμβολομετρικές διατάξεις Mach-Zehnder χρησιμοποιώντας δύο ημιαγωγικούς ενισχυτές για κάθε μετατροπέα. Για την κατασκευή απλούστερων μορφών μετατροπής μήκους κύματος με ένα μόνο ενεργό στοιχείο, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές φιλτραρίσματος οι οποίες μπορούν να υποστηρίξουν ταχύτητες μεγαλύτερες από 160Gb/s [2.43]. Η αρχιτεκτονική αυτή έχει επιδειχθεί πειραματικά με έναν ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή και ένα εμπορικά διαθέσιμο οπτικό φίλτρο. Με την εμφάνιση όμως των συντονιστών δακτυλίου (Micro-Ring Resonators-MRR) είναι εφικτή η κατασκευή μετατροπέων μήκους κύματος με μικρότερο αποτύπωμα και δυνατότητες φωτονικής ολοκλήρωσης. Για ρυθμούς μετάδοσης έως και 40Gb/s, όπου οι παλμοί είναι της τάξης δεκάδων picoseconds, είναι πιο αποδοτική η χρήση υλικών όχι υψηλού δείκτη διάθλασης λόγω των χαμηλότερων απωλειών σύζευξης και μετάδοσης στους κυματοδηγούς [2.46].

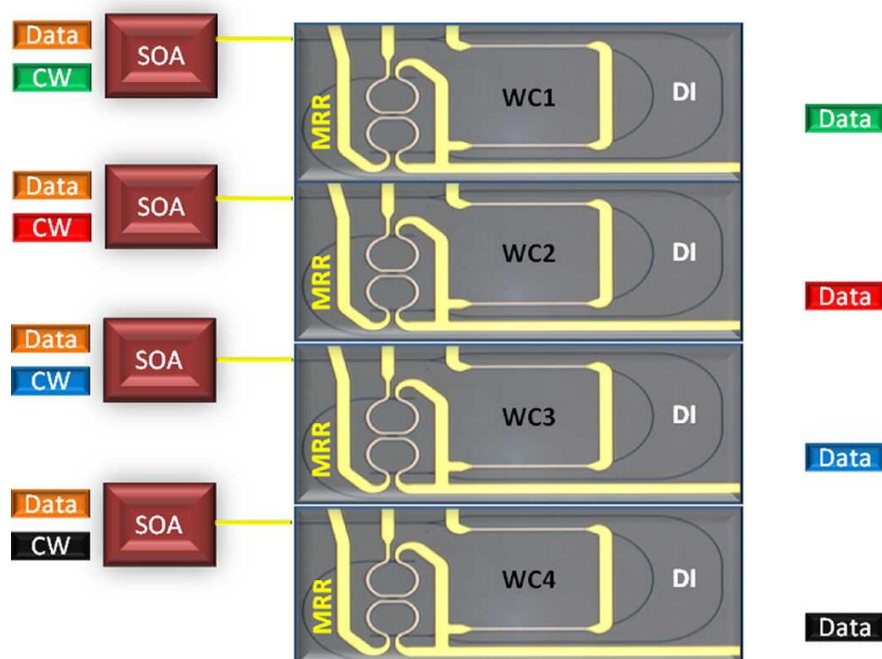
Η πρώτη υλοποίηση μιας τέτοιας συνδεσμολογίας αποτελούνταν από ένα συντονιστή δακτυλίου και ένα συμβολόμετρο καθυστέρησης (DI) [2.44]. Σε αυτή την πειραματική εφαρμογή γινόταν χρήση δύο οπτικών ενισχυτών (Erbium-doped Fiber Amplifiers-EDFA) μέσα στον οπτικό μετατροπέα μήκους κύματος για την αντιστάθμιση των απωλειών των διακριτών στοιχείων. Ο πρώτος ενισχυτής είχε ως σκοπό την εξισορρόπηση των απωλειών σύζευξης, ενώ ο δεύτερος την εξισορρόπηση των απωλειών του στοιχείου καθυστέρησης. Λόγω της χρήσης δύο ενισχυτών για κάθε μετατροπέα μήκους κύματος, η ενεργειακή κατανάλωση ήταν αυξημένη ενώ παράλληλα το συνολικό μέγεθος ήταν περιοριστικό για τη δημιουργία ενός κυκλώματος πολυπλεξίας. Επιπλέον, η κατανάλωση ισχύος για κάθε ολοκληρωμένο στοιχείο θέρμανσης ήταν περίπου ~480 mW, δημιουργώντας προβλήματα στη θερμική διαχείριση των πυκνά ολοκληρωσίμων συντονιστών δακτυλίου. Προκειμένου να αναπτυχθεί μια συμπαγής πλατφόρμα δρομολόγησης χαμηλής απώλειας βασισμένη σε υλικό όχι υψηλού δείκτη διάθλασης, ήταν αναγκαία η ολοκλήρωση τόσο του συντονιστή δακτυλίου όσο και του συμβολομέτρου καθυστέρησης στο ίδιο υπόστρωμα. Επιπλέον, ήταν επιβεβλημένη η περαιτέρω μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των θερμαντικών στοιχείων για περισσότερη ευελιξία στη θερμική διαχείριση και ολοκλήρωση πολλαπλών διατάξεων στο ίδιο υλικό.

Στις παρακάτω ενότητες παρουσιάζεται μια πολυκάναλη πλατφόρμα μετατροπής μήκους κύματος που ενσωματώνει συστοιχίες από συντονιστές δακτυλίου και γραμμές καθυστέρησης στο ίδιο φωτονικό πλινθίο. Λόγω της διασύνδεσης των δακτυλίων με τις γραμμές καθυστέρησης στο ίδιο υπόστρωμα δεν είναι απαραίτητη η χρήση οπτικών ενισχυτών, μειώνοντας έτσι δραστικά το

συνολικό μέγεθος της διάταξης σε μόλις 87,5 mm². Οι φασματικές αποκρίσεις τόσο των αντηχείων δακτυλίου όσο και των γραμμών καθυστέρησης μπορούν να μεταβληθούν με θερμαντικά στοιχεία που καταναλώνουν μόνο 80 mW ηλεκτρική ισχύ. Με την κυκλωματική αυτή δομή επιδεικνύεται 4x40Gb/s οπτική μετατροπή μήκους κύματος με ποιινή ισχύος μικρότερη από 3dB.

2.6.1 Αρχή λειτουργίας του τετραπλού αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος

Το Σχήμα 32 απεικονίζει το λειτουργικό διάγραμμα του οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος. Τέσσερις εξωτερικοί ημιαγωγίμοι ενισχυτές (SOAs) διασυνδέονται με ένα φωτονικό πλινθίο που διαθέτει τέσσερις ανεξάρτητες δομές. Κάθε μια από αυτές περιλαμβάνει ένα συντονιστή δακτυλίου δεύτερης τάξης (2nd order MRR) και ένα συμβολόμετρο καθυστέρησης (DI). Τα πακέτα πληροφορίας εισέρχονται στους ημιαγωγίμους ενισχυτές μαζί με συνεχή κύματα (CW), στα οποία μεταφέρεται η διαδιδόμενη πληροφορία. Λόγω του πεπερασμένου χρόνου ανάκαμψης των ημιαγωγίμων ενισχυτών, τα τελικώς μετατρεπόμενα μήκη κύματος εξέρχονται παραμορφωμένα. Η επιτάχυνση της λειτουργίας των ενισχυτών πραγματοποιείται με τη χρήση του φωτονικού κυκλώματος του Σχήμα 32. Αρχικά τα σήματα μεταδίδονται στους συντονιστές δακτυλίου οι οποίοι επιλέγουν τις γρήγορες φασματικές συνιστώσες μετά την ετεροδιαμόρφωση φάσης στον SOA. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μεταβάλλοντας την απόκριση των φίλτρων δακτυλίου εκτός της ισχύς κορυφής των μετατρεπόμενων κυμάτων χρησιμοποιώντας τα ενσωματωμένα θερμαντικά



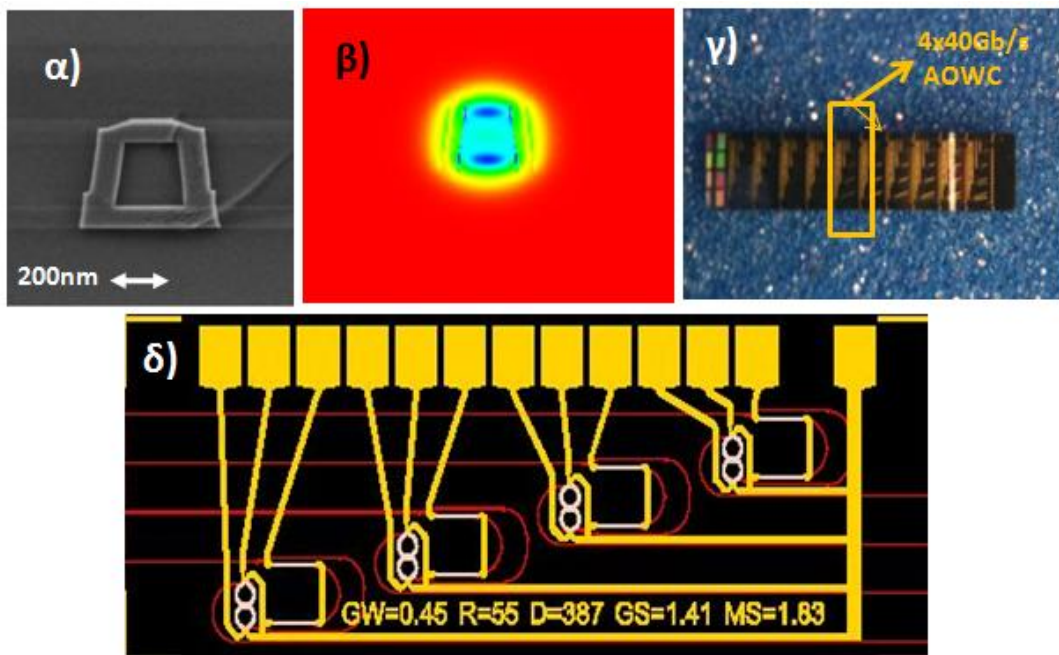
Σχήμα 32: Λειτουργία του 4x40Gb/s οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος

στοιχεία. Στην περίπτωση που επιλέγονται οι «μπλε» φασματικές συνιστώσες, προκύπτουν αντεστραμμένα σήματα στην έξοδο των συντονιστών δακτυλίου και τότε η πόλωσή τους πρέπει να αποκατασταθεί. Για το λόγο αυτό, όλες οι θύρες πτώσης των συντονιστών δακτυλίου διασυνδέονται με συστοιχίες από συμβολόμετρα καθυστέρησης τα οποία αναλαμβάνουν την αποκατάσταση πόλωσης των τελικώς μετατρεπόμενων κυμάτων. Αυτό πραγματοποιείται με τα βυθίσματα των αποκρίσεων των συμβολομέτρων καθυστέρησης τα οποία καταστέλουν τις φασματικές συνιστώσες ισχύος κορυφής προκαλώντας αναστροφή πόλωσης. Η ενσωμάτωση των συντονιστών δακτυλίου και των συμβολομέτρων καθυστέρησης στο ίδιο υπόστρωμα επιτρέπει την εξυπηρέτηση μεγαλύτερου όγκου δεδομένων χρησιμοποιώντας φωτονικά στοιχεία με μικρό αποτύπωμα, χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση και επεκτάσιμότητα σε πιο πολύπλοκες διατάξεις.

2.6.2 Κατασκευή των $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ συντονιστών δακτυλίου και συμβολομέτρων καθυστέρησης

Για την κατασκευή του 4x40 Gb/s οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος χρησιμοποιήθηκε η τεχνολογία κυματοδηγού TriPleX βασισμένη στη στοιχειομετρική ολοκλήρωση (Si_3N_4) με χρήση χημικής εναπόθεσης χαμηλής πίεσης ατμού (LPCVD) [2.47]. Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται κατασκευή φωτονικών στοιχείων μικρού μεγέθους λόγω του δείκτη διάθλασης ($n \sim 2.0$). Με το συνδυασμό ενός πρόσθετου υλικού με μεγάλη τάση συμπίεσης, όπως το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2), η συνολική πίεση του σύνθετου στρώματος μειώνεται σημαντικά. Η διαφορετική δομή υλικού μπορεί να οδηγήσει σε μια ορθογώνια τοπολογία κυματοδηγού με εξαιρετικά χαρακτηριστικά κυματοδήγησης και αναισθησία στην πόλωση. Η μορφή του κυματοδηγού σχηματίζεται από μια τομή νιτριδίου του πυριτίου (Si_3N_4) που γεμίζεται έγκλειστα από διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2), όπως φαίνεται στο Σχήμα 33 α). Η γεωμετρία προσεγγίζει ένα "κοίλο πυρήνα" με χαμηλό δείκτη διάθλασης πάνω στον οποίο εναποτίθεται το στρώμα Si_3N_4 υψηλού δείκτη διάθλασης. Τα χαρακτηριστικά του μεταδιδόμενου ρυθμού εξαρτώνται μόνο από τη γεωμετρία του συστήματος καθώς τα υλικά που το συνθέτουν μπορούν να αναπαραχθούν με ευκολία και ακρίβεια. Η όλη διαδικασία είναι συμβατή με την τεχνολογία CMOS και πολύ αποδοτική καθώς μόνο ένα λιθογραφικό βήμα είναι απαραίτητο για τον προσδιορισμό των κυματοδηγών με απώλεια μετάδοσης $< 0.1\text{dB/cm}$ [2.46].

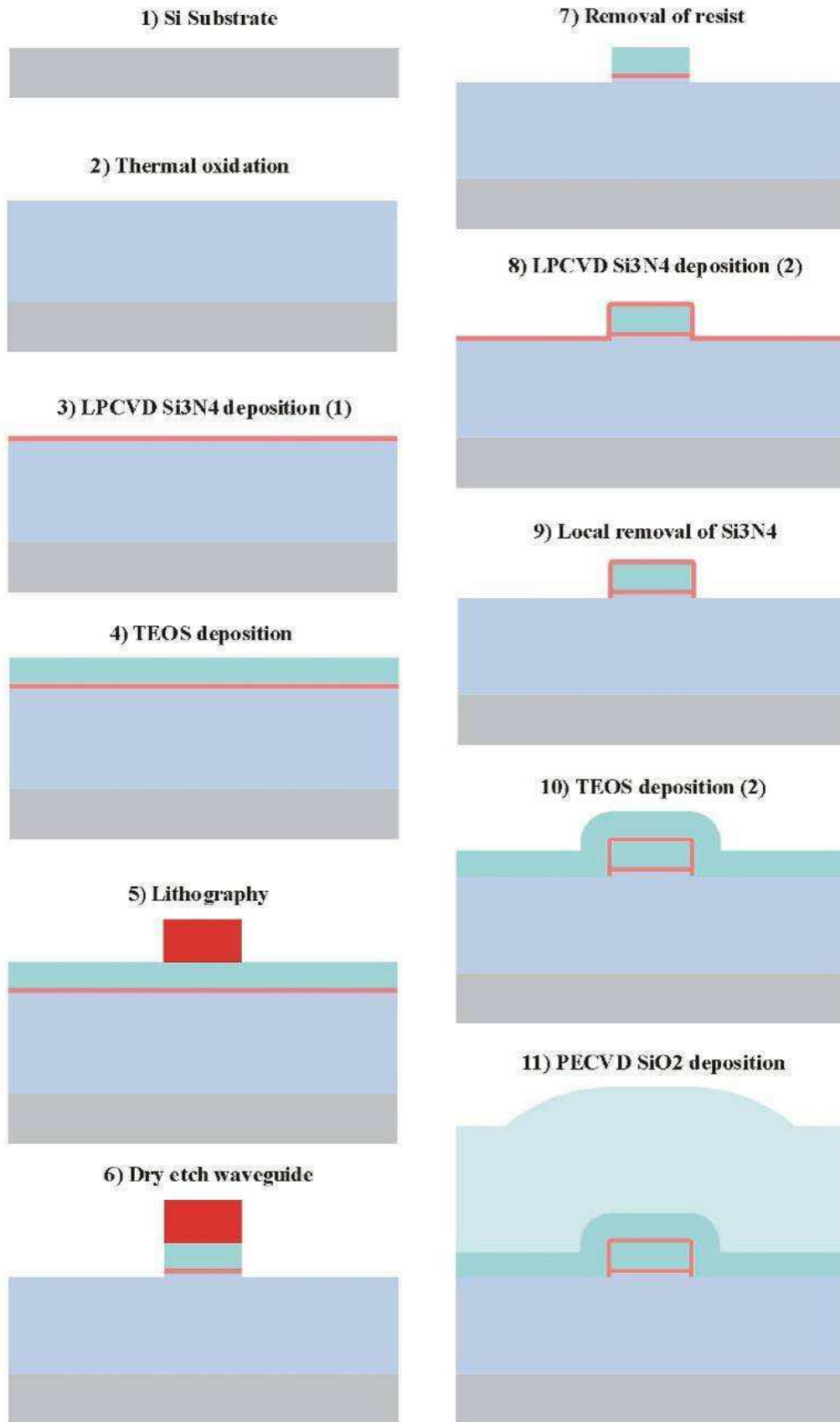
Η διαδικασία κατασκευής ξεκινά με θερμική οξείδωση των 100 χιλιοστών διαμέτρου στρώματος πυριτίου για τη μορφοποίηση του χαμηλότερου επιπέδου επένδυσης. Στη συνέχεια εναποτίθενται Si_3N_4 και SiO_2 και το φωτολιθογραφικό βήμα υλοποιείται από κοινού με χαρακτηριστική αντιδραστικών ιόντων. Μετά από μια δεύτερη εναπόθεση Si_3N_4 , αφαιρείται τοπικά η πλάκα νιτριδίου και εναποτίθεται



Σχήμα 33: α) Κυματοδηγός TriPleX, β) Προφίλ ρυθμού, γ) Ολοκληρωμένο φωτονικό στοιχείο, γ) Μάσκα σχεδιασμού του αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος

η επένδυση κορυφής. Η τοπική αφαίρεση του νιτριδίου, αν και πιο δύσκολη στην κατασκευή, συντελεί στη δημιουργία ενός ορθογώνιου κυματοδηγού μειώνοντας τα φαινόμενα διάθλασης (birefringence). Μετά από την εναπόθεση της άνω επένδυσης, η επιφάνεια επιπεδοποιείται με χημική μηχανική λείανση. Μια λεπτή μεμβράνη από χρώμιο και χρυσό εναποτίθεται στη συνέχεια χρησιμοποιώντας κανονική λιθογραφία επαφής και χημική χαρακτηριστική για την κατασκευή των θερμαντικών στοιχείων.

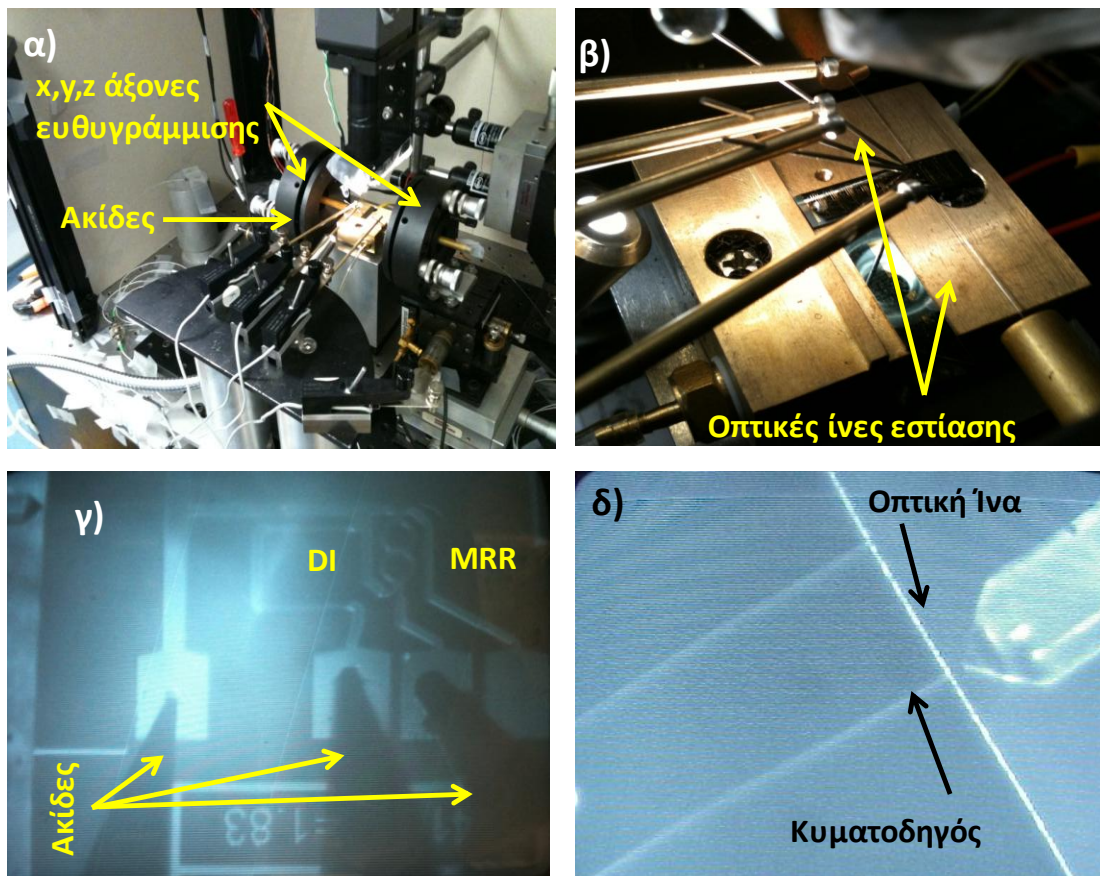
Ο χρυσός είναι χαραγμένος κοντά στους συντονιστές δακτυλίου για την τοπική αύξηση της αντίστασης. Το πυρίτιο του κυματοδηγού στη θέση του θερμαντικού στοιχείου αφαιρείται εξολοκλήρου μειώνοντας σημαντικά τη διαρροή της θερμότητας στο υπόστρωμα πυριτίου. Αν και η ταχύτητα μεταβολής της θερμοκρασίας είναι περιορισμένη, η ισχύς που απαιτείται για την αλλαγή αυτή μειώνεται σε μόλις 80 mW λόγω της συγκέντρωσης της θερμότητας στον κυματοδηγό. Οι κυματοδηγοί είναι σχεδιασμένοι για 450 x 450 nm πυρήνα SiO_2 με κέλυφος 170 nm Si_3N_4 , επιτρέποντας ακτίνες δακτυλίων έως και 55 μm . Το Σχήμα 33 γ) απεικονίζει το ολοκληρωμένο φωτονικό στοιχείο με συστοιχίες από συντονιστές δακτυλίου και συμβολόμετρα καθυστέρησης. Το Σχήμα 33 δ) δείχνει τη μάσκα σχεδιασμού με μια σειρά από επαφές για τη μεταβολή της φασματικής απόκρισης των ολοκληρωμένων στοιχείων. Τέλος το Σχήμα 34 παρουσιάζει τα διάφορα βήματα λιθογραφίας που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή οπτικών διατάξεων με την τεχνολογία TriPleX.



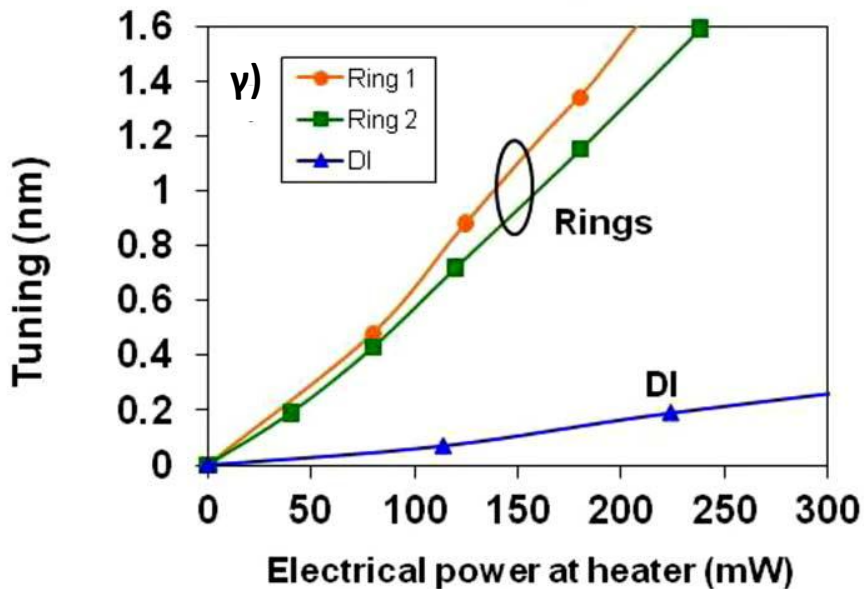
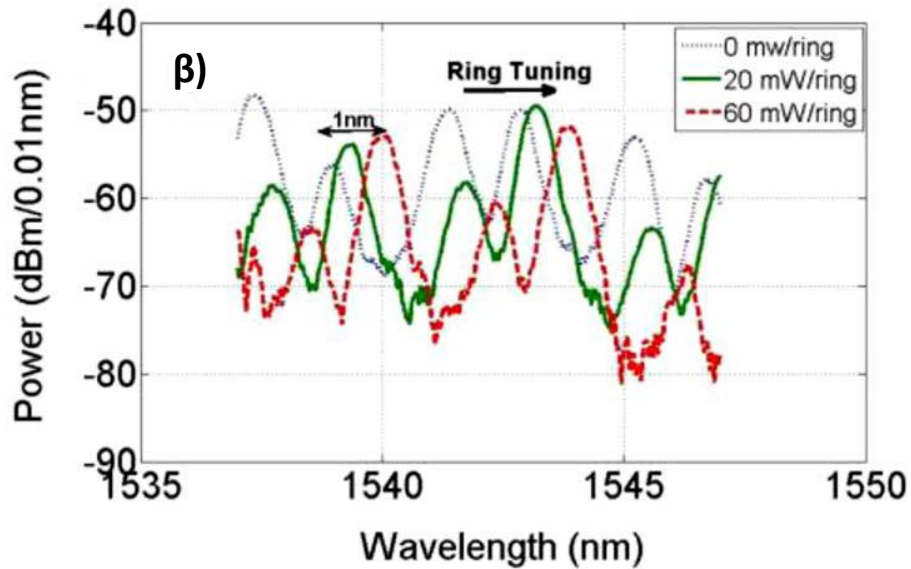
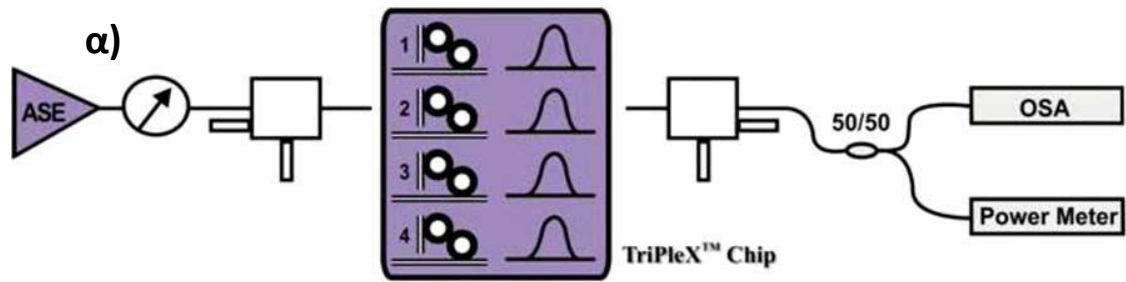
Σχήμα 34: Βήματα κατασκευής φωτονικών στοιχείων με την τεχνολογία TriPleX [2.47]

2.6.3 Χαρακτηρισμός των $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ συντονιστών δακτυλίου και συμβολομέτρων καθυστέρησης

Το Σχήμα 35 α) απεικονίζει το μηχανικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε για το χαρακτηρισμό του οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος. Αποτελείται από δύο άξονες ευθυγράμμισης x-y-z, μια θερμαινόμενη βάση, ακίδες παροχής τάσης και μια κάμερα εστίασης. Η οπτική διάταξη τοποθετείται στην επίπεδη βάση η οποία μέσω ενός αισθητήρα θερμοκρασίας και ενός θερμοηλεκτρικού στοιχείου διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία. Για την οπτική σύζευξη των σημάτων μέσα στο φωτονικό πλινθίο, οπτικές ίνες εστίασης τοποθετημένες πάνω στους άξονες x-y-z ευθυγραμμίζονται με τους κυματοδηγούς του οπτικού κυκλώματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 35 β), δ). Στη συνέχεια ακίδες παροχής τάσης επικάθονται σε συγκεκριμένα σημεία επαφής του οπτικού κυκλώματος για την οδήγηση των θερμαντικών στοιχείων τόσο των συντονιστών δακτυλίου όσο και των συμβολομέτρων καθυστέρησης όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 35 β), γ).



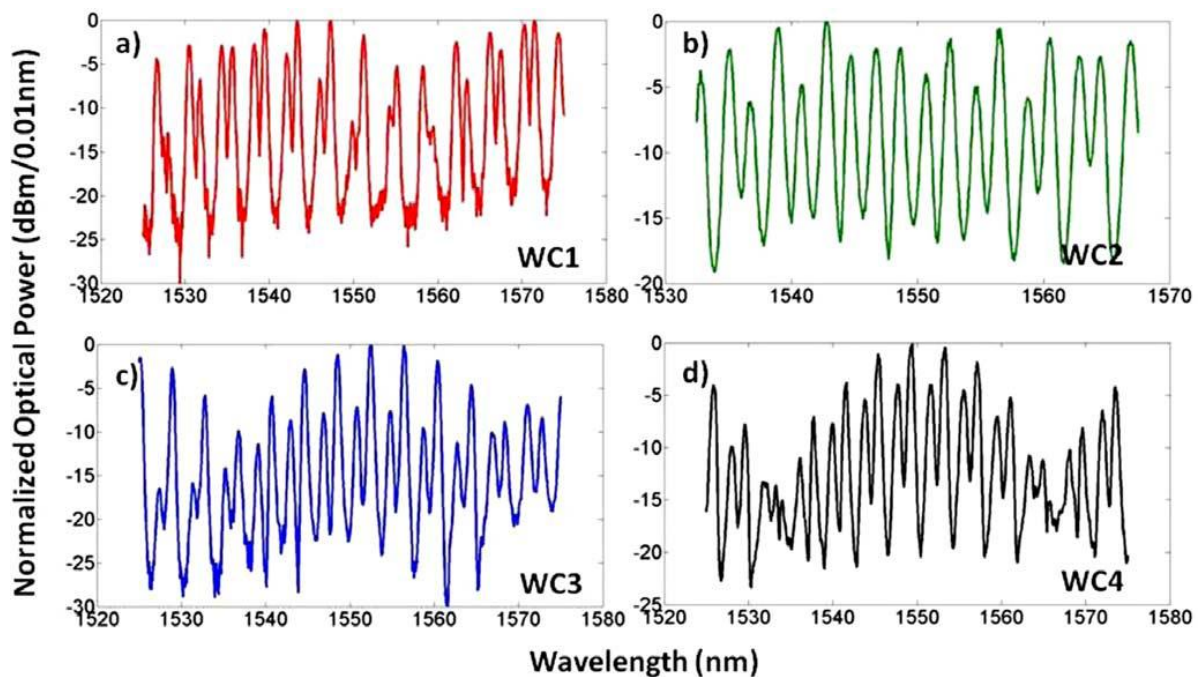
Σχήμα 35: α) Σύστημα ευθυγράμμισης οπτικών ινών με τους κυματοδηγούς του φωτονικού κυκλώματος, β) Οπτικές ίνες εστίασης τοποθετημένες στους κυματοδηγούς του οπτικού κυκλώματος, γ) Ακίδες τοποθετημένες στα σημεία επαφής των θερμαντικών στοιχείων, δ) Σύζευξη μεταξύ ίνας και κυματοδηγού



Σχήμα 36: α) Πειραματική διάταξη χαρακτηρισμού του φωτονικού κυκλώματος, β) Μετατόπιση της φασματικής απόκρισης των συντονιστών δακτυλίου, γ) Φασματική μετατόπιση συναρτήσει της ηλεκτρικής κατανάλωσης

Το Σχήμα 36 α) απεικονίζει την πειραματική διάταξη για το χαρακτηρισμό του αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος. Για την εξαγωγή των φασματικών αποκρίσεων των επιμέρους φωτονικών στοιχείων χρησιμοποιήθηκε η αυθόρμητη εκπομπή ενός οπτικού ενισχυτή (Arbitrary Spontaneous Emission-ASE).

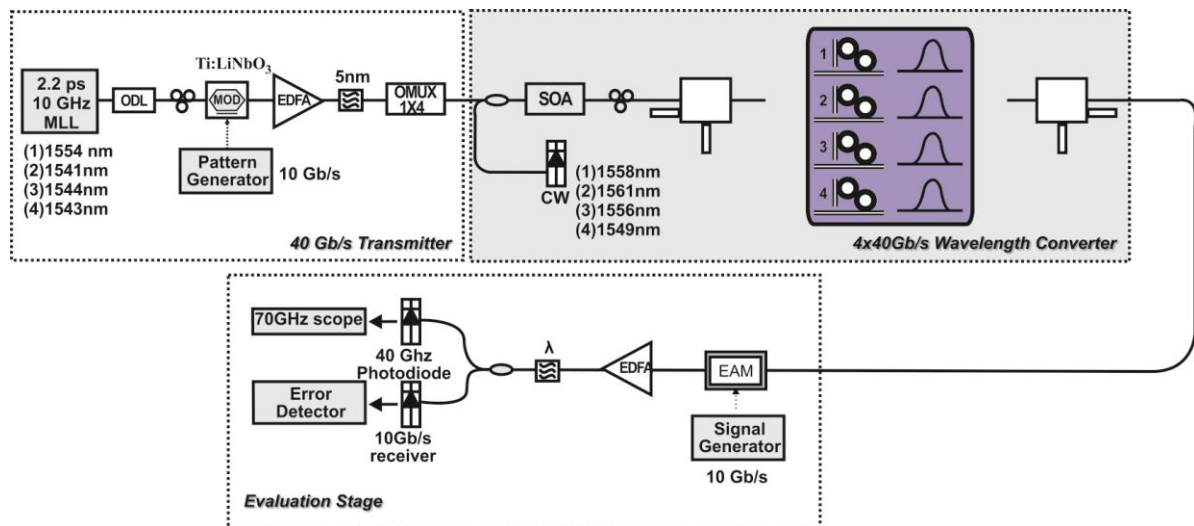
Για τη διατήρηση σταθερής πόλωσης κατά την σύζευξη μέσα στο φωτονικό κύκλωμα γίνεται χρήση ενός πολωτή με λόγο σβέσης 30dB. Το φως συζευγνύεται μέσω οπτικών ινών εστίασης διατηρώντας την πόλωση (Polarization Maintaining-PM lensed fibers), ενώ οι φασματικές αποκρίσεις εξάγονται με έναν οπτικό φασματικό αναλυτή ευκρίνειας 10 pm. Το Σχήμα 36 (β) απεικονίζει τη μεταβολή της φασματικής απόκρισης του συντονιστή δακτυλίου δεύτερης τάξης όταν είναι ενεργοποιημένα και τα δύο θερμαντικά του στοιχεία. Με 60 mW ηλεκτρική ισχύ ανά δακτύλιο επιτυγχάνεται 1nm μετατόπιση μήκους κύματος. Το Σχήμα 36 (γ) δείχνει την εξάρτηση της φασματικής απόκρισης των MRRs και DIs με βάση την κατανάλωση ισχύος κάθε θερμαντή. Τέλος το Σχήμα 37 απεικονίζει τις συναρτήσεις μεταφοράς κάθε μετατροπέα μήκους κύματος με την ελεύθερη φασματική περιοχή (FSR) των συντονιστών δακτυλίου και συμβολομέτρων καθυστέρησης να υπολογίζεται περίπου 4 nm, ενώ το εύρος ζώνης ημίσειας ισχύος 60 GHz. Λόγω των ανοχών κατασκευής κατά τη φωτονική ολοκλήρωση, η ελεύθερη φασματική περιοχή των επιμέρους στοιχείων δεν είναι η ίδια με αποτέλεσμα η συνολική απόκριση ισχύος να παρουσιάζει τις διακυμάνσεις που φαίνονται στο Σχήμα 37. Με τη χρήση όμως των διαθέσιμων θερμαντικών κυκλωμάτων πάνω στο φωτονικό πλινθίο είναι εφικτή η βελτιστοποίηση της συνάρτησης μεταφοράς σε όλη την C περιοχή συχνοτήτων.



Σχήμα 37: Συνάρτηση μεταφοράς ισχύος κάθε μετατροπέα μήκους κύματος του φωτονικά ολοκληρωμένου κυκλώματος.

2.6.4 Πειραματική αξιολόγηση του τετραπλού αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος

Το Σχήμα 38 απεικονίζει τη διάταξη για την πειραματική αξιολόγηση του τετραπλού μετατροπέα μήκους κύματος. Το 40Gb/s διαμορφωμένο σήμα παράγεται με μεθόδους χρονικής πολυπλεξίας από ένα λέιζερ εγκλείδωσης ρυθμών στα 10 GHz και με διάρκεια παλμού 2.2 ps. Η κυματομορφή φέρει μια ψευδοτυχαία ακολουθία τάξης 2^7-1 σε μήκος κύματος παρόμοιο με τις φασματικές αποκρίσεις των συντονιστών δακτυλίου. Για την ετεροδιαμόρφωση κέρδους και φάσης χρησιμοποιείται ένας εμπορικά διαθέσιμος ημιαγωγίμος οπτικός ενισχυτής με 30ps χρονική ανάκαμψη κέρδους και τέσσερις δίοδοι που παράγουν τα κύματα συνεχούς μήκους (CW). Η οπτική σύζευξη στους κυματοδηγούς του φωτονικού κυκλώματος πραγματοποιείται με μονορρυθμικές οπτικές ίνες εστίασης. Τα τελικώς 40Gb/s μετατρεπόμενα μήκη κύματος αξιολογούνται με μετρήσεις λαθών (Bit-Error Rate measurements- BER) ύστερα από αποπολυπλεξία των τεσσάρων καναλιών στα 10Gb/s με τη χρήση ενός διαμορφωτή ηλεκτροαπορρόφησης.

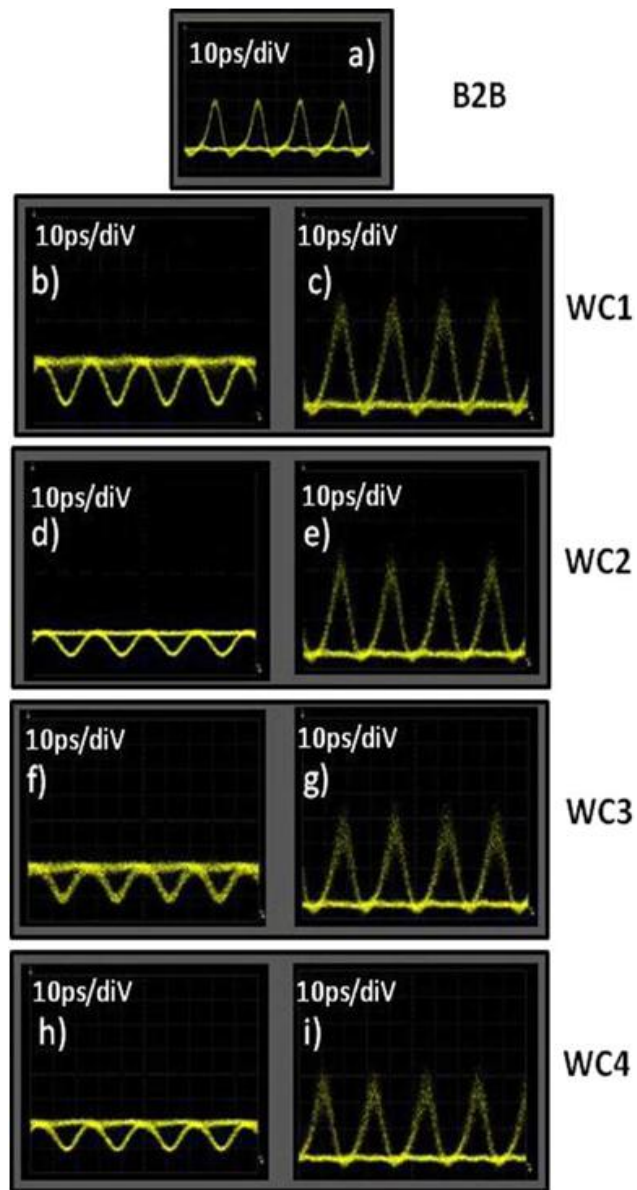


Σχήμα 38: Πειραματική διάταξη

Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει τα βέλτιστα ποσοστά ισχύος που χρησιμοποιήθηκαν στους μετατροπείς μήκους κύματος. Οι αποκλίσεις στα ποσοστά οπτικής ισχύος οφείλονται στη φασματική απόκριση του ημιαγωγίμου ενισχυτή και στις διαφορετικές απώλειες σύζευξης μεταξύ ίνας και κυματοδηγού. Η μέση ηλεκτρική ισχύς για τη μεταβολή των χαρακτηριστικών φίλτρου κάθε μετατροπέα μήκους κύματος (WC) είναι περίπου 72mW για κάθε θερμαντικό στοιχείο. Το διάγραμμα ματιού της εισερχόμενης ροής δεδομένων απεικονίζεται στο Σχήμα 39 (α). Με τη μεταβολή των συναρτήσεων μεταφοράς των συντονιστών δακτυλίου 0.2nm προς τις «μπλε» φασματικές συνιστώσες επιτυγχάνεται μετατροπή μήκους κύματος με αντεστραμμένη πολικότητα όπως φαίνεται στο Σχήμα 39 b), d), f), g).

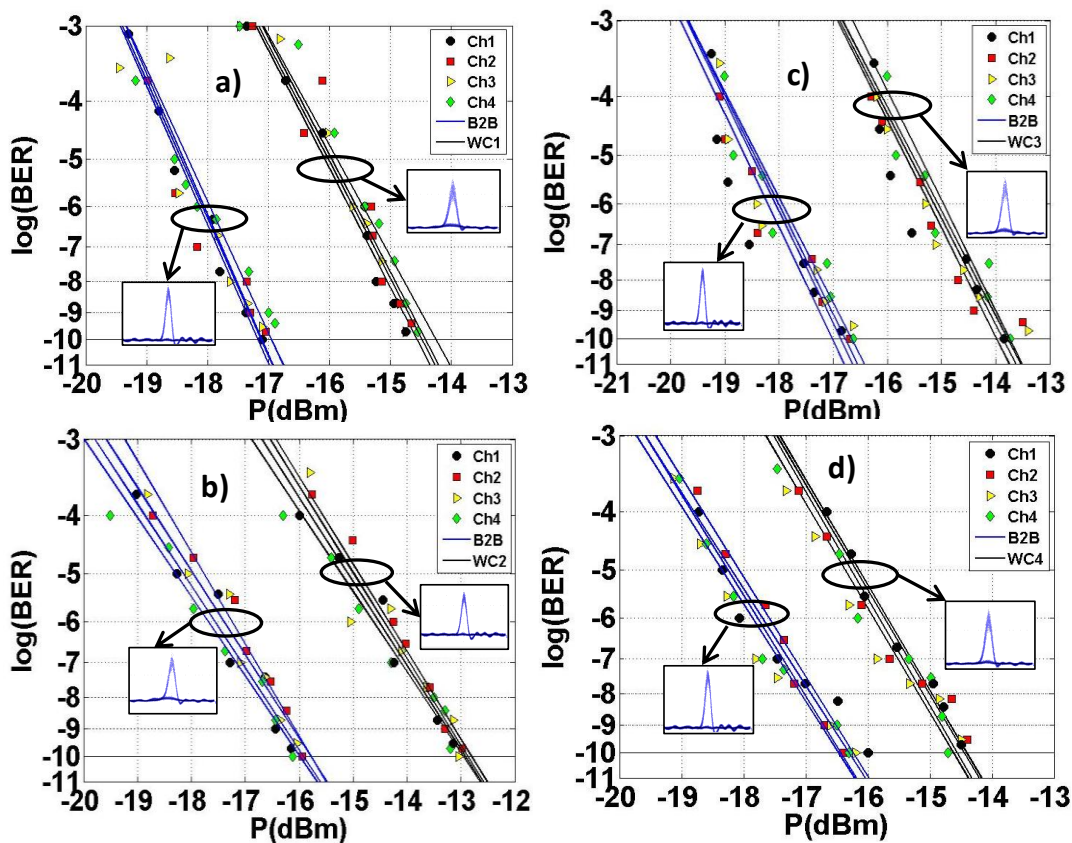
Πίνακας 1: Οπτικά και ηλεκτρικά ποσοστά ισχύος για τους μετατροπείς μήκους κύματος

WC	WC1	WC2	WC3	WC4
Power	1559nm	1561nm	1557nm	1550nm
opt. PData	1.6 mW	3.13 mW	2.92 mW	2.53 mW
opt. PCW	0.747 mW	0.627 mW	0.57 mW	0.8 mW
el. PHeater (1 st ring)	131.44 mW	0.88 mW	0 mW	0 mW
el. PHeater (2 nd ring)	0 mW	0.88 mW	0 mW	0 mW
el. PHeater (DI)	0 mW	85.68 mW	0 mW	69.7 mW

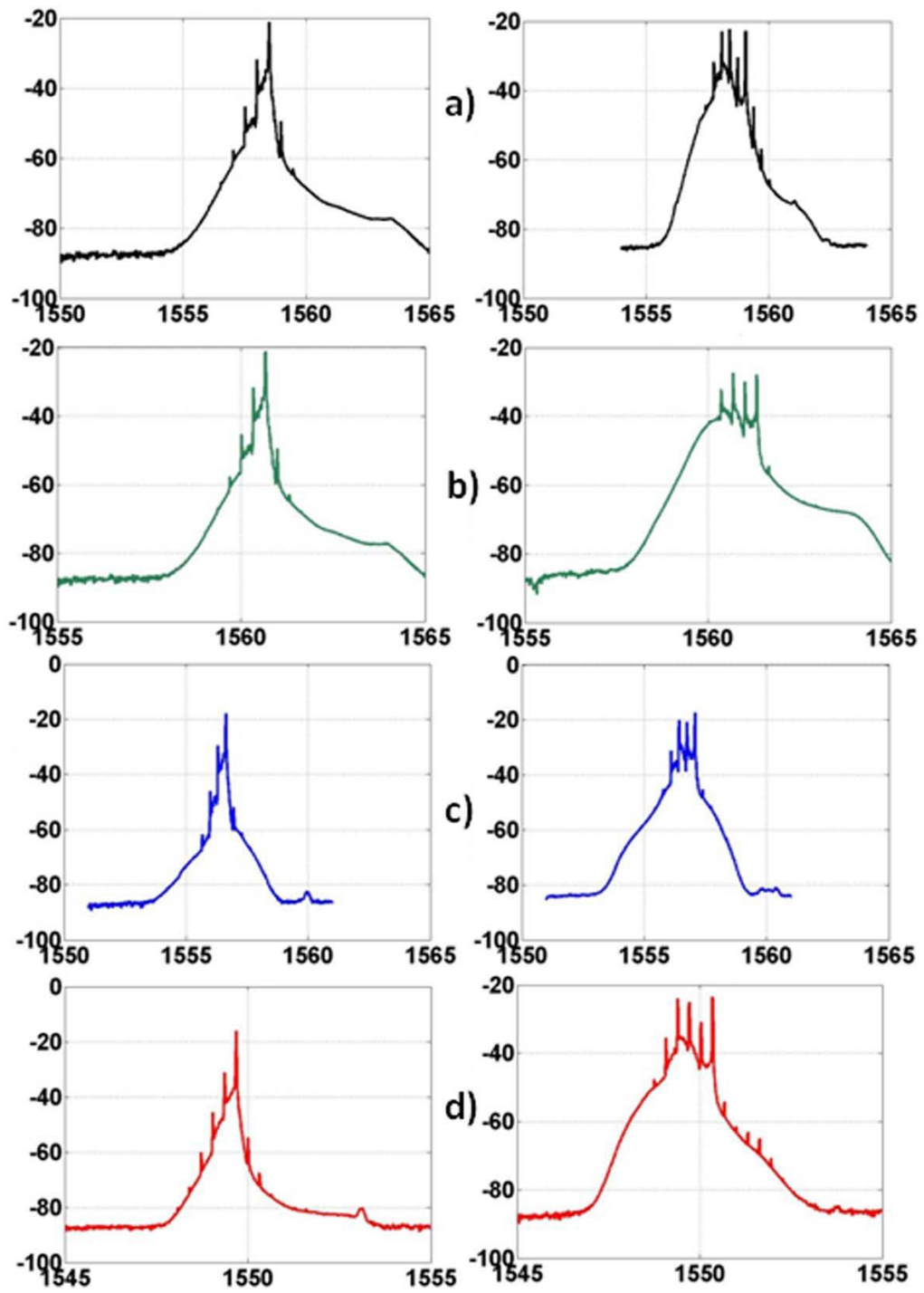


Σχήμα 39: α) Αρχικό σήμα εισόδου, β), δ), ς), η) Σήματα στην έξοδο των μετατροπέων μήκους κύματος 1-4 (WC1-WC4) με αντεστραμμένη πολικότητα, γ), ε), γ), η) Σήματα εξόδου με ορθή πολικότητα

Με την περαιτέρω μεταβολή των συναρτήσεων μεταφοράς 0.3 nm προς τις «μπλέ» φασματικές συνιστώσες, οι κυρίαρχες συνιστώσες CW των μετατρεπόμενων σημάτων συμπίπτουν με τα βυθίσματα των συναρτήσεων μεταφοράς των συμβολομέτρων καθυστέρησης με αποτέλεσμα τη σημαντική εξασθένιση τους και την αποκατάσταση της πολικότητας των κυματομορφών. Το Σχήμα 39 c), e), g), i) απεικονίζει τα τελικώς μετατρεπόμενα κύματα ορθής πολικότητας. Τα αρχικά και τελικά μήκη κύματος για τις τέσσερις παράλληλες διατάξεις είναι 1) 1554 – 1558 nm, 2) 1541 - 1561 nm, 3) 1544 - 1556 nm, και 4) 1543 - 1549 nm. Το Σχήμα 40 απεικονίζει τις μετρήσεις σφαλμάτων μεταξύ των αρχικών (Back-to-Back-B2B) και μετατρεπόμενων σημάτων. Για όλα τα αποπολυπλεγμένα κανάλια παρατηρείται λειτουργία χωρίς λάθη με ποινές ισχύος μικρότερες από 3 dB. Η απόδοση μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω με τη χρήση κυματοδηγών εκλέπτυνσης για καλύτερη οπτική σύζευξη με τις ίνες εστίασης. Το Σχήμα 41 δείχνει τα οπτικά φάσματα για τους επιμέρους μετατροπείς μήκους κύματος. Στην αριστερή πλευρά, απεικονίζονται τα μετατρεπόμενα μήκη κύματος αντεστραμμένης πολικότητας όταν η μεταβολή των συναρτήσεων μεταφοράς γίνεται προς τις «μπλέ» φασματικές συνιστώσες και είναι μικρή. Στη δεξιά πλευρά απεικονίζονται τα φάσματα ορθής πολικότητας όπου οι κυρίαρχες CW συνιστώσες έχουν καταπιεστεί από τα βυθίσματα των συμβολομέτρων καθυστέρησης.



Σχήμα 40: a)-d) Μετρήσεις λαθών για τους μετατροπείς μήκους κύματος 1-4



Σχήμα 41: α)-δ) Φασματικό περιεχόμενο των μετατροπών μήκους κύματος 1-4 για αντεστραμμένη και ορθή πολικότητα

2.7 Οπτικός μετατροπέας μήκους κύματος υπερευψηλών ταχυτήτων χρησιμοποιώντας ημιαγωγίμους ενισχυτές και συντονιστές δακτυλίου πυριτίου ανώτερης τάξης

Η τεχνολογία πυριτίου (Silicon on Insulator-SOI) θεωρείται η ιδανική πλατφόρμα για ολοκλήρωση νανοφωτονικών διατάξεων [2.48]. Οι ελκυστικές ιδιότητες του πυριτίου σε συνδυασμό με τις τεχνικές ολοκλήρωσης CMOS καθιστούν εφικτή την κατασκευή οπτικών διατάξεων μικρού μεγέθους και πυκνής ολοκλήρωσης [2.49][2.50][2.51][2.52][2.53]. Τα κυκλώματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη δημιουργία αποδοτικών συστημάτων πολυπλεξίας κύματος και διατάξεων φωτονικής διασύνδεσης [2.54]. Σε αυτές τις εφαρμογές, οι συντονιστές δακτυλίου ανώτερης τάξης μπορούν να επιτελέσουν λειτουργίες επιλογής μήκους κύματος με χαρακτηριστικές φίλτρου υψηλής ανάλυσης, επίπεδες ζωνοπερατές φασματικές αποκρίσεις και μεγάλο λόγο σβέσης. Πέρα από τις ιδιότητές τους ως φίλτρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως διακόπτες [2.55], ως γραμμές καθυστέρησης [2.56], ως διαμορφωτές [2.57] και ως μετατροπείς μήκους κύματος [2.58] για την υλοποίηση φωτονικών συστημάτων δρομολόγησης νέας γενιάς.

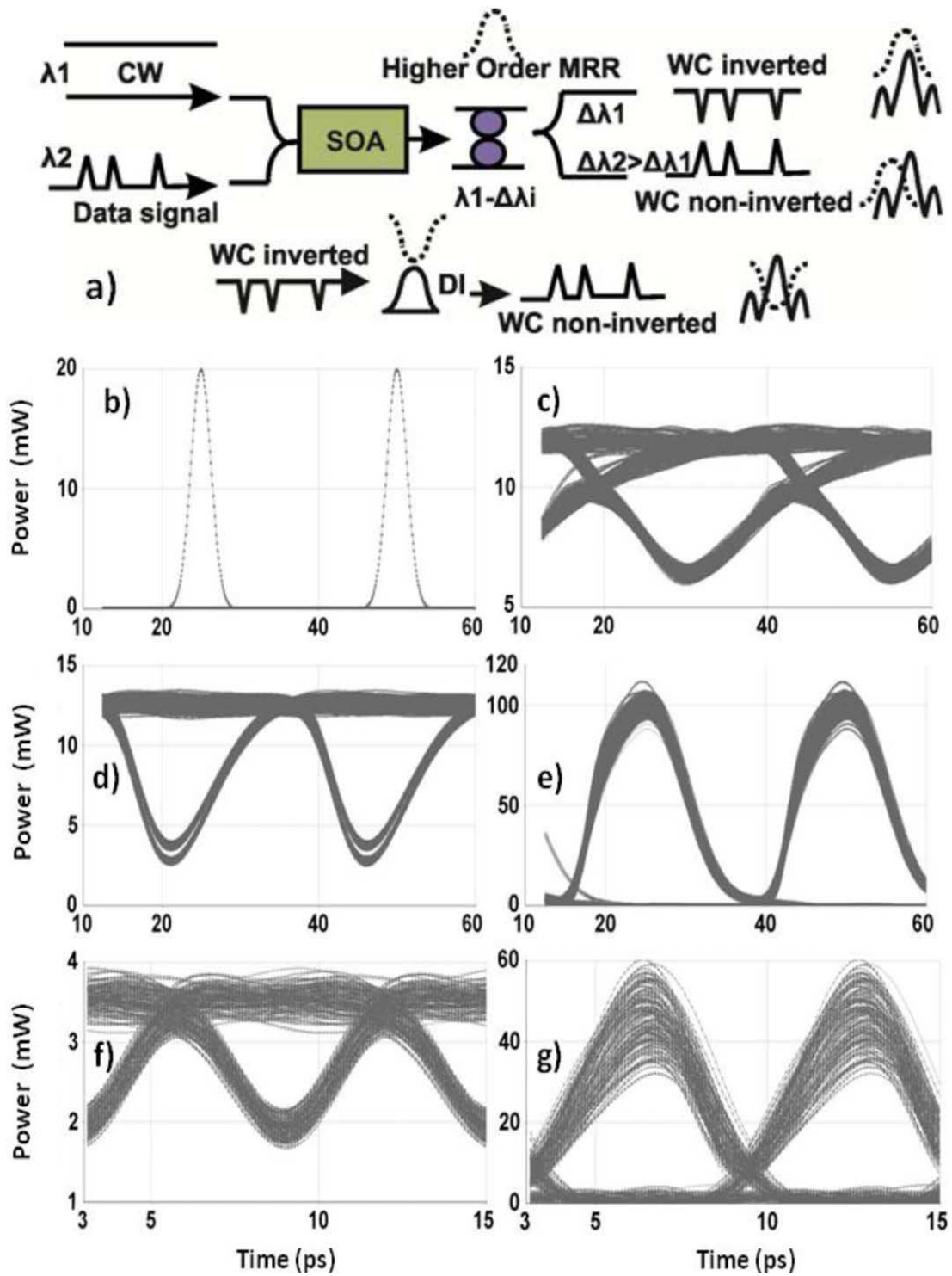
Στην περίπτωση των μετατροπέων μήκους κύματος με χρήση ημιαγωγίμων οπτικών ενισχυτών (SOAs) και συντονιστών δακτυλίου, έχουν επιδειχθεί κυκλώματα επεξεργασίας έως 40Gb/s χρησιμοποιώντας ολοκληρωμένα στοιχεία χαμηλού δείκτη διάθλασης με καμπύλα τμήματα ~50μm [2.59]. Για την επίτευξη μεγαλύτερων ταχυτήτων μετατροπής μήκους κύματος είναι απαραίτητη η κατασκευή συντονιστών δακτυλίου ανώτερης τάξης με ακτίνα μερικών μικρομέτρων, φασματικές αποκρίσεις υψηλού λόγου σβέσης και χρόνους περιστροφής συγκρίσιμους με τους στενούς παλμούς μετάδοσης [2.60]. Στις παρακάτω ενότητες παρουσιάζεται ο σχεδιασμός η κατασκευή και η πειραματική αξιολόγηση συντονιστών δακτυλίου δεύτερης και τρίτης τάξης με χρήση δομής πυριτίου (SOI) μεγάλου δείκτη διάθλασης. Όλα τα φωτονικά στοιχεία κατασκευάζονται με λιθογραφία υψηλής ανάλυσης για το σχηματισμό κυματοδηγών διαστάσεων 220x450 nm πάνω σε πλινθία πυριτίου επιφανείας 30x30mm. Δύο διαφορετικές κατηγορίες συντονιστών δακτυλίου παρουσιάζονται: α) δακτύλιοι σταθερής φασματικής απόκρισης με κυματοδηγούς εκλέπτυνσης SU8 για 50% οπτική σύζευξη με ίνες εστίασης και β) δακτύλιοι μεταβλητής φασματικής απόκρισης με συζεύκτες περίθλασης απόδοσης 30%. Η μεταβολή και βελτίωση των φασματικών χαρακτηριστών των αντηχείων είναι εφικτή με ολοκληρωμένα θερμαντικά στοιχεία τιτανίου που αναλαμβάνουν τη διόρθωση όποιας ολίσθησης φάσης των επιμέρους ταλαντωτών [2.61]. Ένας συνολικός αριθμός 20 συντονιστών δακτυλίου ολοκληρώνεται σε μια επιφάνεια 10.6x10.4mm ενός 30x30mm φωτονικού πλινθίου. Χρησιμοποιώντας τα φωτονικά κυκλώματα αυτά επιδεικνύεται μετατροπή μήκους κύματος στα 40Gb/s και 160Gb/s με ποινή ισχύος 2 και 3dB αντίστοιχα. Οι διατάξεις αυτές μπορούν να ολοκληρωθούν σε κοινό υπόστρωμα με υβριδικές μορφές ολοκλήρωσης [2.62].

2.7.1 Σχεδιασμός συντονιστών δακτυλίου ανώτερης τάξης για οπτική μετατροπή μήκους κύματος

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται ο σχεδιασμός των συντονιστών δακτυλίου ανώτερης τάξης. Τα εργαλεία μοντελοποίησης που χρησιμοποιούνται είναι: α) το λογισμικό ASPIC για τον υπολογισμό των συναρτήσεων μεταφοράς χρησιμοποιώντας μακροσκοπικές παραμέτρους κυματοδηγού β) το λογισμικό VPI για την αξιολόγηση του μηχανισμού μετατροπής μήκους κύματος και γ) ένα λογισμικό διάδοσης δέσμης (Beam propagation) για τον υπολογισμό του μεγέθους και του διάκενου του κυματοδηγών. Αρχικά η ακτίνα του δακτυλίου, οι απώλειες των κυματοδηγών, ο δείκτης διάθλασης ομάδας και οι συντελεστές σύζευξης ισχύος εισάγονται ως παράμετροι στο λογισμικό ASPIC. Για κάθε συνδυασμό παραμέτρων, το ASPIC παράγει μια απόκριση συχνότητας και φάσης η οποία χρησιμοποιείται σε ένα κύκλωμα μετατροπής μήκους κύματος του VPI. Η διάταξη VPI αποτελείται από έναν ημιαγωγίμο οπτικό ενισχυτή με 30ps χρόνο ανάκαμψης, ένα μοντέλο φίλτρου στο οποίο έχει φορτωθεί η συνάρτηση μεταφοράς που έχει εξαχθεί από το ASPIC και ένα συμβολόμετρο (DI) με καθυστέρηση 2ps. Η διαδικασία μετατροπής μήκους κύματος βασίζεται στη μέθοδο φιλτραρίσματος του τετερίσματος (chirp) που παράγεται από τον ημιαγωγίμο ενισχυτή [2.63].

Το Σχήμα 42 α) απεικονίζει την αρχή λειτουργίας του αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος. Ένα διαμορφωμένο σήμα και ένα κύμα συνεχούς μήκους (CW) εισάγονται στο SOA για ετεροδιαμόρφωση κέρδους και φάσης. Λόγω του πεπερασμένου χρόνου ανάκαμψης των φορέων του SOA, το σήμα εξόδου παρουσιάζει έντονη παραμόρφωση. Για την επιτάχυνση του μηχανισμού λειτουργίας χρησιμοποιείται ένας συντονιστής δακτυλίου ανώτερης τάξης για την επιλογή των γρήγορων φασματικών συνιστωσών. Με έκκεντρο φιλτράρισμα προς την «μπλε» φασματική περιοχή, προκύπτει μια κυματομορφή αντεστραμμένης πολικότητας η οποία αποκαθίσταται όταν η μεταβολή της συνάρτησης μεταφοράς προς τα μικρότερα μήκη κύματος είναι πιο έντονη. Η αποκατάσταση της πολικότητας για ρυθμούς μετάδοσης >40Gb/s υλοποιείται με ένα συμβολόμετρο καθυστέρησης του οποίου η απόκριση χρησιμοποιείται για την καταπίεση της κυρίαρχης συνιστώσας κορυφής του CW.

Οι πρώτες προσομοιώσεις γίνονται με ρυθμούς δεδομένων μέχρι και 40 Gb / s. Για την επιλογή των γρήγορων φασματικών συχνοτήτων χρησιμοποιείται ένας συντονιστής δακτυλίου δεύτερης τάξης με ελεύθερη φασματική περιοχή (FSR) 500GHz στη θύρα πτώσης, 60GHz εύρος ημίσειας ισχύος και 20dB λόγο σβέσης. Το Σχήμα 42 β) απεικονίζει το διάγραμμα ματιού του εισερχομένου σήματος στον SOA διαμορφωμένο με μια ψευδοτυχαία ακολουθία 2^7-1 και εύρος παλμού 2ps. Όταν η φασματική απόκριση του συντονιστή δακτυλίου είναι κεντραρισμένη στο φασματικό περιεχόμενο του μετατρεπόμενου κύματος, ο χρόνος ανάκαμψης του SOA είναι εμφανής στο Σχήμα 42 γ). Με 40 GHz μετατόπιση μπρος τις «μπλε» φασματικές συνιστώσες ο μηχανισμός μετατροπής μήκους κύματος επιταχύνεται



Σχήμα 42: a) Αρχή λειτουργίας του μετατροπέα μήκους κύματος, b) Σήμα εισόδου, c) Ανάκαμψη κέρδους του SOA, d) 40Gb/s μετατροπή μήκους κύματος με αντεστραμμένη πολικότητα, e) 40Gb/s μετατροπή μήκους κύματος με ορθή πολικότητα, f) 160Gb/s μετατροπή μήκους κύματος με αντεστραμμένη πολικότητα, g) 160Gb/s μετατροπή μήκους κύματος με ορθή πολικότητα

σημαντικά οδηγώντας σε μια αντεστραμμένη κυματομορφή όπως φαίνεται στο Σχήμα 42 d). Μετά τη χρήση του συμβολομέτρου καθυστέρησης το οπτικό σήμα αποκτά την ορθή πολικότητα όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 42 e). Η φέρουσα συχνότητα του αρχικού σήματος είναι στα 193,6 THz, ενώ αυτή του συνεχούς μήκους κύματος στα 193,1 THz.

Για τη λειτουργία του οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος σε ρυθμοδότηση έως 160 Gb/s οι συντονιστές δακτυλίου δεύτερης τάξης δεν ήταν κατάλληλοι εξαιτίας του στενού εύρους ζώνης ημίσειας ισχύος και του χαμηλού λόγου σβέσης. Για το σκοπό αυτό σχεδιάστηκε ένας συντονιστής τρίτης τάξης με ελεύθερη φασματική περιοχή (FSR) 4THz, εύρος ζώνης ημίσειας ισχύος 190 THz και λόγο σβέσης 30dB. Μεταβάλλοντας τη φασματική απόκριση του 120 GHz προς τις «μπλε» συχνοτική περιοχή ο χρόνος ανάκαμψης του SOA επιταχύνεται σημαντικά όπως φαίνεται από το Σχήμα 42 f). Μετά από το συμβολόμετρο καθυστέρησης το μετατρεπόμενο μήκος κύματος αποκτά την ορθή πολικότητα όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 42 g). Η φέρουσα συχνότητα του αρχικού σήματος είναι στα 194,6 THz, ενώ αυτή του συνεχούς μήκους κύματος στα 193,1 THz. Λαμβάνοντας υπόψη τα φασματικά χαρακτηριστικά των συντονιστών δακτυλίου δεύτερης και τρίτης τάξης είναι εφικτός ο προσδιορισμός των διαστάσεων και διάκενων των κυματοδηγών. Με χρήση της μεθόδου διάδοσης δέσμης (Beam Propagation) εξάγονται οι προδιαγραφές διαφόρων δομών δακτυλίου όπως απεικονίζει ο Πίνακας 2.

Πίνακας 2: Προδιαγραφές συντονιστών δακτυλίου ανώτερης τάξης

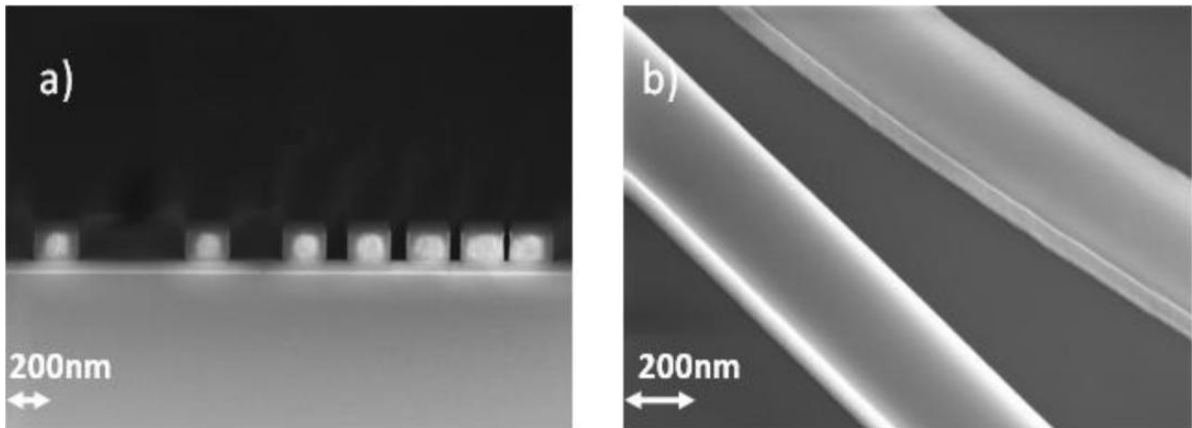
Structure Parameter	2 nd Order	2 nd Order	3 rd Order	3 rd Order
	Ring	Racetrack	Ring	Racetrack
FSR	4nm	4nm	27nm	12nm
Bending radius	23μm	15μm	3μm	5μm
Straight section length	-	25.5μm	-	8.5μm
Waveguide height	220nm	220nm	220nm	220nm
Waveguide width	450nm	450nm	500nm	450nm
Bus waveguide width	450nm	450nm	300nm	450nm
Gap bus-ring waveguide	85nm	290	90nm	160nm
Gap ring-ring waveguide	195nm	415nm	220nm	280nm

2.7.2 Κατασκευή συντονιστών δακτυλίου πυριτίου ανώτερης τάξης για οπτική μετατροπή μήκους κύματος

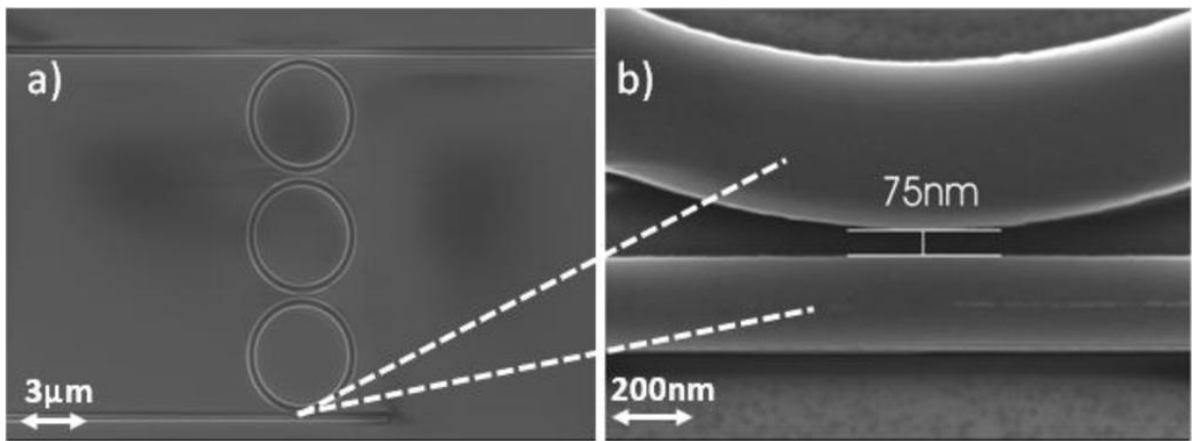
Η κατασκευή συντονιστών δακτυλίου ανώτερης τάξης απαιτεί λιθογραφία υψηλής ανάλυσης. Η λιθογραφία δέσμης ηλεκτρονίων (Electron Beam Lithography) χρησιμοποιείται για την κατασκευή μικρο-δομών σε υποστρώματα πυριτίου SOI αποτελούμενα από πυρίτιο πάχους 220nm και διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) πάχους 2 μm . Χρησιμοποιώντας τη χημική ένωση $\text{RSiO}_{3/2}$ (Hydrogen silsesquioxane-HSQ) μπορούν να σχηματιστούν κυματοδηγοί, συντονιστές δακτυλίου καθώς επίσης και βοηθητικές διατάξεις όπως δείκτες ευθυγράμμισης [2.64]. Η δόση της δέσμης ηλεκτρονίων επιλέγεται στην κατάλληλη ποσότητα για την ορθή κατασκευή του πλάτους των κυματοδηγών ενώ δεν εφαρμόζονται διορθώσεις επιδράσεων εγγύτητας (proximity effect corrections). Οι ανοχές κατασκευής των διάκενων σύζευξης, και του πλάτους των κυματοδηγών σε σύγκριση με τις προδιαγραφές σχεδιασμού κυμαίνονται σε +/- 5nm.

Οι δομές μεταφέρονται στο ανώτερο στρώμα πυριτίου με χαρακτηριστική αντιδραστικών ιόντων (Inductively Coupled Plasma Reactive Ion Etching-ICPRIE), χρησιμοποιώντας χημεία υδρογονοβρωμίου (HBr) για τη δημιουργία ανισοτροπικών δομών. Ο χρόνος χάραξης σε πρώτο στάδιο μεταβάλλεται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε το υπολοιπόμενο στρώμα πυριτίου να είναι περίπου 10nm. Σε δεύτερο στάδιο χρησιμοποιείται ένα μίγμα οξυγόνου για την επιλεκτικότητα χάραξης μεταξύ πυριτίου και γυαλιού [2.65]. Το Σχήμα 43 a) απεικονίζει την υψηλή ποιότητα χάραξης των κυματοδηγών ενώ το Σχήμα 43 b) τη χαμηλή τραχύτητα των επιφανειών τους. Το Σχήμα 44 a) δείχνει το ολοκληρωμένο κύκλωμα συντονιστή δακτυλίου τρίτης τάξης με ακτίνα 3 μm , ενώ το Σχήμα 44 b) το διάκενο σύζευξης 75nm μεταξύ διαύλου και δακτυλίου.

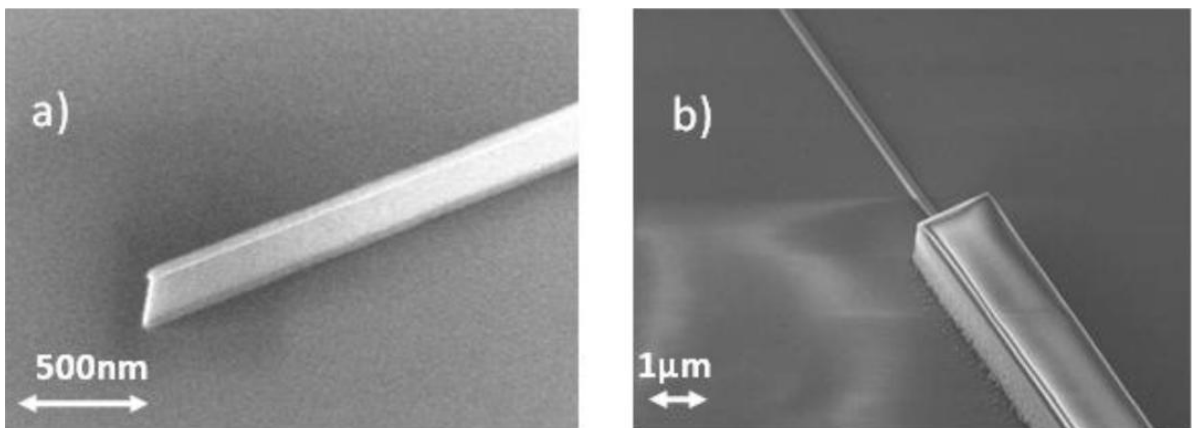
Για την αποδοτική σύζευξη των κυματοδηγών με τις οπτικές ίνες εστίασης χρησιμοποιούνται κατάλληλοι μετατροπείς εκλέπτυνσης [2.66]. Οι άκρες των κυματοδηγών πυριτίου σχεδιάζονται πολύ στενές με πλάτος της τάξης ~40nm όπως φαίνεται στο Σχήμα 45 a). Στη συνέχεια οι διατάξεις αυτές επικαλύπτονται με μια επένδυση (SU8 cladding) όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 45 b) επιτρέποντας σύζευξη υψηλής απόδοσης με εξωτερικές ίνες. Η όλη διαδικασία κατασκευής αποτελείται από την επεξεργασία της δομής, την έκθεση δέσμης ηλεκτρονίων, τη μεταφορά της δομής στο υπόστρωμα και τη χάραξη των κυματοδηγών, βελτιστοποιείται με βάση κάποιες παραμέτρους όπως τραχύτητα πλευρικού τοιχώματος, κρίσιμη διάσταση ελέγχου, αποδοτικότητα σύζευξης με στόχο την επίτευξη της ορθής λειτουργίας των παραγόμενων φωτονικών στοιχείων.



Σχήμα 43: Μικρογραφίες a) Διατομής κυματοδηγών, b) Χάραξης κυματοδηγών



Σχήμα 44: Μικρογραφίες a) Συντονιστή δακτυλίου τρίτης τάξης, b) Διάκενου σύζευξης

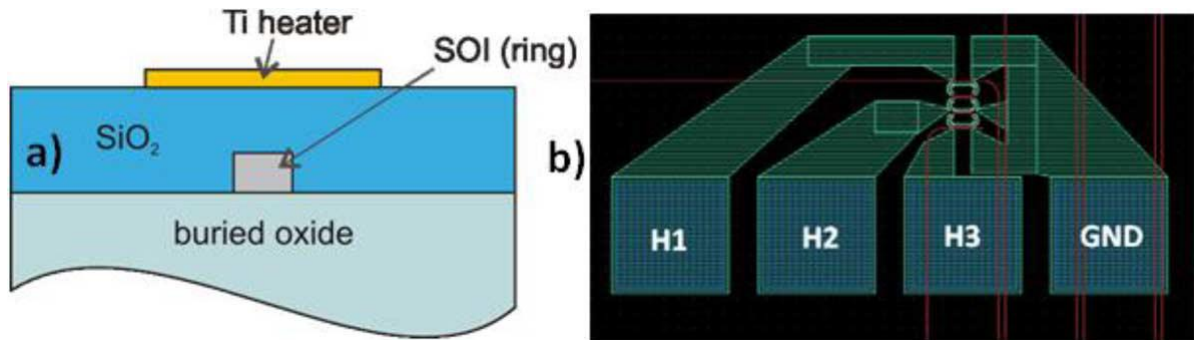


Σχήμα 45: a) Άκρη κυματοδηγού εκλέπτυνσης (taper tip), b) SU8 κυματοδηγού εκλέπτυνσης

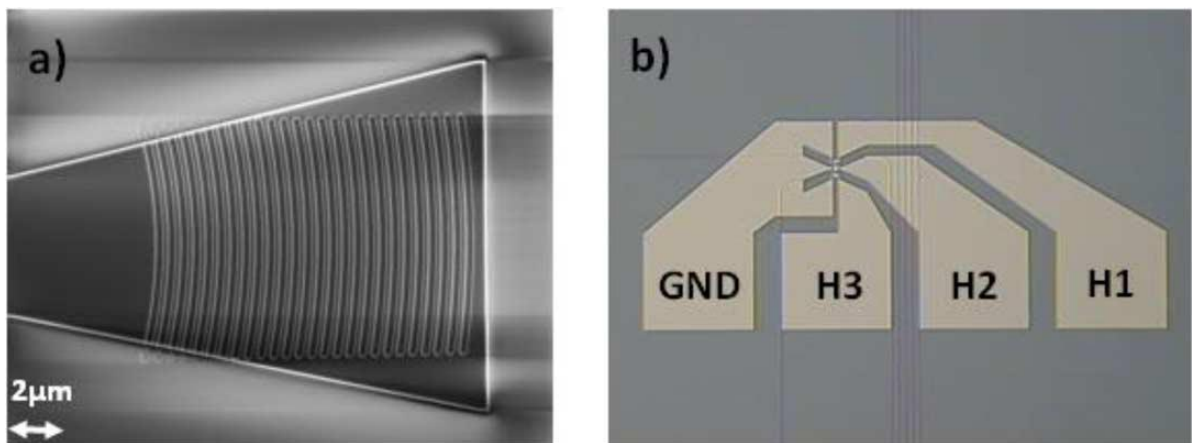
2.7.3 Κατασκευή συντονιστών δακτυλίου πυριτίου ανώτερης τάξης με θερμαντικά στοιχεία και συζεύκτες περίθλασης

Στους συντονιστές δακτυλίου ανώτερης τάξης είναι αναγκαία η χρήση θερμαντικών στοιχείων α) για αντιστάθμιση των ανοχών κατασκευής που προκαλούν διαφοροποιήσεις στα διάκενα των κυματοδηγών και τις φασματικές τους αποκρίσεις, και β) για την υλοποίηση πλήρως λειτουργικών και μεταβαλλόμενων φίλτρων μήκους κύματος. Η ολοκλήρωση των θερμαντικών στοιχείων πάνω στο υπόστρωμα SOI απαιτεί τη χρήση ενός επιπρόσθετου υλικού επένδυσης που χρησιμεύει ως διαχωριστικό στρώμα. Αυτό είναι απαραίτητο καθώς το μέταλλο πρέπει να επικάθεται ακριβώς από πάνω από τον κυματοδηγό πυριτίου. Ο λόγος είναι ότι εξαιτίας του αποσβενύμενου πεδίου, το φως απορροφάται από το μέταλλο μειώνοντας σημαντικά την απόδοση του συντονιστή. Το Σχήμα 46 α) δείχνει τη διατομή του υλοποιημένου υποστρώματος με τον κυματοδηγό πυριτίου να έχει διαστάσεις 450x220 nm και να τοποθετείται πάνω από ένα στρώμα SiO₂. Στη συνέχεια ένα ακόμη στρώμα SiO₂ πάχους 800nm τοποθετείται πάνω από τον κυματοδηγό. Το μέταλλο που χρησιμοποιείται για τα στοιχεία θέρμανσης είναι τιτάνιο πάχους 100 nm. Τα θερμαντικά στοιχεία είναι σχεδιασμένα για την αποτελεσματική μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του δακτυλίου χωρίς να επηρεάζουν τις περιοχές σύζευξης με καταστρεπικό τρόπο. Η διάταξη σχεδίασης των συντονιστών δακτυλίου τρίτης τάξης απεικονίζεται στο Σχήμα 46 b). Όλα τα θερμαντικά στοιχεία μπορούν να ενεργοποιηθούν οδηγώντας τέσσερα σημεία επαφής: μια κοινή γείωση και τρία σημεία επαφής για κάθε ένα επιμέρους συντονιστή δακτυλίου.

Η διαδικασία κατασκευής ξεκινά με το σχηματισμό των κυματοδηγών και των συντονιστών δακτυλίου με λιθογραφία δέσμης ηλεκτρονίων. Για την ολοκλήρωση των επιφανειακά χαραγμένων συζευκτών περίθλασης ακολουθείται μια διαδικασία η οποία επιτρέπει το συνδυασμό πλήρως χαραγμένων κυματοδηγών λωρίδας (strip waveguides) και μερικώς χαραγμένων συζευκτών περίθλασης. Για το σκοπό αυτό, τα άκρα του κυματοδηγού σχεδιάζονται ως μια μεγάλη τριγωνική περιοχή όπως φαίνεται στο Σχήμα 47 a). Η περιοχή αυτή ορίζεται αρχικά με λιθογραφία δέσμης ηλεκτρονίων και στη συνέχεια οι συζεύκτες περίθλασης σχηματοποιούνται με χαρακτηριστική αντιδραστικών ιόντων (ICP-RIE). Σε επόμενο στάδιο, τα θερμαντικά στοιχεία ολοκληρώνονται πάνω από τους συντονιστές δακτυλίου με το διαχωρισμό τους να υλοποιείται με ένα στρώμα υλικού (spin on glass-SOG). Η περιοχή ορίζεται αρχικά με λιθογραφία δέσμης ηλεκτρονίων (EBL) και στη συνέχεια επικάθεται στρώμα τιτανίου (Ti) πάχους 100nm με εξάτμιση της δέσμης των ηλεκτρονίων.



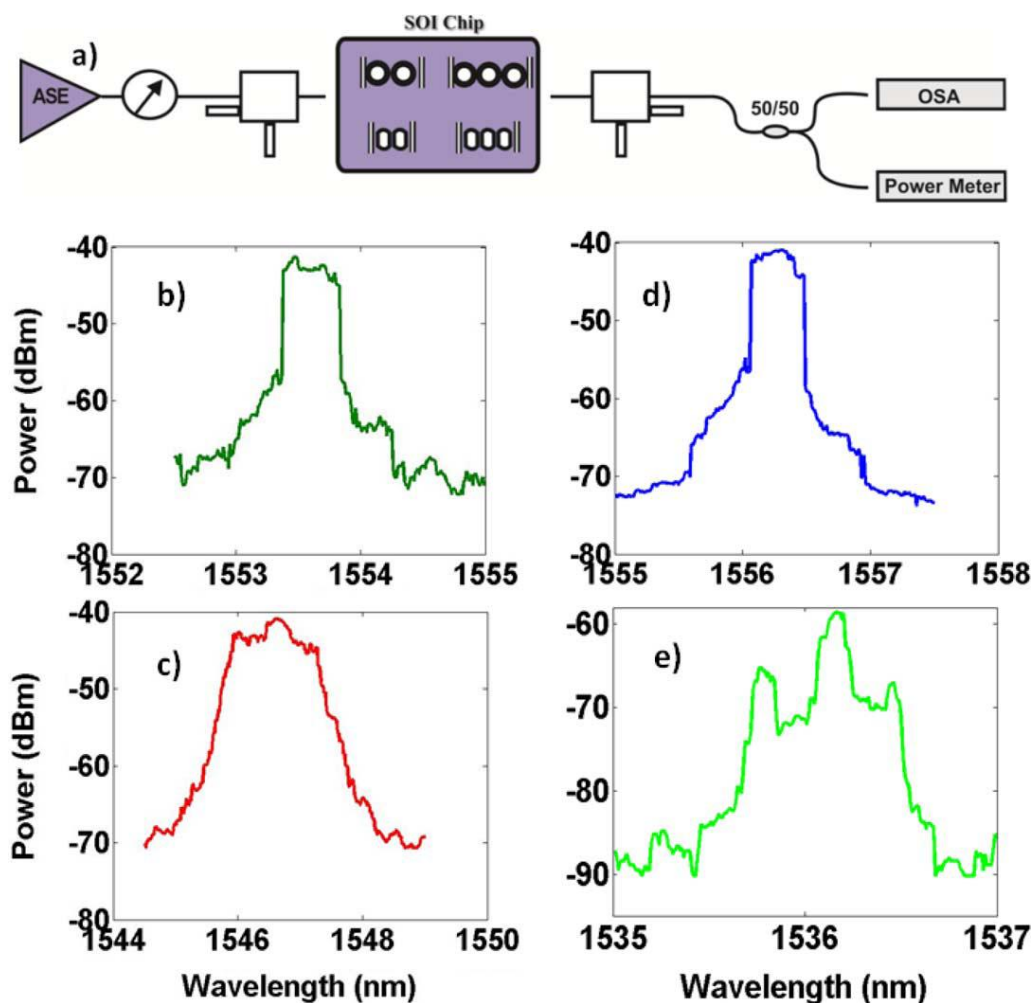
Σχήμα 46: a) Διατομή κυματοδηγού SOI με επένδυση SiO_2 και θερμαντικά στοιχεία τιτανίου, b) Δομή θερμαντικών στοιχείων πάνω από ένα συντονιστή δακτυλίου τρίτης τάξης



Σχήμα 47: Μικρογραφίες a) Συζευκτη περίθλασης, b) Συντονιστή δακτυλίου τρίτης τάξης με θερμαντικά στοιχεία

2.7.4 Χαρακτηρισμός των συντονιστών δακτυλίου πυριτίου ανώτερης τάξης

Το Σχήμα 48 απεικονίζει τις αποκρίσεις των συντονιστών δακτυλίου ανώτερης τάξης χρησιμοποιώντας τους κυματοδηγούς εκλέπτυνσης (SU8 tapers) και το μηχανικό σύστημα ευθυγράμμισης που παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.6.3. Το Σχήμα 48 (b) και (d) απεικονίζει τις φασματικές αποκρίσεις των μικροδομών δεύτερης τάξης με συναρτήσεις μεταφοράς λόγου σβέσης 14 dB ενώ το Σχήμα 48 (c) και (e) απεικονίζει τις χαρακτηριστικές φίλτρου τρίτης τάξης. Οι συντονιστές δακτυλίου τρίτης τάξης με τα ευθύγραμμα τμήματα σύζευξης παρουσιάζουν καλοσχηματισμένες χαρακτηριστικές φίλτρου με φασματική επικάλυψη των επιμέρους αποκρίσεων των συντονιστών και υψηλότερο λόγο σβέσης συγκριτικά με τις διατάξεις δεύτερης τάξης. Από την άλλη οι συντονιστές δακτυλίου τρίτης τάξης με τα καμπύλα τμήματα σύζευξης παρουσιάζουν φασματική ανομοιομορφία με αποπολυπλεγμένες συναρτήσεις κορυφής όπως φαίνεται στο Σχήμα 48 e). Αυτό οφείλεται στην ολίσθηση φάσης των αποκρίσεων των κυματοδηγών [2.61] και σε κατασκευαστικές αστοχίες. Η χαμηλότερη απώλεια



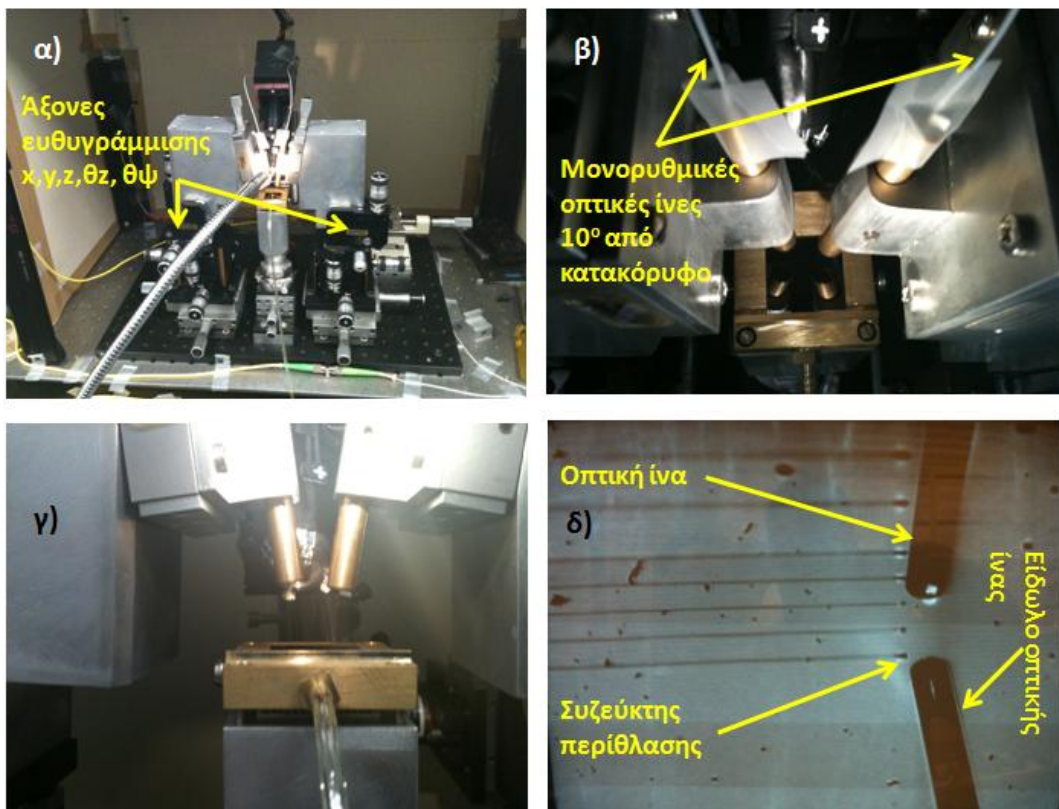
Σχήμα 48: α) Διάταξη χαρακτηρισμού των ολοκληρωμένων φωτονικών στοιχείων. Φασματικές αποκρίσεις θυρών πτώσης συντονιστών δακτυλίου β) δεύτερης τάξης με ευθύγραμμα τμήματα σύζευξης, γ) τρίτης τάξης με ευθύγραμμα τμήματα σύζευξης, δ) δεύτερης τάξης με καμπύλα τμήματα σύζευξης, ε) τρίτης τάξης με καμπύλα τμήματα σύζευξης

στους συντονιστές δακτυλίου με τα ευθύγραμμα τμήματα σύζευξης συγκριτικά με εκείνους με τα καμπύλα τμήματα οφείλεται στο μεγαλύτερο διάκενο και μήκος αλληλεπίδρασης μεταξύ διαύλου-δακτυλίου, δακτυλίου-δακτυλίου, καθώς επίσης και στις πιο μεγάλες ανοχές κατασκευής. Ο Πίνακας 3 απεικονίζει κάποιες επιπρόσθετες τιμές που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια του οπτικού χαρακτηρισμού που είναι σε απόλυτη αντιστοιχία με τις προδιαγραφές του Πίνακα 2. Οι συνολικές απώλειες υπολογίζονται περίπου 11dB επαληθεύοντας την 50% απόδοση των κυματοδηγών εκλέπτυνσης. Οι υψηλές τιμές απώλειας για τους συντονιστές δακτυλίου τρίτης τάξης οφείλονται στη διαφορετική φασματική απόκριση κάθε επιμέρους φίλτρου λόγω ολίσθησης της συχνότητας.

Τα φαινόμενα αυτά επιλύονται με τη χρήση συζευκτών περιθλάσης και θερμαντικών στοιχείων τιτανίου πάνω από τις μικροδομές δακτυλίου. Για το χαρακτηρισμό τους χρησιμοποιήθηκε το μηχανικό σύστημα που φαίνεται

Πίνακας 3: Αποτελέσματα χαρακτηρισμού συντονιστών δακτυλίου δεύτερης και τρίτης τάξης

Structure Parameter	<i>2nd Order</i>	<i>2nd Order</i>	<i>3rd Order</i>	<i>3rd Order</i>
	<i>Ring</i>	<i>Racetrack</i>	<i>Ring</i>	<i>Racetrack</i>
FSR	3.6/3.8nm	3.6/3.8nm	26/28nm	11/12nm
3dB BW	0.4/0.6nm	0.5/0.7nm	0.3/1.4nm	1.4/1.4nm
Out-band suppression	13/15dB	14/16dB	17/22dB	25/26dB
Fiber-to-Fiber losses	12/29dB	11/28dB	29/40dB	12/29dB

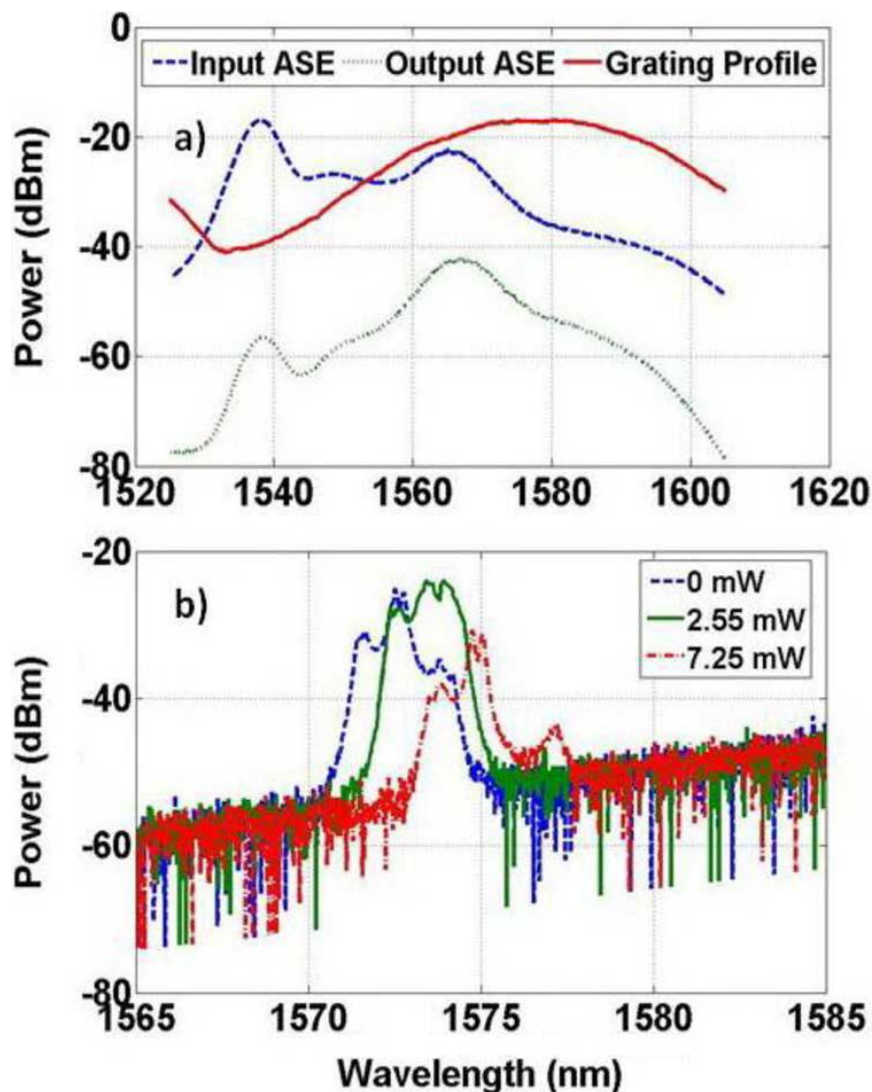


Σχήμα 49: α) Κατακόρυφο σύστημα ευθυγράμμισης οπτικών ινών, β) Οπτικές ίνες τοποθετημένες κατακόρυφα στους συζεύκτες περίθλασης, γ) Πλάγια όψη συστήματος ευθυγράμμισης, δ) Σύζευξη μεταξύ ίνας και φράγματος περίθλασης (Εικόνα κάμερας)

στο Σχήμα 49 α). Αποτελείται από δύο άξονες ευθυγράμμισης x-y-z, θ_z , θ_ψ , μια θερμαινόμενη βάση και μια κάμερα εστίασης. Το φωτονικό ολοκληρωμένο κύκλωμα τοποθετείται στην επίπεδη βάση η οποία μέσω ενός αισθητήρα θερμοκρασίας και ενός θερμοηλεκτρικού στοιχείου διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία. Για την οπτική σύζευξη των σημάτων μέσα στη διάταξη χρησιμοποιούνται μονορυθμικές οπτικές ίνες οι οποίες ευθυγραμμίζονται

κατακόρυφα και σε κλίση 10° με τους συζεύκτες περίθλασης (grating couplers) όπως φαίνεται στο Σχήμα 49 β), γ, δ). Για την οδήγηση των θερμαντικών στοιχείων των συντονιστών δακτυλίου χρησιμοποιούνται ακίδες παροχής τάσης οι οποίες επικάθονται σε συγκεκριμένα σημεία επαφής του φωτονικού πλινθίου.

Το Σχήμα 50 a) απεικονίζει την απόκριση των συζευκτών περίθλασης με μέγιστη συνάρτηση μεταφοράς στα 1580nm ενώ το Σχήμα 50 b) δείχνει τη μεταβολή της απόκρισης ενός συντονιστή δακτυλίου τρίτης τάξης. Χωρίς την εφαρμογή τάσης στο θέρμαντικό στοιχείο, τρεις συνιστώσες κορυφής είναι εμφανείς λόγω της φασματικής ολίσθησης των επιμέρους φίλτρων δακτυλίου. Με την παροχή ρεύματος στο θέρμαντικό στοιχείο H1 του Σχήμα 47 b), η αριστερή κορυφή που αντιστοιχεί στην απόκριση του δακτυλίου που βρίσκεται από κάτω, μετακινείται 2nm προς τις κόκκινες φασματικές συνιστώσες, η κεντρική κορυφή μετακινείται κατά 1nm και στη συνέχεια και οι δύο μαζί επικαλύπτουν την τρίτη φασματική



Σχήμα 50: a) Απόκριση συζεύκτη περίθλασης, b) Μεταβολή απόκρισης συντονιστή δακτυλίου τρίτης τάξης με χρήση ενός θερμαντικού στοιχείου.

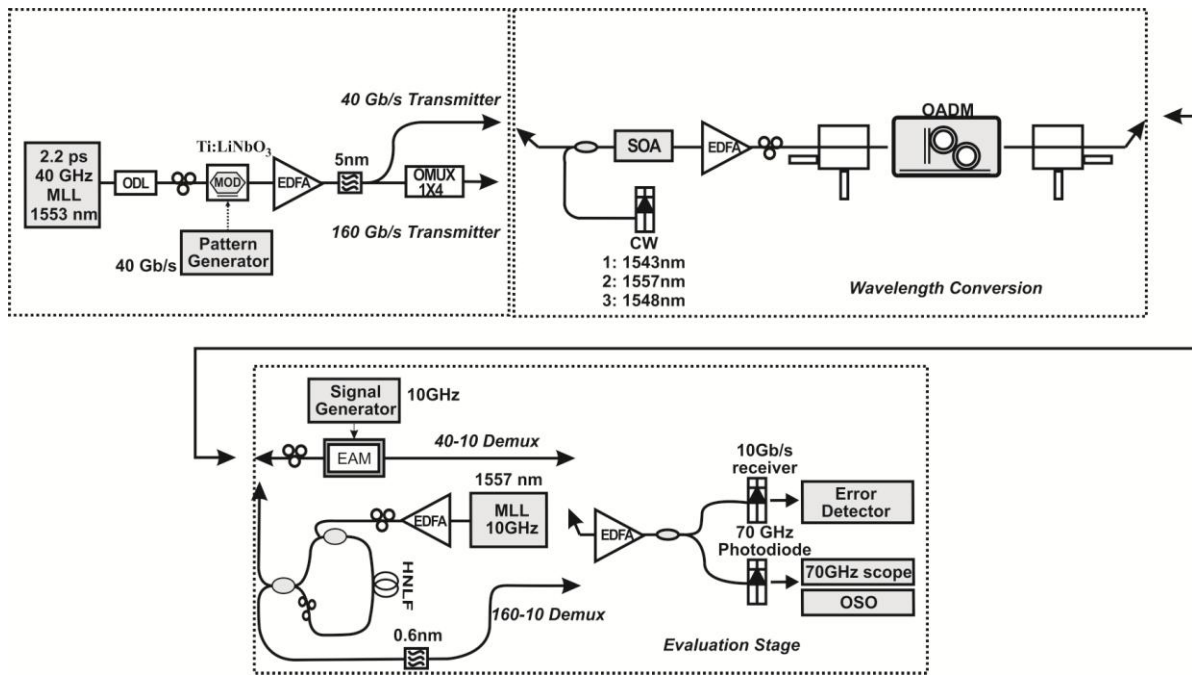
κορυφή. Η αιτία για τη φασματική μετατόπιση δύο χαρακτηριστικών φίλτρων με ένα θερμαντικό στοιχείο οφείλεται στην έλλειψη θερμομόνωσης μεταξύ των συζευγμένων δακτυλίων καθώς επίσης και στην πολύ κοντινή τους απόσταση ($< 90\text{nm}$). Εάν υποθεθεί μέγιστη ισχύς περίπου $7,25\text{ mW}$, επιτυγχάνεται φασματική μετατόπιση 5.6 nm . Ο Πίνακας 3 περιγράφει τα οπτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού για τα στοιχεία που φέρουν σύζευκτες περίθλασης και θερμαντικά στοιχεία. Η συνολική απώλεια ενός τυπικού κυματοδηγού αναφοράς υπολογίζεται περίπου 17dB ενώ το υψηλότερο εύρος ζώνης ημίσειας ισχύος και ποσοστό λόγου σβέσης οφείλεται στη μεταβολή των επιμέρους συναρτήσεων μεταφοράς φίλτρου χρησιμοποιώντας τα ολοκληρωμένα θερμαντικά στοιχεία.

2.7.5 Πειραματική αξιολόγηση των συντονιστών δακτυλίου πυριτίου για αμιγώς οπτική μετατροπή μήκους κύματος

A. 40Gb/s μετατροπή μήκους κύματος χρησιμοποιώντας συντονιστές δακτυλίου SOI δεύτερης τάξης

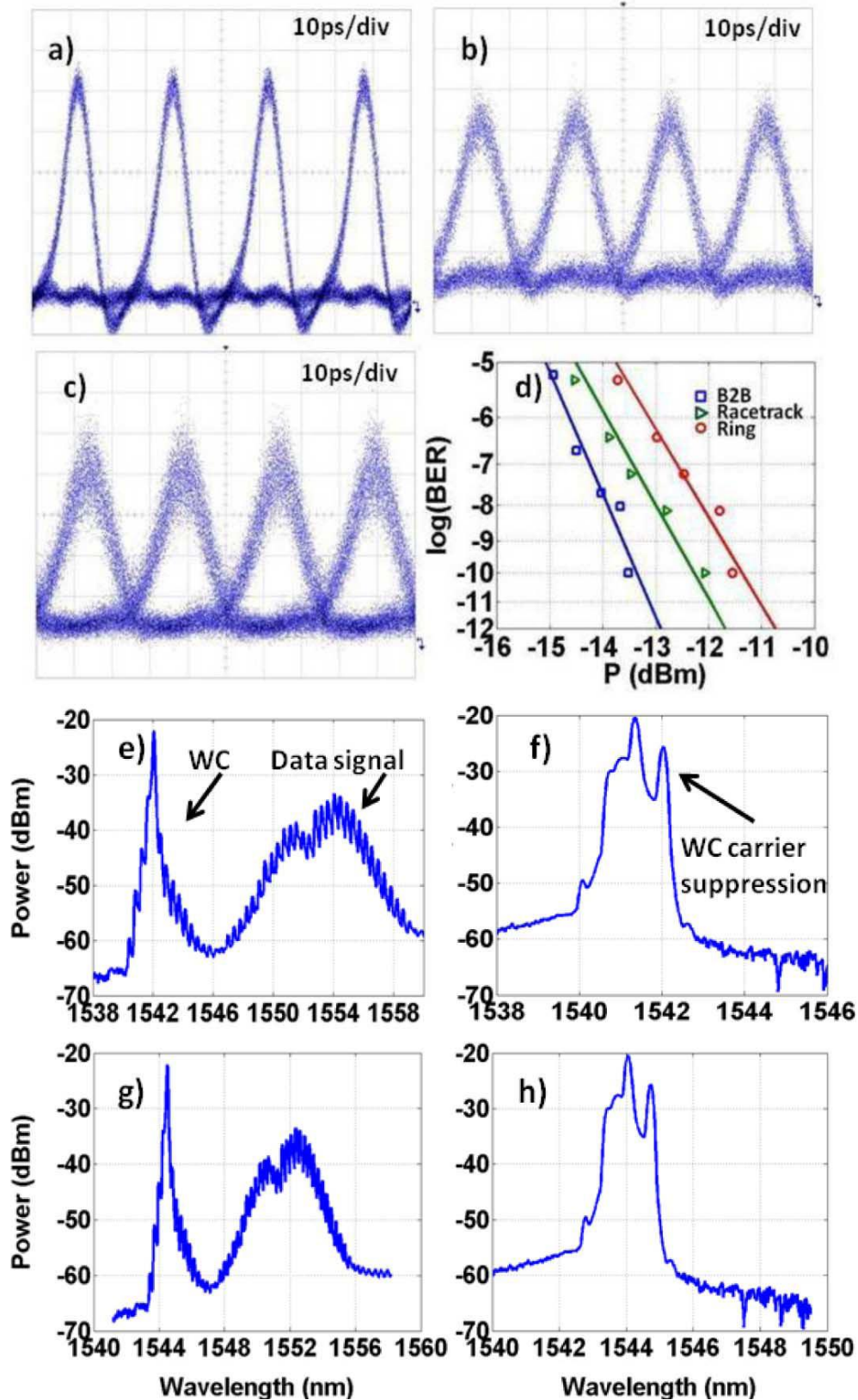
Το Σχήμα 51 απεικονίζει την πειραματική διάταξη για την αξιολόγηση της απόδοσης των συντονιστών δακτυλίου. Το διαμορφωμένο 40 Gb/s σήμα εισόδου δημιουργείται από ένα λέιζερ εγκλείδωσης ρυθμών στα 40 GHz με εύρος παλμού 2.2ps στο οποίο φορτώνεται μια ψευδοτυχαία ακολουθία 2^7-1 . Για την ετεροδιαμόρφωση κέρδους και φάσης χρησιμοποιείται ένας εμπορικά διαθέσιμος ημιαγωγικός ενισχυτής με χρόνο ανάκαμψης κέρδους 30 ps , ενώ για την παραγωγή των συνεχών κυμάτων CW ένα λέιζερ μεταβαλλόμενου μήκους. Τα σήματα αυτά ενώνονται και εισέρχονται στον ημιαγωγικό ενισχυτή μέσω οπτικών ινών εστίασης. Λόγω του πεπερασμένου χρόνου ανάκαμψης του SOA το μετατρεπόμενο μήκος κύματος εξέρχεται παραμορφωμένο προκαλώντας διασυμβολική παρεμβολή (Inter Symbol Interference-ISI). Με τη μεταβολή του CW προς τα μεγαλύτερα μήκη κύματος της απόκρισης του συντονιστή, ο χρόνος ανάκαμψης του τελικού σήματος επιταχύνεται καταπιέζοντας τη διασυμβολική παρεμβολή. Η μετατρεπόμενη όμως κυματομορφή είναι σε αντεστραμμένη πολικότητα καθώς η φασματική συνιστώσα του CW κυριαρχεί σε σχέση με τις αρμονικές των δεδομένων. Η αποκατάσταση της πολικότητας του σήματος επέρχεται μεταβάλλοντας το μήκος κύματος του CW στην περιοχή καταπίεσης της απόκρισης του συντονιστή δακτυλίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την καταστολή της κυρίαρχης CW συνιστώσας και την ανάδειξη της αρμονικής των δεδομένων [2.67]. Με την αναστροφή της πολικότητας, το μετατρεπόμενο μήκος κύματος αξιολογείται με μετρήσεις λαθών αφού προηγηθεί αποπολυπλεξία σε 10Gb/s χρησιμοποιώντας έναν διαμορφωτή ηλεκτρο-απορρόφησης.

Το Σχήμα 52 a) απεικονίζει το διάγραμμα ματιού του διαμορφωμένου 40 Gb/s σήματος εισόδου. Μεταβάλλοντας το μήκος κύματος του CW 0.7nm εκτός της φασματικής απόκρισης του δακτυλίου δεύτερης τάξης (racetrack), προκύπτει το



Σχήμα 51: Πειραματική διάταξη για την αξιολόγηση των συντονιστών δακτυλίου ανώτερης τάξης

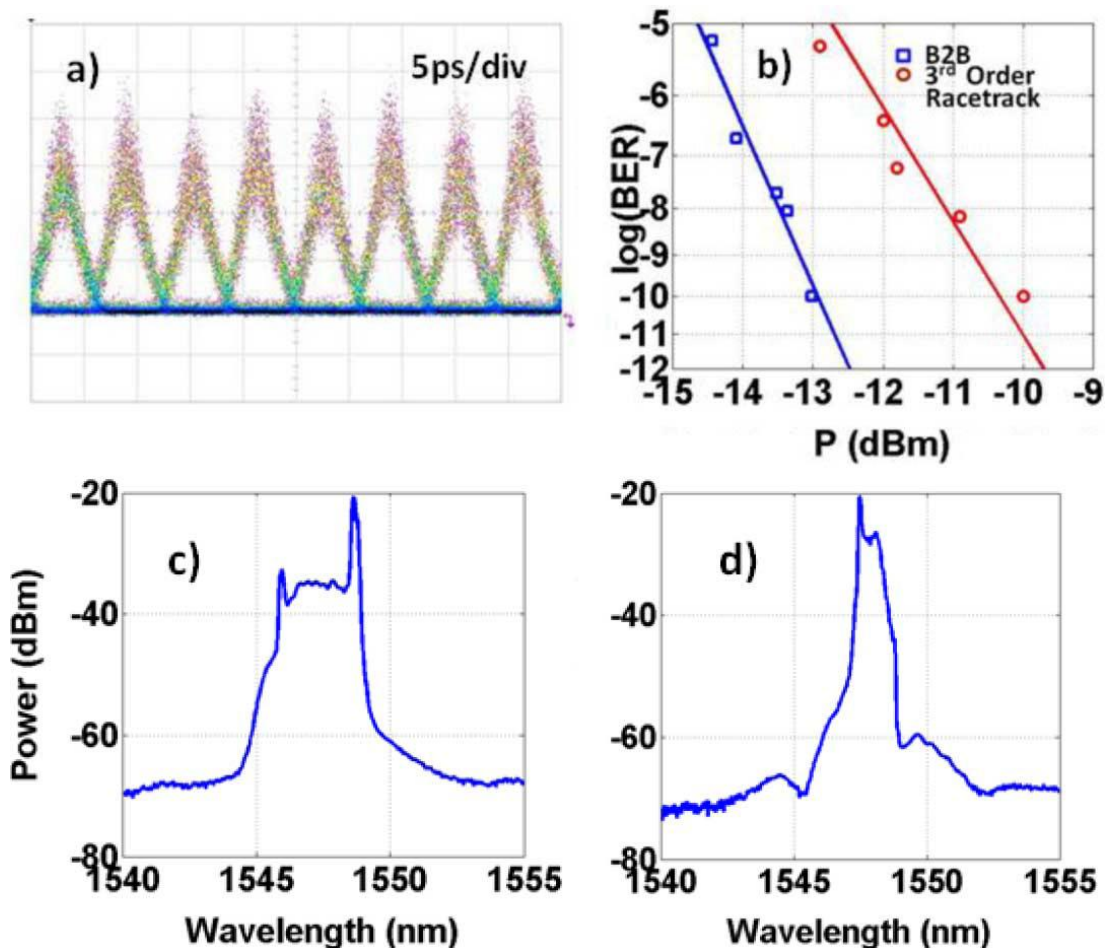
μετατρεπόμενο σήμα του Σχήμα 52 b). Η κυματομορφή παρουσιάζει υψηλό ποσοστό θορύβου καθώς η αναστροφή της πόλωσης πραγματοποιείται με μακρύ έκκεντρο φιλτράρισμα με αποτέλεσμα χαμηλή ισχύ εξόδου και μη βέλτιστη οπτική ενίσχυση. Το Σχήμα 52 c) εμφανίζει το διάγραμμα ματιού του μετατρεπόμενου σήματος χρησιμοποιώντας μικρο-συντονιστή δακτυλίου με καμπύλα τμήματα σύζευξης (ring). Η απόδοση του φίλτρου αυτού είναι χειρότερη λόγω της υψηλότερης απώλειας και του χαμηλότερου λόγου σβέσης. Η διεύρυνση των παλμών και για τις δύο δομές συντονιστών είναι αποτέλεσμα του σχετικά στενού εύρους ημίσειας ισχύος $\sim 0.4\text{nm}$. Το Σχήμα 52 d) απεικονίζει τις καμπύλες μετρήσεων λαθών. Λειτουργία χωρίς σφάλματα επιτεύχθηκε για όλα τα αποπολυπλεγμένα κανάλια, με ποινή ισχύος 1.1 και 2.2 dB για τους συντονιστές δακτυλίου ευθύγραμμων (racetrack) και καμπύλων (ring) τμημάτων ζεύξης. Το Σχήμα 52 e) δείχνει τα φάσματα του σήματος εισόδου και του μετατρεπόμενου μήκους κύματος. Για την επιλογή των συχνοτήτων με τερέτισμα (chirp) και την αναστροφή της πόλωσης, η φασματική απόκριση του συντονιστή δακτυλίου (racetrack) μεταβάλλεται προς τις «μπλε» φασματικές συνιστώσες συγκριτικά με τη φέρουσα του CW. Καθώς η χαρακτηριστική του φίλτρου έχει υψηλό λόγο σβέσης καταπιέζει την φέρουσα CW και προκαλεί την αποκατάσταση της πολικότητας του σήματος. Το Σχήμα 52 f) απεικονίζει την 40GHz αρμονική δεδομένων που γίνεται κυρίαρχη σε σχέση με τη φασματική συνιστώσα του CW. Το Σχήμα 52 g), h) εμφανίζει τα φάσματα για την περίπτωση χρήσης του συντονιστή δακτυλίου με καμπύλα τμήματα σύζευξης. Τα αρχικά και τα μετατρεπόμενα μήκη κύματος και για τις δύο περιπτώσεις είναι 1) 1553 σε 1541 nm και 2) 1553 σε 1544 nm.



Σχήμα 52: a) 40Gb/s σήμα εισόδου, b) Μετατροπή μήκους κύματος με συντονιστή δακτυλίου δεύτερης τάξης ευθύγραμμων τμημάτων σύζευξης (racetrack), c) Μετατροπή μήκους κύματος με συντονιστή δακτυλίου δεύτερης τάξης καμπύλων τμημάτων σύζευξης (ring) , d) Καμπύλες από μετρήσεις λαθών, Φάσματα e-f) Μετά τον SOA και racetrack αντιστοίχα, g-h) Μετά τον SOA και ring αντιστοίχα

B. 160Gb/s μετατροπή μήκους κύματος χρησιμοποιώντας συντονιστές δακτυλίου SOI τρίτης τάξης

Το Σχήμα 51 παρουσιάζει την πειραματική διάταξη για την αξιολόγηση των συντονιστών δακτυλίου σε υψίρρυθμες ταχύτητες λειτουργίας. Το 160Gb/s διαμορφωμένο σήμα μαζί με ένα συνεχές κύμα (CW) εισάγονται σε έναν ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή. Η αργή ανάκαμψη κέρδους του SOA επιταχύνεται με τη χρήση ενός συντονιστή δακτυλίου τρίτης τάξης (racetrack), ενώ η αναστροφή της πόλωσης επιτυγχάνεται με ένα συμβολόμετρο καθυστέρησης 2ps. Στην πλευρά του δέκτη το τελικώς μετατρεπόμενο μήκος κύματος αξιολογείται κατόπιν οπτικής αποπολυπλεξίας 160Gb/s σε 10Gb/s χρησιμοποιώντας ένα μη γραμμικό βρόγχο καθρέφτη (Non Linear Optical Loop Mirror-NOLM). Μέσα στο βρόγχο τοποθετείται μια μη γραμμική ίνα με μη γραμμικό συντελεστή $10\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ και διασπορά 1.21 ps/nm/km . Ως σήμα ελέγχου στο NOLM χρησιμοποιείται ένα



Σχήμα 53: a) 160Gb/s μετατροπή μήκους κύματος χρησιμοποιώντας συντονιστή δακτυλίου τρίτης τάξης ευθύγραμμων τμημάτων σύζευξης (racetrack), b) Καμπύλες από μετρήσεις λαθών, Φασματα c) μετατρεπόμενο μήκος κύματος αντεστραμμένης πολικότητας, d) μετατρεπόμενο μήκος κύματος ορθής πολικότητας

λείζερ εγκλείδωσης ρυθμών στα 10GHz, με εύρος παλμού 1.3ps και μήκος κύματος 1557nm. Το Σχήμα 53 a) απεικονίζει το 160Gb/s μετατρεπόμενο σήμα αντεστραμμένης πολικότητας ενώ το Σχήμα 53 b) τις καμπύλες μετρήσεις λαθών. Το Σχήμα 53 c), d) εμφανίζει τα φάσματα μετά την αμιγώς μετατροπή μήκους κύματος σε αντεστραμμένη και ορθή πολικότητα αντίστοιχα. Συγκεκριμένα το Σχήμα 53 c) δείχνει το φάσμα μετά από το συντονιστή δακτυλίου τρίτης τάξης μετατοπισμένο 1.2nm προς τις «μπλε» φασματικές συνιστώσες. Για την αποκατάσταση της πολικότητας χρησιμοποιείται ένα συμβολόμετρο καθυστέρησης (DI) του οποίου το φασματικό βύθισμα εφαρμόζεται στη συνιστώσα κορυφής του CW. Το Σχήμα 53 d) απεικονίζει την αποτελεσματική καταπίεση του CW από το συμβολόμετρο καθυστέρησης. Η αντιστροφή της πολικότητας με χρήση αποκλειστικά και μόνο της απόκρισης του συντονιστή δακτυλίου δεν ήταν εφικτή καθώς η απαιτούμενη φασματική μεταβολή προκαλούσε υψηλές απώλειες και μη βέλτιστη οπτική ενίσχυση. Οι δομές δακτυλίου τρίτης τάξης με καμπύλα τμήματα σύζευξης (rings) δεν ήταν δυνατό να αξιολογηθούν λόγω των μεγάλων απωλειών τους ~39dB. Ωστόσο με χρήση πιο αποδοτικών συζευκτών περίθλασης [2.68], οι συνολικές απώλειες μπορούν να μειωθούν σημαντικά επιτρέποντας την αξιολόγηση και των δομών αυτών.

Αναφορές

- [2.1] S.J.B. Yoo, "Wavelength Conversion Technologies for WDM Network Applications," *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, pp. 955-966, June 1996.
- [2.2] S. Danielsen, P. Hansen, and K. Stubkjaer, "Wavelength conversion in optical packet switching," *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, vol. 16(12), pp. 2095-2108, 1998.
- [2.3] A. Poustie, "Semiconductor devices for all-optical signal processing," *ECOC*, 2005.
- [2.4] P. Winzer and R. Essiambre, "Advanced optical modulation formats," *Pro-ceedings of IEEE*, vol. 94(5), pp. 952-985, 2006.
- [2.5] Z. Li, Y. Dong, J. Mo, Y.Wang, and C. Lu, "Cascaded all-optical wavelength conversion for RZ-DPSK signal based on four-wave mixing in semiconductor optical amplifier," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16(7), pp. 1685-1687, 2004.
- [2.6] G. P. Agrawal et al., "Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 25, No. 11, pp. 2297-2306, 1989.
- [2.7] M. J. Adams et al., "Nonlinearities in semiconductor laser amplifiers", *Opt. Quantum Electron.*, vol. 27, No. 1, pp. 1-13, 1995.
- [2.8] T. Durhuus, B. Mikkelsen, C. Joergensen, S.L. Danielsen, and K. Stubkjaer, "All-optical Wavelength Conversion by Semiconductor Optical Amplifiers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, pp. 942-954, June 1996.
- [2.9] S.-C. Cao, and J.C. Cartledge, "Characterisation of the Chirp and Intensity Modulation Properties of an SOA-MZI Wavelength Converter," *J. Lightwave Technol.*, vol. 20, pp. 689-694, Apr. 2002.
- [2.10] Y. Liu, M.T. Hill, E. Tangdiongga, H. de Waardt, N. Calabretta, G.D. Khoe and H.J.S. Dorren, "Wavelength conversion using nonlinear polarization rotation in a single semiconductor optical amplifier," *Phot. Technol. Let.*, vol. 15, pp 90-92, 2003
- [2.11] C. Politi, D. Klionidis, and M. O'Mahony, "Dynamic behavior of wavelength converters based on FWM in SOAs," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 42, pp. 108-124, 2006.
- [2.12] A. Matsumoto, K. Nishimura, K. Utaka, and M. Usami, "Operational design on high-speed semiconductor optical amplifier with assist light for application to wavelegnth converters using cross-phase modulation," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 42(3), pp. 313-323, 2006.
- [2.13] R. Manning, D. Davis, D. Cotter, and J. Lucek, "Enhanced recovery rates in semiconductor laser amplifiers using optical pumping," *Electron. Lett.*, vol. 30, pp. 787-788, 1994.
- [2.14] S.Bischo, M. Nielsen, and J. Mork, "Improving the all-optical response of SOAs using a modulated holding signal," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 22(5), pp. 1303-1308, 2004.
- [2.15] B. Sartorius and H.-P. Nolting, "Techniques and technologies for all-optical processing in communication systems," *Proceedings of ECOC2004*, vol. 1, Mo.3.5.1, 2004.
- [2.16] A. Ellis, A. Kelly, D. Nasset, D. Pitcher, D. Moodie, and R. Kashyap, "Error free 100 Gbit/s wavelength conversion using grating assisted cross-gain modulation in 2 mm long semiconductor amplifier," *Electron. Lett.*, vol. 34, pp. 1958-1959, 1998.
- [2.17] N. Patel, K. Rauschenbach, and K. Hall, "40 Gb/s demultiplexing using an ultrafast nonlinear interferometer (uni)," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 8(12), pp. 1695-1697, 1996.
- [2.18] S. Nakamura, Y. Ueno, and K. Tajima, "168-Gb/s all-optical wavelength conversion with a symmetric-Mach-Zehnder-type switch," *IEEE Phot. Technol. Lett.*, vol. 13, pp. 1091-1093, 2001.

- [2.19] J. Leuthold, B. Mikkelsen, G. Raybon, C. Joyner, J. Pleumeekers, B. Miller, K. Dreyer, and R. Behringer, "All-optical wavelength conversion between 10 and 100 Gb/s with SOA delayed-interference configuration," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 33, pp. 939-952, 2001.
- [2.20] Y. Liu, E. Tangdiongga, Z. Li, H. de Waardt, A. Koonen, G. D. Khoe, H. J. S. Dorren, X. Shu, and I. Bennion, "Error-free 320 Gb/s SOA-based wavelength conversion using optical filtering," *Optical Fiber Communication Conference*, vol. PD, 2006.
- [2.21] G. P. Agrawal and N. A. Olsson, "Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 25, pp. 2297-2306, 1989.
- [2.22] M. L. Nielsen and J. Mrk, "Increasing the modulation bandwidth of semiconductor-optical-amplifier-based switches by using optical filtering," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 21, pp. 1606-1619, 2004.
- [2.23] J. Leuthold, D. M. Marom, S. Cabot, J. J. Jaques, R. Ryf, and C. R. Giles, "All-optical wavelength conversion using a pulse reformatting optical filter," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 22, pp. 186-192, 2004.
- [2.24] A. Yariv, "Critical Coupling and Its Control in Optical Waveguide-Ring Resonator Systems", , " *IEEE Phot. Technol. Lett.*, vol. 14, pp. 483-485, 2002.
- [2.25] M. K. Chin and S. T. Ho, "Design and Modeling of Waveguide-Coupled Single-Mode Microring Resonators," *J. Lightwave Technol.* 16, 1433-1446 (1998)
- [2.26] H. Lee, C. Choi, B. O. S. Lee, and E. Lee, "Non-unitary transfer matrix method for practical analysis of race-track micro-resonator waveguide devices," in *Optical Fiber Communication Conference, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2004)*, paper MF31.
- [2.27] L. Caruso and I. Montrosset, "Analysis of a Racetrack Microring Resonator With MMI Coupler," *J. Lightwave Technol.* 21, 206-210 (2003)
- [2.28] Stephen Emelett and Richard Soref, "Analysis of dual-microring-resonator cross-connect switches and modulators," *Opt. Express* 13, 7840-7853 (2005)
- [2.29] D. Chiaroni, R. Urata, J. Gripp, J. E. Simsarian, A. Gary, E. Sophie, T. Segawa, Y. Pointurier, C. Simonneau, Y. Suzuki, T. Nakahara, M. Thottan, A. L. Adamiecki, and D. Nielson, "Demonstration of the interconnection of two optical packet rings with a hybrid optoelectronic packet router," presented at the presented at the Eur. Conf. Optical Communication, Torino, Italy, PD3.5..
- [2.30] D. J. Blumenthal, "LASOR: Label switched optical router," presented at the presented at the Int. Workshop Future of Optical Networking, Optical Fiber Communications Conf., Anaheim, CA, 2006.
- [2.31] I. Keslassy, S. T. Chuang, K. Yu, D. Miller, M. Horowitz, O. Solgaard, and N. McKeown, "Scaling internet routers using optics," presented at the presented at the ACM SIGCOMM, Karlsruhe, Germany, Aug. 2003.
- [2.32] F. Xia, L. Sekaric, and Y. Vlasov, "Ultra-compact optical buffers on a silicon chip," *Nature Photon.*, vol. 1, pp. 65-71, 2007.
- [2.33] L. Liu, J. Van Campenhout, G. Roelkens, D. Van Thourhout, P. R. Romeo, P. Regreny, C. Seassal, J. M. Fédéli, and R. Baets, "All-Optical wavelength converter with InP micro-disk laser integrated on SOI," presented at the presented at the Eur. Conf. Optical Communication 2008, Brussels, Belgium, Paper Tu.4.C.3.

- [2.34] M. L. Masanovic, V. Lal, J. A. Summers, J. S. Barton, E. J. Skogen, L. G. Rau, L. A. Coldren, and D. J. Blumenthal, "Widely tunable monolithically integrated all-optical wavelength converters in InP," *J. Lightw. Technol.*, vol. 23, no. 3, pp. 1350–1362, Mar. 2005.
- [2.35] J. Leuthold, J. Jaques, and S. Cabot, "All optical regeneration and wavelength conversion," presented at the presented at the Opt. Fiber Commun./Natl. Fiber Opt. Eng. Conf., Atlanta, GA, 2003, PaperWN1.
- [2.36] B. G. Lee, A. Biberman, N. Sherwood-Droz, C. B. Poitras, M. Lipson, and K. Bergman, "High-Speed 2 2 switch for multiwavelength silicon-photonics-on-chip," *J. Lightw. Technol.*, vol. 27, no. 14, pp. 2900–2907, Jul. 2009.
- [2.37] D. T. Neilson, "Photonics for switching and routing," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 12, no. 4, pp. 669–677, Jul./Aug. 2006.
- [2.38] S. Rangarajan, Z. Hu, L. Rau, and D. J. Blumenthal, "All-Optical contention resolution with wavelength conversion for asynchronous variable-length 40 Gb/s optical packets," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.16, no. 2, pp. 689–691, Feb. 2004.
- [2.39] F. Xue, Z. Pan, H. Yang, J. Yang, J. Cao, K. Okamoto, S. Kamei, V. Akella, and S. J. B. Yoo, "Design and experimental demonstration of a variable length optical packet routing system with unified contention resolution," *J. Lightw. Technol.*, vol. 22, no. 11, pp. 2570–2581, Nov. 2004.
- [2.40] C. Stamatiadis, M. Bougioukos, A. Maziotis, P. Bakopoulos, L. Stampoulidis, and H. Avramopoulos, "All-optical contention resolution using a single optical flip-flop and two stage all-optical wavelength conversion," presented at the presented at the Opt. Fiber Commun. Conf., San Diego, CA, 2010, Paper OThN5.
- [2.41] L. Stampoulidis, D. Apostolopoulos, D. Petrantonakis, P. Zakyntinos, P. Bakopoulos, O. Zouraraki, E. Kehayas, A. Poustie, G. Maxwell, and H. Avramopoulos, "Enabling Tb/s photonic routing: Development of advanced hybrid integrated photonic devices to realize high-speed, alloptical packet switching," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 14, no. 3, pp. 849–860, May./Jun. 2008.
- [2.42] S. C. Nicholes, M. L. Masanovic, B. Jevremovic, E. Lively, L. A. Coldren, and D. J. Blumenthal, "The world's first InP 8 8 monolithic tunable optical router (MOTOR) operating at 40 Gbps line rate per port," presented at the presented at the Opt. Fiber Commun. Conf., San Diego, CA, 2009, Paper PDPB1.
- [2.43] Y. Liu, E. Tangdionga, Z. Li, H. de Waardt, A. M. J. Koonen, G. D. Khoe, and H. J. S. Dorren, "Error-free 320 Gbit/s SOA-based wavelength conversion using optical filtering," presented at the presented at the Opt. Fiber Commun. Conf., Anaheim, CA, 2006, Paper PDP28.
- [2.44] C. Stamatiadis, D. Petrantonakis, P. Bakopoulos, E. Kehayas, P. Zakyntinos, C. Kouloumentas, L. Stampoulidis, R. Dekker, E. J. Klein, and H. Avramopoulos, "First demonstration of WDM-enabled all-optical wavelength conversion with a SOA and a 2nd order micro-ring resonator ROADM," presented at the presented at the Opt. Fiber Commun. Conf., San Diego, CA, 2009, Paper PDP A8.
- [2.45] K. Vysokinos, L. Stampoulidis, F. Gomez-Agis, K. Voigt, L. Zimmermann, T. Wahlbrink, Z. Sheng, D. V. Thourhout, and H. J. S. Dorren, "Ultra-high speed, all-optical wavelength converters using single SOA and SOI photonic integrated circuits," in *Proc. IEEE Photonics Soc. Winter Topicals Meeting Ser.*, Jan. 11–13, 2010, pp. 113–114.
- [2.46] F. Morichetti, A. Melloni, M. Martinelli, R. G. Heideman, A. Leinse, D. H. Geuzebroek, and A. Borreman, "Box-shaped dielectric waveguides: A new concept in integrated optics?," *J. Lightw. Technol.*, vol. 25, no. 9, pp. 2579–2859, Sep. 2007.

- [2.47] R. Heideman, et al., "Large-scale integrated optics using TriPleXTM waveguide technology: from UV to IR" (Invited), SPIE Photonics West, San Jose, California, 24–29 January 2009, p. 7221-26.
- [2.48] B. Jalali and S. Fathpour, "Silicon photonics," *J. Lightw. Technol.*, vol. 24, no. 12, pp. 4600–4615, Dec. 2006.
- [2.49] N. Izhaky, M. T. Morse, S. Koehl, O. Cohen, D. Rubin, A. Barkai, G. Sarid, R. Cohen, and M. J. Paniccia, "Development of CMOS-compatible integrated silicon photonics devices," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 12, no. 6, pp. 1688–1698, Nov./Dec. 2006.
- [2.50] S. Janz, P. Cheben, D. Dalacu, A. Delage, A. Densmore, B. Lamontagne, M. J. Picard, E. Post, J. H. Schmid, P. Waldron, D. X. Xu, K. P. Yap, and W. N. Ye, "Microphotonics elements for integration on the silicon-on-insulator waveguide platform," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 12, no. 6, pp. 1402–1415, Nov./Dec. 2006.
- [2.51] T. Tsuchizawa, K. Yamada, H. Fukuda, T. Watanabe, J. Takahashi, M. Takashi, T. Shoji, E. Tamechika, S. Itabashi, and H. Morita, "Microphotonics devices based on silicon microfabrication technology," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 11, no. 1, pp. 232–240, Jan./Feb. 2005.
- [2.52] W. Bogaerts, P. Dumon, D. Van Thourhout, D. Taillaert, P. Jaenen, J. Wouters, S. Beckx, V. Wiaux, and R. G. Baets, "Compact wavelengthselective functions in silicon-on-insulator photonic wires," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 12, no. 6, pp. 1394–1401, Nov./Dec. 2006.
- [2.53] U. Plachetka, N. Koo, T. Wahlbrink, J. Bolten, M. Waldow, T. Plötzing, M. Först, and H. Kurz, "Fabrication of photonic ring resonator device in silicon waveguide technology using soft UV-nanoimprint lithography," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 20, no. 7, pp. 490–492, Apr. 2008.
- [2.54] S. T. Chu, B. E. Little, V. Van, J. V. Hryniewicz, P. P. Absil, F. G. Johnson, D. Gill, O. King, F. Seiferth, M. Trakalo, and J. Shanton, "Compact full C-band tunable filters for 50 GHz channel spacing based on high-order micro-ring resonators," presented at the presented at the Opt. Fiber Commun. Conf., Los Angeles, CA, 2004, Paper PDP9.
- [2.55] B. G. Lee, A. Biberman, N. Sherwood-Droz, C. B. Poitras, M. Lipson, and K. Bergman, "High-speed 2 2 switch for multiwavelength silicon-photonic networks-on-chip," *J. Lightw. Technol.*, vol. 27, no. 4, pp. 2900–2907, Jul. 2009.
- [2.56] F. Xia, L. Sekaric, and Y. Vlasov, "Ultra-compact optical buffers on a silicon chip," *Nature Photon.*, vol. 1, pp. 65–71, 2007.
- [2.57] N. Ophir, K. Padmaraju, A. Biberman, L. Chen, K. Preston, M. Lipson, and K. Bergman, "First demonstration of error-free operation of a full silicon on-chip photonic link," presented at the presented at the Opt. Fiber Commun. Conf., Los Angeles, CA, 2011, Paper OWZ3.
- [2.58] K. Vysokinos, L. Stampoulidis, Z. Sheng, E. Kehayas, P. Bakopoulos, D. Petrantonakis, C. Stamatiadis, Ch. Kouloumentas, P. Zakyntinos, R. Dekker, E. J. Klein, D. Van Thourhout, M. T. Kothorst, and H. Avramopoulos, "Higher-order micro-ring resonator assisted wavelength converters for scalable and power efficient photonic routers," presented at the presented at the Eur. Conf. Opt. Commun., Vienna, Austria, 2009, Paper P2.08.
- [2.59] C. Stamatiadis, D. Petrantonakis, P. Bakopoulos, E. Kehayas, P. Zakyntinos, Ch. Kouloumentas, L. Stampoulidis, Z. Sheng, E. Kehayas, P. Bakopoulos, D. Petrantonakis, C. Stamatiadis, C. Kouloumentas, P. Zakyntinos, R. Dekker, E. J. Klein, D. Van Thourhout, M. T. Kothorst, and H. Avramopoulos, "First demonstration of WDM-enabled all-optical wavelength conversion with a SOA and a 2nd order micro-ring resonator ROADM," presented at the presented at the Opt. Fiber Commun. Conf., San Diego, CA, 2009, Paper PDP8.

- [2.60] C. Stamatiadis, K. Vysokinos, L. Stampoulidis, A. Maziotis, Z. Sheng, D. Van Thourhout, J. Bolten, M. Karl, T. Wahlbrink, and H. Avramopoulos, "All-optical wavelength conversion at 160 Gb/s using an SOA and a 3rd order SOI nanowire periodic filter," presented at the presented at the IEEE Photon. Soc. Annu. Meet. 2010, Denver, CO, 2010.
- [2.61] M. Popovic, M. Watts, T. Barwicz, P. Rakich, L. Socci, E. Ippen, F. Kartner, and H. Smith, "High-index-contrast, wide-FSR microring-resonator filter design and realization with frequency-shift compensation," presented at the presented at the Opt. Fiber Commun. Conf., Anaheim, CA, 2005, Paper OFK1.
- [2.62] L. Liu, T. Spuesens, D. Van Thourhout, G. Morthier, L. Grenouillet, N. Olivier, J. Fedeli, P. Romeo, P. Régnery, F. Mandorlo, and R. Orobtschouk, "200 mm wafer scale III-V/SOI technology for all-optical network-on-chip and signal processing," presented at the presented at the 7th IEEE Int. Conf. Group IV Photon. (GFP), Beijing, China, 2010.
- [2.63] Y. Liu, E. Tangdiongga, Z. Li, H. de Waardt, A. M. J. Koonen, G. D. Khoe, and H. J. S. Dorren, "Error-free 320 Gbit/s SOA-based wavelength conversion using optical filtering," presented at the presented at the Opt. Fiber Commun. Conf., Anaheim, CA, 2006, Paper PDP28.
- [2.64] W. Henschel, Y. M. Georgiev, and H. Kurz, "Study of a high contrast process for hydrogen silsesquioxane as a negative tone electron beam resist," *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 21, pp. 2018–2024, 2003.
- [2.65] T. Wahlbrink, T. Mollenhauer, Y. M. Georgiev, W. Henschel, J. K. Efavi, H. D. B. Gottlob, M. C. Lemme, H. Kurz, J. Niehusmann, and P. H. Bolivar, "Highly selective etch process for silicon-on-insulator nano devices," *Microelectron. Eng.*, vol. 78–79, pp. 212–217, 2005.
- [2.66] T. Wahlbrink, W. S. Tsai, M. Waldow, M. Först, J. Bolten, T. Mollenhauer, and H. Kurz, "Fabrication of high efficiency SOI taper structures," *Microelectron. Eng.*, vol. 86, pp. 1117–1119, 2009.
- [2.67] J. Dong, X. Zhang, S. Fu, J. Xu, P. Shum, and D. Huang, "Ultrafast all-optical signal processing based on single semiconductor optical amplifier and optical filtering," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 14, no. 3, pp. 770–778, May/Jun. 2008.
- [2.68] D. Vermeulen, S. Selvaraja, P. Verheyen, G. Lepage, W. Bogaerts, P. Absil, D. Van Thourhout, and G. Roelkens, "High-efficiency fiber-tochip grating couplers realized using an advanced CMOS-compatible silicon-on-insulator platform," *Opt. Exp.*, vol. 18, pp. 18278–18283, 2010.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Οπτικός μετατροπέας μήκους κύματος με χρήση ενός υβριδικά ολοκληρωμένου φωτονικού κυκλώματος σε πυρίτιο.

3.1 Εισαγωγή

Είναι γεγονός ότι οι διάφορες λειτουργίες δρομολόγησης και επεξεργασίας δεδομένων υλοποιούνται από ηλεκτρονικές μορφές μετάδοσης και μεταγωγής. Ωστόσο, η αλματώδης αύξηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης στους κόμβους των δικτύων αναμένεται να επιβάλει ένα μετασχηματισμό στη μορφή των μελλοντικών συστημάτων δρομολόγησης [3.1]. Ένα από τα κυριότερα μειονεκτήματα των ηλεκτρονικών υποδομών είναι η αδυναμία επέκτασης και υποστήριξης υψηλών ταχυτήτων γραμμών μεταφοράς χρησιμοποιώντας μια εύελκτη, φθηνή και ενεργειακά αποδοτική λύση. Η διείσδυση των φωτονικών μορφών μετάδοσης στα κέντρα διαχείρισης δεδομένων είναι ήδη εμφανής καθώς τα διάφορα συστήματα δρομολόγησης διασυνδέονται πλέον με οπτικό τρόπο αποφεύγοντας τις ογκώδεις και πολύπλοκες ηλεκτρικές καλωδιώσεις. Μάλιστα με την ανάπτυξη της φωτονικής ολοκλήρωσης, τα οπτικά κυκλώματα αρχίζουν σταδιακά να διεισδύουν βαθύτερα στην καρδιά των μηχανών δρομολόγησης αντικαθιστώντας επιτυχώς μερικά ηλεκτρονικά υποσυστήματά τους [3.2][3.3]. Η δημιουργία αμιγώς οπτικών μετατροπέων μήκους κύματος με επεκτασιμότητα, χαμηλό κόστος, μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση και μεγαλύτερη χωρητικότητα συγκριτικά με αυτή των ηλεκτρονικών παραμένει κύρια προτεραιότητα στο χώρο των ευρυζωνικών μορφών δρομολόγησης για την υλοποίηση Tb/s μονάδων μεταγωγής με αρχιτεκτονικές πολυπλεξίας μήκους κύματος.

Κατά καιρούς διάφορες τεχνικές έχουν προταθεί για τη δημιουργία αμιγώς οπτικών μετατροπέων μήκους κύματος κατάλληλων για εφαρμογές φωτονικής δρομολόγησης. Με τη μίξη τεσσάρων φωτονίων σε παθητικούς κυματοδηγούς έχει επιτευχθεί μετατροπή μήκους κύματος σε υψηλές ταχύτητες λειτουργίας και με απόλυτη διαφάνεια αλλά με χρήση υψηλών τιμών ισχύος [3.4]. Με την ετεροδιαμόρφωση κέρδους ή ετεροδιαμόρφωση φάσης σε ημιαγώγιμους οπτικούς ενισχυτές έχει αναφερθεί μετατροπή μήκους κύματος σε

συμβολομετρικές διατάξεις αλλά με περιορισμούς στην ταχύτητα λειτουργίας λόγω του χρόνου ανάκαμψης των φορέων του SOA [3.5][3.6]. Αυτό έχει αντιμετωπιστεί τελευταία με χρήση κατάλληλων φίλτρων που αναλαμβάνουν την επιλογή των φασματικών συνιστωσών εκείνων που παρουσιάζουν τετέρισμα (chirp) αξιοποιώντας και τα δύο φαινόμενα ετεροδιαμόρφωσης πλάτους και φάσης (XGM-XPM). Στο παρελθόν με τη μέθοδο αυτή έχει επιδειχθεί ένα φωτονικό κύκλωμα σε InP που αποτελείται από ένα μονολιθικά ολοκληρωμένο SOA και ένα συμβολόμετρο καθυστέρησης υποστηρίζοντας μετατροπή μήκους κύματος ως 100Gb/s [3.7]. Για ταχύτητες λειτουργίας > 100 Gb/s έχει επιχειρηθεί μετατροπή μήκους κύματος χρησιμοποιώντας ημιαγωγικούς οπτικούς ενισχυτές ακολουθούμενοι από εμπορικά φίλτρα [3.8], συντονιστές δακτυλίου [3.9] και συμβολόμετρα καθυστέρησης [3.10].

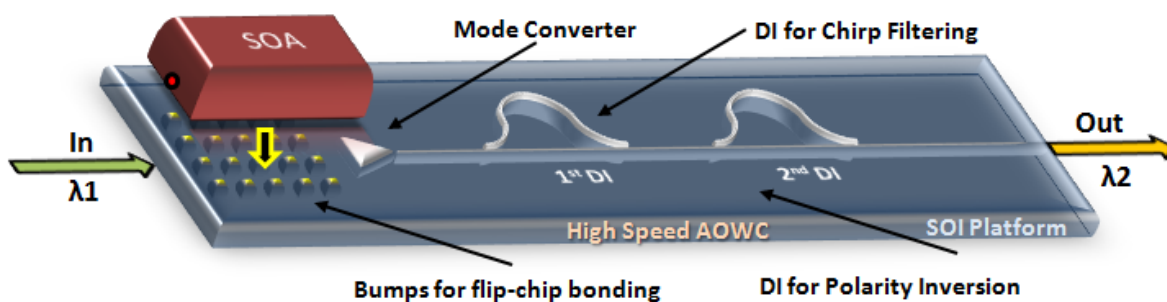
Με τις πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα φωτονικής ολοκλήρωσης, είναι εφικτή η ανάπτυξη και χρήση πλήρως ολοκληρωμένων κυκλωμάτων σε δίκτυα διασύνδεσης και επικοινωνίας δεδομένων. Τα υποστρώματα πυριτίου SOI είναι ελκυστικά καθώς παρουσιάζουν χαμηλό κόστος κατασκευής και μεγάλο βαθμό ευελιξίας επιτρέποντας την κατασκευή κυματοδηγών των οποίων οι διαστάσεις κυμαίνονται από κάποιες εκατοντάδες νανόμετρα (nanowires) σε κάποιες δεκάδες μικρόμετρα (rib waveguides). Στην περίπτωση κυματοδηγών πυριτίου (nanowires) και με την τεχνική συγκόλλησης (die-to-wafer bonding) έχει υλοποιηθεί μια σειρά από ενεργά στοιχεία όπως λέιζερ [3.11][3.12] και φωτοανιχνευτές [3.13]. Για κυματοδηγούς (rib waveguides) χρησιμοποιούνται υβριδικές τεχνικές ολοκλήρωσης (flip-chip) οι οποίες επιτρέπουν τη συγκόλληση III-V στοιχείων σε υποστρώματα πυριτίου με χαμηλότερες απώλειες. Στην κατηγορία αυτή ανήκει η τεχνική θερμοσυμπίεσης (thermo-compression) με την οποία έχουν υλοποιηθεί διάφορα οπτικά κυκλώματα όπως λέιζερ, ανιχνευτές, διαμορφωτές και ημιαγωγά οπτικοί ενισχυτές [3.14][3.15]. Πρόσφατα μια άλλη τεχνική στηριζόμενη σε σφαιρίδια συγκόλλησης χρυσού χρησιμοποιείται για την ολοκλήρωση InP στοιχείων σε πυρίτιο [3.16].

Στις παρακάτω ενότητες παρουσιάζεται η κατασκευή και πειραματική αξιολόγηση ενός υβριδικά ολοκληρωμένου μετατροπέα μήκους κύματος πάνω σε υπόστρωμα SOI. Το φωτονικό πλινθίο περιλαμβάνει έναν ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή μήκους 1.25mm ο οποίος ολοκληρώνεται σε μήτρα SOI χρησιμοποιώντας σφαιρίδια συγκόλλησης χρυσού. Η πλευρική ευθυγράμμιση του SOA γίνεται με ακρίβεια <1μm. Ως οπτικά φίλτρα χρησιμοποιούνται δύο συμβολόμετρα καθυστέρησης τα οποία είναι μονολιθικά ολοκληρωμένα στο υπόστρωμα SOI έχοντας 2x2 πολυρυθμικούς συζεύκτες (Multi Mode Interference couplers-MMI). Οι κυματοδηγοί πυριτίου έχουν 4μm ύψος, 0.1dB/cm απώλεια μετάδοσης και <0.5dB απώλεια σύζευξης. Η μεταβολή της ελεύθερης φασματικής περιοχής πραγματοποιείται από δύο ολοκληρωμένα θερμαντικά στοιχεία. Η τελική ταχύτητα του μετατροπέα μήκους κύματος είναι στα 160Gb/s καταναλώνοντας μια συνολική ισχύ περίπου ~700mW.

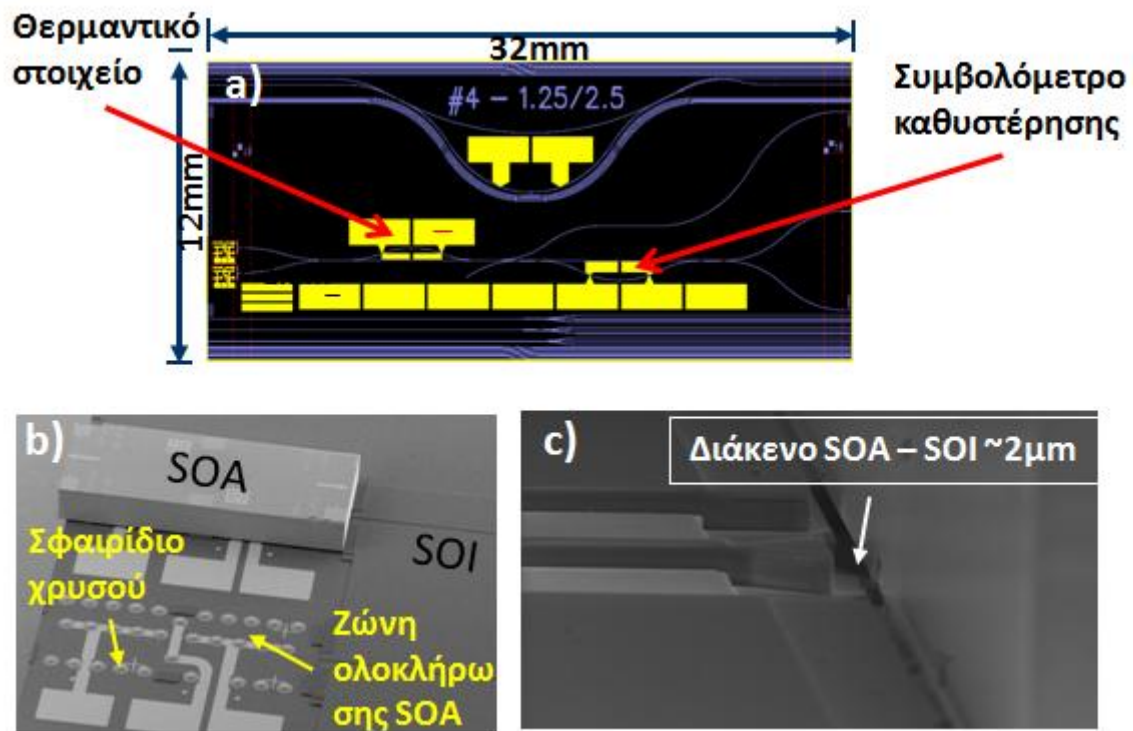
3.2 Αρχή λειτουργίας και κατασκευή του υβριδικά ολοκληρωμένου μετατροπέα μήκους κύματος σε πυρίτιο

Το Σχήμα 54 απεικονίζει τη δομή του υβριδικά ολοκληρωμένου μετατροπέα μήκους κύματος. Η διάταξη αποτελείται από δύο βασικά συστατικά: τον ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή (SOA) και το φωτονικό πλινθίο σε SOI. Ο SOA χρησιμοποιείται ως μη γραμμικό στοιχείο για τη μετατροπή μήκους κύματος μέσω της ετεροδιαμόρφωσης κέρδους και φάσης. Το υπόστρωμα σε SOI εκτελεί την επεξεργασία μήκους κύματος με δύο μονολιθικά ολοκληρωμένα συμβολόμετρα καθυστέρησης (DI). Το πρώτο χρησιμοποιείται ως περιοδικό φίλτρο για την επιλογή των φασματικών συνιστωσών με τετέρισμα (chirp) και την επιτάχυνση της αργής χρονικής ανάκαμψης κέρδους, ενώ το δεύτερο ως φίλτρο καταπίεσης για την αναστροφή της πόλωσης του μετατρεπόμενου σήματος. Λόγω της περιοδικότητας των συμβολομέτρων καθυστέρησης, επιτυγχάνεται υψίρρυθμη λειτουργία ακόμα και σε αρχιτεκτονικές πολυπλεξίας κύματος. Οι λειτουργίες τόσο του ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή όσο και του φωτονικού πλινθίου SOI συνδυάζονται στην ίδια πλατφόρμα με την ακόλουθη διαδικασία: Ένα μέρος της πλατφόρμας SOI υποβάλλεται σε επεξεργασία με επικάλυψη σφαιριδίων χρυσού (gold-tin bumps) σχηματίζοντας μια περιοχή προσγείωσης για το SOA ο οποίος συγκολλάται στο υπόστρωμα SOI και ευθυγραμμίζεται με τον κυματοδηγό εκλέπτυνσης (taper section).

Η δημιουργία του φωτονικού κυκλώματος ξεκινά πρώτα με την κατασκευή των ημιαγωγικών οπτικών ενισχυτών μήκους 1.25 χιλιοστών με ισχύ κορεσμού 10dBm, συντελεστή θορύβου 7dB, κέρδος 22dB (25dB μέγιστη τιμή) και ευαισθησία πόλωσης χαμηλότερη από 1.5dB. Για την επικάλυψη και συγκόλληση του SOA πάνω σε υπόστρώματα SOI είναι αναγκαία: i) η προσαρμογή της εξόδου του ημιαγωγικού ενισχυτή στο πεδίο του κυματοδηγού SOI, ii) η υψηλής ανάλυση οπτική ευθυγράμμιση των κυματοδηγών SOA και SOI, iii) η επιμετάλλωση για αξιόπιστη διασύνδεση του SOA πάνω σε SOI και iv) η δημιουργία χαρακτηριστικών ταυτοποίησης και ευθυγράμμισης στην κάτω όψη του ημιαγωγικού ενισχυτή.



Σχήμα 54: Δομή του αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος σε πυρίτιο



Σχήμα 55: a) Μάσκα σχεδιασμού , b) Μικρογραφία ημιαγωγίμου οπτικού ενισχυτή σε υπόστρωμα SOI, c) Διάκενο μεταξύ SOA και κυματοδηγού SOI

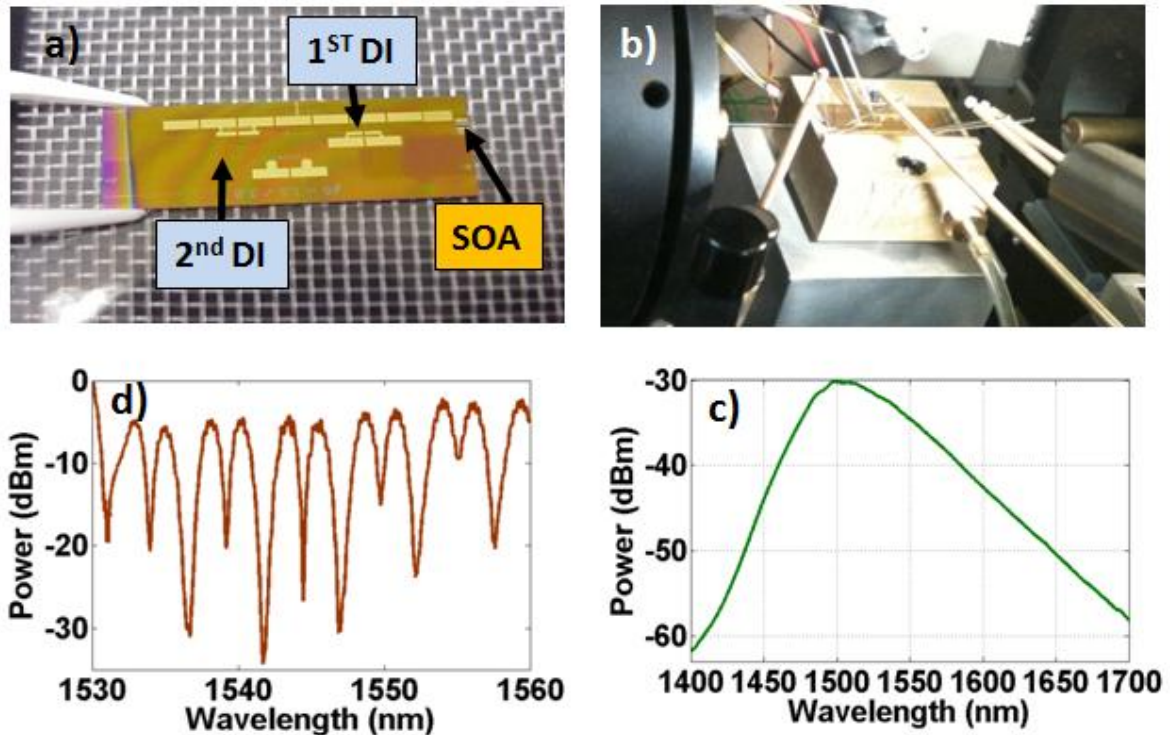
Για την κατασκευή του ημιαγωγίμου ενισχυτή χρησιμοποιούνται στρώματα διεπαφής p-n ενσωματώνοντας πλαγίως κυματοδηγούς εκλέπτυνσης (tapers). Για την κατάλληλη οριζόντια και κατακόρυφη ευθυγράμμιση, χρησιμοποιείται μηχανικό σύστημα υψηλής ακρίβειας που αναλαμβάνει την τοποθέτηση του SOA πάνω σε SOI μέσω κατάλληλων δεικτών ευθυγράμμισης.

Η κατασκευή του φωτονικού πλινθίου σε SOI είναι μια διαδικασία τριών σταδίων. Αρχικά χαράσσονται οι κυματοδηγοί, η ζώνη ολοκλήρωσης του SOA και οι διατάξεις ευθυγράμμισης (alignment stands). Στη συνέχεια επιμεταλλώνεται η μητρική πλακέτα SOI με ηλεκτρικές διασυνδέσεις, επικάθονται τα σφαιρίδια συγκόλλησης χρυσού και λειαίνονται οι κυματοδηγοί εισόδου-εξόδου. Για την ολοκλήρωση του SOA πάνω στο υπόστρωμα SOI χρησιμοποιείται ένα μηχανικό σύστημα ευθυγράμμισης ακρίβειας 1μm (flip-chip bonder) το οποίο αναλαμβάνει την τοποθέτηση και τη συγκόλληση των επιμέρους στοιχείων μέσω της τήξης των σφαιριδίων χρυσού. Η αναπαραγωγή και ομοιομορφία των σφαιριδίων χρυσού καθώς επίσης και η ακρίβεια συγκόλλησης επιτυγχάνονται ύστερα από σειρά δοκιμών οδηγώντας σε ολοκληρωμένα κυκλώματα με μηχανική σταθερότητα και υψηλή ποιότητα ολοκλήρωσης. Το Σχήμα 55 a) απεικονίζει τη ζώνη ολοκλήρωσης του SOA, τα συμβολόμετρα καθυστέρησης και τα θερμαντικά στοιχεία. Το Σχήμα 55 b) δείχνει την επιμεταλλωμένη επιφάνεια SOI, τα σφαιρίδια χρυσού και τον υβριδικά ολοκληρωμένο ημιαγωγίμο ενισχυτή στο υπόστρωμα SOI. Τέλος το Σχήμα 55 c) παρουσιάζει την ορθή ευθυγράμμιση των κυματοδηγών των επιμέρους φωτονικών στοιχείων.

3.3 Χαρακτηρισμός του υβριδικά ολοκληρωμένου φωτονικού κυκλώματος

Το φωτονικό κύκλωμα του οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος απεικονίζεται στο Σχήμα 56 a) με τον ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή και τα συμβολόμετρα καθυστέρησης ολοκληρωμένα στο υπόστρωμα SOI. Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του κυκλώματος εξάγονται πειραματικά με το σύστημα ευθυγράμμισης που φαίνεται στο Σχήμα 56 b) . Ένας συνολικός αριθμός από 6 ακίδες επαφής εφαρμόζονται στο φωτονικό πλινθίο για την οδήγηση του SOA και των θερμαντικών στοιχείων των συμβολομέτρων καθυστέρησης. Η οπτική σύζευξη στην είσοδο του ημιαγωγικού ενισχυτή και στις εξόδους των κυματοδηγών SOI επιτυγχάνεται με οπτικές ίνες εστίασης διαμέτρου 3 μ m. Οι φασματικές αποκρίσεις των συμβολομέτρων καθυστέρησης (DIs) εξάγονται με τη χρήση ενός λέιζερ μεταβλητού μήκους κύματος και οπτική ισχύ ~4dBm. Το Σχήμα 56 d) παρουσιάζει τις χαρακτηριστικές φίλτρου των DIs. Η ελεύθερη φασματική περιοχή (FSR) των συμβολομέτρων καθυστέρησης είναι 5.6nm και 2.52nm αντίστοιχα ενώ με κατάλληλη χρήση των ολοκληρωμένων θερμαντικών στοιχείων επιτυγχάνεται λόγος σβέσης περίπου 30dB. Η αντίσταση των θερμαντικών στοιχείων υπολογίζεται ~ 600 Ω m, η φασματική απόδοση ~ 6 μ m/mW και το μέγιστο εύρος μεταβολής μήκους κύματος ~6nm.

Ο ημιαγωγικός ενισχυτής εμφανίζει υψηλή ποιότητα ολοκλήρωσης, κατάλληλο ύψος συγκόλλησης και μηχανική ευθυγράμμιση ακρίβειας 1 μ m ύστερα από εστίαση με έναν ηλεκτρονικό αναλυτή σάρωσης. Στη συνέχεια οδηγείται ηλεκτρικά με ρεύμα έως 180mA (Τάση = 2.3V) παρουσιάζοντας καλή ποιότητα επαφής και αυθόρμητη εκπομπή όπως φαίνεται στο Σχήμα 56 c). Κατά τη διάρκεια της πειραματικής μέτρησης η θερμοκρασία είναι σταθερή στους 20°C χρησιμοποιώντας ένα θερμοηλεκτρικό στοιχείο (Thermo Electric Cooler-TEC). Για τον υπολογισμό της χρονικής ανάκαμψης των φορέων του SOA χρησιμοποιείται ένα λέιζερ εγκλείδωσης ρυθμών και μια πηγή συνεχούς (CW). Ο χρόνος αποκατάστασης (Δt_{10-90}) κυμαίνεται ~30ps με τις φασματικές αποκρίσεις των συμβολομέτρων καθυστέρησης τοποθετημένες γύρω από την ισχύ κορυφής του CW. Με μεταβολή των χαρακτηριστικών φίλτρου των DIs προς τις μπλέ φασματικές συνιστώσες είναι εφικτή η επιτάχυνση του χρόνου ανάκαμψης του μετατρεπόμενου μήκους κύματος κάτω από 2ps. Οι απώλειες λόγω σύζευξης με τις οπτικές ίνες εστίασης καθώς επίσης και οι απώλειες λόγω μεταβολής των χαρακτηριστικών των DIs αντισταθμίζονται χρησιμοποιώντας οπτικούς ενισχυτές ερβίου (Erbium Doped Fiber Amplifiers-EDFA), ενώ η απόρριψη του διαμορφωμένου σήματος εισόδου επιτυγχάνεται με ένα επιπρόσθετο στοιχείο φιλτραρίσματος. Η σημαντική μείωση του χρόνου ανάκαμψης (κάτω του 1 / 3 της χρονοθυρίδας που αντιστοιχεί σε ρυθμοδότηση 160Gb/s) θεωρείται επαρκής για υψίρρυθμες ταχύτητες επεξεργασίας χρησιμοποιώντας το φωτονικό ολοκληρωμένο κύκλωμα του Σχήμα 56 a). Το κέρδος του SOA είναι περίπου 20dB

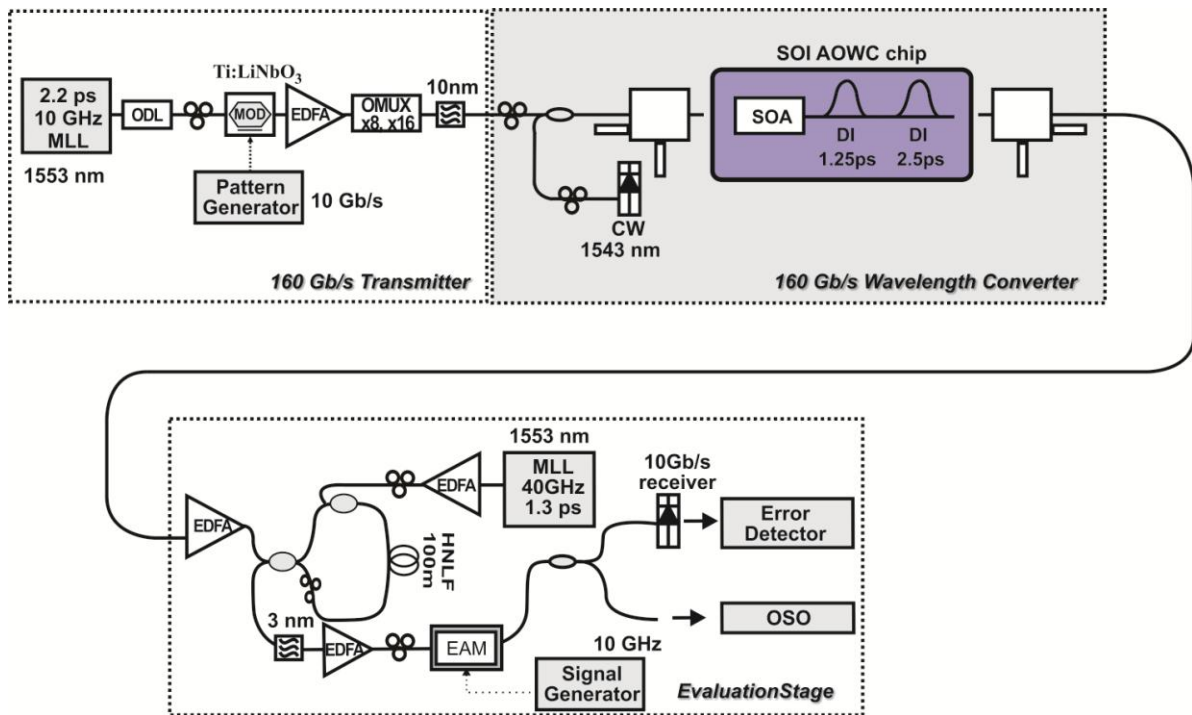


Σχήμα 56: a) Ολοκληρωμένο κύκλωμα μετατροπέα μήκους κύματος, b) Φωτονικό πλινθίο τοποθετημένο σε σύστημα ευθυγράμμισης, c) Χαρακτηριστική του SOA, d) Φασματική απόκριση των συμβολομέτρων καθυστέρησης

με ασθενή εξάρτηση από την πόλωση ενώ η ισχύς εξόδου του φωτονικού πλινθίου για για 4dBm οπτική είσοδο είναι ~ 0dBm επιβεβαιώνοντας τη σωστή ευθυγράμμιση x-y-z μεταξύ των κυματοδηγών SOA και SOI.

3.4 Πειραματική αξιολόγηση του υβριδικά ολοκληρωμένου φωτονικού κυκλώματος

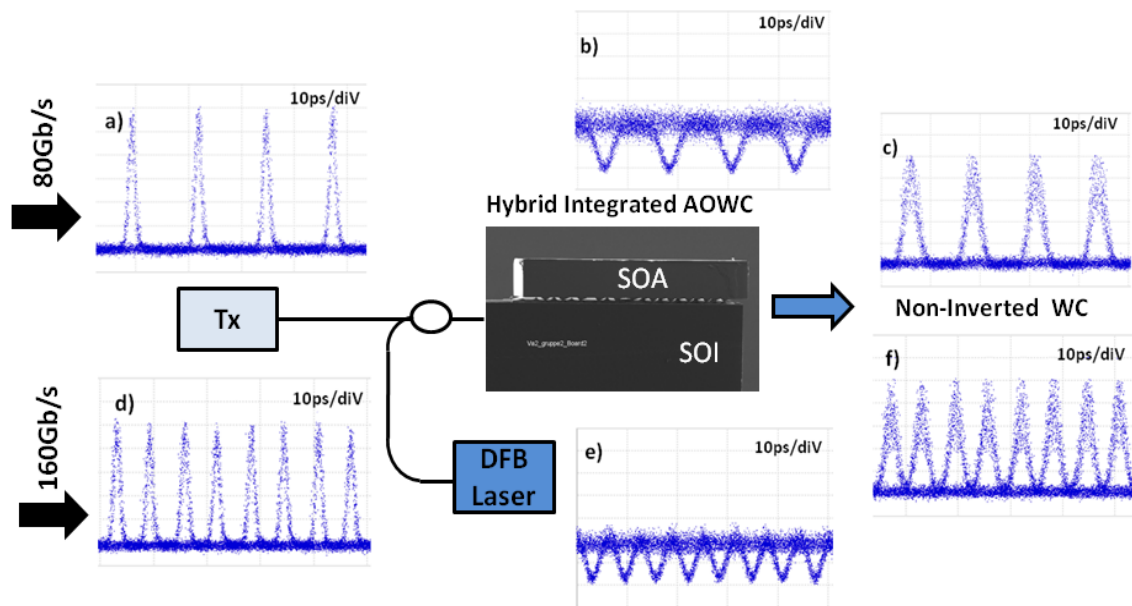
Το Σχήμα 57 απεικονίζει την πειραματική διάταξη για την αξιολόγηση του αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος σε ταχύτητες λειτουργίας έως 160Gb/s. Περιλαμβάνει τρία ξεχωριστά κυκλώματα: τον πομπό, το μετατροπέα μήκους κύματος και τον οπτικό δέκτη. Οι παλμοί κωδικοποιούνται με μια ψευδοτυχαία ακολουθία 2^7-1 χρησιμοποιώντας ένα διαμορφωτή LiNbO₃ και στη συνέχεια συμπιέζονται χρονικά (~440fs) με οπτικές μεθόδους επεξεργασίας [3.17][3.18]. Για το μηχανισμό της οπτικής συμπίεσης χρησιμοποιείται μια μη γραμμική οπτική ίνα μήκους 220m με διασπορά $-0,25 \text{ ps/nm/km}$ και μη γραμμικό συντελεστή $11,5 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$, ένας ενισχυτής ερβίου υψηλής ισχύος για τη διέγερση του φαινομένου της αυτοδιαμόρφωσης φάσης και στη συνέχεια ένα οπτικό φίλτρο για την επιλογή της γραμμικής περιοχής ολίσθησης της φάσης. Κατόπιν ακολουθεί



Σχήμα 57: Πειραματική διάταξη για αμιγώς οπτική μετατροπή μήκους κύματος σε ταχύτητες λειτουργίας 160Gb/s

οπτική πολυπλεξία χρόνου (Optical Time Division Multiplexing-OTDM) για τη δημιουργία του 160Gb/s διαμορφωμένου σήματος. Η κυματομορφή αυτή μαζί με την έξοδο μιας διόδου λέιζερ σε μήκος κύματος 1542nm, εισάγονται μέσα στο υβριδικά ολοκληρωμένο φωτονικό κύκλωμα για μετατροπή μήκους κύματος. Μέσα στον ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή λόγω της ετεροδιαμόρφωσης κέρδους και φάσης προκύπτει σήμα με αντίστροφη πολικότητα και αργή χρονική ανάκαμψη. Για το λόγο αυτό η φασματική απόκριση το πρώτου συμβολομέτρου καθυστέρησης χρησιμοποιείται για την επιλογή των «μπλε» φασματικών συνιστωσών και την επιτάχυνση του μηχανισμού λειτουργίας. Αντίστοιχα η χαρακτηριστική φίλτρου του δεύτερου συμβολομέτρου χρησιμοποιείται ως μέσο καταπίεσης της αδιαμόρφωτης φέρουσας της διόδου για την αντιστροφή της πολικότητας του τελικώς μετατρεπόμενου μήκους κύματος. Η μεταβολή των φασματικών αποκρίσεων των δύο DIs επιτυγχάνεται με τη χρήση των ολοκληρωμένων θερμαντικών στοιχείων.

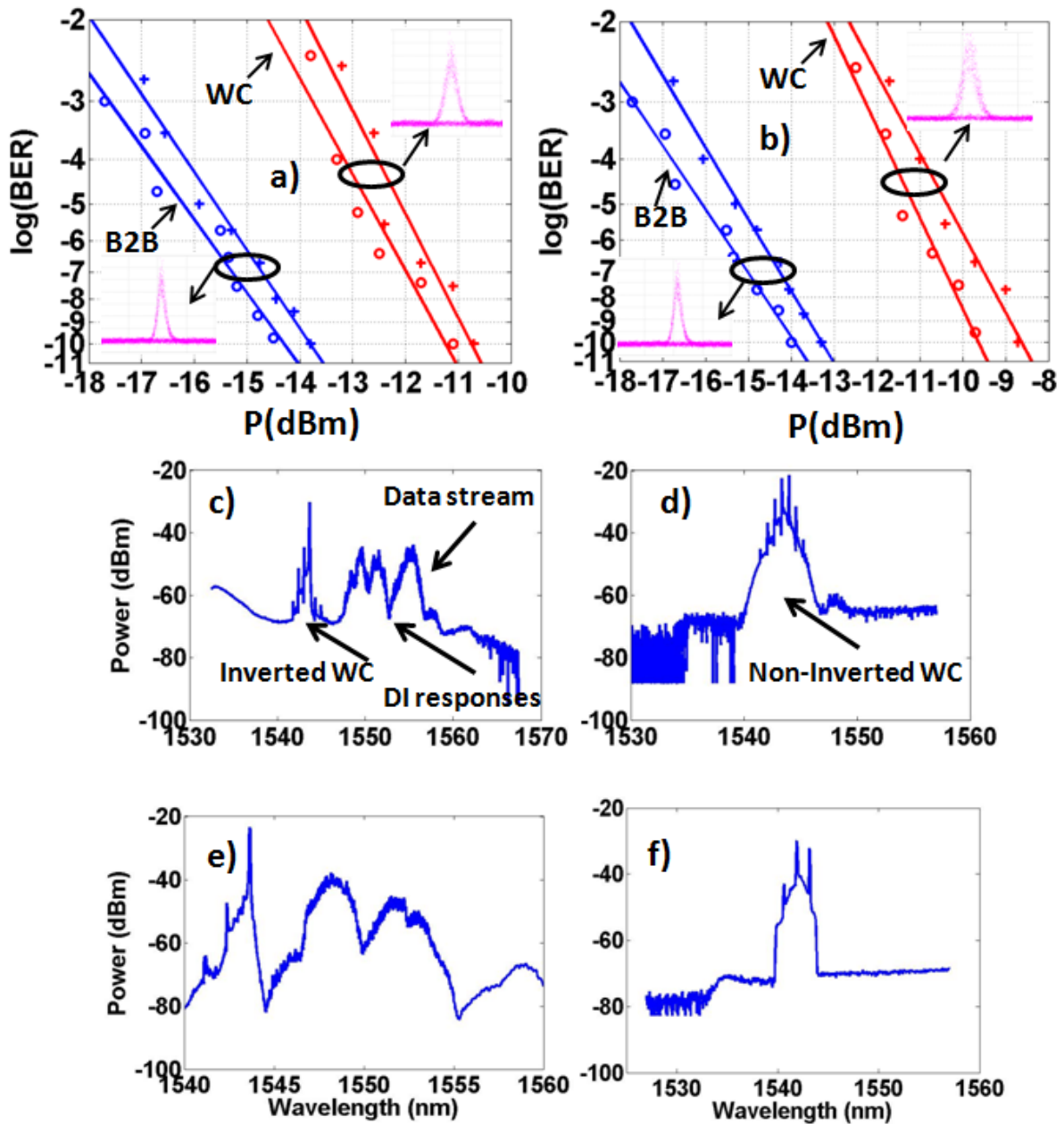
Στην πλευρά του δέκτη το μετατρεπόμενο υψίρρυθμο σήμα λειτουργίας αξιολογείται χρησιμοποιώντας μεθόδους οπτικής αποπολυπλεξίας [3.19][3.20]. Πιο συγκεκριμένα η έξοδος του φωτονικού πλινθίου ενισχύεται αρχικά από έναν ενισχυτή ερβίου, το διαμορφωμένο σήμα εισόδου απορρίπτεται από ένα φίλτρο με εύρος ημίσειας ισχύος 4nm και το μετατρεπόμενο μήκος κύματος αποπολυπλέκεται σε κανάλια 40Gb/s χρησιμοποιώντας έναν μη γραμμικό βρόγχο καθρέφτη (Non Linear Optical Loop Mirror-NOLM). Το μη γραμμικό στοιχείο του NOLM είναι μια μη γραμμική ίνα μήκους 100m με μη γραμμικό συντελεστή $10W^{-1} km^{-1}$ και διασπορά $1.21ps/nm/km$. Ως σήμα ελέγχου στο μη γραμμικό βρόγχο χρησιμοποιείται ένα λέιζερ εγκλειδωσης ρυθμών σε μήκος κύματος 1553nm



Σχήμα 58: Διαγράμμα ματιού a) 80Gb/s σήμα εισόδου, b) 80Gb/s μετατρεπόμενο μήκος κύματος με ανάστροφη πολικότητα, c) 80Gb/s μετατρεπόμενο μήκος κύματος με ορθή πολικότητα, d) 160Gb/s σήμα εισόδου, e) 160Gb/s μετατρεπόμενο μήκος κύματος με ανάστροφη πολικότητα, c) 160Gb/s μετατρεπόμενο μήκος κύματος με ορθή πολικότητα

εκπέμποντας οπτικούς παλμούς χρονικής διάρκειας 1.3ps σε ρυθμοδότηση 40GHz. Η έξοδος του NOLM, μετά από απόρριψη του σήματος ελέγχου, οδηγείται σε ένα διαμορφωτή ηλεκτροαπορρόφησης (Electro Absorption Modulator-EAM) για περαιτέρω οπτική αποπολυπλεξία σε κανάλια 10Gb/s. Το υβριδικά ολοκληρωμένο κύκλωμα αξιολογείται πειραματικά για ταχύτητες 80Gb/s και 160Gb/s με τον ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή να οδηγείται σε τιμές ρεύματος 180mA, τη θερμοκρασία του να διατηρείται στους 20°C και τη μετατόπιση των συμβολομέτρων καθυστέρησης να κυμαίνεται 0.8nm και 1.3nm αντίστοιχα. Η μέση ισχύ εισόδου για το συνεχές κύμα (CW) είναι της τάξης 8dBm και για το διαμορφωμένο σήμα 10dBm και 12dBm για ταχύτητες λειτουργίας 80Gb/s και 160Gb/s αντίστοιχα.

Το Σχήμα 58 απεικονίζει τις μετρήσεις υψηλής ταχύτητας που πραγματοποιούνται με τον υβριδικά ολοκληρωμένο μετατροπέα μήκους κύματος. Το Σχήμα 58 a) και d) εμφανίζει το διάγραμμα ματιού των εισερχομένων 80Gb/s και 160Gb/s δεδομένων που εισάγονται στον ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή για ετεροδιαμόρφωση κέρδους και φάσης. Η μικρή διακύμανση πλάτους που παρατηρείται στους παλμούς οφείλεται στη μη βέλτιστη ρύθμιση των σταδίων του οπτικού πολυπλέκτη. Με τη μεταβολή των συμβολομέτρων καθυστέρησης προς τις «μπλέ» φασματικές συνιστώσες προκύπτουν οι κυματομορφές που φαίνονται στο Σχήμα 58 b) και e). Αν και τα σήματα βρίσκονται σε αντεστραμμένη πολικότητα, το διάγραμμα ματιού είναι ανοιχτό αποδεικνύοντας την αποτελεσματική συμβολή των DIs στη διαδικασία επιτάχυνσης της ανάκαμψης κέρδους του SOA. Το Σχήμα 58 c) και f) απεικονίζει τις κυματομορφές ορθής



Σχήμα 59: Καμπύλες μετρήσεων λαθών για λειτουργία a) 80Gb/s, b) 160Gb/s. Φάσμα εξόδου του μετατροπέα μήκους κύματος για c) 80Gb/s, e) 160Gb/s. Φάσμα του τελικώς μετατρεπόμενου μήκους κύματος ορθής πολικότητας για d) 80Gb/s, f) 160Gb/s.

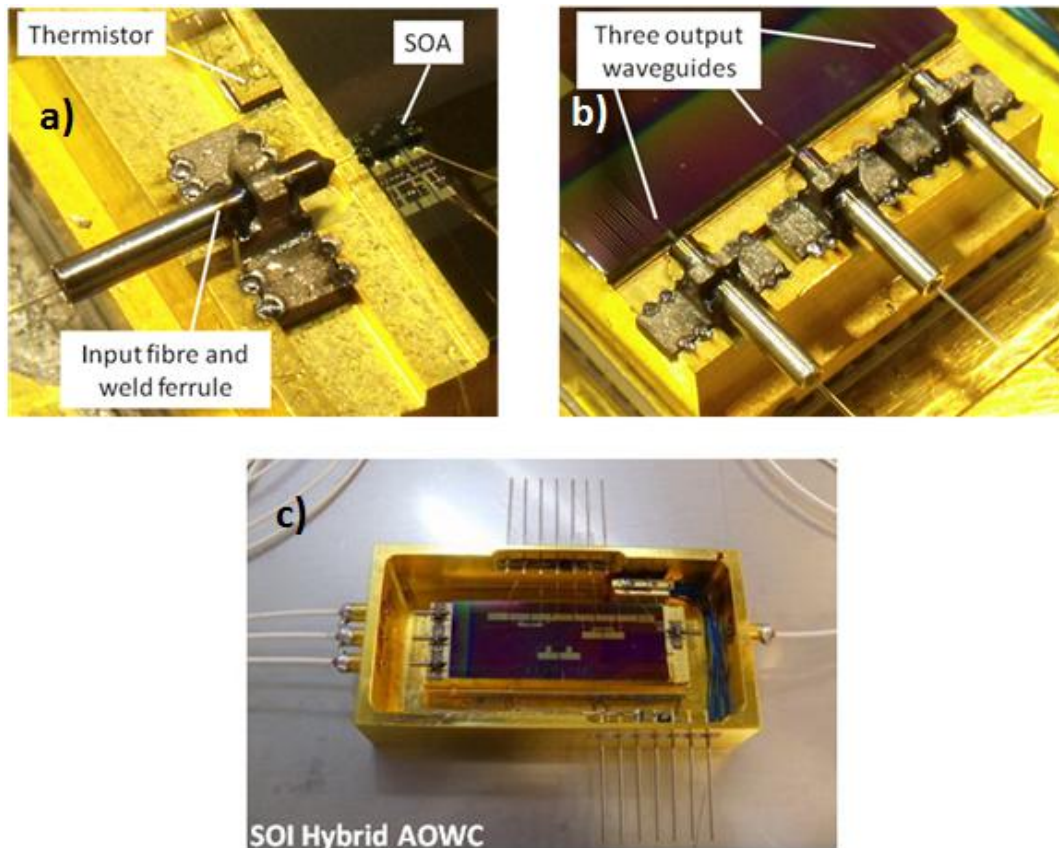
πολικότητας του 80Gb/s και 160Gb/s μετατρεπόμενου μήκους κύματος τοποθετώντας τη φέρουσα της πηγής CW στη φασματική περιοχή καταπίεσης των συμβολομέτρων καθυστέρησης. Για λειτουργία 80Gb/s η ισχύς εξόδου μετά το μετατροπέα μήκους κύματος είναι -12dBm και μετά την ενίσχυση και απόρριψη του διαμορφωμένου σήματος εισόδου, ο σηματοθρομβικός λόγος (Signal-to-Noise Ratio) είναι 25dB. Αντίθετα για λειτουργία 160Gb/s τα επίπεδα ισχύος μετά το μετατροπέα είναι -15dBm ενώ το τελικό σήμα έχει σηματοθρομβικό λόγο 19dB. Αυτό εξηγεί την αυξημένη διαμόρφωση πλάτους του Σχήμα 58 f) συγκριτικά με το Σχήμα 58 c). Η διεύρυνση του παλμού και στις δύο

περιπτώσεις οφείλεται στο στενό εύρος ημίσειας ισχύος των συμβολομέτρων καθυστέρησης καθώς επίσης και στη χρήση στενών φίλτρων (~5nm) ανάμεσα στις διάφορες βαθμίδες ενίσχυσης.

Το Σχήμα 59 απεικονίζει τις καμπύλες μέτρησης λαθών για μετατροπή μήκους κύματος (Wavelength Conversion-WC) σε ταχύτητες 80 Gb/s και 160Gb/s καθώς επίσης και τα αντίστοιχα φάσματα στην έξοδο του φωτονικού πλινθίου. Λειτουργία χωρίς λάθη επιτυγχάνεται για όλα τα αποπολυπλεγμένα κανάλια του 80Gb/s μετατρεπόμενου μήκους κύματος με ποινή ισχύος μικρότερη από 3.2dB. Η καλύτερη και χειρότερη απόδοση εμφανίζεται στο Σχήμα 59 a). Το Σχήμα 59 c) απεικονίζει το φασματικό περιεχόμενο του μετατρεπόμενου κύματος με αντίστροφη πολικότητα (Inverted WC). Στο ίδιο σχήμα εμφανίζεται το φάσμα του αρχικού 80Gb/s διαμορφωμένου σήματος εισόδου (data stream) καθώς επίσης και οι αποκρίσεις των συμβολομέτρων καθυστέρησης (DI responses). Για την αποκατάσταση την πολικότητας, τα βυθίσματα των DIs εφαρμόζεται στη φέρουσα του συνεχούς κύματος CW. Αυτό επιτυγχάνεται είτε μεταβάλλοντας το μήκος κύματος της διόδου είτε μεταβάλλοντας τις χαρακτηριστικές των DIs με τα ολοκληρωμένα θερμαντικά στοιχεία. Το Σχήμα 59 d) δείχνει ξεκάθαρα την καταπίεση της φέρουσας έναντι των αρμονικών διαμόρφωσης. Το Σχήμα 59 b) δείχνει τις καμπύλες μέτρησης λαθών για μετατροπή μήκους κύματος σε ταχύτητα μετάδοσης 160Gb/s. Χωρίς λάθη λειτουργία επιτυγχάνεται για όλα τα αποπολυπλεγμένα κανάλια με ποινή ισχύος μικρότερη από 4.6dB. Η υψηλή τιμή οφείλεται στη μικρότερη ισχύ εξόδου του μετατροπέα που έχει ως αποτέλεσμα την αλλοίωση του σηματοθορυβικού του λόγου ύστερα από κάθε ενισχυτικό στάδιο. Μια πιο βέλτιστη απόδοση είναι εφικτό να επιτευχθεί ύστερα από μια πιο ορθή ευθυγράμμιση των κυματοδηγών SOA και SOI κατά τη διαδικασία φωτονικής ολοκλήρωσης. Το Σχήμα 59 e) και f) απεικονίζει τα φάσματα των 160Gb/s μετατρεπόμενων σημάτων με ανάστροφη και ορθή πολικότητα αντίστοιχα.

3.5 Συσσκευασία του υβριδικά ολοκληρωμένου μετατροπέα μήκους κύματος

Για τη συσκευασία του μετατροπέα μήκους κύματος χρησιμοποιείται μια κατασκευή από υλικό Kovar με κατάλληλες οπές για τη διασύνδεση των οπτικών ινών και των ηλεκτρικών επαφών. Για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του φωτονικού πλινθίου χρησιμοποιείται μια συστοιχία από θερμοηλεκτρικά στοιχεία τα οποία αναλαμβάνουν την απαγωγή της θερμότητας μέσω του υλικού συσκευασίας. Το φωτονικό πλινθίο SOI τοποθετείται και επικολλάται σε μια επίπεδη επιφάνεια Kovar στην οποία έχουν προσκολληθεί οι συστοιχίες των θερμοηλεκτρικών στοιχείων. Η ευθυγράμμιση των κυματοδηγών με τις οπτικές ίνες εστίασης πραγματοποιείται με ένα πολυαξονικό μηχανικό σύστημα ακρίβειας μικρομέτρου το οποίο αναλαμβάνει τη σταθεροποίηση των ινών



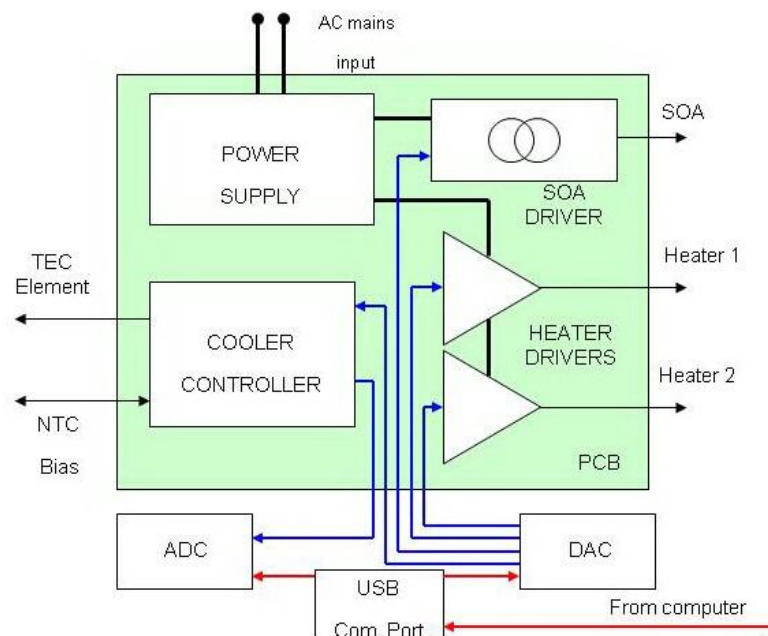
Σχήμα 60: a-b) Οπτικές ίνες εστίασης ευθυγραμμισμένες στην είσοδο και έξοδο των κυματοδηγών του SOA και SOI αντίστοιχα, c) Συσκευασμένος οπτικός μετατροπέας μήκους κύματος

χρησιμοποιώντας τεχνικές συγκόλλησης λέιζερ [3.21]. Ενώ οι οπτοηλεκτρονικές διαδικασίες συσκευασίας είναι απλές στη χρήση τους, η επικόλληση των φωτονικών πλινθίων πάνω σε επιφάνειες Kovar θεωρείται εξαιρετικά δύσκολη. Και αυτό γιατί υπάρχει η απαίτηση για επίπεδη συγκόλληση υπό χαμηλές συνθήκες θερμοκρασίας δίνοντας τη δυνατότητα οπτικής αξιολόγησης χωρίς οι κυματοδηγοί του ολοκληρωμένου κυκλώματος να υποστούν θερμική ζημιά. Κατά δεύτερο λόγο είναι απαραίτητη η καλή θερμική αγωγιμότητα μεταξύ του υποστρώματος SOI και της επιφάνειας Kovar έτσι ώστε να απορρίπτεται το ποσό θερμότητας που παράγεται από τον ημιαγώγιμο οπτικό ενισχυτή.

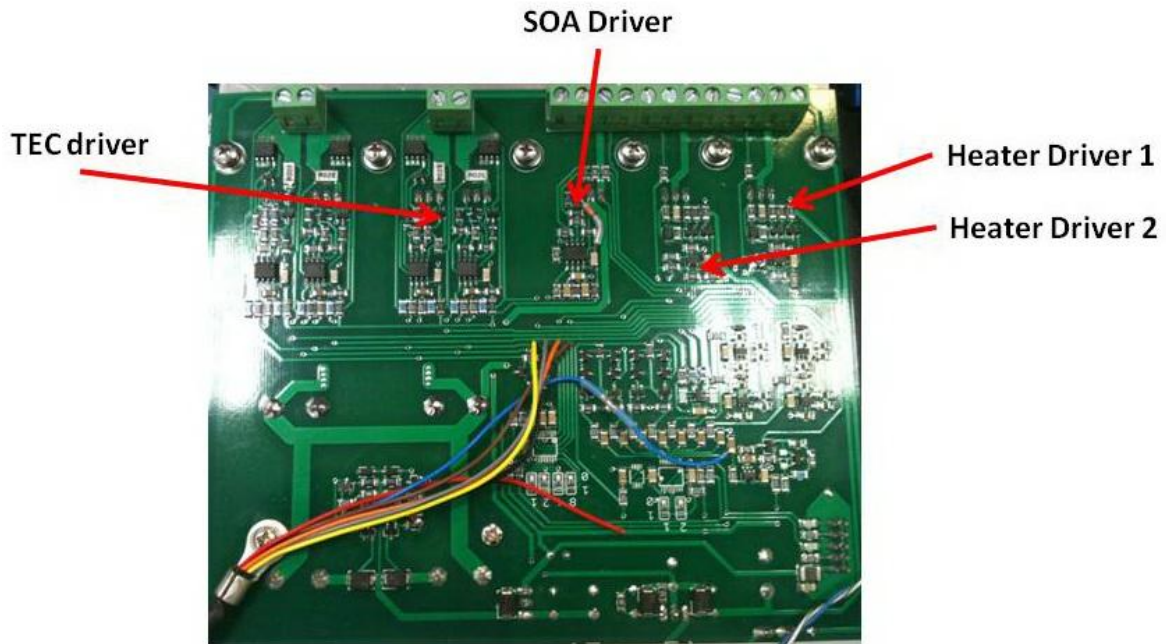
Για την αντιμετώπιση των δυσκολιών αυτών έχουν προταθεί δύο μέθοδοι: Η πρώτη είναι κοινότυπη καθώς χρησιμοποιείται μια ομοιόμορφη κολλώδη ουσία σε όλη την επιφάνεια Kovar πάνω στην οποία επικάθεται το φωτονικό πλινθίο. Στη δεύτερη μέθοδο ανοίγονται μικρές εγκοπές κατά μήκος της επιφάνειας Kovar οι οποίες γεμίζονται με κολλώδη ουσία και στη συνέχεια λαμβάνει χώρα η τοποθέτηση του οπτικού στοιχείου. Συγκριτικές δοκιμές έχουν δείξει ότι η δεύτερη μέθοδος είναι πιο αποδοτική στη θερμική απαγωγή του ημιαγώγιμου οπτικού ενισχυτή. Το Σχήμα 60 a,b) απεικονίζει τις οπτικές ίνες εστίασης ευθυγραμμισμένες στους κυματοδηγούς του φωτονικού πλινθίου. Το Σχήμα 60 c) δείχνει τον πλήρως ολοκληρωμένο και συσκευασμένο οπτικό μετατροπέα μήκους κύματος.

Για τη λειτουργία του προηγούμενου φωτονικού κυκλώματος είναι απαραίτητη η χρήση και κατασκευή ηλεκτρονικών διατάξεων κατάλληλων για την παροχή τάσης και ρεύματος στα επιμέρους οπτικά στοιχεία. Το Σχήμα 61 παρουσιάζει τα ηλεκτρονικά που συνθέτουν την πλακέτα οδήγησης του οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος. Οι κύριες μονάδες είναι: α) το κεντρικό τροφοδοτικό, β) ο ελεγκτής θερμοκρασίας, γ) το κύκλωμα οδήγησης του ημιαγωγικού ενισχυτή και δ) το κύκλωμα οδήγησης των θερμαντικών αντιστάσεων. Με τη χρήση ενός ψηφιακού-αναλογικού ελεγκτή (Digital to Analog Converter-DAC) καθορίζονται οι τιμές παροχής τάσης-ρεύματος ενώ με έναν αναλογικό-ψηφιακό ελεγκτή (Analog to Digital Converter-ADC) διαβάζεται η θερμοκρασία του οπτικού κυκλώματος και ενεργοποιείται το αντίστοιχο θερμοηλεκτρικό στοιχείο.

Το κύκλωμα οδήγησης του SOA είναι μια πηγή ρεύματος χαμηλού θορύβου που κυμαίνεται από 0-300mA με τάση εισόδου 0-2.5V. Το σύστημα ακολουθεί συνάρτηση ράμπας κατά τις διάφορες μεταβολές και η μέγιστη τάση λειτουργίας του φτάνει τα 3.6 V. Για τα θερμαντικά στοιχεία χρησιμοποιούνται πηγές τάσης 0-24V με μέγιστη τιμή ρεύματος 70mA για προστασία των ηλεκτρικών τους διασυνδέσεων από χωρητικά και επαγωγικά φαινόμενα. Το κεντρικό τροφοδοτικό υλοποιείται από δύο μετασχηματιστές και έχει τελείως γραμμική συμπεριφορά για αποφυγή συνθηκών εκπομπής ή ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής με τα οπτικά στοιχεία του φωτονικού κυκλώματος. Τέλος για τον ελεγκτή θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται δύο πηγές ρεύματος για την οδήγηση των θερμοηλεκτρικών στοιχείων και του αισθητήρα θερμοκρασίας. Τυπικές τιμές ρεύματος για τα κυκλώματα αυτά είναι 2.2A και 100mA αντίστοιχα.

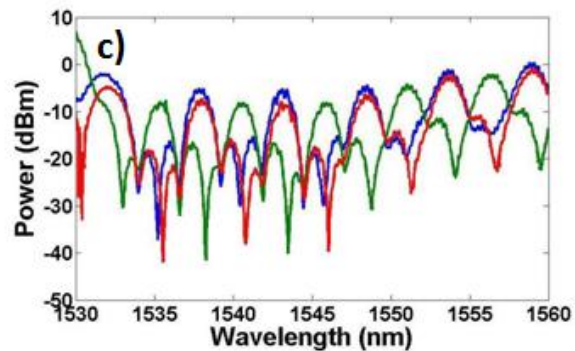
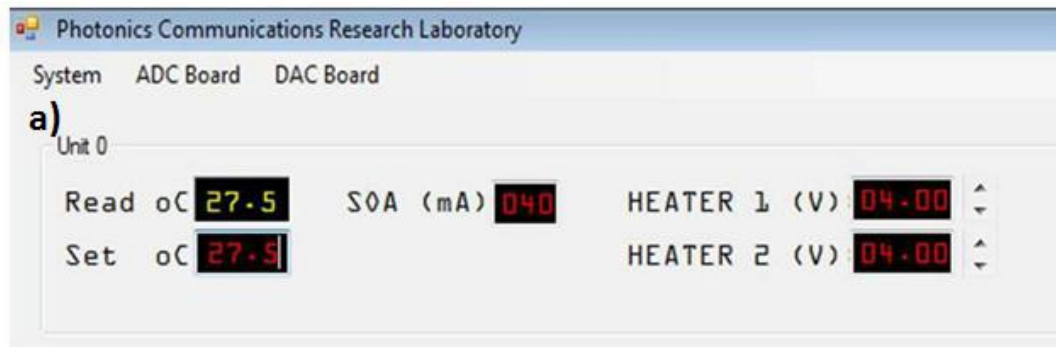


Σχήμα 61: Ηλεκτρονικά οδήγησης του φωτονικού μετατροπέα μήκους κύματος



Σχήμα 62: Ηλεκτρονική πλακέτα οδήγησης του οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος

Το Σχήμα 62 απεικονίζει το ηλεκτρονικό τυπωμένο κύκλωμα για την παροχή τάσης και ρεύματος στον αμιγώς οπτικό μετατροπέα μήκους κύματος. Φαίνονται καθαρά τα τμήματα οδήγησης του ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή, των θερμαντικών στοιχείων και του ελεγκτή θερμοκρασίας. Η ηλεκτρονική πλακέτα τοποθετείται μαζί με το φωτονικό κύκλωμα σε μια επίπεδη επιφάνεια η οποία ψύχεται στην κάτω πλευρά της από έναν ανεμιστήρα όπως φαίνεται στο Σχήμα 63 b). Στο κουτί συσκευασίας τοποθετούνται οι αναλογικοί-ψηφιακοί μετατροπείς και η μονάδα διασύνδεσης (USB Hub) και όλο το σύστημα ελέγχεται ηλεκτρονικά από έναν υπολογιστή. Για τη μεταβολή των διαφόρων παραμέτρων χρησιμοποιείται ένα πρόγραμμα λογισμικού με το οποίο ορίζονται οι τιμές τάσης και ρεύματος των επιμέρους κυκλωμάτων όπως φαίνεται στο Σχήμα 63 a). Η πρωτότυπη αυτή ιδιοκατασκευή αξιολογείται πειραματικά θέτοντας ως θερμοκρασία αναφοράς (Set Temperature) τους 27.5°C . Η εισαγόμενη τιμή συγκρίνεται με τη θερμοκρασία του αισθητήρα και σε περίπτωση απόκλισης το λογισμικό ενεργοποιεί τα αντίστοιχα θερμοηλεκτρικά στοιχεία. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 63 a) η θερμοκρασία ανάγνωσης (Read Temperature) εξισώνεται σταδιακά με τη θερμοκρασία αναφοράς επαληθεύοντας την ορθή λειτουργία του συστήματος. Στη συνέχεια το ρεύμα του ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή τίθεται στην τιμή 40mA ενώ οι τάσεις των θερμαντικών στοιχείων στην τιμή 4V. Μια οπτική ίνα συνδέεται στην έξοδο του συστήματος και το αποτέλεσμα καταγράφεται σε έναν αναλυτή φάσματος ακρίβειας 10pm. Οι φασματικές αποκρίσεις των συμβολόμετρων καθυστέρησης για διαφορετικές τιμές τάσεις απεικονίζονται στο Σχήμα 63 c).



Σχήμα 63: a) Λογισμικό για τη μεταβολή των παραμέτρων του αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος, b) Ολοκλήρωση φωτονικών και ηλεκτρονικών στοιχείων, c) Φασματική απόκριση των συμβολόμετρων καθυστέρησης για διαφορετικές τιμές τάσης στα θερμαντικά στοιχεία

3.6 Πειραματική αξιολόγηση του υβριδικά ολοκληρωμένου μετατροπέα μήκους κύματος σε πραγματικές συνθήκες δικτύου.

3.6.1 Εισαγωγή

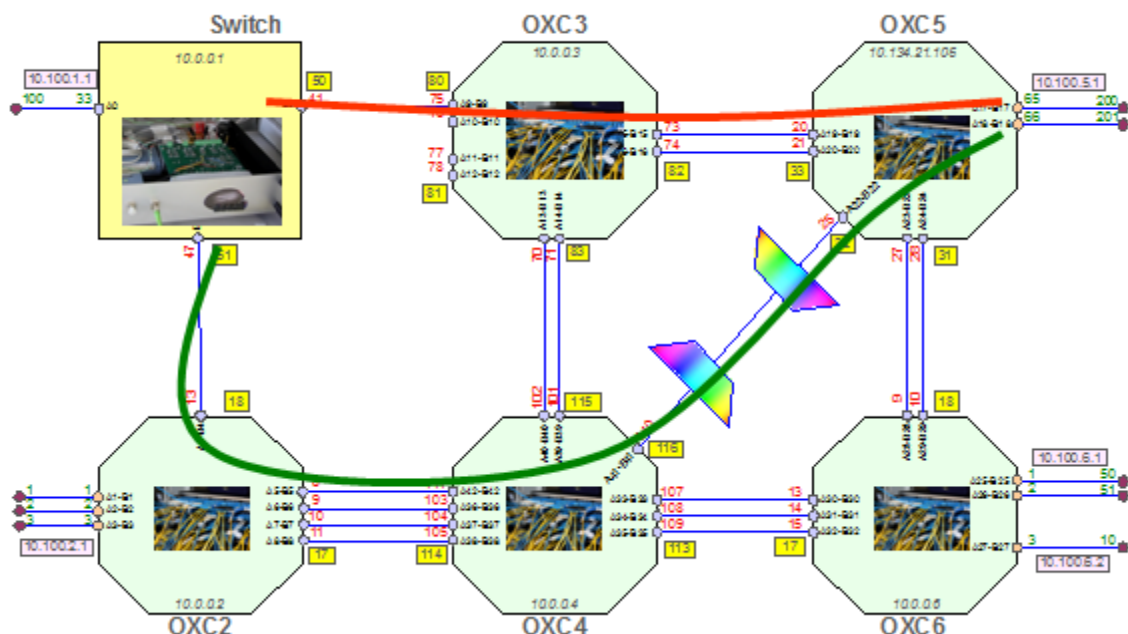
Ο ρόλος των ολοκληρωμένων οπτικών στα δίκτυα τηλεπικοινωνιών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε τμήματος του δικτύου. Για την ανάπτυξη ευέλικτων και αποδοτικών συστημάτων μεταγωγής, είναι απαραίτητη η χρήση φωτονικών στοιχείων με μικρό αποτύπωμα, χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, μικρό κόστος και μεγάλη επεξεργαστική ισχύ. Στα μητροπολιτικά δίκτυα υλοποιούνται ήδη αρχιτεκτονικές που διασυνδέουν πολλαπλούς κόμβους μεταγωγής χρησιμοποιώντας τεχνικές πολυπλεξίας μήκους κύματος και κυκλώματα οπτικής δρομολόγησης με σκοπό την ανάπτυξη μηχανισμών πρόβλεψης και ανακατανομής της τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Σε αυτό το πλαίσιο με τη χρήση ενός συστήματος ελέγχου GMPLS και γρήγορους οπτικούς κόμβους μεταγωγής μπορεί να επιτευχθεί μια σημαντική βελτίωση στην αξιοπιστία του δικτύου ενώ παράλληλα με τη χρήση οπτικών μετατροπέων μήκους κύματος μπορεί να κατορθωθεί φωτονική μεταγωγή υψηλών ταχυτήτων. Για το λόγο αυτό ο μετατροπέας που περιγράφηκε στις προηγούμενες ενότητες

εντάσσεται σε ένα πραγματικό δίκτυο δεδομένων για τη μετάδοση φωνής, βίντεο καθώς επίσης και για τη δρομολόγηση πακέτων πληροφορίας σε ρυθμοδότηση 10/40Gb/s. Η οπτική μεταγωγή μήκους κύματος ενεργοποιείται από ένα σύστημα ελέγχου GMPLS διαμέσου οπτικών διαδρομών πολυπλεξίας μήκους κύματος.

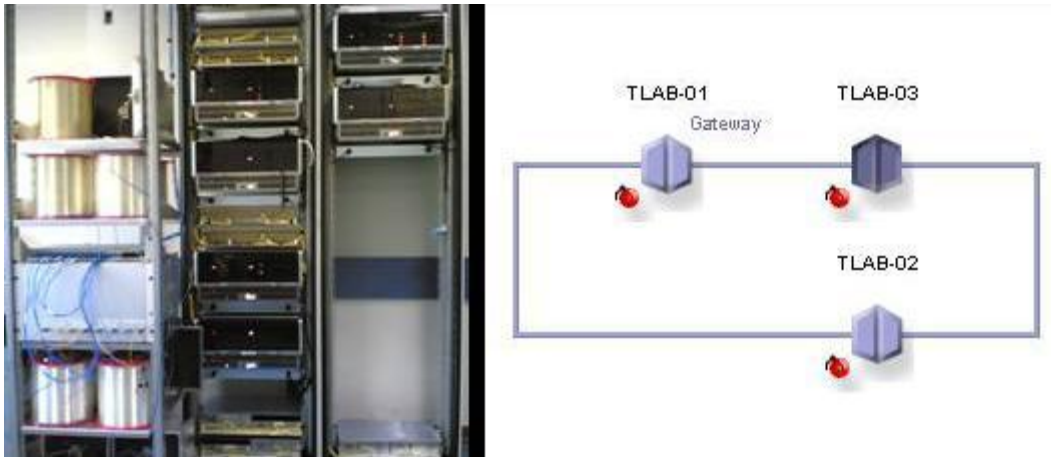
3.6.2 Πειραματική διάταξη οπτικού δικτύου μεταγωγής

Το Σχήμα 64 απεικονίζει τη δομή ενός δικτύου μεταγωγής χρησιμοποιώντας μια οπτική μήτρα δρομολόγησης (3D MEMS) διαχωρισμένη κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αναπαριστά πέντε κόμβους (OXC2-OCX6) διασυνδεδεμένους με οπτικές ίνες αμφίδρομης επικοινωνίας. Ένας ακόμη κόμβος (OXC1) αναλαμβάνει τη δρομολόγηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης μέσω ενός ολοκληρωμένου μετατροπέα μήκους κύματος και ενός φράγματος περίθλασης (AWG) που διαχωρίζει τα σήματα εξόδου. Κάθε κόμβος έχει το δικό του ελεγκτή (βασισμένο σε λογισμικό Linux) ο οποίος διασυνδέεται με τους ελεγκτές γειτονικών κόμβων μέσω σημειακών ζεύξεων Ethernet. Κάποιοι από τους κόμβους έχουν θύρες που χρησιμοποιούνται για τη διακίνηση εφαρμογών τόσο σε επίπεδο δεδομένων όσο και σε επίπεδο ελέγχου. Τα πρωτόκολλα σηματοδότησης και δρομολόγησης είναι αντίστοιχα, RSVP-TE και OSPF-TE με επεκτάσεις GMPLS.

Μια σειρά από καταναμημένα λέιζερ ανάδρασης (Distributed Feedback Lasers-DFBs) ενεργοποιούνται από ένα σύστημα ελέγχου GMPLS για την ετεροδιαμόρφωση πλάτους και φάσης μέσα στον ημιαγώγιμο οπτικό ενισχυτή. Ανάλογα με το μήκος κύματος που εισάγεται στο μετατροπέα, τα δεδομένα δρομολογούνται είτε απευθείας στον κόμβο OXC3 (κόκκινη γραμμή) είτε στον

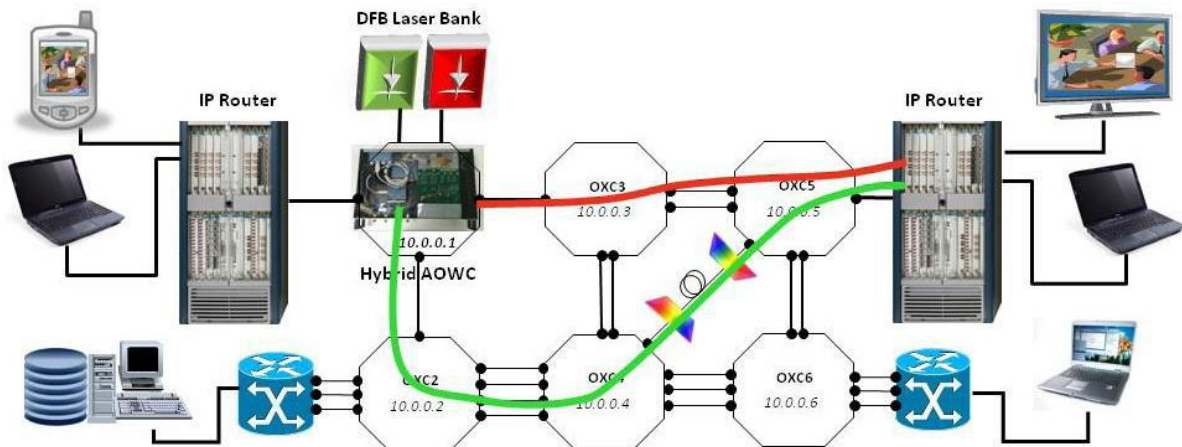


Σχήμα 64: Οπτικό δίκτυο μεταγωγής



Σχήμα 65: Πυκνό δίκτυο πολυπλεξίας μήκους κύματος

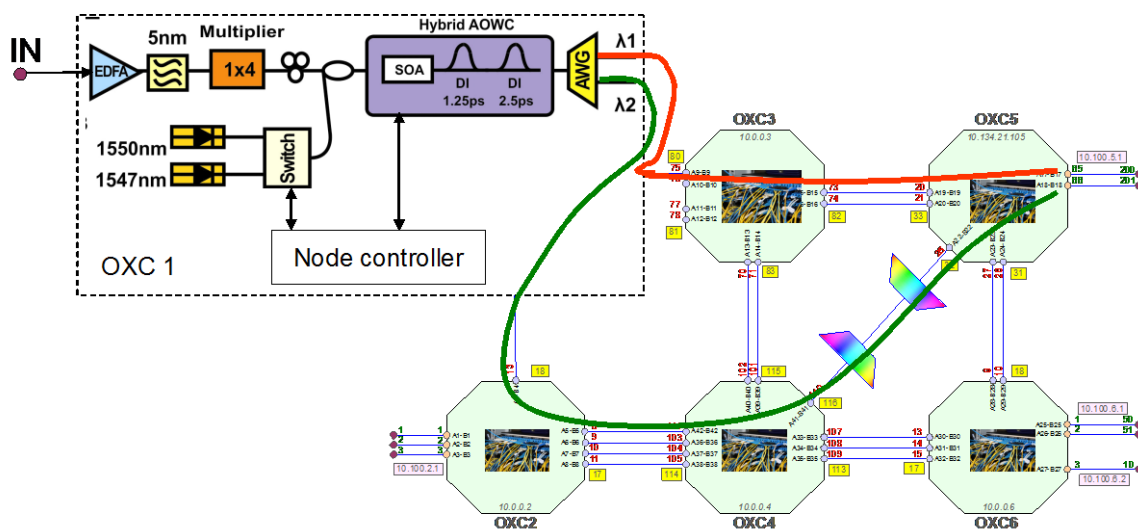
κόμβο OXC2 (πράσινη γραμμή) και στη συνέχεια στον τελικό κόμβο. Σε κάποια από τις ζεύξεις έχει τοποθετηθεί ένα σύστημα πολυπλεξίας μήκους κύματος (WDM) με 125km οπτική ίνα τύπου G.652 (Σχήμα 65). Η πυκνή WDM ζεύξη αποτελεί τμήμα ενός τοπικού/αστικού δικτύου με 40 κανάλια μεταφοράς, διάφορους οπτικούς κόμβους, σειρές από ενισχυτές ερβίου και οπτικές ίνες αντιστάθμισης διασποράς. Στη συνέχεια δρομολογητές με 10GbE οπτικές διεπαφές διασυνδέονται στο οπτικό σύστημα μεταγωγής ως τελικοί χρήστες όπως φαίνεται στο Σχήμα 66. Χρησιμοποιώντας ένα λογισμικό ελέγχου των διευθύνσεων προορισμού των οπτικών κόμβων γίνεται εφικτή η διασύνδεση των ηλεκτρονικών δρομολογητών μέσω του δικτύου μεταγωγής. Η διαδρομή διασύνδεσης μπορεί να καθοριστεί είτε χειροκίνητα (μεταβάλλοντας την αλληλουχία μετάβασης) είτε αυτόματα μέσω του συστήματος ελέγχου GMPLS. Σε αυτή την τελευταία περίπτωση, το σύστημα εκτελεί έναν αλγόριθμο διαλέγοντας τη συντομότερη διαδρομή που στην προκειμένη περίπτωση είναι η OXC3-OXC5. Κάθε εντολή επεξεργάζεται από τον κάθε ελεγκτή του οπτικού κόμβου και στη συνέχεια αρχίζει η σηματοδότηση του δικτύου για τον ορισμό της διαδρομής δρομολόγησης.



Σχήμα 66: Ηλεκτρονικοί δρομολογητές διασυνδεδεμένοι στο οπτικό δίκτυο μεταγωγής

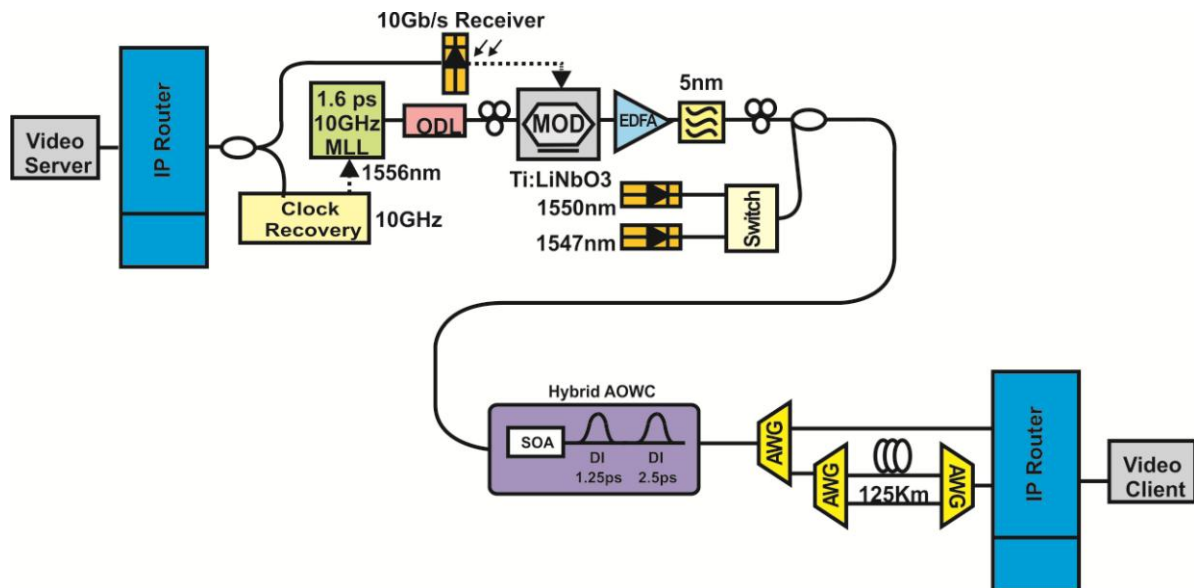
3.6.3 Οπτική μετάδοση βίντεο και φωνής χρησιμοποιώντας τον ολοκληρωμένο μετατροπέα μήκους κύματος

Το Σχήμα 67 απεικονίζει την κυκλωματική δομή του κόμβου OXC1. Η εισερχόμενη ακολουθία δεδομένων αλληλεπιδρά στον ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή με μια δίοδο λέιζερ με αποτέλεσμα τη μετατροπή μήκους κύματος λόγω ετεροδιαμόρφωσης κέρδους και φάσης. Το σήμα έχει αντεστραμμένη πολικότητα η οποία αποκαθίσταται με τα δύο συμβολόμετρα καθυστέρησης. Το πρώτο αναλαμβάνει την επιλογή των «μπλε» φασματικών συνιστωσών και την επιτάχυνση του μηχανισμού λειτουργίας ενώ το δεύτερο την καταπίεση της αδιαμόρφωτης φέρουσας και την αναστροφή του τελικού σήματος. Ανάλογα με το μήκος κύματος του λέιζερ που χρησιμοποιείται, τα δεδομένα δρομολογούνται είτε στους κόμβους OXC3-OXC5 ($\lambda_1 = 1547\text{nm}$) είτε στους κόμβους OXC2-OXC4-OXC5 ($\lambda_2 = 1550\text{nm}$). Και στις δύο περιπτώσεις ο ημιαγωγικός οπτικός ενισχυτής λειτουργεί με 140mA ρεύμα, η θερμοκρασία διατηρείται στους 20°C, ενώ η μεταβολή των φασματικών αποκρίσεων των DIs σε σχέση με το φέρον του λέιζερ ορίζεται σε ~ 0.4nm. Η μέση οπτική ισχύς για το συνεχές σήμα είναι ~ 8dBm ενώ για το διαμορφωμένο σήμα ρυθμοδότησης 10Gb/s περίπου 13dBm.



Σχήμα 67: Διασύνδεση του οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος με το δίκτυο μεταγωγής

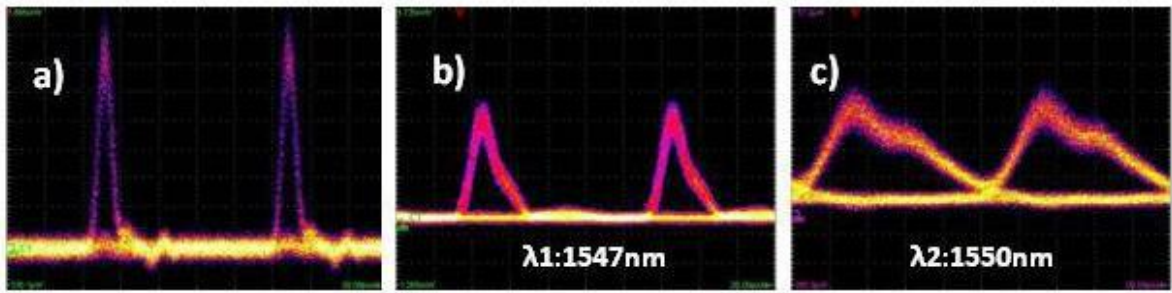
Για τη μετάδοση και μεταγωγή βίντεο μέσα από τον οπτικό μετατροπέα μήκους κύματος χρησιμοποιείται η πειραματική διάταξη που φαίνεται στο Σχήμα 68. Ένας διακομιστής και ένας τελικός αποδέκτης διασυνδέονται μέσω οπτικών διεπαφών σε δύο ηλεκτρονικούς δρομολογητές. Ο πρώτος δρομολογητής στέλνει δεδομένα βίντεο παρόμοιας ποιότητας με αυτά που χρησιμοποιούνται στις μεταδόσεις της επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης ενώ ο δεύτερος λαμβάνει τη μεταδιδόμενη πληροφορία. Η μέγιστη ρυθμοδότηση του συστήματος περιορίζεται σε 10 Gb/s λόγω των διαθέσιμων οπτικών διεπαφών που φέρουν οι ηλεκτρονικοί δρομολογητές.



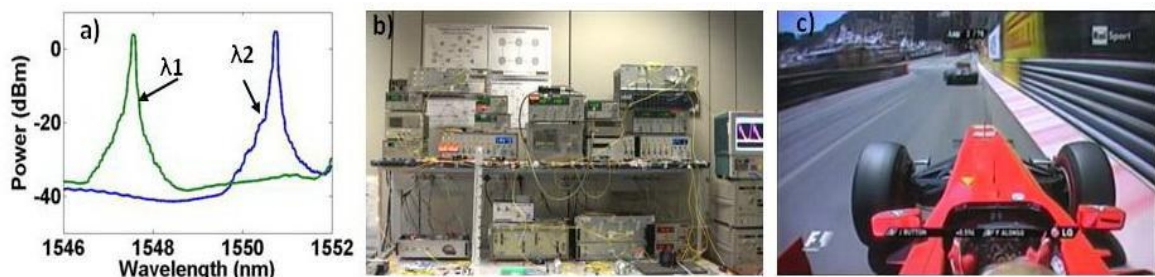
Σχήμα 68: Πειραματική διάταξη για μετάδοση και μεταγωγή βίντεο

Το Σχήμα 68 απεικονίζει την πειραματική διάταξη μετάδοσης και μεταγωγής, η οποία αποτελείται από τέσσερα βασικά τμήματα: το διακομιστή βίντεο, τις διατάξεις δρομολόγησης, το οπτικό δίκτυο μεταγωγής και τον τελικό χρήστη. Τα δεδομένα που παρέχονται από το δρομολογητή μέσω των οπτικών διεπαφών του, κατευθύνονται σε ένα διαχωριστή. Δύο διαδρομές ακολουθούν. Η μια εκτελεί τη διαδικασία ανάκτησης του σήματος ρολογιού τροφοδοτώντας ένα λέιζερ εγκλειδωσης ρυθμών, ενώ η δεύτερη επιτελεί οπτο-ηλεκτρονική μετατροπή χρησιμοποιώντας έναν 10Gb/s οπτικό δέκτη ακολουθούμενο από ένα διαμορφωτή LiNbO₃. Η κυματομορφή που προκύπτει εισάγεται στη συνέχεια μέσα στον οπτικό μετατροπέα μήκους κύματος.

Το Σχήμα 69 a) δείχνει την ροή δεδομένων βίντεο 10Gb/s που εισάγεται στον ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή για ετεροδιαμόρφωση κέρδους και φάσης. Αντίστοιχα το Σχήμα 69 b) απεικονίζει το μετατρεπόμενο μήκος κύματος σε $\lambda_1=1547\text{nm}$ ύστερα από κατάλληλη φασματική μετακίνηση των συμβολόμετρων καθυστέρησης αλλά με χρονική διεύρυνση των εξερχόμενων παλμών λόγω του στενού εύρους ζώνης των καναλιών του φράγματος περίθλασης (AWG). Το Σχήμα 69 c) απεικονίζει το μετατρεπόμενο μήκος κύματος σε $\lambda_2=1550\text{nm}$ εξερχόμενο από το πυκνό σύστημα πολυπλεξίας (DWDM). Το διάγραμμα ματιού παρουσιάζει μια καθαρή αλλά διευρυμένη κυματομορφή λόγω των στενών φίλτρων και της μη βέλτιστης αντιστάθμισης διασποράς. Το Σχήμα 70 a) απεικονίζει τα φάσματα των μετατρεπόμενων μηκών κύματος ενώ το Σχήμα 70 b) απεικονίζει την πειραματική διάταξη που περιλαμβάνει τον οπτικό μετατροπέα, τη συστοιχία από τα λέιζερ ανάδρασης, τα φράγματα περίθλασης και τα ενδιάμεσα στάδια οπτικής ενίσχυσης. Το Σχήμα 70 c) δείχνει ένα χαρακτηριστικό στιγμιότυπο του βίντεο μετάδοσης που διέρχεται μέσα από το σύστημα πολυπλεξίας (DWDM) χωρίς απώλεια πακέτων ή υποβάθμιση της



Σχήμα 69: Διαγράμματα ματιού a) Σήματος εισόδου, b) Μετατρεπόμενο μήκος κύματος σε $\lambda_1:1547\text{nm}$, c) Μετατρεπόμενο μήκος κύματος σε $\lambda_2: 1550\text{nm}$ μετά από το πυκνό σύστημα πολυπλεξίας (WDM)



Σχήμα 70: a) Φάσματα μετατρεπόμενων σημάτων μήκους κύματος, b) Πειραματική διάταξη συστήματος μεταγωγής, c) Στιγμιότυπο μεταδιδόμενου σήματος βίντεο



Σχήμα 71: Ηλεκτρονικός δρομολογητής με 10Gb/s οπτικές διεπαφές (αριστερά), Λογισμικό απεικόνισης της ποιότητας των μεταδιδόμενων σημάτων (δεξιά)

ποιότητας του σήματος. Το Σχήμα 72 εμφανίζει την ποιότητα μετάδοσης των σημάτων με σκοπό τη μέτρηση των πακέτων πληροφορίας που χάνονται κατά την οπτική μετάδοση και μεταγωγή. Όπως φαίνεται μόνο πέντε καρέ χάνονται κατά τη διάρκεια της μέτρησης χωρίς καμία απολύτως επίπτωση στην ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών. Με χρήση της ίδιας πειραματικής διάταξης είναι εφικτή η εξυπηρέτηση περισσότερων εφαρμογών, ταυτόχρονα, μέσω του συστήματος ελέγχου GMPLS.

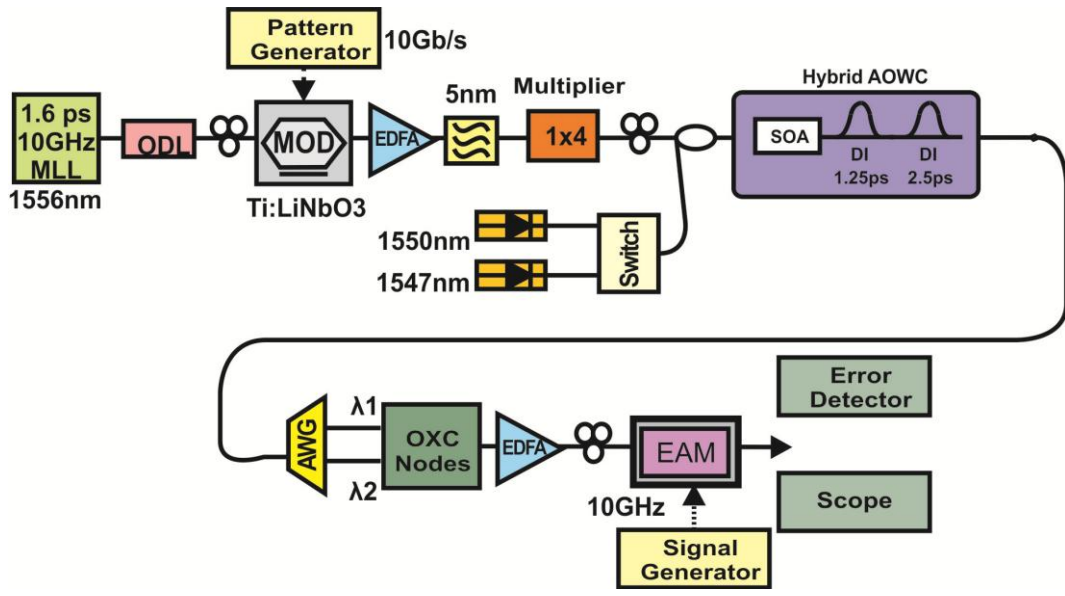
Name	Unit1:3:1 (MU120118A) Accumulated
Transmitted Bit Rate (bit/s)	6,258,144,791bit/s
Transmitted Bit Rate (%)	62.58%
Transmitted Rate (%)	82.14%
Transmitted Byte	70,404,128,896
Transmitted Frame	1,100,064,514
Transmitted Frame (fps)	12,222,939fps
Transmitted IPv4 Packet	0
Transmitted IPv4 Packet (pps)	0pps
Transmitted ARP Reply	0
Transmitted ARP Request	0
Transmitted Ping Reply	0
Transmitted Ping Request	0
Received Bit Rate (bit/s)	6,258,144,786bit/s
Received Bit Rate (%)	62.58%
Received Rate (%)	82.14%
Received Byte	70,404,128,846
Received Frame	1,100,064,505
Received Frame (fps)	12,222,939fps

Σχήμα 72: Ανάλυση ποιότητας μεταδιδόμενων πακέτων πληροφορίας

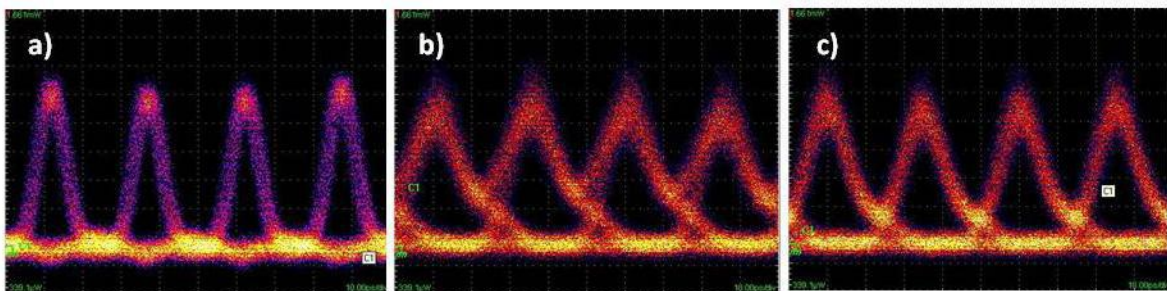
3.6.4 Οπτική μετάδοση και μεταγωγή δεδομένων σε ταχύτητες 40Gb/s χρησιμοποιώντας τον ολοκληρωμένο μετατροπέα μήκους κύματος

Για την επίδειξη ενός κυκλώματος μεταγωγής σε ταχύτητες 40Gb/s, η προηγούμενη πειραματική διάταξη εμπλουτίζεται με ένα σύστημα χρονικής πολυπλεξίας (Optical Time Division Multiplexing-OTDM) και ένα διαμορφωτή ηλεκτρο-απορρόφησης (EAM) για την αντίστοιχη οπτική αποπολυπλεξία όπως φαίνεται στο Σχήμα 73. Στον πομπό οι οπτικοί παλμοί παράγονται από ένα λέιζερ εγκλείδωσης ρυθμών, διαμορφώνονται με μια ψευδοτυχαία ακολουθία 2^7-1 και πολυπλέκονται έτσι ώστε να σχηματίσουν το σήμα ρυθμοδότησης 40Gb/s σε μήκος κύματος 1556nm. Στη συνέχεια το σήμα αυτό ενώνεται με την έξοδο πηγών συνεχούς κύματος σε μήκη 1547nm και 1550nm και όλα μαζί εισάγονται στο μετατροπέα μήκους κύματος για την ετεροδιαμόρφωση πλάτους και φάσης. Το τελικώς μετατρεπόμενο μήκος κύματος αποπολυπλέκεται σε τέσσερα κανάλια ρυθμοδότησης 10Gb/s με ένα διαμορφωτή ηλεκτροαπορρόφησης.

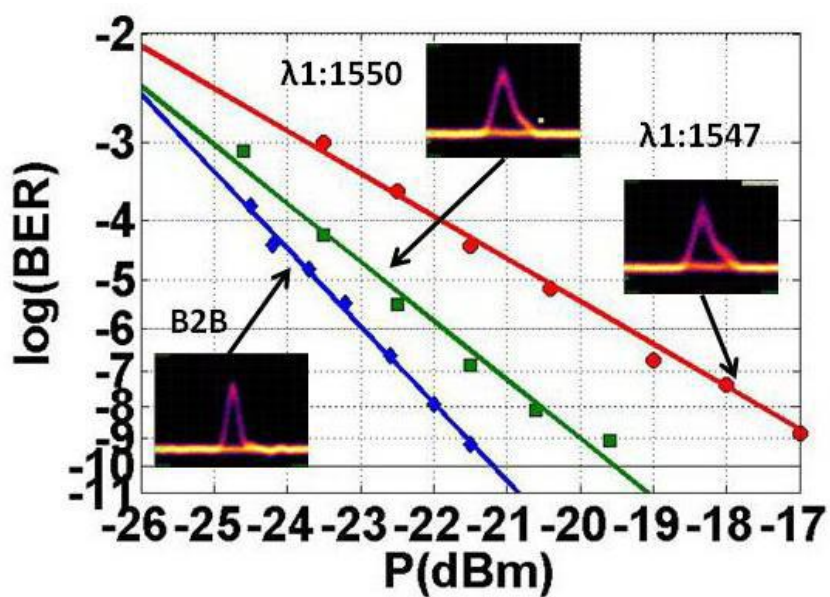
Το Σχήμα 73 a) απεικονίζει τα δεδομένα ρυθμοδότησης 40Gb/s τα οποία εισάγονται στον ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή για ετεροδιαμόρφωση πλάτους και φάσης. Το Σχήμα 73 b) εμφανίζει το μετατρεπόμενο μήκος κύματος σε λ_1 : 1547nm το οποίο διέρχεται από τους κόμβους OXC3-OXC5. Η χρονική διεύρυνση των παλμών οφείλεται κυρίως στο στενό εύρος ζώνης του φράγματος περίθλασης ενώ αντίστοιχα η ασυμμετρία της κυματομορφής στη φασματική διαφοροποίηση των αποκρίσεων του φράγματος περίθλασης (AWG) και των συμβολόμετρων



Σχήμα 73: Πειραματική διάταξη για μεταγωγή σε ταχύτητες 40Gb/s



Σχήμα 74: Διαγράμματα ματιού a) 40Gb/s σήματος εισόδου, b) Μετατρεπόμενο μήκος κύματος σε λ_1 :1547nm, c) Μετατρεπόμενο μήκος κύματος σε λ_2 : 1550nm



Σχήμα 75: Καμπύλες μετρήσεων λαθών για τα μετατρεπόμενα μήκη κύματος

καθυστέρησης. Το Σχήμα 73 c) απεικονίζει το μετατρεπόμενο μήκος κύματος σε $\lambda_2:1550\text{nm}$ το οποίο διέρχεται από τους οπτικούς κόμβους OXC2-OXC4-OXC6-OXC5). Τέλος το Σχήμα 75 εμφανίζει τις καμπύλες μετρήσεων λαθών και για τα δύο μετατρεπόμενα μήκη κύματος με ποινή ισχύος 2dB και 5dB αντίστοιχα.

Αναφορές

- [3.1] J. Gripp, J. E. Simsarian, J. D. LeGrange, P. G. Bernasconi and D. T. Neilson, "Architectures, Components, and Subsystems for Future Optical Packet Switches," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 16, 1394–1404, (2010).
- [3.2] D.J Blumenthal, J. Barton, N. Beheshti, J.E. Bowers, E. Burmeister, L.A. Coldren, M. Dummer, G. Epps, A. Fang, Y. Ganjali, J. Garcia, B. Koch, V. Lal, E. Lively, J. Mack, M. Masanovic, N. McKeown, K. Nguyen, S.C. Nicholes, H. Park, B. Stamenic, A. Tauke-Pedretti, H. Poulsen, and M. Sysakl, "Integrated Photonics for low-power networking," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 17, 458–471 (2010).
- [3.3] D. Chiaroni, R. Urata, J. Gripp, J.E. Simsarian, A. Gary, E. Sophie, T. Segawa, Y. Pointurier, C. Simonneau, Y. Suzaki, T. Nakahara, M. Thottan, A. L. Adamiecki and D. Nielson, "Demonstration of the Interconnection of Two Optical Packet Rings with a Hybrid Optoelectronic Packet Router", in Proc. ECOC 2010, Turin, Italy, (2010), PD 3.5.
- [3.4] H. Hu, H. Ji, M. Galili, M. Pu, H.C.H. Mulvad, L.K. Oxenlowe, K. Yvind, J.M. Hvam, and P. Jeppesen, "Silicon Chip based Wavelength Conversion of Ultra-High Repetition Rate Data Signals," in Proc. OFC 2011, Los Angeles (CA),USA, PDPA8.
- [3.5] L. Stampoulidis, D. Apostolopoulos, D. Petrantonakis, P. Zakyntinos, P. Bakopoulos, O. Zourarakı, E. Kehayas, A. Poustie, G. Maxwell, and H. Avramopoulos, "Enabling Tb/s photonic routing: Development of advanced hybrid integrated photonic devices to realize high-speed, all- optical packet switching," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* 14, 849-860 (2008).
- [3.6] D. Apostolopoulos, K. Vyrsokinos, P. Zakyntinos, N. Pleros and H. Avramopoulos, "An SOA-MZI NRZ Wavelength Conversion Scheme With Enhanced 2R Regeneration Characteristics", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 21, 1363-1365, 2009.
- [3.7] J. Leuthold, C.H. Joyner, B. Mikkelsen, G. Raybon, J.L. Pleumeekers, B.I. Miller, K. Dreyer and C.A. Burrus, "100Gbit/s all-optical wavelength conversion with integrated SOA delayed-interference configuration," *Elect. Lett.* 36, 1129-1130 (2000).
- [3.8] Y. Liu, E. Tangdionga, Z. Li, H. de Waardt, A.M.J. Koonen, G.D. Khoe, and H.J.S. Dorren, "Error-free 320 Gbit/s SOA-based wavelength conversion using optical filtering," in Proc. OFC 2006, Anaheim (CA), USA, PDP28.
- [3.9] C. Stamatıadis, K. Vyrsokinos, L. Stampoulidis, I. Lazarou, A. Maziotis, J. Bolten, M. Karl, T. Wahlbrink, P. De Heyn, Z. Sheng, D. Van Thourhout, and H. Avramopoulos, "Silicon-on-Insulator Nanowire Resonators for Compact and Ultra-High Speed All-Optical Wavelength Converters," *J. Lightw. Technol.*, 29, 3054-3060 (2011).
- [3.10] F. Gomez-Agis, O. Raz, S.J. Zhang, E. Tangdionga, L. Zimmermann, K. Voigt, C. Vyrsokinos, L. Stampoulidis and H.J.S. Dorren, "All-optical wavelength conversion at 160 Gbit/s using SOA and silicon-on- insulator photonic circuit," *Elect. Lett.* 45, 1132-1133 (2009).
- [3.11] J. Van Campenhout et al., "Electrically pumped InP-based microdisk lasers integrated with a nanophotonic silicon-on-insulator waveguide circuit," *Opt. Express*, 15, 6744-6749 (2007)
- [3.12] J. Hofrichter, O. Raz, L. Liu, G. Morthier, F. Horst, P. Regreny, T. De Vries, H.J.S. Dorren and B.J. Offrein, "All-optical wavelength conversion using mode switching in InP microdisc laser," *Elect. Lett.*, 47, 927-929 (2011).
- [3.13] J. Brouckaert et al, "Compact InAlAs/InGaAs metalsemiconductor- metal photodetectors integrated on SOI waveguides," *IEEE Photonic Technology Letters.*, 19, 1484-1486, (2007).

- [3.14] T. Aalto, M. Harjanne, M. Kapulainen, S. Ylinen, J. Ollila, V. Vilokkinen, L. Moerl, M. Moehrle, and R. Hamelin, "Integration of InP-based optoelectronics with silicon waveguides," in Proc. SPIE 2009, San Jose (CA), USA, 72180O.
- [3.15] M. Kapulainen et al, "Hybrid Integration of InP lasers with SOI waveguides using thermocompression bonding," in Proc. Group IV Photonics 2008, Sorrento, Italy, WD3.
- [3.16] L. Zimmermann, G.B. Preve, K. Voigt, G. Winzer, J. Kreissl, L. Moerl, C. Stamatiadis, L. Stampoulidis, and H. Avramopoulos, "High-precision flip-chip technology for all-optical wavelength conversion using SOI photonic circuit," in Proc. IEEE Int. Conf. on Group IV photonics, London, England, (2011), P2.4.
- [3.17] H. Weber, R. Ludwig, S. Ferber, C. Schmidt-Langhorst, M. Kroh, V. Marembert, C. Boerner, and C. Schubert, "Ultrahigh-speed OTDMtransmission technology," *J. Lightw. Technol.*, vol. 24, pp. 4616–4627, 2006.
- [3.18] H. C. Hansen Mulvad, L. K. Oxenløwe, M. Galili, A. Clausen, L. Gruner-Nielsen, and P. Jeppesen, "1.28 Tbit/s single-polarization serial OOK optical data generation and demultiplexing," *Electron. Lett.*, vol. 45, pp. 280–281, 2009.
- [3.19] T. Yamamoto, E. Yoshida, and M. Nakazawa, "Ultrafast nonlinear optical loop mirror for demultiplexing 640 Gbit/sTDMsignals," *Electron. Lett.*, vol. 34, pp. 1013–1014, 1998.
- [3.20] H. Hu, H. C. H. Mulvad, M. Galili, E. Palushani, A. T. Clausen, L. K. Oxenløwe, and P. Jeppesen, "Polarization-insensitive 640 Gbit/s demultiplexing using a polarization maintaining highly non-linear fibre," presented at the Photonics in Switching, Pisa, Italy, 2009, paper Fr11-2.
- [3.21] L. Zimmermann, G. B. Preve, T. Tekin, T. Rosin and K. Landles, "Packaging and Assembly for Integrated Photonics—A Review of the ePIXpack Photonics Packaging Platform", *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 3,pp. 645-651, (2011).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Μεταγωγή πακέτων πληροφορίας σε υψίρρυθμες ταχύτητες λειτουργίας με χρήση φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων σε πυρίτιο

4.1 Εισαγωγή

Η αυξανόμενη ζήτηση για περισσότερες ευρυζωνικές εφαρμογές στο διαδίκτυο έχει περιορίσει σημαντικά τη χωρητικότητα και την απόδοση των οπτικών δικτύων [4.1]. Οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι συνεχίζουν να επεκτείνουν τις ηλεκτρονικές υποδομές τους με απόκτηση νέων συστημάτων μετάδοσης και επεξεργασίας με στόχο να ανταποκριθούν στις νέες απαιτήσεις επικοινωνίας. Ωστόσο, το μέγεθος, η κατανάλωση ενέργειας, η θερμότητα διάχυσης και η πολυπλοκότητα διασύνδεσης του ηλεκτρονικού εξοπλισμού εγείρει ανησυχίες για την πρακτική λειτουργία των σύγχρονων σταθμών διαχείρισης πληροφορίας [4.2]. Οι ερευνητικές προσπάθειες εστιάζονται πλέον στη δημιουργία αμιγώς οπτικών δρομολογητών που προσφέρουν υψηλή χωρητικότητα μέσα σε συμπαγές και ενεργειακά αποδοτικές διατάξεις [4.3]. Η μέθοδος για την κατασκευή φωτονικών στοιχείων μικρού μεγέθους στηρίζεται σε τεχνικές ολοκλήρωσης είτε σε InP είτε σε SOI [4.4][4.5].

Η μονολιθική ολοκλήρωση σε InP έχει κυρίαρχη θέση στην κατασκευή φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων για μετατροπή μήκους κύματος και οπτική μεταγωγή [4.6][4.7]. Με τη συνεχή πρόοδο των τεχνικών ολοκλήρωσης είναι εφικτή η ολοκλήρωση InP διατάξεων με παθητικά κυκλώματα σε πυρίτιο ή γυαλί υλοποιώντας ακόμα πιο απαιτητικές λειτουργίες όπως αποθήκευση και συγχρονισμό δεδομένων [4.8]. Πρόσφατα η καινούρια τάση απαιτεί την ολοκλήρωση InP και πυριτίου σε ένα κοινό υπόστρωμα προκειμένου να αναπτυχθούν νέα κυκλώματα με χαμηλότερες απώλειες σύζευξης και πιο αποδοτική λειτουργία. Υπό αυτό το πρίσμα έρχονται στο προσκήνιο υβριδικές μορφές ολοκλήρωσης οι οποίες στοχεύουν να συνδυάσουν την επεξεργαστική ισχύ InP με τη φθηνή κατασκευή σε πυρίτιο [4.9]. Το ερευνητικό ενδιαφέρον εστιάζεται στη δημιουργία μιας αμιγώς οπτικής πλατφόρμας δρομολόγησης χρησιμοποιώντας υβριδικά ολοκληρωμένα στοιχεία που εκτελούν λειτουργίες

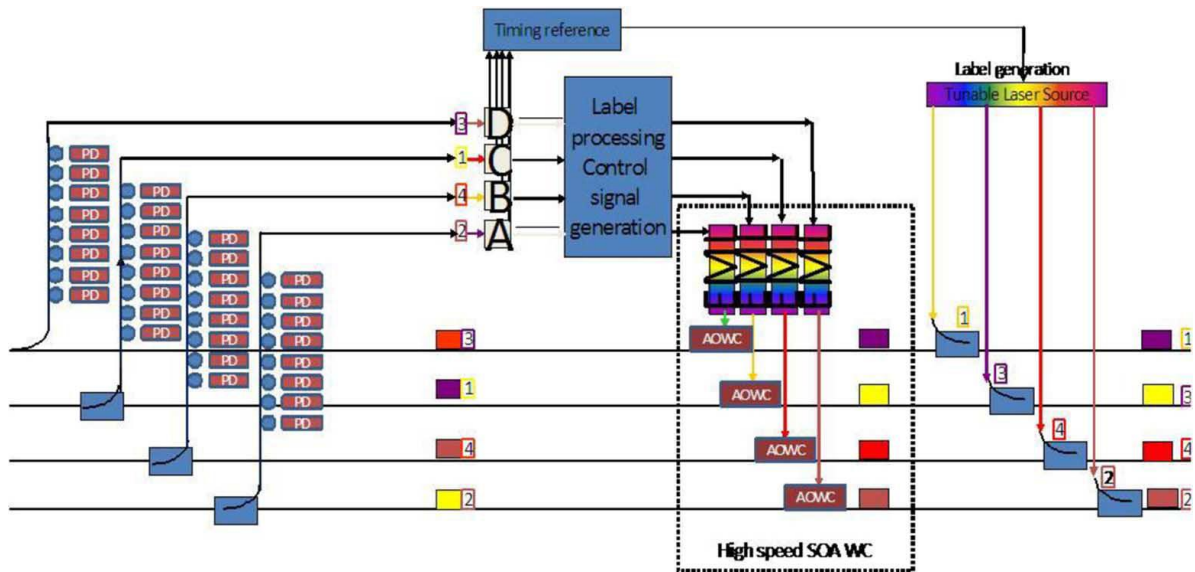
ανίχνευσης επικεφαλίδας, μετατροπής μήκους κύματος, μετάδοσης και μεταγωγής δεδομένων [4.10][4.11]. Ο συγχρονισμός τους μπορεί να επιτευχθεί με γραμμές καθυστέρησης [4.12] ή δομές μικρο-δακτυλίου [4.13].

4.2 Υψίρρυθμο κύκλωμα δρομολόγησης με χρήση φωτονικών και ηλεκτρονικών στοιχείων

Το Σχήμα 76 αναπαριστά μια φωτονική αρχιτεκτονική δρομολόγησης με συγχρονισμένα πακέτα πληροφορίας που εισέρχονται σε διαφορετικά μήκη κύματος. Το περιεχόμενο τους (payload) έχει διαμόρφωση πλάτους και μεταφέρει δεδομένα σε ταχύτητες 160 Gb/s. Κατάλληλες ετικέτες τοποθετούνται μπροστά από τη διαμορφωμένη πληροφορία μέσω των οποίων καθορίζεται η διαδρομή του πακέτου μέσα στο δίκτυο. Η διαδικασία μεταγωγής ξεκινά με πακέτα που φθάνουν στον κόμβο σε προκαθορισμένες χρονοθυρίδες και στη συνέχεια τρία συστήματα αναλαμβάνουν τη δρομολόγηση τους. Το πρώτο εκτελεί ανίχνευση επικεφαλίδας με συντονιστές δακτυλίου δεύτερης τάξης οι οποίοι φέρουν στη θύρα πτώσης ολοκληρωμένες φωτοδιόδους. Τα παραγόμενα ηλεκτρικά σήματα προωθούνται στη συνέχεια για ηλεκτρονική επεξεργασία, με τον κεντρικό επεξεργαστή να δημιουργεί σήματα ελέγχου τα οποία οδηγούν το σύστημα μετατροπής μήκους κύματος.

Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει ηλεκτρο-διαμορφωμένα λέιζερ (Electro Modulated Lasers-EMLs) και μετατροπείς μήκους κύματος υψηλής ταχύτητας. Τα EMLs περιλαμβάνουν ένα λέιζερ και ένα διαμορφωτή ηλεκτρο-απορρόφησης (Electro Absorption Modulator-EAM) στο ίδιο υπόστρωμα και οδηγώντας τον EAM με το σήμα που παράγει ο ηλεκτρονικός επεξεργαστής επιτυγχάνεται ηλεκτρο-οπτική μετατροπή. Τα οπτικά πλέον σήματα ελέγχου χρησιμοποιούνται ως είσοδος στους οπτικούς μετατροπείς για την αλλαγή των μηκών κύματος των εισερχόμενων πακέτων πληροφορίας υποστηρίζοντας με αυτόν τον τρόπο τη διαδικασία δρομολόγησης. Οι οπτικοί μετατροπείς μήκους κύματος αποτελούνται από έναν ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή και δύο συμβολόμετρα καθυστέρησης. Ο ημιαγωγικός ενισχυτής χρησιμοποιείται για την ετεροδιαμόρφωση κέρδους και φάσης ενώ τα συμβολόμετρα καθυστέρησης για την επιλογή των φασματικών συνιστωσών με τετέρισμα (chirp) και την αναστροφή της πόλωσης των τελικών σημάτων. Μια τέτοια δομή οπτικού μετατροπέα μπορεί να υποστηρίξει ταχύτητες έως και 160Gb/s [4.14].

Η δρομολόγηση των πακέτων πληροφορίας μπορεί να επιτευχθεί με μια μονάδα μεταγωγής υλοποιημένη με συστοιχίες από συντονιστές δακτυλίου ανώτερης τάξης [4.15][4.16]. Ανάλογα με το μήκος κύματος της επικεφαλίδας ενεργοποιείται μια διαφορετική ομάδα από φωτοδιόδους, ηλεκτρο-διαμορφωτές και μετατροπείς μήκους κύματος αλλάζοντας το χρώμα των εισερχόμενων πακέτων πληροφορίας. Τα τελικώς μετατρεπόμενα σήματα εισάγονται στη μήτρα

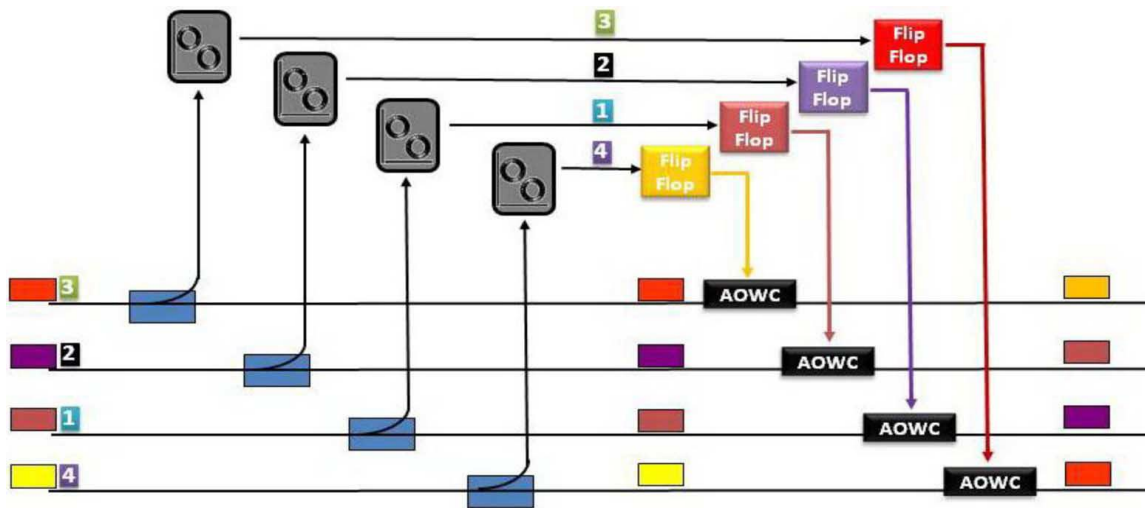


Σχήμα 76: Αρχιτεκτονική δρομολόγησης πακέτων πληροφορίας

μεταγωγής και ανάλογα πλέον με το καινούριο τους χρώμα δρομολογούνται σε συγκεκριμένες εξόδους. Η μονάδα μεταγωγής μπορεί να κατασκευαστεί σε υποστρώματα πυριτίου με κυματοδηγούς χαμηλής απώλειας $\sim 0.7\text{dBm/m}$ [4.24]. Χρησιμοποιώντας μάλιστα συντονιστές δακτυλίου με ολοκληρωμένα θερμαντικά στοιχεία είναι εφικτή η αντιμετάθεση των θυρών εξόδου της μήτρας και η διασφάλιση προστασίας του δικτύου από περιπτώσεις αστοχίας ή καταστροφής του υλικού. Το συνολικό σύστημα δρομολόγησης μπορεί να υποστηρίξει ταχύτητες 160Gb/s με την κατανάλωση ισχύος να καθορίζεται κατά κύριο λόγο από τη λειτουργία των μετατροπέων μήκους κύματος.

4.3 Αμιγώς οπτικό κύκλωμα δρομολόγησης με χρήση φωτονικών και ηλεκτρονικών στοιχείων

Το Σχήμα 77 απεικονίζει ένα αμιγώς οπτικό σύστημα δρομολόγησης που εκτελεί μεταγωγή δεδομένων χρησιμοποιώντας συντονιστές δακτυλίου, οπτικούς μανδαλωτές (Optical Flip Flops) και μετατροπείς μήκους κύματος υψηλής ταχύτητας. Η διαδικασία μεταγωγής ξεκινά με πακέτα που φθάνουν στον κόμβο του δικτύου σε προκαθορισμένες χρονοθυρίδες και σε διαφορετικά μήκη κύματος και στη συνέχεια διαβιβάζονται σε τρία διαδοχικά συστήματα επεξεργασίας. Το πρώτο αναλαμβάνει την ανίχνευση της επικαφαλίδας και την εξαγωγή της χρησιμοποιώντας ένα συντονιστή δακτυλίου δεύτερης τάξης με φασματική απόκριση στενού εύρους ημίσειας ισχύος και θερμαντικά στοιχεία για τη μεταβολή των συναρτήσεων μεταφοράς τους. Το δεύτερο σύστημα λαμβάνει τις επικεφαλίδες και οδηγεί υβριδικά ολοκληρωμένους οπτικούς μανδαλωτές οι οποίοι αποτελούνται από συζευγμένες συμβολομετρικές διατάξεις ημιαγωγίμου



Σχήμα 77: Αμιγώς οπτικό σύστημα δρομολόγησης πακέτων πληροφορίας

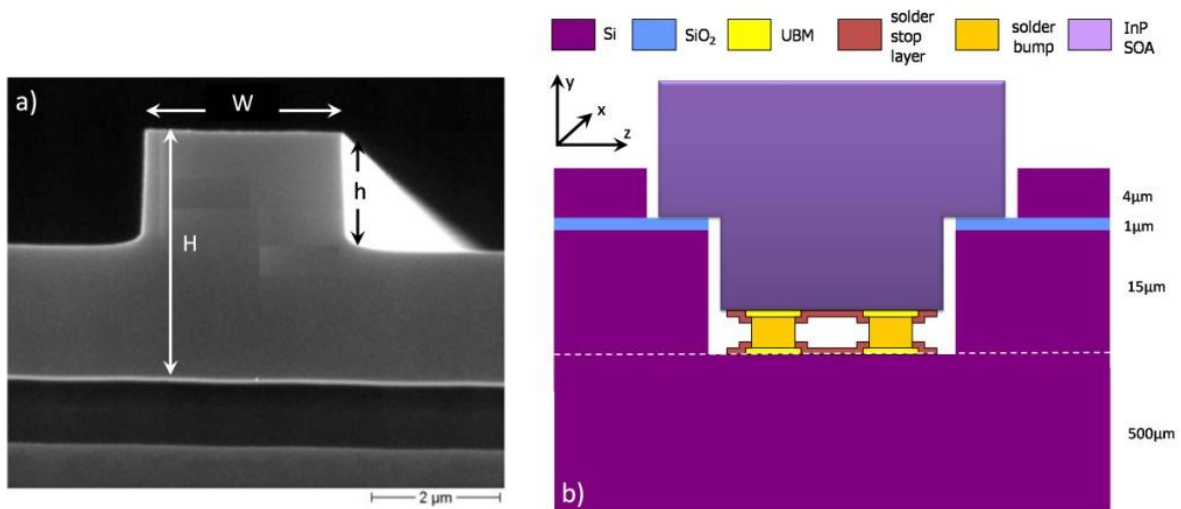
ενισχυτή [4.21]. Τα κυκλώματα αυτά είναι εφικτό να κατασκευαστούν και σε υπόστρωμα πυριτίου χρησιμοποιώντας συζευγμένες διατάξεις συντονιστών δακτυλίου [4.17]. Η κυματομορφή των σημάτων εξόδου του μανδαλωτή καθορίζεται αποκλειστικά και μόνο από τη συχνότητα των εξαγόμενων επικεφαλίδων που δρουν ως παλμοί ενεργοποίησης-απενεργοποίησης παράγοντας πακέτα συνεχούς κύματος με χρονική διάρκεια συγκρίσιμη με το μήκος των αρχικών πακέτων πληροφορίας.

Τα σήματα αυτά χρησιμοποιούνται στη συνέχεια στους μετατροπείς μήκους κύματος υψηλής ταχύτητας. Το σύστημα μετατροπής μήκους κύματος αποτελείται από έναν ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή με χρονική ανάκαμψη κέρδους 18 ps και ένα συσκευασμένο φωτονικό στοιχείο με δύο συμβολόμετρα καθυστέρησης με χαμηλές απώλειες μετάδοσης και φασματικές αποκρίσεις υψηλού λόγου σβέσης. Ο ημιαγωγικός ενισχυτής χρησιμοποιείται για ετεροδιαμόρφωση κέρδους και φάσης ενώ τα συμβολόμετρα καθυστέρησης για επιτάχυνση της χρονικής ανάκαμψης του μετατρεπόμενου σήματος και αποκατάσταση της πολικότητάς του. Στο φωτονικό πλινθίο έχουν ολοκληρωθεί επίσης θερμαντικά στοιχεία για τη μεταβολή των συναρτήσεων μεταφοράς των χαρακτηριστικών φίλτρου. Αυτό είναι σημαντικό καθώς στον κόμβο του δικτύου εισέρχονται πακέτα πληροφορίας σε διαφορετικά μήκη κύματος και ανάλογα με τις επικεφαλίδες που φέρουν ενεργοποιούνται διαφορετικοί οπτικοί μανδαλωτές και παράγονται διαφορετικά σήματα για μετατροπή μήκους κύματος. Με την υπόθεση ότι ο ημιαγωγικός οπτικός ενισχυτής έχει ένα φασματικό περιεχόμενο 40nm, τότε σε αυτή την περιοχή είναι δυνατή η μετατροπή πολλαπλών μηκών κύματος χρησιμοποιώντας την περιοδική συνάρτηση των συμβολόμετρων καθυστέρησης.

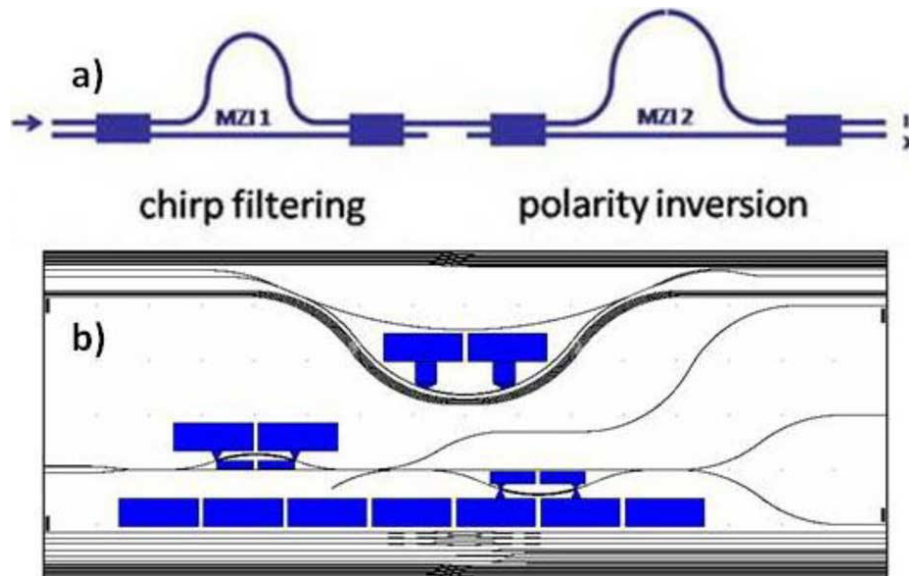
4.4 Φωτονικά ολοκληρωμένα στοιχεία για την εκτέλεση διάφορων λειτουργιών δρομολόγησης

A. Ολοκληρωμένο κύκλωμα συμβολόμετρου καθυστέρησης για μετατροπή μήκους κύματος

Η κατασκευή φωτονικών ολοκληρωμένων στοιχείων σε πυρίτιο απαιτεί μια οπτική τεχνολογία ικανή να παρέχει χαμηλές απώλειες κυματοδηγών και υψηλή απόδοση σύζευξης. Αυτό μπορεί να εξασφαλιστεί με την ολοκλήρωση κυκλωμάτων σε υποστρώματα SOI πάχους 4μm προσφέροντας απώλειες μετάδοσης της τάξης 0.1 dB/cm και απώλειες σύζευξης περίπου 0.5dB. Η δομή των κυματοδηγών που χρησιμοποιείται σε τέτοιες περιπτώσεις (rib waveguides) φαίνεται στο Σχήμα 78 a) με διαστάσεις: ύψος πλευρών $h=2\mu\text{m}$, πλάτος $W=3.2\mu\text{m}$, και ύψος πυριτίου 4μm. Για την ολοκλήρωση ενεργών στοιχείων άλλου υλικού πάνω σε SOI δημιουργείται μια κατακόρυφη τομή στην οποία επικάθονται σφαιρίδια χρυσού όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 78 β). Στη συνέχεια το ενεργό στοιχείο τοποθετείται μέσα στην εγκοπή, ευθυγραμμίζεται με τον κυματοδηγό SOI και συγκολλάται με τήξη των σφαιριδίων χρυσού. Με αυτή την τεχνική αναπτύσσεται ο μετατροπέας μήκους κύματος του Κεφαλαίου 3 ο οποίος περιλαμβάνει έναν ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή και δύο συμβολόμετρα καθυστέρησης όπως φαίνεται στο Σχήμα 79 a,b). Η αρχή λειτουργίας του είναι απλή καθώς με τον SOA εξασφαλίζεται η ετεροδιαμόρφωση κέρδους και φάσης ενώ με τα DIs η επιτάχυνση της αργής ανάκαμψης του σήματος εξόδου και η αποκατάσταση της πολικότητας του. Δεδομένης της περιοδικής απόκρισης των συμβολόμετρων καθυστέρησης είναι εφικτή η μετατροπή μήκους κύματος σε ένα ευρύ φάσμα τιμών που εξαρτάται από την καμπύλη κέρδους του ημιαγωγικού ενισχυτή.



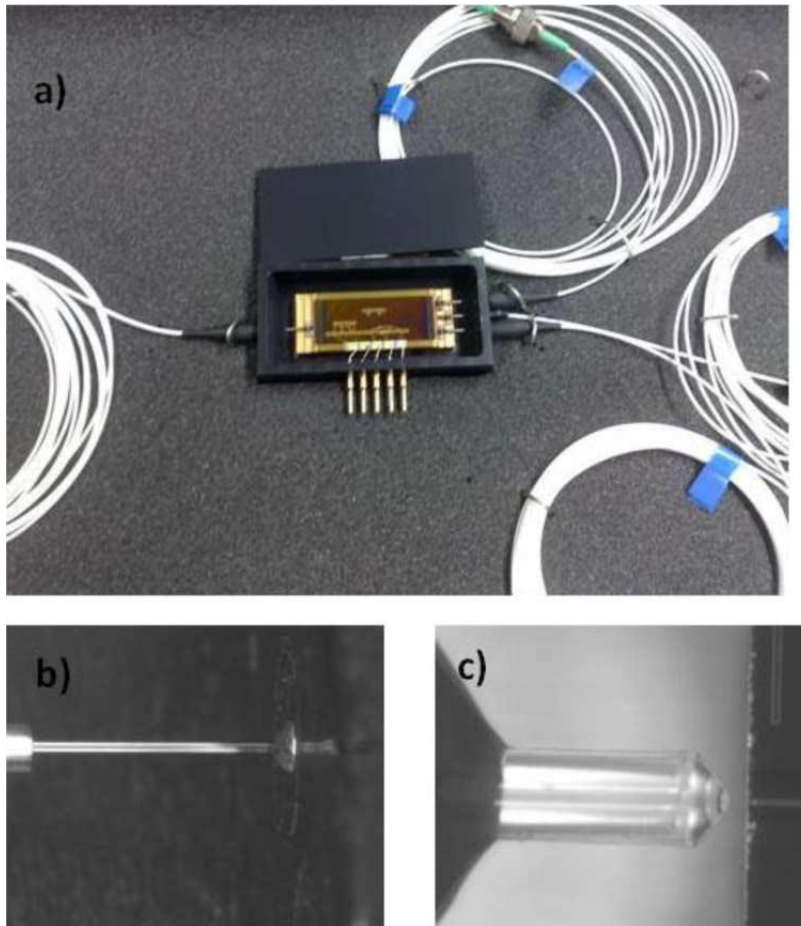
Σχήμα 78: a) Δομή ενός κυματοδηγού σε υπόστρωμα SOI 4μm, b) Τεχνική ολοκλήρωσης ενεργών στοιχείων InP σε πυρίτιο



Σχήμα 79: a) Διάταξη συμβολόμετρων καθυστέρησης για επιλογή συχνοτικών συνιστωσών με τετέρισμα (chirp) και αναστροφή πολικότητας (polarity inversion), b) Μάσκα σχεδιασμού του παθητικού στοιχείου

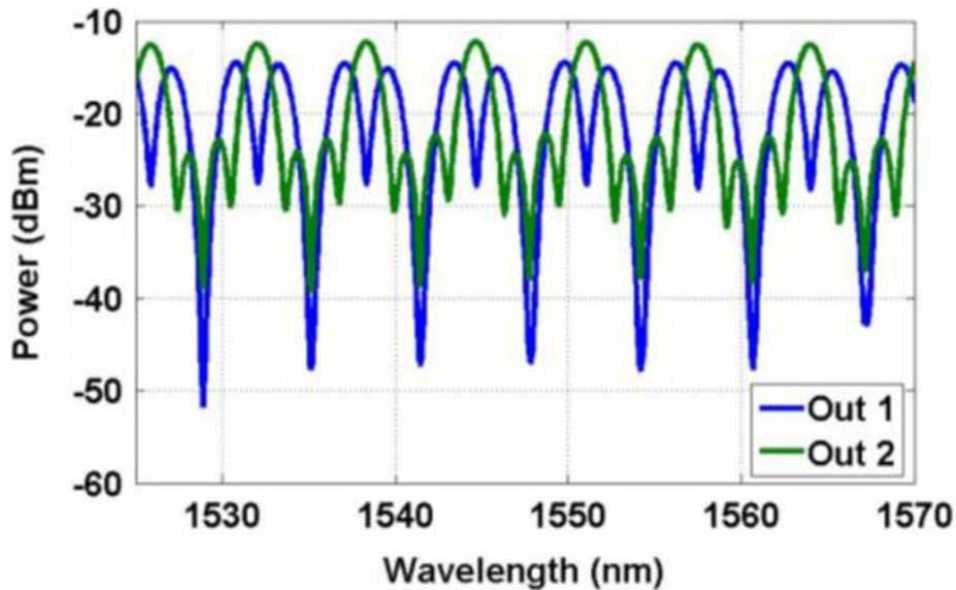
Για τη συσκευασία της διάταξης που περιλαμβάνει τα δύο συμβολόμετρα καθυστέρησης απαιτείται μια μεταλλική κατασκευή με οπές για τις ηλεκτρικές και οπτικές διασυνδέσεις. Με πλευρική εκλέπτυνση των κυματοδηγών η απώλεια σύζευξης με απλές μονορρυθμικές ίνες υπολογίζεται περίπου 3dB ενώ για την επίτευξη χαμηλότερων απωλειών είναι απαραίτητη η χρήση οπτικών ινών εστίασης. Παρόλο που οι απώλειες σε αυτή την περίπτωση κυμαίνονται <1dB, το μικρό σημείο εστίασης δυσχεραίνει τη διαδικασία ευθυγράμμισης καθώς οποιαδήποτε μεταβολή από αυτό αυξάνει δραματικά το ποσοστό απόσβεσης. Έχει παρατηρηθεί απώλεια 1 dB για 0.5μm απόκλιση κατά την X-κατεύθυνση. Λαμβάνοντας υπόψη ότι μετατόπιση μπορεί να συμβεί τόσο στον X όσο και στον Y άξονα, γίνεται φανερό ότι η ευθυγράμμιση των ινών και η στερέωσή τους είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθεί με ακρίβεια κάτω από ένα μικρόμετρο και αυτό μπορεί να γίνει μόνο με ενεργό τρόπο.

Η διαδικασία που ακολουθείται στηρίζεται σε ένα πολυαξονικό μηχανικό σύστημα. Η ίνα σφραγίζεται σε έναν εξωτερικό μεταλλικό σωλήνα, ευθυγραμμίζεται με τον κυματοδηγό πυριτίου και όταν βελτιστοποιείται στερεώνεται με ένα σύστημα συγκόλλησης λέιζερ. Στη συνέχεια γίνεται ένας πειραματικός έλεγχος για τη λειτουργικότητα του στοιχείου και για το ποσοστό απώλειας που εμφανίζει. Ένα κεντρικό ζήτημα κατά τη συσκευασία είναι η μη ορθή ευθυγράμμιση των κυματοδηγών η οποία διορθώνεται μέσω ενεργών τεχνικών στερέωσης των οπτικών ινών, συρρίκνωση της κολλώσης ουσίας που χρησιμοποιείται κατά τη συγκόλληση και θερμικών μεθόδων μετακίνησης των σημείων ευθυγράμμισης.



Σχήμα 80: a) Συσκευασμένο παθητικό στοιχείο, b) Οπτική ίνα σφραγισμένη σε ένα εξωτερικό μεταλλικό σωλήνα, c) Οπτική ίνα εστίασης ευθυγραμμισμένη στον κυματοδηγό του φωτονικού ολοκληρωμένου κυκλώματος

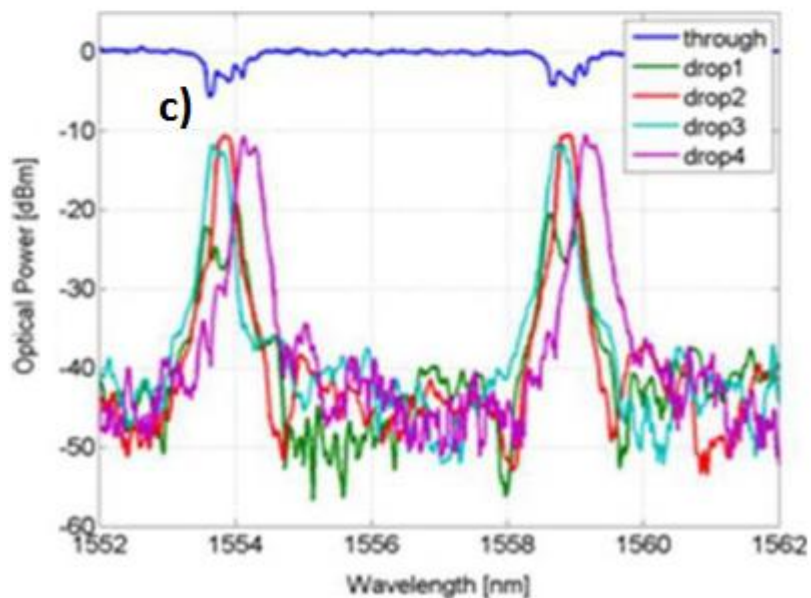
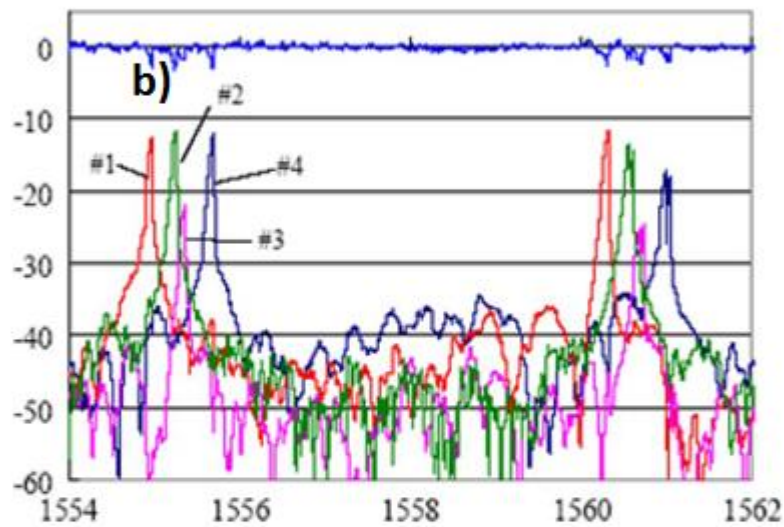
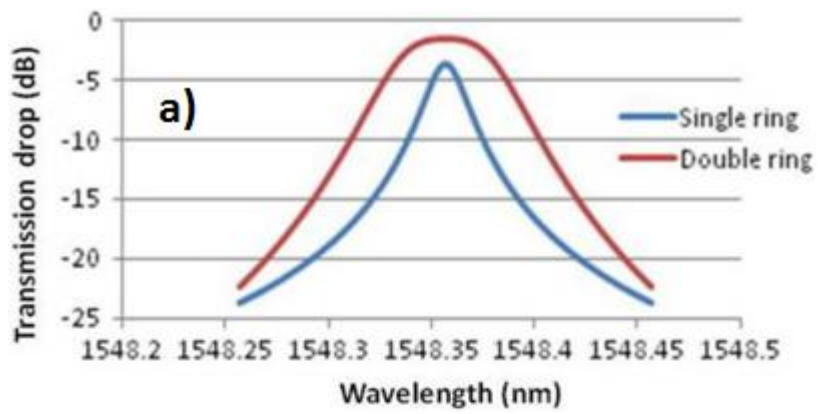
Το Σχήμα 80 a) δείχνει το συσκευασμένο παθητικό στοιχείο με ίνες εισόδου-εξόδου συζευγμένες στους κυματοδηγούς των δύο συμβολόμετρων καθυστέρησης ενώ το Σχήμα 80 b) απεικονίζει την ίνα εστίασης σφραγισμένη σε ένα μεταλλικό σωλήνα. Το Σχήμα 80 c) εμφανίζει την οπτική ίνα ευθυγραμμισμένη στο κυματοδηγό του φωτονικού πλινθίου και στερεωμένη σε μόνιμη θέση. Για τον οπτικό χαρακτηρισμό του συσκευασμένου οπτικού κυκλώματος χρησιμοποιείται μια επίπεδη πηγή εκπομπής θορύβου για την εξαγωγή των φασματικών αποκρίσεων των συμβολόμετρων καθυστέρησης. Η πόλωση διατηρείται σταθερή με τη χρήση ενός πολωτή λόγου σβέσης 30dB ενώ οι χαρακτηριστικές φίλτρου καταγράφονται από έναν οπτικό φασματικό αναλυτή ακρίβειας 10pm. Η φασματική ελεύθερη περιοχή (FSR) των δύο συμβολόμετρων παραμένει σταθερή και ίση με 6nm και 3nm αντίστοιχα (Σχήμα 81) ενώ με την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στα θερμαντικά στοιχεία παρατηρείται 1.5nm μετατόπιση μήκους κύματος για 300mW ηλεκτρική ισχύ. Ο μέγιστος λόγος σβέσης της συνάρτησης μεταφοράς των δύο συμβολόμετρων καθυστέρησης υπολογίζεται 35dB ενώ η απώλεια μετάδοσης μέσα από το οπτικό κυκλώμα περίπου 8dB.



Σχήμα 81: Φασματική απόκριση των συμβολομέτρων καθυστέρησης

B. Συντονιστές δακτυλίου ανώτερης τάξης σε πυρίτιο

Για την ανίχνευση και εξαγωγή της επικεφαλίδας των πακέτων πληροφορίας είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν συντονιστές δακτυλίου ανώτερης τάξης. Αυτές οι διατάξεις αποτελούνται από δύο ή περισσότερους συζευγμένους δακτυλίους με κατάλληλο εύρος ημίσειας ισχύος, επίπεδη φασματική απόκριση και υψηλότερη ισχύ μετάδοσης στη θύρα εξόδου. Για τη διερεύνηση των χαρακτηριστικών λειτουργίας τους προσομοιώνονται συντονιστές δακτυλίου με ακτίνα 19μm. Η συνάρτηση μεταφοράς του συντονιστή δακτυλίου δεύτερης τάξης, λαμβάνοντας υπόψη τιμές απώλειας 3dB/cm, εμφανίζει λόγο καταπίεσης (crosstalk) 20dB, πιο ευρύ φασματικό περιεχόμενο και πιο επίπεδη συνάρτηση μεταφοράς από εκείνη του συντονιστή δακτυλίου πρώτης τάξης [4.18]. Το Σχήμα 82 a) απεικονίζει τις αποκρίσεις των δύο δομών και τα διαφορετικά χαρακτηριστικά λειτουργίας τους. Για την κατασκευή τους χρησιμοποιείται οπτική λιθογραφία 193nm [4.19]. Το Σχήμα 82 b) παρουσιάζει τις φασματικές αποκρίσεις τεσσάρων συντονιστών δακτυλίου πρώτης τάξης διασυνδεδεμένους σε σειρά. Η ελεύθερη φασματική περιοχή (FSR) είναι περίπου 5.34 nm, ενώ το εύρος ζώνης ημίσειας ισχύος υπολογίζεται 0,04 nm δίνοντας ένα παράγοντα ποιότητας $Q \sim 40000$. Η χαμηλότερη σε ισχύ απόκριση του καναλιού 3 οφείλεται σε κατασκευαστικές ανοχές οι οποίες προκαλούν εκφυλισμό της χαρακτηριστικής του φίλτρου. Για την επίλυση των περιορισμών αυτών μπορεί να αυξηθεί η συγκέντρωση του πεδίου στον κυματοδηγό χρησιμοποιώντας ρηχή χάραξη κυματοδηγών ή να μειωθεί η συγκέντρωση και να γίνει χρήση TM πόλωσης αντί TE. [4.20].



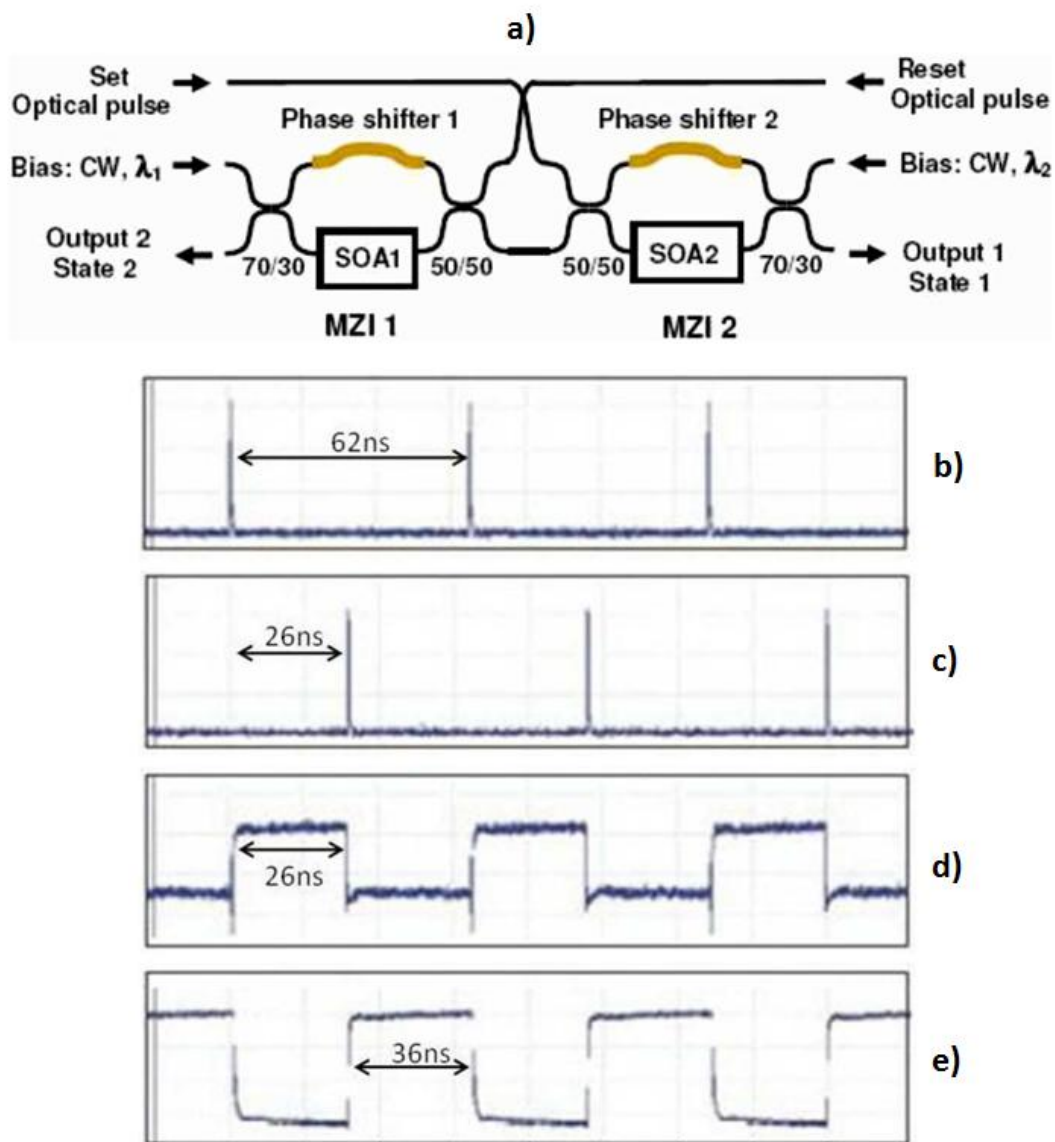
Σχήμα 82: a) Σύγκριση συνάρτησης μεταφοράς συντονιστή δακτυλίου πρώτης και δεύτερης τάξης, b) Φασματική απόκριση 4 συντονιστών δακτυλίου πρώτης τάξης σε διάταξη σειράς, c) Φασματική απόκριση 4 συντονιστών δακτυλίου δεύτερης τάξης σε διάταξη σειράς

Το Σχήμα 82 c) απεικονίζει τις φασματικές αποκρίσεις τεσσάρων συντονιστών δακτυλίου δεύτερης τάξης διασυνδεδεμένους σε διάταξη σειράς. Λόγω των κατασκευαστικών ανοχών οι συχνότητες συντονισμού των συζεγμένων αντηχείων δεν επικαλύπτονται πλήρως με αποτέλεσμα το διαχωρισμό των συναρτήσεων μεταφοράς. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να επιλυθεί με τη χρήση ανεξάρτητων θερμαντικών στοιχείων για τη φασματική ολίσθηση των επιμέρους αποκρίσεων. Θερμαντές τιτανίου είναι δυνατόν να ολοκληρωθούν πάνω από τις φωτονικές μικρο-διατάξεις μεταβάλλοντας το δείκτη διάθλασής τους και τη χαρακτηριστική φίλτρου τους. Η οδήγησή τους μπορεί να επιτευχθεί από συγκεκριμένες επιφάνειες χρυσού οι οποίες διασυνδέονται μέσω ενός στρώματος προστασίας με τις αντιστάσεις των θερμαντικών στοιχείων.

Γ. Οπτικοί μανδαλωτές

Μια κρίσιμη λειτουργία σε δρομολογητές δικτύου είναι η παραγωγή σημάτων ελέγχου για την εκτέλεση αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος. Αυτή μπορεί να υλοποιηθεί με οπτικούς μανδαλωτές οι οποίοι αποθηκεύουν την πληροφορία μεταγωγής με τη χρήση κατάλληλων σημάτων ελέγχου. Διάφορες τοπολογίες έχουν προταθεί για τη δημιουργία τέτοιων οπτικών διατάξεων στηριζόμενες είτε σε λέιζερ δακτυλίου ίνας [4.25], είτε σε λέιζερ μικρο-δίσκου [4.23], είτε σε συμβολομετρικές διατάξεις με ημιαγωγίσιμους οπτικούς ενισχυτές [4.21]. Το σχηματικό διάγραμμα ενός συμβολομετρικού οπτικού μανδαλωτή φαίνεται στο Σχήμα 83 a) όπου διακρίνονται δύο διασυνδεδεμένοι οπτικοί διακόπτες. Ο κάθε διακόπτης αποτελείται από ένα κύκλωμα τύπου Mach Zehnder. Στον ένα οπτικό δρόμο έχει τοποθετηθεί ένας οπτικός ημιαγωγίσιμος ενισχυτής και στον άλλο ένα στοιχείο μεταβολής της φάσης του πεδίου (phase shifter). Το συγκεκριμένο στοιχείο είναι ικανό να μεταβάλλει τη φάση του εισερχόμενου οπτικού πεδίου ανάλογα με την εφαρμοζόμενη ηλεκτρική τάση.

Οι δύο δυνατές καταστάσεις του στοιχείου δίνονται από το μήκος κύματος εκπομπής δύο λέιζερ, που εισάγονται σε κάθε διακόπτη. Ο αριστερός διακόπτης SOA-MZI δέχεται σαν σήμα εισόδου ένα συνεχές οπτικό κύμα σε μήκος κύματος λ_1 . Το κέρδος του ημιαγωγίσιμου ενισχυτή σε συνδυασμό με τον phase shifter καθορίζονται έτσι ώστε το οπτικό σήμα να εξέρχεται από το κάτω μέρος του συζεύκτη. Το σήμα αυτό εισέρχεται στο δεύτερο συμβολομετρικό διακόπτη και στο δεύτερο ημιαγωγίσιμο ενισχυτή, επηρεάζοντας τη δυναμική των φορέων του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το σήμα λ_2 να μην εισέρχεται στον ημιαγωγίσιμο ενισχυτή του αριστερού διακόπτη και επομένως να μην μπορεί να επηρεάσει τη δυναμική των φορέων του και επομένως την κατάσταση μεταγωγής του. Το αποτέλεσμα της διασύνδεσης αυτής οδηγεί στη στατική κατάσταση του μανδαλωτή, στην οποία η κατάσταση λ_1 επικρατεί και εξέρχεται από την έξοδο του διακόπτη SOA-MZI1.



Σχήμα 83: a) Δομικό διάγραμμα οπτικού μανδαλωτή, b) Παλμοί ενεργοποίησης, c) Παλμοί απενεργοποίησης, d) Κατάσταση 1 του οπτικού μανδαλωτή, e) Κατάσταση 2 του οπτικού μανδαλωτή

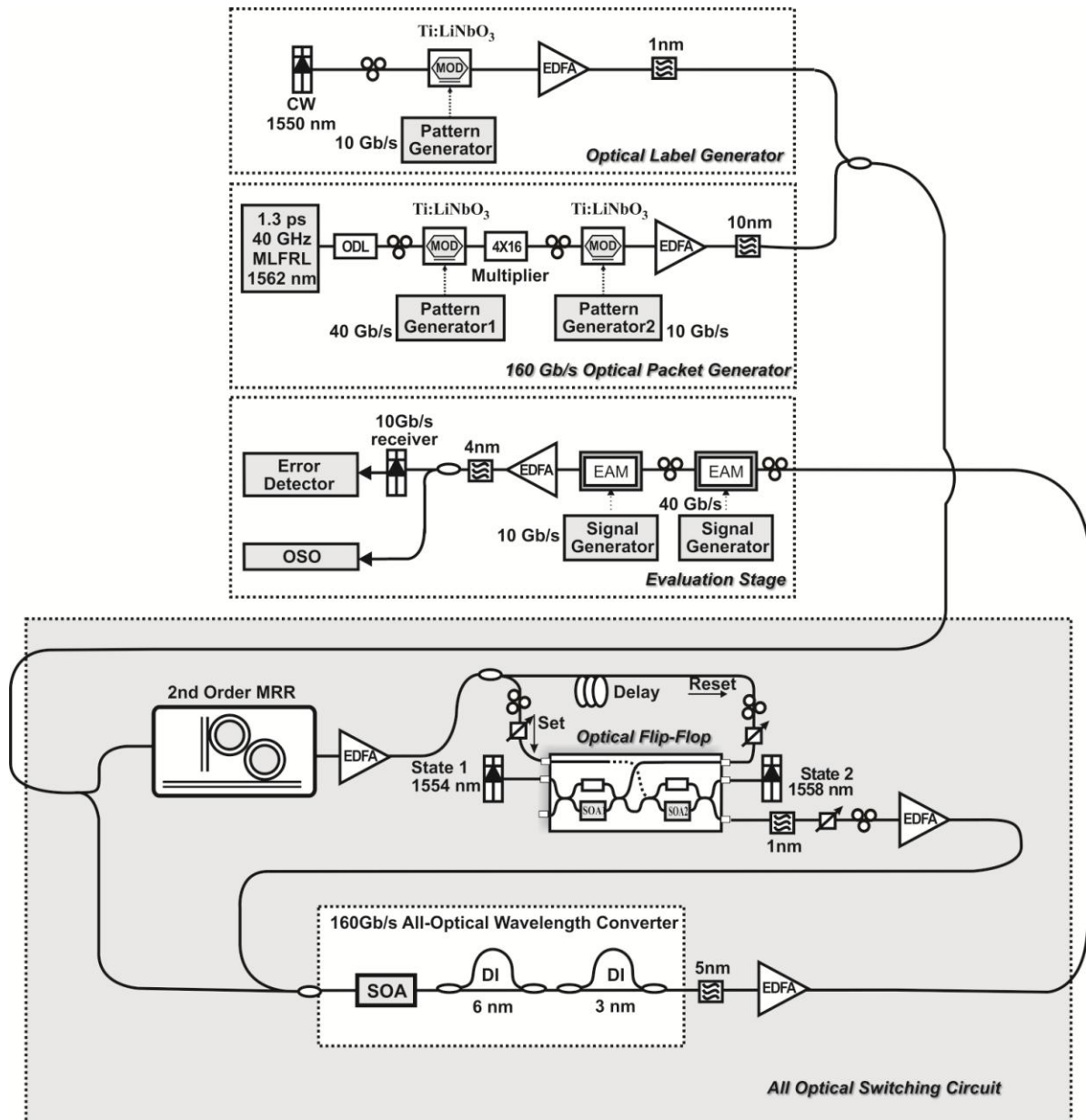
Λόγω της συμμετρίας του συστήματος, η στατική αρχική κατάσταση του μανδαλωτή μπορεί να μεταβληθεί, δηλαδή να επικρατεί το μήκος κύματος λ_2 . Η δυναμική λειτουργία του μανδαλωτή, δηλαδή η αλλαγή κατάστασης του συστήματος, επιτυγχάνεται με τη χρήση παλμικών σημάτων ελέγχου ενεργοποίησης (Set) και απενεργοποίησης (Reset). Αν υποθέσουμε ότι ο μανδαλωτής βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση στην οποία ο αριστερός διακόπτης SOA-MZI επικρατεί του δεξιού διακόπτη SOA-MZI, τότε στόχος του παλμικού σήματος απενεργοποίησης είναι να προκαλέσει τον κορεσμό του ημιαγωγικού ενισχυτή για τόσο χρονικό διάστημα όσο χρειάζεται ο ημιαγωγικός ενισχυτής στο διακόπτη SOA-MZI2 να ανακάμψει και να μετάγει το οπτικό σήμα μήκους κύματος λ_2 στο διακόπτη SOA-MZI1. Η επαναφορά του μανδαλωτή στην

κατάσταση λ1 γίνεται αντίστοιχα με την εισαγωγή του σήματος ενεργοποίησης στο διακόπτη SOA-MZI2. Η επιτυχής αλλαγή κατάστασης του μανδαλωτή εξαρτάται άμεσα από την οπτική ισχύ και το χρονικό εύρος των παλμών ελέγχου. Ο συνδυασμός αυτών των δύο φυσικών μεγεθών προκαλεί τη μείωση κέρδους του ημιαγωγίου ενισχυτή για τόση χρονική περίοδο, όση είναι απαραίτητη για την ανάκαμψη του ημιαγωγίου ενισχυτή του συζευγμένου συμβολομέτρου.

Το ολοκληρωμένο κύκλωμα του οπτικού μανδαλωτή κατασκευάζεται με τεχνολογία γυαλιού σε πιρίτιο (silica-on-silicon) μέσω μιας υβριδικής πλατφόρμας ολοκλήρωσης. Οι ημιαγωγοί οπτικοί ενισχυτές είναι τοποθετημένοι επάνω σε ξεχωριστά πλινθία πυριτίου τα οποία στη συνέχεια συγκολλούνται πάνω στη μητρική πλακέτα. Το μέγεθος της φωτονικής συσκευής είναι περίπου 45x12 mm και περιλαμβάνει τα συζευγμένα συμβολόμετρα Mach-Zehnder, τους θερμο-οπτικούς μετατροπείς φάσης και τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία ψύξης. Το Σχήμα 83 b), c) απεικονίζει τα σήματα ελέγχου ενεργοποίησης (Set) και απενεργοποίησης (Reset). Αντίστοιχα το Σχήμα 83 d), e) παρουσιάζει τη δυναμική λειτουργία του οπτικού μανδαλωτή. Όπως παρατηρείται οι έξοδοι του κυκλώματος είναι συμπληρωματικές αλλά με διαφορετικό λόγο σβέσης. Αυτό αποδίδεται στις μη ιδανικές αναλογίες των συζευκτών και στην έλλειψη ακρίβειας κατά τη θερμική μεταβολή φάσης. Το αποτέλεσμα είναι η ανομοιόμορφη μεταβολή κέρδους του ημιαγωγίου ενισχυτή και η διακύμανση φάσης.

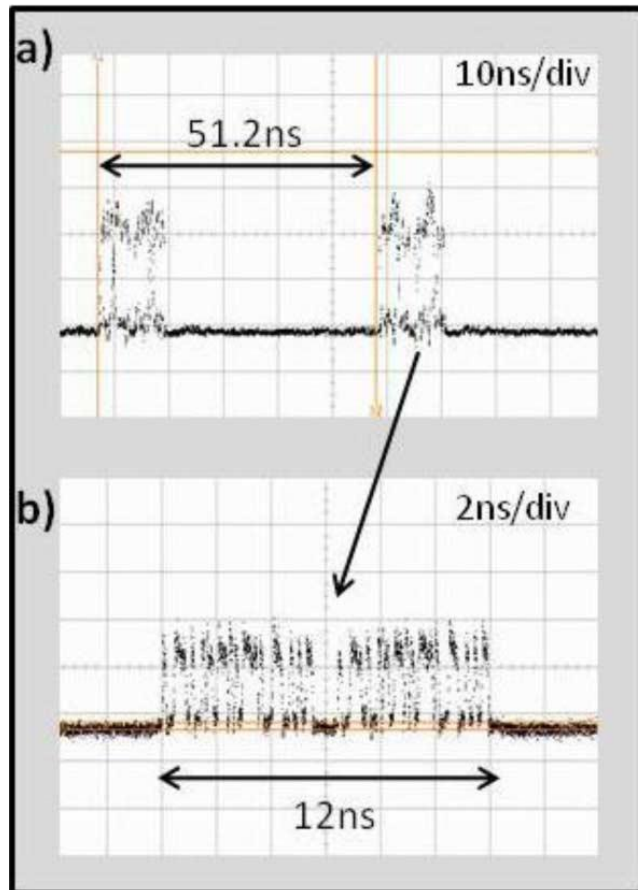
4.5 Πειραματική αξιολόγηση ενός κυκλώματος μεταγωγής πακέτων πληροφορίας σε υψίρρυθμες ταχύτητες λειτουργίας

Το Σχήμα 84 απεικονίζει την πειραματική διάταξη για την αξιολόγηση του υψίρρυθμου κυκλώματος μεταγωγής. Αποτελείται από τέσσερα βασικά υποσυστήματα: τον πομπό οπτικών πακέτων πληροφορίας, τον πομπό των οπτικών επικεφαλίδων και το δέκτη. Για τη δημιουργία του διαμορφωμένου σήματος χρησιμοποιείται ένα λέιζερ εγκλειδωσης ρυθμών ίνας σε μήκος κύματος 1562nm και με διάρκεια παλμού 1.3ps στα 40GHz. Οι παλμοί κωδικοποιούνται με μια ψευδοτυχαία ακολουθία 2^7-1 και οδηγούνται στα στάδια χρονικής πολυπλεξίας για τη γένεση του 160Gb/s σήματος πληροφορίας. Για τη δημιουργία πακέτων χρησιμοποιείται ένας δεύτερος διαμορφωτής πλάτους ο οποίος καθορίζει την περιβάλλουσα τους. Η περιοδικότητα των πακέτων ορίζεται σε 51.2ns από τα οποία 12.8ns αντιστοιχούν στο περιεχόμενο δεδομένων ενώ τα 38.4ns σε χρονική απόσταση ασφαλείας. Το Σχήμα 85 a,b) απεικονίζει την περιβάλλουσα και το παραγόμενο πακέτο πληροφορίας. Για τη δημιουργία των επικεφαλίδων χρησιμοποιείται μια πηγή συνεχούς κύματος στα 1550nm η οποία διαμορφώνεται με παλμούς 5ns σε ρυθμοδότηση 20Mb/s. Τόσο το διαμορφωμένο σήμα όσο και οι επικεφαλίδες συνδυάζονται σε ένα συζεύκτη και στη συνέχεια



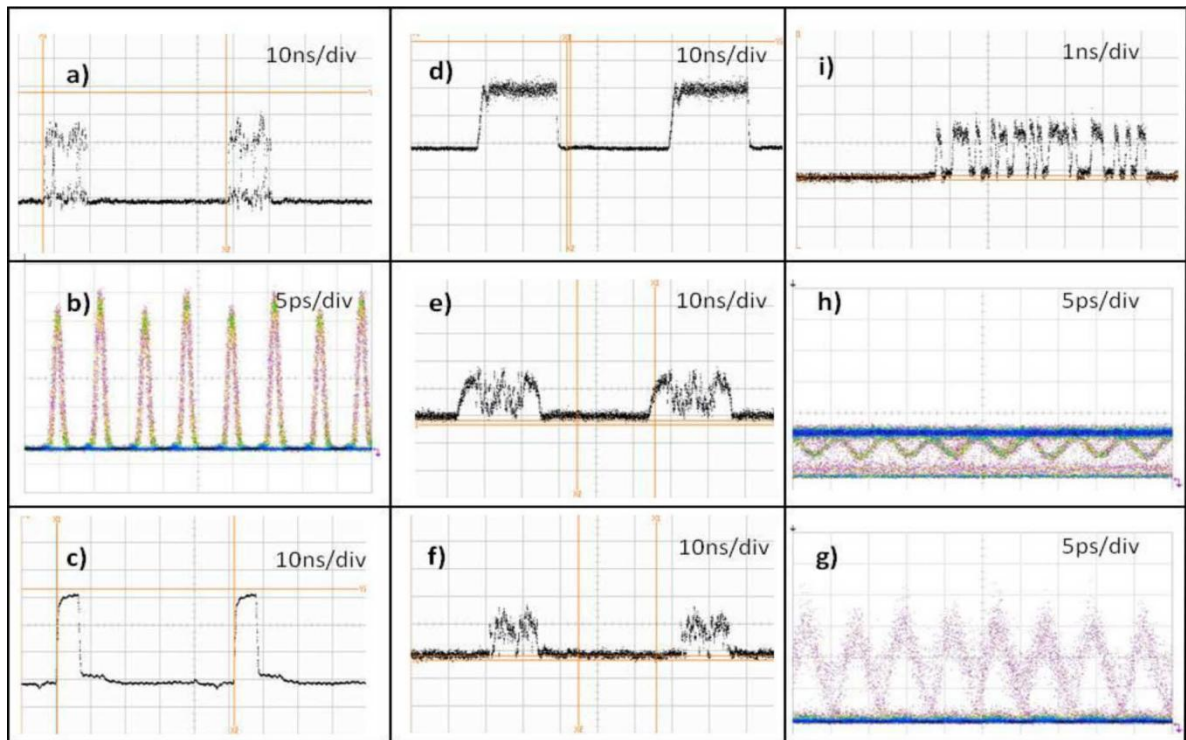
Σχήμα 84: Πειραματική διάταξη του συστήματος μεταγωγής

ακολουθούν δύο διαδρομές. Ο πάνω κλάδος καταλήγει σε ένα συντονιστή δακτυλίου δεύτερης τάξης ο οποίος αναλαμβάνει την ανίχνευση και την εξαγωγή της επικεφαλίδας. Ο συντονιστής δακτυλίου έχει ελεύθερη φασματική περιοχή (FSR) 5nm, εύρος ημίσειας ισχύος 0.05nm και δυνατότητα μεταβολής των φασματικών αποκρίσεων του με τη χρήση θερμαντικών στοιχείων. Οι εξαγόμενες ετικέτες οδηγούνται στη συνέχεια στους υβριδικά ολοκληρωμένους οπτικούς μανδαλωτές ως σήματα ελέγχου ενεργοποίησης (Set) – απενεργοποίησης (Reset). Τα συζευγμένα συμβολόμετρα Mach-Zehnder τροφοδοτούνται με δύο εξωτερικά λέιζερ συνεχούς κύματος με μήκη 1554nm και 1558nm ενώ οι παλμοί ελέγχου καθυστερούνται 22ns έτσι ώστε στην έξοδο των οπτικών μανδαλωτών να σχηματίζονται πακέτα παλμών με χρόνο ανάκαμψης 1.3ns και χρονική διάρκεια λίγο μεγαλύτερη από το περιεχόμενο των πακέτων



Σχήμα 85: a) Περβάλλουσα πακέτων πληροφορίας, b) Περιεχόμενο πακέτου δεδομένων

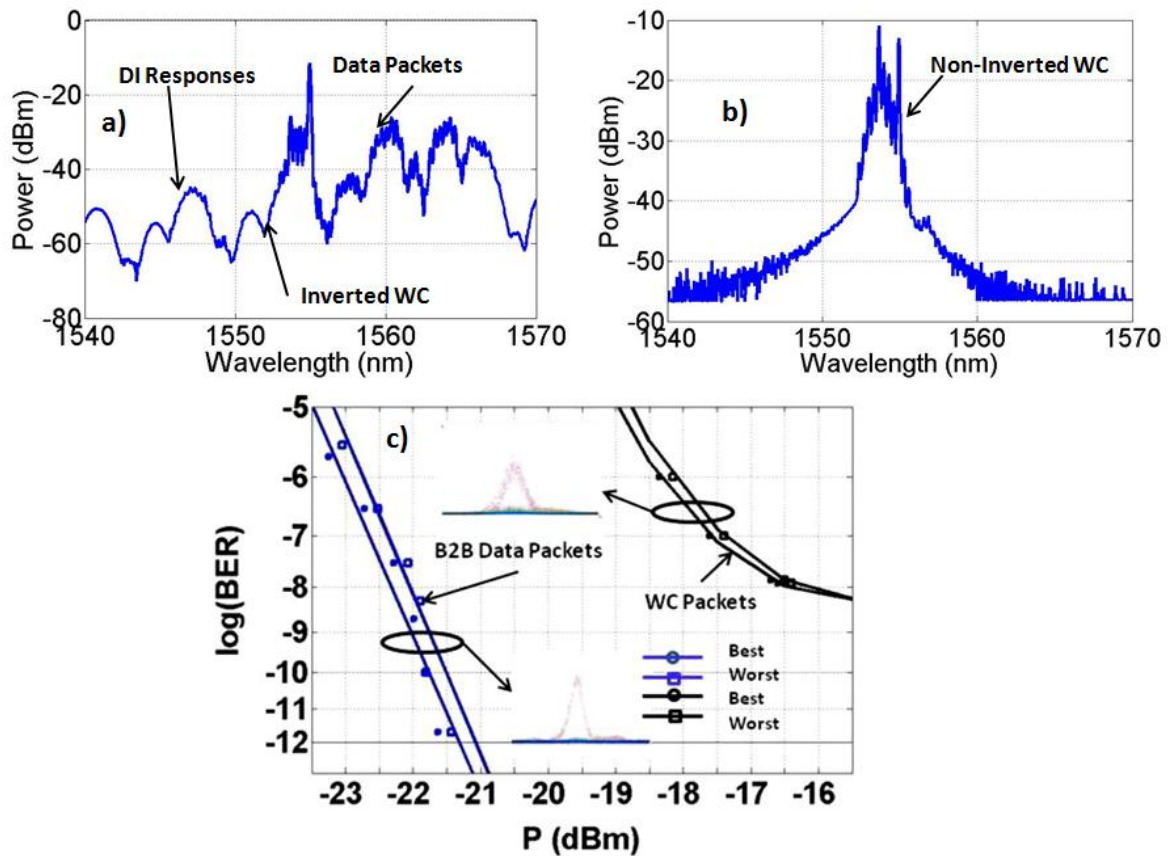
πληροφορίας. Η έξοδος του οπτικού μανδαλωτή ενώνεται και συγχρονίζεται με το 160 Gb/s πακέτο δεδομένων πριν εισέρθουν μαζί στον οπτικό μετατροπέα μήκους κύματος. Ο μετατροπέας αποτελείται από έναν εμπορικά διαθέσιμο ημιαγωγικό ενισχυτή και δύο συζευγμένα συμβολόμετρα καθυστέρησης (DIs). Ο SOA δέχεται μέγιστο ρεύμα λειτουργίας 500mA, εμφανίζει χρονική ανάκαμψη κέρδους 10ps και ισχύ κορεσμού 15dBm. Τα συμβολόμετρα καθυστέρησης από την άλλη έχουν ελεύθερη φασματική περιοχή 6nm και 3nm, απώλεια 8dB, λόγο σβέσης 35dB και μέγιστη μεταβολή μήκους κύματος 3nm. Ο μηχανισμός της μετατροπής μήκους κύματος στηρίζεται στην εξής λειτουργία: Μέσα στον ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή τα εισερχόμενα πακέτα πληροφορίας αλληλεπιδρούν με το σήμα εξόδου του οπτικού μανδαλωτή λόγω ετεροδιαμόρφωσης κέρδους και φάσης. Κατά την έξοδο τους από τον SOA εισάγονται στα δύο συμβολόμετρα καθυστέρησης τα οποία επιλέγουν τις «μπλε» φασματικές συνιστώσες και επιταχύνουν το χρόνο ανάκαμψής τους ενώ παράλληλα αναλαμβάνουν την καταπίεση της αδιαμόρφωτης φέρουσας του σήματος εξόδου του οπτικού μανδαλωτή και την αναστροφή της πολικότητας του τελικού μετατροπόμενου κύματος. Η αποπολυπλεξία υλοποιείται σε δύο στάδια χρησιμοποιώντας διαμορφωτές ηλεκτρο-απορρόφησης (EAM). Ο πρώτος λειτουργεί σε ταχύτητα 40GHz για αποπολυπλεξία από 160Gb/s σε 40Gb/s ενώ ο



Σχήμα 86: a) 160Gb/s πακέτα εισόδου, b) Διάγραμμα ματιού πακέτων πληροφορίας, c) Οπτική επικεφαλίδα, d) Έξοδος οπτικού μανδαλωτή, e) Αντεστραμμένο σήμα μετατρέπομενου μήκους κύματος, f) Μετατρεπόμενο σήμα ορθής πολικότητας, g) Διάγραμμα ματιού μετατρεπόμενου σήματος ορθής πολικότητας, h) Διάγραμμα ματιού αντεστραμμένου σήματος, i) Αποπολυπλεγμένο πακέτο πληροφορίας από 160Gb/s σε 10Gb/s.

δεύτερος στα 10GHz για αποπολυπλεξία από 40Gb/s σε 10Gb/s. Αξίζει να αναφερθεί ότι για την ανίχνευση και εξαγωγή της επικεφαλίδας μέσω του συντονιστή δακτυλίου δεύτερης τάξης χρησιμοποιούνται συζεύκτες περίθλασης με αποτέλεσμα οι απώλειες μετάδοσης να είναι υψηλές. Λόγω επίσης του πολύ στενού εύρους ημίσειας ισχύος οι απώλειες αυξάνονται σε ένα ποσοστό περίπου ~28dB και για την αντιστάθμιση τους χρησιμοποιούνται ενισχυτές ερβίου πολύ χαμηλού σηματοθορυβικού λόγου.

Το Σχήμα 86 a) απεικονίζει τα εισερχόμενα πακέτα πληροφορίας ρυθμοδότησης 160Gb/s ενώ το Σχήμα 86 b) τα αντίστοιχα διαγράμματα ματιού. Η μικρή διακύμανση πλάτους που παρατηρείται οφείλεται στη μη ιδανική εξίσωση των παλμών μέσα στα στάδια του χρονικού πολυπλέκτη. Το Σχήμα 86 c) εμφανίζει τις οπτικές επικεφαλίδες διάρκειας 5ns οι οποίες τοποθετούνται μπροστά από το πακέτο πληροφορίας. Η φασματική απόδοση του συστήματος μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω χρησιμοποιώντας οπτικές ετικέτες εντός του φασματικού περιεχομένου των δεδομένων [4.22]. Οι εξαγόμενες επικεφαλίδες χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία του οπτικού μανδαλωτή ο οποίος παράγει στην έξοδο του το σήμα που φαίνεται στο Σχήμα 86 d). Η περιβάλλουσα του σήματος αυτού συγχρονίζεται με τα εισερχόμενα πακέτα πληροφορίας και στη



Σχήμα 87: a) Φάσμα εξόδου του μετατροπέα μήκους κύματος, b) Μετατρεπόμενο μήκος κύματος ορθής πολικότητας, c) Καμπύλες μετρήσεων σφαλμάτων-λαθών

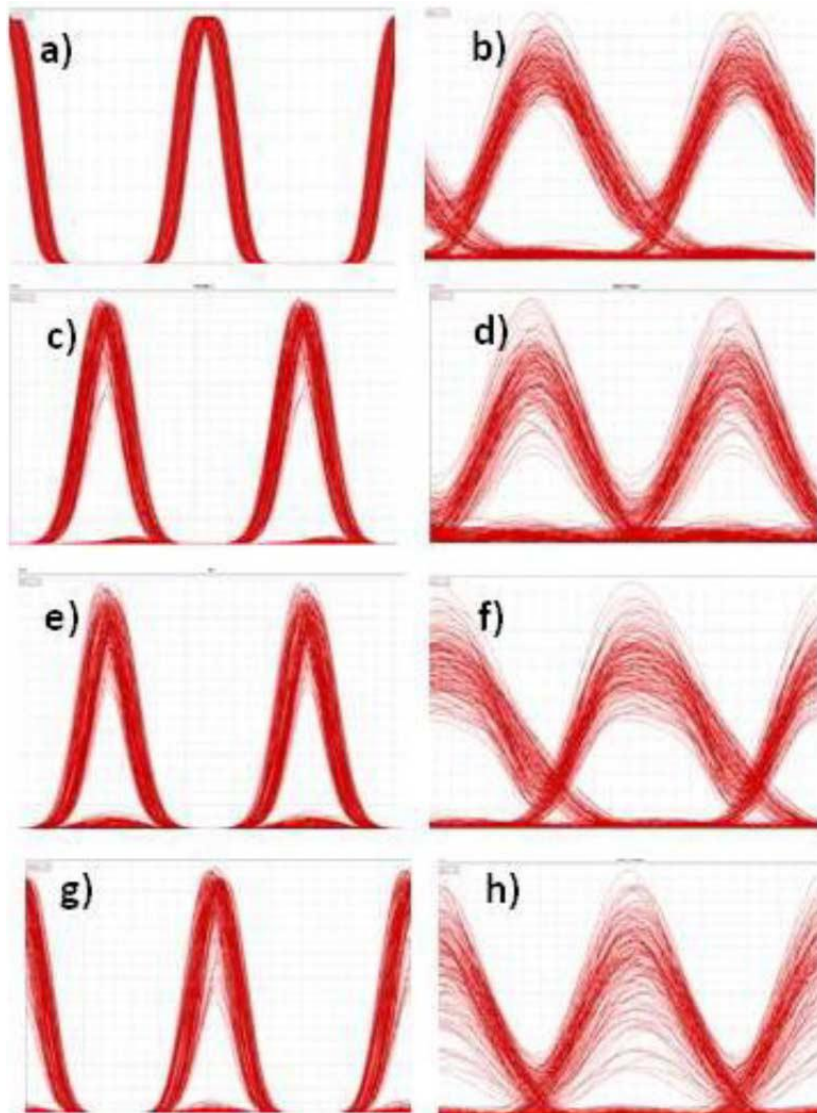
συνέχεια εισάγονται από κοινού μέσα στον ημιαγωγικό μετατροπέα μήκους κύματος. Το Σχήμα 86 e) απεικονίζει την αντεστραμμένη λειτουργία μετατροπής μήκους κύματος με τα πακέτα δεδομένων να τοποθετούνται στο κέντρο του σήματος εξόδου του οπτικού μανδαλωτή αποφεύγοντας με αυτό τον τρόπο την παραμόρφωση λόγω του πεπερασμένου χρόνου ανάκαμψης και σβέσης. Το Σχήμα 86 f) εμφανίζει την ορθή πολικότητα του μετατρεπόμενου κύματος όταν η φέρουσα συνιστώσα έχει καταπιεστεί επιτυχώς από τη φασματική απόκριση των συμβολομέτρων καθυστέρησης. Το Σχήμα 86 g) δείχνει το αντίστοιχο διάγραμμα ματιού με κάποιο μικρό ποσοστό θορύβου λόγω του μη ιδανικού λόγου σβέσης του σήματος εξόδου του οπτικού μανδαλωτή. Η διεύρυνση των παλμών μετά τη μετατροπή μήκους κύματος οφείλεται κυρίως στο στενό εύρος ημίσειας ισχύος των συμβολομέτρων καθυστέρησης. Το Σχήμα 86 h) παρουσιάζει το διάγραμμα ματιού του αντεστραμμένου σήματος όπου έχει επιτευχθεί φιλτράρισμα των «μπλέ» συχνοτικών συνιστωσών και επιτάχυνση του χρόνου ανάκαμψης της τελικής κυματομορφής. Τα ίχνη μεταξύ των δύο επιπέδων σήματος αντιπροσωπεύουν τα σημεία που καταγράφει ο οπτικός παλμογράφος λόγω του χρόνου ανάκαμψης και σβέσης του οπτικού μανδαλωτή. Το Σχήμα 86 i) απεικονίζει το αποπολυπλεγμένο πακέτο πληροφορίας ρυθμοδότησης 10Gb/s.

Το Σχήμα 87 a) δείχνει το φάσμα εξόδου του μετατρεπόμενου μήκους κύματος καθώς επίσης και τη συνδυασμένη συνάρτηση μεταφοράς των συμβολομέτρων καθυστέρησης. Φαίνεται από αυτό το διάγραμμα ότι η φέρουσα συνιστώσα κυριαρχεί έναντι των αρμονικών διαμόρφωσης με αποτέλεσμα το σήμα να βρίσκεται σε αντεστραμμένη μορφή. Για την αποκατάσταση της πολικότητας είναι απαραίτητο να εφαρμοστεί η χαρακτηριστική των DIs στη φέρουσα συνιστώσα με στόχο την καταπίεση της. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με τη μεταβολή των μηκών κύματος του οπτικού μανδαλωτή είτε με τη μεταβολή των συναρτήσεων μεταφοράς των συμβολομέτρων καθυστέρησης χρησιμοποιώντας τα ολοκληρωμένα θερμαντικά στοιχεία. Η καταπίεση της φέρουσας απεικονίζεται στο Σχήμα 87 b).

Το Σχήμα 87 c) εμφανίζει τις καμπύλες μετρήσεων λαθών για τα εισερχόμενα (Back to Back-B2B) και τα τελικώς μετατρεπόμενα μήκη κύματος (Wavelength Converted-WC). Η ποινή ισχύος για το μετατρεπόμενο μήκος κύματος είναι 4.5dB με υπόβαθρο λάθους 10^{-8} που οφείλεται κυρίως στο χαμηλό λόγο σβέσης του σήματος εξόδου του οπτικού μανδαλωτή. Αυτό προκύπτει από τις μη ιδανικές αναλογίες σύζευξης των συμβολομέτρων Mach-Zehnder και την έλλειψη θερμικής ακρίβειας κατά τη μεταβολή φάσης. Ο σχεδιασμός ωστόσο των οπτικών μανδαλωτών έχει βελτιωθεί αρκετά παρέχοντας τη δυνατότητα για αμιγώς οπτική μεταγωγή πακέτων πληροφορίας σε υπερυψηλές ταχύτητες μετάδοσης. [4.23].

Σε ένα οπτικό δίκτυο διαχείρισης δεδομένων είναι απαραίτητη η χρήση πολλαπλών μετατροπών μήκους κύματος που έχουν ως αποτέλεσμα την αλλοίωση των μεταδιδόμενων σημάτων. Για τη μελέτη του μέγιστου αριθμού μετατροπών μήκους κύματος που μπορεί να υποστεί ένα διαμορφωμένο σήμα γίνονται οι προσομοιώσεις που παρουσιάζονται στο Σχήμα 88. Συγκεκριμένα το Σχήμα 88 a) αναπαριστά ένα 160 Gb/s σήμα εισόδου αποτελούμενο από 256 διφύα διαμορφωμένα με μια ψευδοτυχαία ακολουθία 2^7-1 . Το Σχήμα 88 b) δείχνει το διάγραμμα ματιού ύστερα από τον πρώτο μετατροπέα μήκους κύματος που φέρει έναν ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή και δύο συμβολόμετρα καθυστέρησης. Εξαιτίας της χρονικής διεύρυνσης ύστερα από τη μετατροπή μήκους κύματος το τετέρισμα (chirp) που παράγεται στο δεύτερο μετατροπέα δεν είναι κατάλληλο. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται ένας οπτικός αναγεννητής, χρησιμοποιώντας έναν μη γραμμικό βρόγχο καθρέφτη με μη γραμμική ίνα μήκους 100m, ο οποίος δημιουργεί στενούς παλμούς διάρκειας 2ps. Το Σχήμα 88 c) παρουσιάζει το σήμα ύστερα από τον αναγεννητή ενώ το Σχήμα 88 d) ύστερα από το δεύτερο μετατροπέα μήκους κύματος. Εξαιτίας της χρονικής διεύρυνσης στην έξοδο του δεύτερου μετατροπέα γίνεται χρήση και δεύτερου αναγεννητή. Το Σχήμα 88 e) απεικονίζει το σήμα στην έξοδο του δεύτερου αναγεννητή ενώ το Σχήμα 88 f) στην έξοδο του τρίτου μετατροπέα μήκους κύματος. Η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί για ακόμη μια φορά όπως φαίνεται στο Σχήμα 88 g-h)

Όπως είναι φανερό μετά από κάθε μετατροπή μήκους κύματος είναι αναγκαία η οπτική αναγέννηση των κυματομορφών εξόδου. Οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι ένα 160Gb/s σήμα μπορεί να επιζήσει ύστερα από 4 αλληπάληλες μετατροπές μήκους κύματος εξαιτίας της συσσώρευσης διαμόρφωσης πλάτους. Η απόδοση μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω χρησιμοποιώντας έναν περιοριστή ισχύος που μπορεί να αφαιρέσει τη διαμόρφωση πλάτους που παράγεται από το μηχανισμό της μετατροπής μήκους κύματος.



Σχήμα 88: Αλλοιώσεις μεταδιδόμενου σήματος ύστερα από πολλαπλές μετατροπές μήκους κύματος

Αναφορές

- [4.1] G. Shen and R. S. Tucker, "Energy-minimized design for IP over WDM networks," *IEEE J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 1, no. 1, pp. 176–186, Jun. 2009.
- [4.2] R. S. Tucker, R. Parthiban, J. Baliga, K. Hinton, R. W. A. Ayre, and W. V. Sorin, "Evolution of WDM optical IP networks: A cost and energy perspective," *J. Lightw. Technol.*, vol. 27, no. 3, pp. 243–252, Feb. 1, 2009.
- [4.3] J. Gripp, J. E. Simsarian, J. D. LeGrange, P. G. Bernasconi, and D. T. Neilson, "Architectures, components, and subsystems for future optical packet switches," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 16, no. 5, pp. 1394–1404, Sep./Oct. 2010.
- [4.4] D. J. Blumenthal et al., "Integrated photonics for low-power networking," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 17, no. 5, pp. 458–471, Sep./Oct. 2010.
- [4.5] F. Xia, L. Sekaric, and Y. Vlasov, "Ultra-compact optical buffers on a silicon chip," *Nature Photon.*, vol. 1, pp. 65–71, 2007.
- [4.6] J. Gripp, J. E. Simsarian, J. D. LeGrange, P. Bernasconi, and D. T. Neilson, "Photonics terabit routers: The IRIS project," in *Proc. OFC 2010, San Diego, CA, Paper OThP3*.
- [4.7] S. C. Nicholes, M. L. Masanovic, B. Jevremovic, E. Lively, L. A. Coldren, and D. J. Blumenthal, "The world's first InP 8 × 8 monolithic tunable optical router (MOTOR) operating at 40 Gbps line rate per port," in *Proc. OFC 2009, San Diego, CA, Paper PDPB1*.
- [4.8] M. J. R. Heck, G. Kurczveil, E. F. Burmeister, H. Park, J. P. Mack, D. J. Blumenthal, and J. E. Bowers, "Integrated recirculating optical buffers," presented at the *SPIE Photon*, San Diego, CA, 2010, 76060W.
- [4.9] L. Stampoulidis et al., "The European BOOM project: Silicon photonics for high-capacity optical packet routers," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 16, no. 5, pp. 1422–1433, Sep./Oct. 2010.
- [4.10] E. Kehayas, D. Tsiokos, P. Bakopoulos, D. Apostolopoulos, D. Petrantonakis, L. Stampoulidis, A. Poustie, R. McDougall, G. Maxwell, Y. Liu, S. Zhang, H. J. S. Dorren, J. Seoane, P. V. Holm-Nielsen, P. Jeppesen and H. Avramopoulos, "40-Gb/s All-Optical Processing Systems using Hybrid Photonic Integration Technology", *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, Vol. 24, No. 12, Dec. 2006.
- [4.11] E. Kehayas, K. Vysokinos, L. Stampoulidis, K. Christodouloupolous, K. Vlachos and H. Avramopoulos, "ARTEMIS: 40-Gb/s All-Optical Self-Routing Node and Network Architecture Employing Asynchronous Bit and Packet-Level Optical Signal Processing", *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, Vol. 24, No. 8, pp. 2967-2977, pp. 2993-3011, Aug. 2006.
- [4.12] D. J. Blumenthal et al., "Integrated photonics for low-power packet networking," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 17, no. 2, pp. 458–471, Mar./Apr. 2011.
- [4.13] F. Xia, L. Sekaric, and Y. Vlasov, "Ultra-compact optical buffers on a silicon chip," *Nature Photon.*, vol. 1, pp. 65–71, 2007.
- [4.14] F. Gomez-Agis, O. Raz, S. J. Zhang, E. Tangdiongga, L. Zimmermann, K. Voigt, C. Vysokinos, L. Stampoulidis, and H. J. S. Dorren, "All optical wavelength conversion at 160 Gbit/s using SOA and silicon-on-insulator photonic circuit," *Elect. Lett.*, vol. 45, pp. 1132–1133, 2009.
- [4.15] B. G. Lee et al., "High-speed 2x2 switch for multiwavelength silicon photonic networks-on-chip," *J. Lightw. Technol.*, vol. 27, no. 14, pp. 2900–2907, Jul. 15, 2009.

- [4.16] A. Kazmierczak, W. Bogaerts, E. Drouard, F. Dortu, P. Rojo-Romeo, F. Gaffiot, D. Van Thourhout, and D. Giannone, "Highly integrated optical 4x4 crossbar in silicon-on-insulator technology," *J. Lightw. Technol.*, vol. 27, no. 16, pp. 3317–3323, Aug. 15, 2009.
- [4.17] L. Liu et al., "An ultra-small, low-power, all-optical flip-flop memory on a silicon chip," *Nature Photon.*, vol. 4, pp. 182–187, 2010.
- [4.18] S. Xiao, M. Campus, M. H. Khan, H. Shen, and M. Qi, "A highly compact third-order silicon microring add-drop filter with a very large free spectral range, a flat passband and a low delay dispersion," *Opt. Exp.*, vol. 15, pp. 14765–14771, 2007.
- [4.19] S. K. Selvaraja, P. Jaenen, W. Bogaerts, D. Van Thourhout, P. Dumon, and R. Baets, "Fabrication of photonic wire and crystal circuits in silicon-on-insulator using 193-nm optical lithography," *J. Lightw. Technol.*, vol. 27, no. 18, pp. 4076–4083, Sep. 15, 2009.
- [4.20] P. De Heyn, B. Kuyken, D. Vermeulen, W. Bogaerts, and D. Van Thourhout, "High-performance low-loss silicon-on-insulator microring resonators using TM-polarized light," presented at the Proc. OFC 2011, Los Angeles, CA, Paper OThV2.
- [4.21] Y. Liu, R. McDougall, J. Seoane, E. Kehayas, M. T. Hill, G. Maxwell, S. Zhang, R. Harmon, F. M. Huijskens, L. Rivers, P. V. Holm-Nielsen, J. M. Martinez, J. Herrera, F. Ramos, J. Marti, H. Avramopoulos, P. Jeppesen, A. M. J. Koonen, A. Poustie, and H. J. S. Dorren, "Characterization of hybrid integrated all-optical flip-flop," presented at the 19th Annu. Meeting. IEEE LEOS, Montreal, Canada, 2006, Paper ThBB1.
- [4.22] J. Herrera, E. Tangdiongga, Y. Liu, M. T. Hill, R. McDougall, A. Poustie, G. Maxwell, F. Ramos, J. Marti, H. de Waardt, G. D. Khoe, A. M. J. Koonen, and H. J. S. Dorren, "160 Gb/s packet all-optical packet switching with in-band filter-based label extraction and a hybrid integrated flip-flop," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 19, no. 13, pp. 990–992, Jul. 1, 2007.
- [4.23] L. Liu, R. Kumar, K. Huybrechts, T. Spuesens, G. Roelkens, E. J. Geluk, T. de Vries, P. Regreny, D. Van Thourhout, R. Baets, and G. Morthier, "An ultra small, low power, all-optical flip-flop memory on a silicon chip," *Nature Photon.*, vol. 4, pp. 182–187, 2010.
- [4.24] J. Bauters, M. Heck, D. D. John, M. Tien, W. Li, J. S. Barton, D. J. Blumenthal, J. Bowers, A. Leinse, and R. G. Heideman, "Ultra-lowloss single-mode silicon nitride waveguides with 0.7 dB/m propagation loss," in Proc. ECOC, 2011, Th.12.LeSaleve.3.
- [4.25] M.Y. Hill, H.J.S Dorren, T de Vries, X.J.M Leijtens, J.H den Besten, B. Smalbrugge, Y.S Oei, H. Binsma, G.D Khoe, M.K Smit, "A fast low-power optical memory based on coupled micro-ring lasers", *Nature*, vol. 432, pp. 206-208.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΜΙΓΩΣ ΟΠΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗΣ ΠΑΚΕΤΩΝ

5.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια οι τεχνικές πολυπλεξίας μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing-WDM) έχουν επιφέρει θεμελιώδεις αλλαγές στο σχεδιασμό των οπτικών δικτύων [5.1][5.2]. Τα συστήματα δρομολόγησης σχεδιάζονται πλέον με βάση το διαθέσιμο εύρος ζώνης πολλαπλών μηκών κύματος [5.3][5.4] οδηγώντας σε πιο ευφυή δίκτυα τηλεπικοινωνιών [5.5]. Με την ανάπτυξη μάλιστα των φωτονικών μορφών ολοκλήρωσης καθίσταται εφικτή η αμιγώς οπτική μεταγωγή πακέτων πληροφορίας χωρίς ενδιάμεσα στάδια οπτο-ηλεκτρονικών μετατροπών και επιπρόσθετων σταδίων επεξεργασίας. Κατά καιρούς διάφορες τεχνικές έχουν προταθεί για την οπτική δρομολόγηση μηκών κύματος [5.6][5.7] υποστηρίζοντας ένα σημαντικό αριθμό από διαδικτυακές λειτουργίες [5.8] [5.9][5.10][5.11][5.12][5.13].

Σε ένα οπτικό δίκτυο, η σύγκρουση πακέτων πληροφορίας παρατηρείται όταν δύο ή περισσότερα πακέτα δεδομένων εξέρχονται από την ίδια θύρα της μονάδας μεταγωγής, στο ίδιο μήκος κύματος και την ίδια χρονική στιγμή. Στα ηλεκτρικά συστήματα μεταγωγής, η σύγκρουση πακέτων επιλύεται με την τεχνική της αποθήκευσης και της μετάδοσης (store and forwarding) κατά την οποία το συγκρουόμενο πακέτο εισέρχεται σε μια τράπεζα μνήμης και εξέρχεται για επεξεργασία μόνο όταν η θύρα εξόδου της μεταγωγικής μονάδας γίνει διαθέσιμη. Μπορεί οι ηλεκτρονικές μνήμες τυχαίας προσπέλασης (Random Access Memory) να είναι ευρέως διαδεδομένες και να λειτουργούν σε υψηλές ταχύτητες, ωστόσο στις οπτικές επικοινωνίες ανάλογα συστήματα δεν είναι υπαρκτά. Συνεπώς, η οπτική επίλυση σύγκρουσης πακέτων πραγματοποιείται με εναλλακτικές μεθόδους χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές επεξεργασίας σήματος.

Η οπτική μετατροπή μήκους κύματος μπορεί να επιλύσει τη σύγκρουση πακέτων χωρίς να είναι απαραίτητη η αποθήκευση ή η καθυστέρηση της πληροφορίας σε μονάδα μνήμης [5.14][5.15][5.16][5.17][5.18]. Οι μετατροπείς κύματος μπορούν να αλλάξουν τα μήκη των πακέτων πληροφορίας με γρήγορο τρόπο, χωρίς να χρειάζεται αναδιάταξη ή επαναδρομολόγηση των δεδομένων.

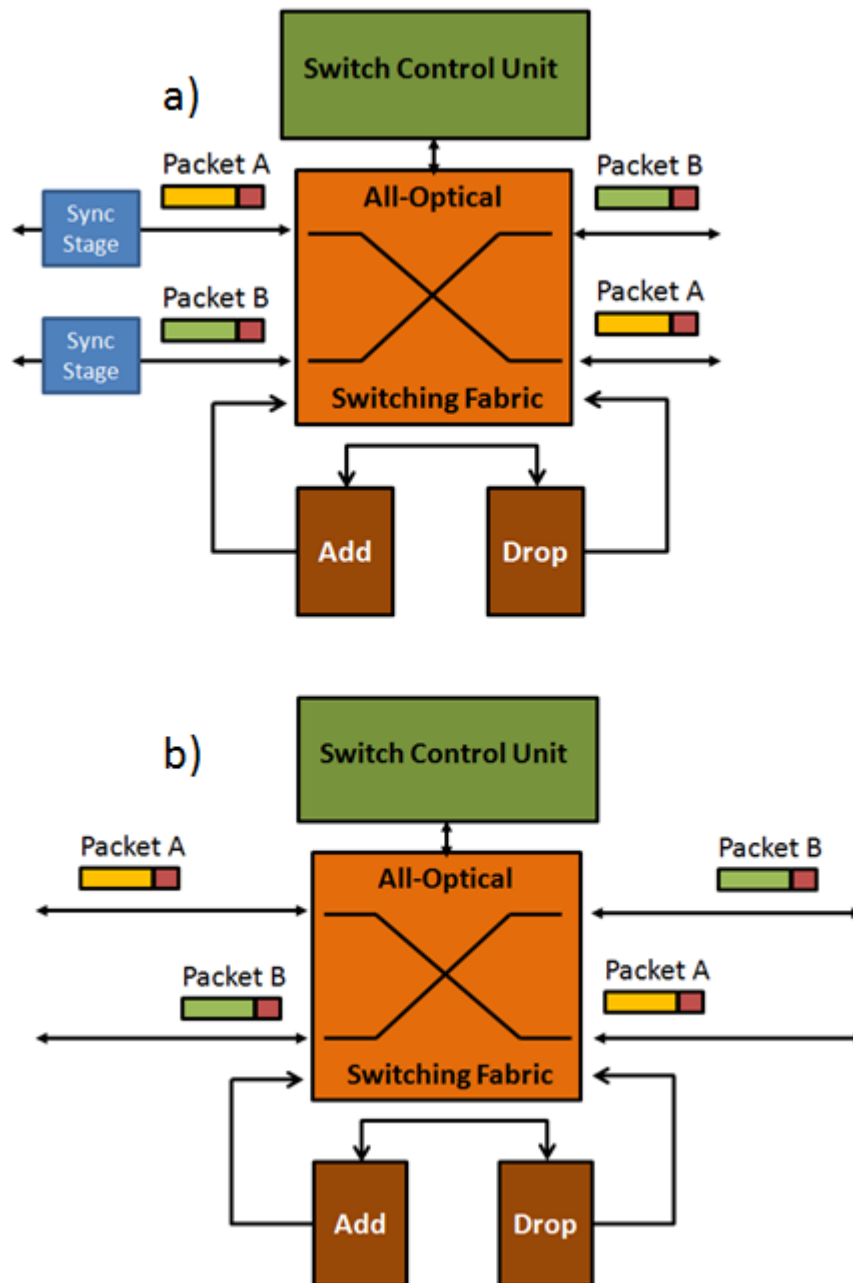
Μια άλλη μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι οι οπτικές γραμμές καθυστέρησης (Optical Delay Lines-ODLs) οι οποίες προσφέρουν σταθερή και πεπερασμένη χρονοκαθυστέρηση [5.19][5.20][5.21][5.22][5.23][5.24][5.25][5.26]. Μπορεί η λειτουργία τους να είναι απλή, ωστόσο για την υλοποίηση διατάξεων μνήμης μεγάλης χωρητικότητας είναι αναγκαία η χρήση μεγάλου αριθμού ODLs. Μια επίσης ευρέως διαδεδομένη τεχνική επίλυσης σύγκρουσης πακέτων είναι η μεταγωγή/εκτροπή διαμέσου πολλαπλών διαδρομών δρομολόγησης [5.27][5.28][5.29][5.30][5.31]. Σε αυτή την περίπτωση τα συγκρουόμενα πακέτα δρομολογούνται σε κόμβους διαφορετικούς από τον αρχικό τους προορισμό, με την προσδοκία ότι τελικά θα κατευθυνθούν στον τελικό χρήστη. Η αποτελεσματικότητα της δρομολόγησης αυτής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τοπολογία του δικτύου και το είδος της τηλεπικοινωνιακής κίνησης.

5.2 Τεχνικές επίλυσης σύγκρουσης πακέτων πληροφορίας

Τα οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων μπορούν να διαιρεθούν σε δύο κατηγορίες. Στα συγχρονισμένα δίκτυα με πακέτα σταθερού μήκους [5.32] και στα δίκτυα εκρηκτικής ροής με πακέτα σταθερού ή μεταβλητού μεγέθους [5.17][5.21]. Σε ένα συγχρονισμένο δίκτυο τα πακέτα φθάνουν στον κόμβο επεξεργασίας και τοποθετούνται σε συγκεκριμένες χρονοθυρίδες [5.22]. Το Σχήμα 89 α) απεικονίζει τη δομή ενός συγχρονισμένου δικτύου. Αντίθετα σε ένα δίκτυο εκρηκτικής ροής τα πακέτα δε συγχρονίζονται αλλά δρομολογούνται έναν προς ένα (on the fly) στην τελική θύρα μεταγωγής. Λόγω αυτής της ιδιότητας τα ασυγχρόνιστα δίκτυα έχουν μικρότερη χωρητικότητα και περιορισμένη ταχύτητα επεξεργασίας λόγω της αυξημένης πιθανότητας σύγκρουσης πακέτων [5.29]. Το Σχήμα 89 β) απεικονίζει τη δομή ενός δικτύου εκρηκτικής ροής. Οι τεχνικές επίλυσης σύγκρουσης πακέτων ομαδοποιούνται στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες.

A. Γραμμές καθυστέρησης

Με την τεχνική αυτή χρησιμοποιούνται μια ή περισσότερες οπτικές ίνες καθυστέρησης οι οποίες μεταδίδουν τη συγκρουόμενη πληροφορία από την έξοδο στην είσοδο της μονάδας μεταγωγής όπως φαίνεται στο Σχήμα 90 α). Πιο συγκεκριμένα το πακέτο που προκαλεί σύγκρουση εισέρχεται στην οπτική γραμμή μεταφοράς, καθυστερείται για όσο χρόνο οι θύρες δρομολόγησης είναι κατειλημμένες και επανέρχεται στη μονάδα μεταγωγής για οπτική επεξεργασία. Διάφορες τοπολογίες έχουν προταθεί κατά καιρούς χρησιμοποιώντας πολλαπλά στάδια καθυστέρησης, οπτικές γραμμές μεταφοράς ποικίλου μήκους ή μεγάλο αριθμό από οπτικές ίνες. Οι διατάξεις αυτές ωστόσο απαιτούν πολλές διασυνδέσεις και εξελιγμένα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου τα οποία αυξάνουν το βαθμό πολυπλοκότητας εισάγοντας επιπλέον αλλοιώσεις στη μεταδιδόμενη πληροφορία σήματος. Για τη δημιουργία λειτουργικών κόμβων επικοινωνίας



Σχήμα 89: α) Συγχρονισμένο δίκτυο μεταγωγής β) Δίκτυο εκρηκτικής ροής

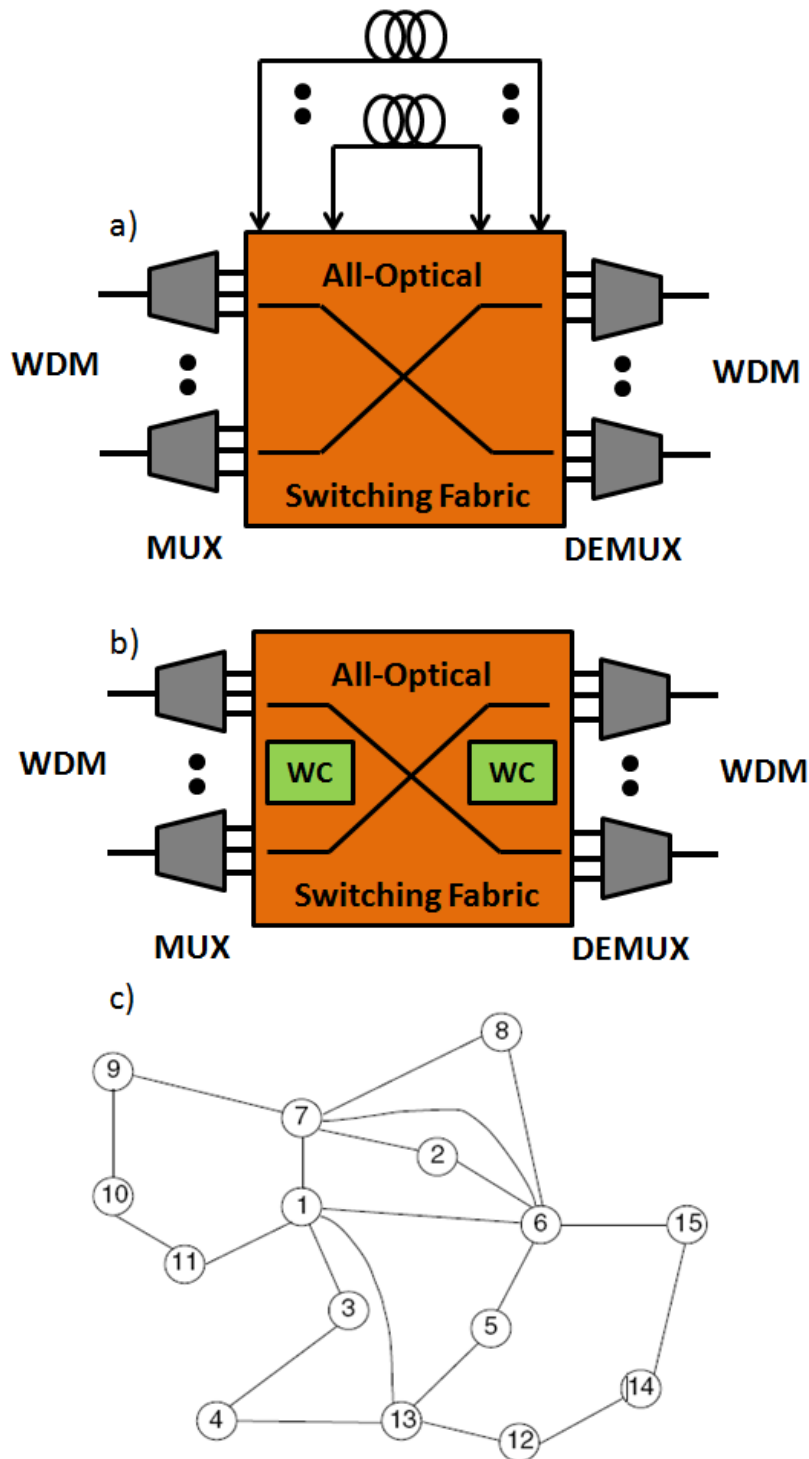
χαμηλού κόστους, υιοθετείται η αρχιτεκτονική πολυπλεξίας μήκους κύματος. Στα μέχρι τώρα συστήματα επίλυσης σύγκρουσης πακέτων χρησιμοποιούνταν ένα μόνο μήκος κύματος για κάθε γραμμή καθυστέρησης με αποτέλεσμα να υπάρχει πιθανότητα απώλειας της πληροφορίας αν η μονάδα αποθήκευσης ήταν κατειλημμένη. Στις νέες δομές μεταγωγής, συγκρουόμενα πακέτα πληροφορίας με διαφορετικό μήκος κύματος μεταδίδονται μέσα από την ίδια γραμμή καθυστέρησης εφόσον στην είσοδο και έξοδο της μεταγωγικής μονάδας υπάρχουν κατάλληλοι πολυπλέκτες και αποπολυπλέκτες και οι μήτρες δρομολόγησης των δεδομένων έχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα.

B. Μετατροπή μήκους κύματος

Οι μετατροπείς μήκους κύματος χρησιμοποιούνται ευρέως στην επίλυση σύγκρουσης πακέτων καθώς μπορούν να μετατρέψουν τα εισερχόμενα δεδομένα σε ένα επιθυμητό μήκος κύματος διασφαλίζοντας τη διαδικασία μεταγωγής στις επιθυμητές θύρες εξόδου. Για τη λειτουργία τους είναι απαραίτητη η χρήση φωτονικών στοιχείων που παράγουν οπτικά σήματα ελέγχου στο μήκος των οποίων μεταφέρεται η διαμορφωμένη πληροφορία. Με την ανάπτυξη της φωτονικής ολοκλήρωσης οι βαθμίδες μετατροπής μήκους κύματος εξελίχθηκαν σε δομές με μικρότερο αποτύπωμα, χαμηλότερο κόστος, μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση και δυνατότητα επεκτασιμότητας κάνοντας εφικτή τη χρήση τους στους κόμβους των δικτύων είτε για δρομολόγηση είτε για διαχείριση και διακίνηση των δεδομένων επικοινωνίας. Ειδικά στην περίπτωση σύγκρουσης πακέτων οι μετατροπείς κύματος με την υψηλή ταχύτητα επεξεργασίας που διαθέτουν μπορούν να διοχετεύουν τη μεταδιδόμενη πληροφορία στις μονάδες μεταγωγής κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα εμφάνισης δεδομένων στην ίδια θύρα εξόδου, την ίδια χρονική στιγμή και στο ίδιο μήκος κύματος με συνέπεια την απώλεια σήματος. Μεταξύ των διάφορων δομών μετατροπής μήκους κύματος ξεχωρίζουν οι συμβολομετρικές διατάξεις που φέρουν ημιαγώγιμους οπτικούς ενισχυτές και οι τοπολογίες μίξης τεσσάρων φωτονίων με χρήση μη γραμμικών μεθόδων διάδοσης. Το Σχήμα 90 b) απεικονίζει μια οπτική μήτρα δρομολόγησης με ενσωματωμένους μετατροπείς μήκους κύματος για την εκτέλεση διάφορων λειτουργιών δρομολόγησης.

Γ. Μεταγωγή/εκτροπή σε πολλαπλούς κόμβους του δικτύου

Η μεταγωγή/εκτροπή της τηλεπικοινωνιακής κίνησης σε γειτονικούς κόμβους του δικτύου είναι δυνατόν να επιλύσει τη σύγκρουση πακέτων πληροφορίας όπως φαίνεται στο Σχήμα 90 c). Οι κόμβοι που αναλαμβάνουν την κύρια δρομολόγηση δεδομένων είναι οι 1,6,7,13 και στην περίπτωση εκτροπής των πακέτων πληροφορίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι υπόλοιποι κόμβοι με την προϋπόθεση ότι τα δεδομένα θα φτάσουν στο αμέσως επόμενο κόμβο προορισμού τους χωρίς να γίνει μεταγωγή περισσότερες από δύο φορές. Αν τέτοιο ενδεχόμενο δεν υφίσταται τότε το πακέτο πληροφορίας θα πρέπει να εξαχθεί από το δίκτυο. Για παράδειγμα στο Σχήμα 90 c) αν το πακέτο από τον κόμβο 3 προορίζεται για τον κόμβο 9 διαμέσου του κόμβου 1 και υπάρχει σύγκρουση στην έξοδο του κόμβου 1 οδηγώντας στον κόμβο 7, τότε το πακέτο θα εκτραπεί στον κόμβο 11. Αν η θύρα του κόμβου 11 είναι κατειλημμένη τότε το πακέτο θα εξαχθεί από το δίκτυο αντί να μεταχθεί στον κόμβο 13 ή 6. Στα περισσότερα δίκτυα εκτροπής υπάρχουν συγκεκριμένοι μηχανισμοί που εφαρμόζονται έτσι ώστε να αποφεύγεται η πιθανότητα πακέτο πληροφορίας να επιστρέφει σε κόμβο που έχει επισκευφθεί στο παρελθόν. Επίσης προσδιορίζεται και ο μέγιστος αριθμός κόμβων που πρέπει να αλλάξει ένα πακέτο για να



Σχήμα 90: Επίλυση σύγκρουσης πακέτων με: a) Οπτικές γραμμές καθυστέρησης, b) Μετατροπή μήκους κύματος, c) Μεταγωγή/εκτροπή σε πολλαπλούς κόμβους

κατευθυνθεί στον προορισμό του. Στην περίπτωση που δεν υλοποιούνται αυτές οι συνθήκες τα δεδομένα εξαγονται από το δίκτυο. Αξίζει να αναφερθεί ότι η εκτροπή δεδομένων μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητη αναδιάταξη των δεδομένων λόγω της διαφορετικής χρονικής διάρκειας που χρειάζονται τα ξεχωριστά πακέτα πληροφορίας για να φτάσουν στον τελικό χρήστη.

Δ. Κυκλώματα επίλυσης σύγκρουσης πακέτων με συνδυασμό των προηγούμενων τεχνικών

Με τον συνδυασμό των τριών προηγούμενων μεθόδων είναι εφικτή η σχεδίαση κυκλωμάτων επίλυσης σύγκρουσης πακέτων με μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Έχει επιδειχθεί στο παρελθόν αμιγώς οπτική διάταξη η οποία επιλύει συγκρούσεις σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιώντας τόσο εκτροπή δεδομένων όσο και μετατροπή μήκους κύματος [5.33][5.34]. Η αρχιτεκτονική του εν λόγω συστήματος περιλαμβάνει ένα οπτικό κύκλωμα ανίχνευσης περιβάλλουσας και πρόσθετες οπτικές πύλες, ώστε να ανιχνεύονται τα συγκρουόμενα πακέτα και να μεταγόνται σε διαφορετικές θύρες ή να μετατρέπεται το μήκος κύματός τους. Ανάλογες τεχνικές έχουν δειχθεί επίσης και για δίκτυα εκρηκτικής ροής χρησιμοποιώντας συμβολομετρικές διατάξεις Mach-Zehnder και οπτικούς μανδαλωτές [5.35]. Πρόσφατα μάλιστα έχει παρουσιαστεί η υλοποίηση και η πειραματική επίδειξη ενός αμιγώς οπτικού κυκλώματος επίλυσης συγκρούσεων για σύγχρονα οπτικά πακέτα δεδομένων λαμβάνοντας υπόψη και τη σειρά των πακέτων που πρέπει να δρομολογηθούν χρησιμοποιώντας σήματα προτεραιότητας (priority flags) [5.36].

5.3 Αμιγώς οπτική επίλυση σύγκρουσης πακέτων χρησιμοποιώντας έναν οπτικό μανδαλωτή και μετατροπείς μήκους κύματος σε σειρά

5.3.1 Εισαγωγή

Για την ανάπτυξη γρήγορων και ενεργειακά αποδοτικών δικτύων δρομολόγησης καθίσταται αναγκαία η χρήση ολοκληρωμένων φωτονικών κυκλωμάτων. Σε αυτό το πλαίσιο οι ερευνητικές προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί στη δημιουργία φωτονικών συστημάτων που επιτελούν λειτουργίες μεταγωγής στον οπτικό πεδίο [5.37]. Παράλληλα, με την εξέλιξη των διάφορων τεχνικών οπτικής ολοκλήρωσης καθίσταται εφικτή η κατασκευή πολυστοιχειακών φωτονικών δομών με μικρό ίχνος και υψηλή επεξεργαστική ισχύ [5.38]. Το γεγονός αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί για την εκτέλεση όχι μόνο της διαδικασίας μεταγωγής αλλά και πιο απαιτητικών και ευφύων λειτουργιών δρομολόγησης όπως η επίλυση σύγκρουσης πακέτων.

Ο έλεγχος της κυκλοφοριακής συμφόρησης είναι μια από τις πιο δύσκολες λειτουργίες που μπορούν να πραγματοποιηθούν στο οπτικό πεδίο. Η δημιουργία οπτικών διατάξεων εφάμιλλων των ηλεκτρονικών για την επίλυση σύγκρουσης πακέτων δεν είναι απλή υπόθεση. Η υλοποίηση ενός συστήματος αποθήκευσης και διακίνησης (store and forward) απαιτεί οπτικές μνήμες τυχαίας προσπέλασης (Random Access Memory), οι οποίες βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο εξέλιξης και παρουσιάζουν δυσκολίες επεκτασιμότητας [5.40]. Μην έχοντας πρακτικά μια

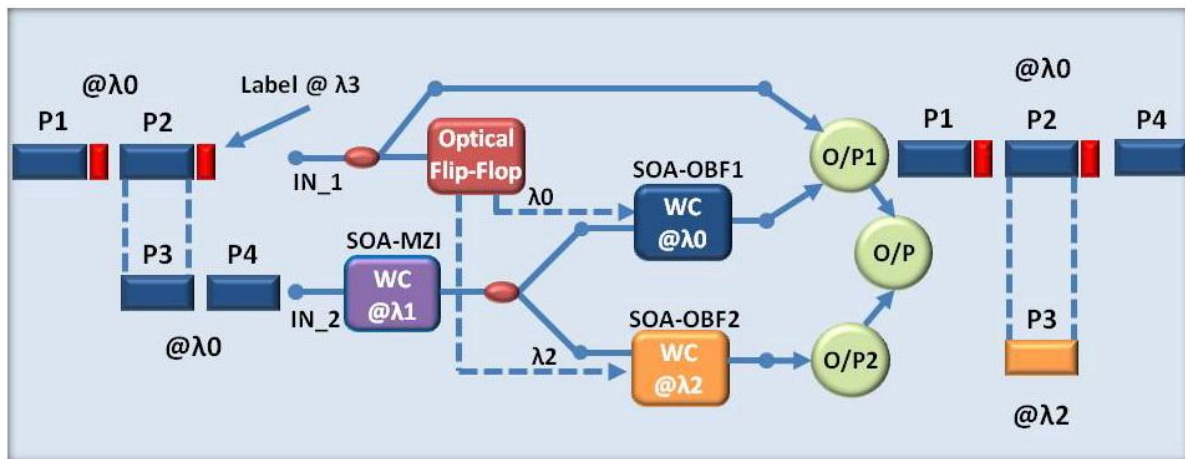
διαθέσιμη οπτική μνήμη, τα διάφορα κυκλώματα που έχουν προταθεί για την επίλυση των συγκρούσεων στηρίζονται στο συνδυασμό διαφόρων λειτουργιών και φωτονικών στοιχείων που αυξάνουν το βαθμό πολυπλοκότητας και ενεργειακής κατανάλωσης [5.39][5.41]. Συγκεκριμένα, τα κυκλώματα ανίχνευσης περιβάλλουσας, μετατροπής μήκους κύματος και εκτροπής δεδομένων διασυνδέονται σειριακά για την επίλυση των κατάστασεων σύγκρουσης [5.36]. Για τη μείωση της πολυπλοκότητας και της κατανάλωσης ισχύος καθώς επίσης και για την ανάπτυξη πλήρως ολοκληρωμένων συστημάτων είναι αναγκαία η χρήση ενός ελάχιστου αριθμού παράλληλων οπτικών στοιχείων.

Στις παρακάτω ενότητες παρουσιάζεται ένα αμιγώς οπτικό κύκλωμα το οποίο εκτελεί επίλυση σύγκρουσης πακέτων σε ρυθμοδότηση 40Gb/s χρησιμοποιώντας έναν οπτικό μανδαλωτή και ένα μετατροπέα μήκους κύματος δύο σταδίων. Η διάταξη παρέχει βέλτιστη χρήση και των δύο εξόδων του μανδαλωτή για την οδήγηση των μετατροπέων μήκους κύματος που αλλάζουν το χρώμα των πακέτων υπό σύγκρουση και επαναφέρουν το αρχικό μήκος κύματος στα πακέτα χωρίς σύγκρουση. Το εν λόγω κύκλωμα είναι εύκολο να υλοποιηθεί κάνοντας χρήση μονολιθικών ολοκληρωμένων συστοιχείων από μετατροπείς μήκους κύματος [5.42] παρέχοντας με αυτό τον τρόπο συστήματα λειτουργικά, μικρού μεγέθους και χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης.

5.3.2 Αρχή λειτουργίας κυκλώματος επίλυσης σύγκρουσης πακέτων

Το Σχήμα 91 απεικονίζει την αρχιτεκτονική του οπτικού συστήματος επίλυσης σύγκρουσης πακέτων χρησιμοποιώντας έναν οπτικό μανδαλωτή, μια συμβολομετρική διάταξη Mach-Zehnder με ημιαγωγικούς οπτικούς ενισχυτές και δύο μετατροπείς μήκους κύματος. Προκειμένου να αξιολογηθούν οι επιδόσεις του και να εξεταστούν όλα τα ενδεχόμενα μεταγωγής, διερευνούνται οι ακόλουθες περιπτώσεις μετάδοσης πακέτων πληροφορίας.

Περίπτωση 1: Πακέτο πληροφορίας στη θύρα IN_2: Το πακέτο P4 σε μήκος κύματος λ_0 εισέρχεται στη μονάδα επίλυσης συγκρούσεων από τη θύρα IN_2 και μετατρέπεται σε ένα ενδιάμεσο μήκος κύματος λ_1 πριν οδηγηθεί στο μετατροπέα ημιαγωγικού ενισχυτή φίλτρου (SOA-OBF). Λόγω απουσίας πακέτου στην είσοδο IN_1, ο οπτικός μανδαλωτής παραμένει αδρανής σε αυτή τη χρονοθυρίδα εκπέμποντας φως σε μήκος κύματος λ_0 και όχι σε λ_2 . Κατά συνέπεια, ο μετατροπέας μήκους κύματος SOA-OBF1 μετατρέπει το πακέτο P4 στο αρχικό του μήκος κύματος, δρομολογώντας το τελικά στην έξοδο O/P1. Αντίθετα ο μετατροπέας SOA-OBF2 παραμένει απενεργοποιημένος λόγω της απουσίας σήματος σε μήκος κύματος λ_2 . Κατά συνέπεια το πακέτο P4 έχοντας το ενδιάμεσο μήκος κύματος λ_1 απορρίπτεται από το φίλτρο OBF2 (Optical Bandpass Filter-OBF) που είναι κεντραρισμένο σε μήκος κύματος λ_2 .



Σχήμα 91: Δομικό διάγραμμα λειτουργίας κυκλώματος επίλυσης σύγκρουσης πακέτων

Περίπτωση 2: Πακέτα πληροφορίας στο ίδιο μήκος κύματος και στις δύο θύρες IN_1 και IN_2 (Σύγκρουση): Το πακέτο P3 σε μήκος κύματος λ_0 εισέρχεται στο κύκλωμα από την είσοδο IN_2 και μετατρέπεται στο ενδιάμεσο μήκος κύματος λ_1 . Παράλληλα, το πακέτο P2 σε μήκος κύματος λ_0 μαζί με την με την επικεφαλίδα του σε μήκος λ_3 , εισέρχεται στο σύστημα από την είσοδο IN_1 με κατεύθυνση προς δύο ξεχωριστές διαδρομές. Η άνω διαδρομή οδηγεί το πακέτο απευθείας στην έξοδο O/P1, ενώ η κάτω εξάγει την επικεφαλίδα με στενό οπτικό φιλτράρισμα και ενεργοποιεί τον οπτικό μανδαλωτή. Η κατάσταση του μανδαλωτή σε αυτή την περίπτωση τροποποιείται εκπέμποντας φως σε μήκος κύματος λ_2 και όχι λ_0 . Κατά συνέπεια το πακέτο P3 μετατρέπεται στο νέο μήκος κύματος λ_2 μέσα στο μετατροπέα SOA-OBF2, ενώ απορρίπτεται από τον SOA-OBF1 λόγω της απουσίας σήματος ελέγχου σε λ_0 . Συγκρίνοντας τα πακέτα P3 και P2 στις εισόδους/εξόδους του συστήματος, είναι σαφές ότι εισέρχονται στο κύκλωμα στο ίδιο μήκος κύματος, αλλά εξάγονται σε διαφορετικά μήκη κύματος με αποτέλεσμα την επίλυση της επικείμενης σύγκρουσης.

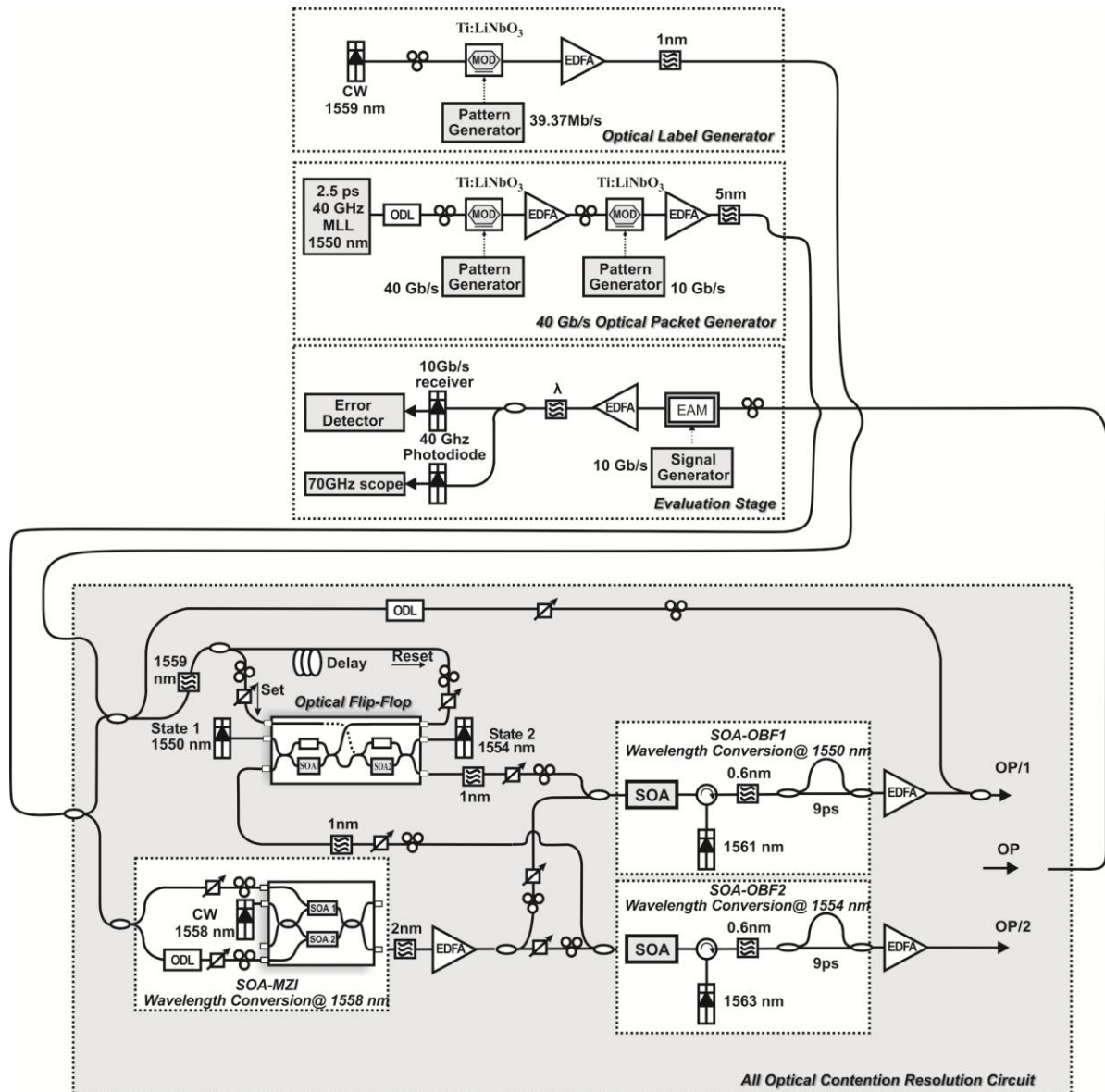
Περίπτωση 3: Πακέτο πληροφορίας μόνο στη θύρα IN_1: Το πακέτο P1 σε μήκος κύματος λ_0 μαζί με την επικεφαλίδα του σε μήκος κύματος λ_3 οδηγείται στην είσοδο IN_1 με κατεύθυνση προς δύο διαφορετικές διαδρομές. Η πάνω διαδρομή κατευθύνει το πακέτο απευθείας στην έξοδο O/P1 ενώ η κάτω εξάγει την επικεφαλίδα και τροφοδοτεί τον οπτικό μανδαλωτή. Όπως και στην περίπτωση 2, ο οπτικός μανδαλωτής εκπέμπει φως σε μήκος κύματος λ_2 και όχι σε λ_0 . Λόγω απουσίας πακέτου στη θύρα IN_1, δεν υπάρχει διαμορφωμένο σήμα στη θύρα μεταγωγής της συμβολομετρικής διάταξης και κατά συνέπεια και στους δύο μετατροπείς μήκους κύματος SOA-OBFs. Υπό την προϋπόθεση ότι ο μετατροπέας SOA-OBF2 περιλαμβάνει ένα συμβολόμετρο καθυστέρησης (DI) για την αναστροφή της πολικότητας, η έξοδος του του οπτικού μανδαλωτή σε μήκος κύματος λ_2 φιλτράρεται από το OBF2 αλλά στη συνέχεια καταπιέζεται από τη

χαρακτηριστική του DI. Αντίστοιχα, η αυθόρμητη εκπομπή του ημιαγωγικού ενισχυτή στο μετατροπέα SOA-OBF1 φιλτράρεται από το OBF1 αλλά και πάλι καταπιέζεται από το συμβολόμετρο καθυστέρησης. Αυτό έχει ως συνέπεια οι έξοδοι των μετατροπέων SOA-OBFs να έχουν καλό σηματοθορυβικό λόγο.

5.3.3 Πειραματική αξιολόγηση του κυκλώματος επίλυσης σύγκρουσης πακέτων πληροφορίας

Το Σχήμα 92 απεικονίζει την πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται για την επίλυση σύγκρουσης πακέτων πληροφορίας. Αποτελείται από τέσσερα υποσυστήματα : την οπτική γεννήτρια παραγωγής 40Gb/s διαμορφωμένων πακέτων, τη γεννήτρια παραγωγής επιφαλίδων, τη μονάδα επίλυσης συγκρούσεων και το σύστημα αξιολόγησης των εξερχόμενων κυματομορφών. Ένα λέιζερ εγκλείδωσης ρυθμών ρυθμοδότησης 40 GHz παράγει παλμούς χρονικής διάρκειας 2.5ps σε μήκος κύματος 1550nm, οι οποίοι διαμορφώνονται από μια ψευδοτυχαία ακολουθία 2^7-1 . Το σήμα αυτό περνά από ένα δεύτερο διαμορφωτή LiNbO₃ που οδηγείται από μια γεννήτρια 10 Gb/s με σκοπό να σχηματιστεί μια ακολουθία από δύο πακέτα δεδομένων διάρκειας 20,8 ns με χρονικό διάστημα προστασίας 4,6ns. Αυτή η κυματομορφή διαχωρίζεται στη συνέχεια σε δύο κομμάτια έτσι ώστε να δημιουργηθούν τα εισερχόμενα πακέτα πληροφορίας P1-P2 και P3-P4.

Για την επίλυση σύγκρουσης πακέτων πραγματοποιείται αρχικά συγχρονισμός μεταξύ των πακέτων P2 και P3 μέσω καθυστέρησης της κυματομορφής P1-P2 σε σχέση με την P3-P4. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με ένα κομμάτι απλής μονορρυθμικής ίνας που αντιπροσωπεύει καθυστέρηση 25,4ns. Η κυματομορφή που περιέχει τα πακέτα P1 και P2 ενώνεται με επικεφαλίδες διάρκειας 1 ns οι οποίες παράγονται από έναν τρίτο διαμορφωτή LiNbO₃. Το προκύπτον σήμα ακολουθεί δύο διαδρομές για τη δρομολόγηση των πακέτων πληροφορίας απευθείας στην έξοδο O/P1 και την ενεργοποίηση του οπτικού μανδαλωτή. Ο τελευταίος αποτελείται από δύο συζευγμένα συμβολόμετρα Mach-Zehnder και για την αλλαγή της κατάστασης λειτουργίας του χρησιμοποιούνται παλμοί ενεργοποίησης/απενεργοποίησης (Set/Reset). Προκειμένου να παραχθούν αυτά τα σήματα ελέγχου, η επικεφαλίδα κάθε πακέτου εξάγεται με τη χρήση ενός οπτικού φίλτρου, διαιρείται με ένα διαχωριστή και καθυστερείται κατά 22ns. Στη συνέχεια οι δύο έξοδοι του οπτικού μανδαλωτή διασυνδέονται με τις εισόδους των μετατροπέων SOA-OBFs τροφοδοτώντας τους με παλμούς για την ενεργοποίηση ή μη της λειτουργίας μετατροπής μήκους κύματος. Για την ενδιάμεση μετατροπή των πακέτων P3-P4 χρησιμοποιείται μια ολοκληρωμένη συμβολομετρική διάταξη (SOA-MZI) σε μήκος κύματος 1558nm. Η θύρα μεταγωγής του συμβολόμετρου παράγει σήματα ελέγχου τα οποία συγχρονίζονται με τις εξόδους του οπτικού μανδαλωτή και στη συνέχεια εισάγονται στους μετατροπέες SOA-OBFs. Οι τελευταίοι αναλαμβάνουν τη



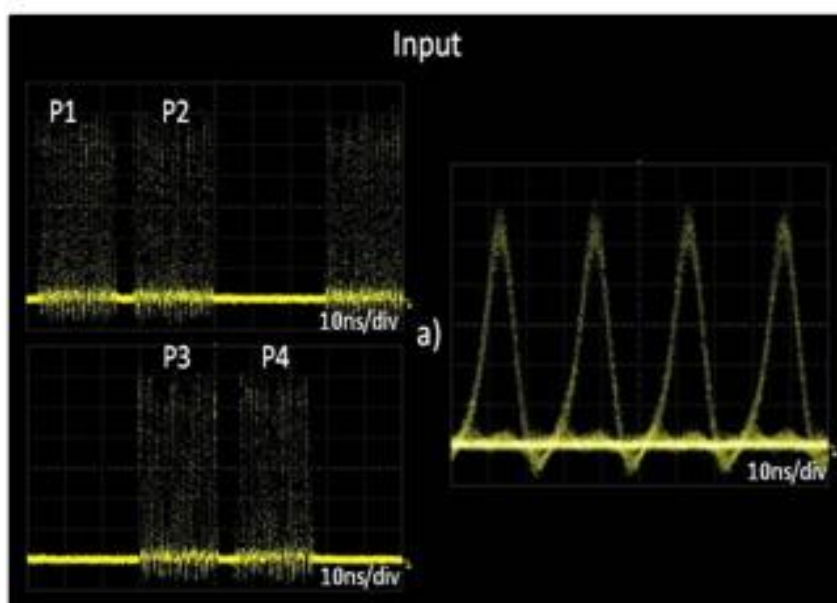
Σχήμα 92: Πειραματική διάταξη επίλυσης σύγκρουσης πακέτων

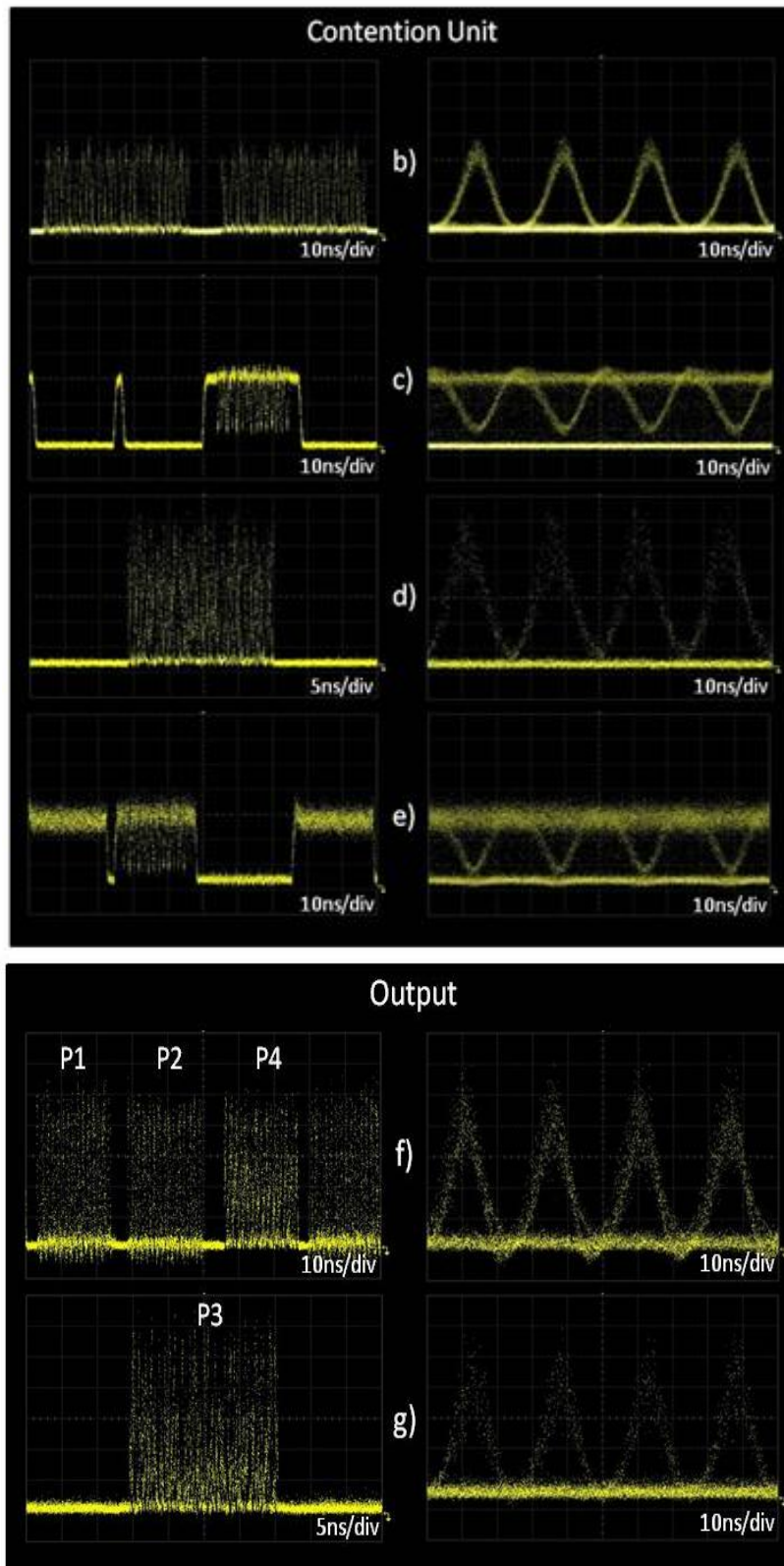
δρομολόγηση των τελικών πακέτων πληροφορίας και την επίλυση των συγκρούσεων. Και οι δύο ημιαγωγικοί ενισχυτές στους μετατροπείς SOA-OBFs έχουν 25 dB κέρδος μικρού σήματος και χρόνο ανάκαμψης 25 ps, ενώ παράλληλα γίνεται χρήση βοηθητικών δεσμών συνεχούς κύματος (CW) για τη μείωση της αυθόρμητης εκπομπής θορύβου μεταξύ των πακέτων. Για την επιτάχυνση της λειτουργίας των εξερχόμενων σημάτων χρησιμοποιείται η τεχνική φιλτραρισμάτων του τετερίσματος (chirp) με φίλτρα εύρους 0.6nm, ακολουθούμενα από συμβολόμετρα καθυστέρησης 9ps για την αποκατάσταση της ορθής πολικότητας των κυματομορφών. Οι έξοδοι των μετατροπέων SOA-OBFs αξιολογούνται με μετρήσεις σφαλμάτων/λαθών ύστερα από αποπολυπλεξία σε κανάλια 10Gb/s με τη χρήση ενός διαμορφωτή ηλεκτροαπορρόφησης. Ο Πίνακας 4 δείχνει τις τιμές οπτικής ισχύος που χρησιμοποιήθηκαν για τους τρεις μετατροπείς μήκους κύματος.

Πίνακας 4: Οπτικές ισχύεις μετατροπέων μήκους κύματος (σε dBm)

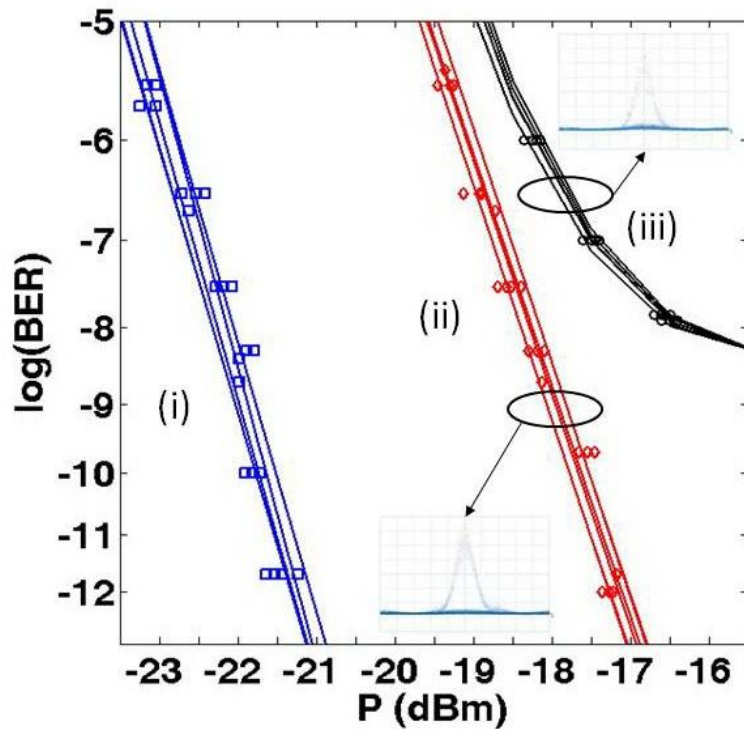
WC	SOA-MZI	SOA-OBF_1	SOA-OBF_2
Pin	-4	2.9	4.27
Pctr	-1.6	3.76	5.14
CW counter	---	-0.4	1.7

Το Σχήμα 93 a) απεικονίζει τις κυματομορφές εισόδου όπου σύγκρουση παρατηρείται μεταξύ των πακέτων P2 και P3. Το Σχήμα 93 b-e) εμφανίζει τα πακέτα πληροφορίας που διέρχονται από τους τρεις μετατροπείς μήκους κύματος. Είναι εμφανές από το Σχήμα 93 c, e) ότι ο οπτικός μανδαλωτής παράγει στις εξόδους του συμπληρωματικούς οπτικούς παλμούς με αποτέλεσμα τη μετατροπή μήκους κύματος διαφορετικών κυματομορφών σε κάθε SOA-OBF. Το Σχήμα 93 f) απεικονίζει τα πακέτα P1, P2, P4 που εξέρχονται από την έξοδο O/P1 στο ίδιο μήκος κύματος 1550 nm, ενώ το Σχήμα 93 g) δείχνει το πακέτο P3 το οποίο έχει μετατραπεί στο νέο μήκος κύματος 1554 nm για την αποφυγή σύγκρουσης με το πακέτο P2.





Σχήμα 93: Ίχνη και διαγράμματα ματιού α) Εισερχομένων πακέτων P1-P2-P3-P4, β) Μετατρεπόμενου μήκους κύματος στην έξοδο SOA-MZI, γ) Μετατρεπόμενου μήκους κύματος αντεστραμμένης πολικότητας στην έξοδο του SOA-OBF1, δ) Μετατρεπόμενου μήκους κύματος ορθής πολικότητας στην έξοδο του SOA-OBF1, ε) Μετατρεπόμενου μήκους κύματος αντεστραμμένης πολικότητας στην έξοδο του SOA-OBF2, ς) Έξοδος O/P1, ζ) Έξοδος O/P2.



Σχήμα 94: Καμπύλες μετρήσεων λαθών i) Εισερχομένων πακέτων, ii) Έξοδος μετατροπέα SOA-OBF1, iii) Έξοδος μετατροπέα SOA-OBF2

Το Σχήμα 94 απεικονίζει τις καμπύλες μετρήσεων λαθών των εισερχομένων πακέτων πληροφορίας, των κυματομορφών στη θύρα O/P2 και των σημάτων στην έξοδο του μετατροπέα μήκους κύματος SOA-OBF1. Στο ίδιο διάγραμμα φαίνονται τα διάγραμματα ματιού των αποπολυπλεγμένων 10Gb/s καναλιών. Λειτουργία χωρίς λάθη παρατηρήθηκε στην έξοδο SOA-OBF1 (Πακέτο P4) με ποιή ισχύος 4dB. Λειτουργία με υπόβαθρο 10^{-8} μετρήθηκε στην έξοδο O/P2 εξαιτίας της συμπεριφοράς του οπτικού μανδαλωτή ο οποίος παρήγαγε σήματα διαφορετικού λόγου σβέσης στις δύο εξόδους του. Το γεγονός αυτό οφείλεται στις μη ιδανικές αναλογίες των συζευκτών στα συμβολόμετρα Mach-Zehnder όπως και στην αδυναμία θερμικής ακρίβειας κατά τη μεταβολή φάσης.

Αναφορές

- [5.1] B. Mukherjee, *Optical Communication Networks*, McGraw-Hill, 1997.
- [5.2] R. Rawaswami and K. Sivarajan, *Optical Networks: A Practical Perspective*, Morgan Kaufmann Publishers, 1998.
- [5.3] I. Chlamtac, A. Farago, and T. Zang, "Lightpath routing in large WDM networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, no. 5, pp. 909–913, June 1994.
- [5.4] B. Mukherjee, D. Banerjee, S. Ramamurthy, and A. Mukherjee, "Some principles for designing a wide-area WDM optical network," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 4, no. 5, pp. 124–129, Oct. 1996.
- [5.5] A. Banerjee et al., "Generalized multiprotocol label switching: an overview of signaling enhancements and recovery techniques," *IEEE Communications Magazine*, vol. 39, pp. 144–151, July 2001.
- [5.6] C. Qiao and M. Yoo, "Optical burst switching (OBS) - a new paradigm for an optical internet," *Journal of High Speed Networks*, vol. 8, no. 1, pp. 69–84, 1999.
- [5.7] I. Chlamtac, V. Elek, A. Fumagalli, and C. Szabo, "Scalable WDM access network architecture based on photonic slot routing," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 7, no. 1, pp. 1–9, Feb. 1999.
- [5.8] D. J. Blumenthal, P. R. Prucnal, and J. R. Sauer, "Photonic packet switches: architectures and experimental implementations," *Proc. IEEE*, vol. 82, pp. 1650–1667, Nov. 1994.
- [5.9] M. J. O'Mahony, D. Simeonidou, D. K. Hunter, and A. Tzanakaki, "The application of optical packet switching in future communication networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 39, pp. 128–135, Mar. 2001.
- [5.10] D. K. Hunter and I. Andronovic, "Approaches to optical internet packet switching," *IEEE Communications Magazine*, vol. 38, pp. 116–122, Sept. 2000.
- [5.11] F. Callegati, A. C. Cankaya, Y. Xiong, and M. Vandenhoute, "Design issues of optical IP routers for internet backbone applications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 37, pp. 124–128, Dec. 1999.
- [5.12] A. Jourdan, D. Chiaroni, E. Dotaro, G. J. Eilenberger, F. Masetti, and M. Renaud, "The perspective of optical packet switching in IP dominant backbone and metropolitan networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 39, pp. 136–141, Mar. 2001.
- [5.13] S. Yao, S. J. B. Yoo, B. Mukherjee, and S. Dixit, "All-optical packet switching for metropolitan area networks: opportunities and challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 39, pp. 142–148, Mar. 2001.
- [5.14] S. L. Danielsen, P. B. Hansen, and K. E. Stubkjear, "Wavelength conversion in optical packet switching," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 16, no. 12, pp. 2095–2108, Dec. 1998.
- [5.15] V. Eramo and M. Listanti, "Packet loss in a bufferless optical WDM switch employing shared tunable wavelegth converters," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 18, no. 12, pp. 1818–1833, Dec. 2000.
- [5.16] D. K. Hunter et al., "WASPNET: a wavelength switched packet network," *IEEE Communications Magazine*, vol. 37, no. 3, pp. 120–129, Mar. 99.
- [5.17] P. B. Hansen et al., "Optical packet switching without packet alignment," *Proc. ECOC'98*, p. WdD13, 1998.

- [5.18] G. Castanon, L. Tancevski, S. Yagnanarayanan, and L. Tamil, "Asymmetric WDM all-optical packet switched routers," *Proc. OFC '00*, vol. 2, pp. 53–55, Mar. 2000.
- [5.19] D. K. Hunter, M. C. Chia, and I. Andonovic, "Buffering in optical packet switches," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 16, no. 12, pp. 2081–2094, Dec. 1998.
- [5.20] L. Tancevski, A. Ge, and G. Castanon, "Optical packet switch with partially shared buffers: design principles," *Proc. OFC '01*, vol. 2, pp. TuK3–1 –TuK3–3, Mar. 2001.
- [5.21] L. Tancevski et al., "Optical routing of asynchronous, variable length packets," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 18, pp. 2084–2093, Oct. 2000.
- [5.22] C. Guillemot et al., "Transparent optical packet switching: the European ACTS KEOPS project approach," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 16, pp. 2117–2133, Dec. 1998.
- [5.23] Z. Haas, "The 'staggering switch': an electronically controlled optical packet switch," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 11, no. 5/6, pp. 925–936, May/June 1993.
- [5.24] D. K. Hunter, W. D. Cornwell, T. H. Gilfedder, A. Franzen, and I. Andonovic, "SLOB: a switch with large optical buffers for packet switching," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 16, no. 10, pp. 1725–1736, Oct. 1998.
- [5.25] I. Chlamtac et al., "CORD: contention resolution by delay lines," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, no. 5, pp. 1014–1029, June 1996.
- [5.26] F. Callegati and W. Cerroni, "Wavelength allocation algorithms in optical buffers," *Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC '01)*, vol. 2, pp. 499–503, June 2001.
- [5.27] F. Forghieri, A. Bononi, and P. R. Prucnal, "Analysis and comparison of hot-potato and single-buffer deflection routing in very high bit rate optical mesh networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 43, no. 1, pp. 88–98, Jan. 1995.
- [5.28] G. Castanon, L. Tancevski, and L. Tamil, "Routing in all-optical packet switched irregular mesh networks," *Proc. IEEE Globecom '99*, pp. 1017–1022, Dec. 1999.
- [5.29] F. Brogonovo, L. Fratta, and J. Bannister, "Unslotted deflection routing in all-optical networks," *Proc. IEEE Globecom '93*, vol. 1, pp. 119–125, 1993.
- [5.30] A. S. Acampora and S. I. A. Shah, "Multihop lightwave networks: a comparison of store-and-forward and hot-potato routing," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 40, pp. 1082–1090, June 1992.
- [5.31] J. Fehrer, J. Sauer, and L. Ramfelt, "Design and implementation of a prototype optical deflection network," *Proc. ACM SIGCOMM*, vol. 24, pp. 191–200, 1994.
- [5.32] G. Prati, Ed., *Photonic Networks*, Springer Verlag, London, U.K., 1997.
- [5.33] L. Stampoulidis, E. Kehayas, D. Apostolopoulos, P. Bakopoulos, K. Vysokinos, and H. Avramopoulos, "On-the-Fly All-Optical Contention Resolution for NRZ and RZ Data Formats Using Packet Envelope Detection and Integrated Optical Switches", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, VOL. 19, NO. 8, pp. 538-541, APRIL 15, 2007.
- [5.34] D. Apostolopoulos, E. Kehayas, L. Stampoulidis, P. Bakopoulos and H. Avramopoulos, "All-Optical Contention Resolution in Space and Wavelength Domain with Ultra-Fast Packet Envelope Detection and Integrated Optical Gates", presented at the European Conference on Optical Communication (ECOC) 2006, We1.4.2, Cannes France.
- [5.35] " D. Apostolopoulos, P. Zakyntinos, L. Stampoulidis, E. Kehayas, R. McDougall, R. Harmon, A. Poustie, G. Maxwell, R. Van Caenegem, D. Colle, M. Pickavet, E. Tangdiongga, H. J. S. Dorren, and H. Avramopoulos, "Contention Resolution for Burst-Mode Traffic Using Integrated

SOA-MZI Gate Arrays and Self-Resetting Optical Flip-Flops”, IEEE Photon. Technol. Lett., VOL. 20, NO. 24, pp. 2024-2026, DECEMBER 15, 2008.

- [5.36] P. Bakopoulos, P. Zakyntinos, E. Kehayas, L. Stampoulidis, F. Fresi, C. Porzi, N. Calabretta, Ch. Kouloumentas, D. Petrantonakis, A. Maziotis, C. Stamatiadis, D. Apostolopoulos, M. Guina, D. Klonidis, L. Potì, E. Tangdionga, A. Poustie, G. Maxwell, I. Tomkos, A. Bogoni, H.J.S. Dorren and H. Avramopoulos, “160 Gb/s All-Optical Contention Resolution with Prioritization using Integrated Photonic Components”, ECOC 2009, 20-24 September, 2009, Vienna, Austria Paper 6.3.5.
- [5.37] H. Takenouchi, R. Urata, T. Nakahara, T. Segawa, H. Ishikawa, R. Takahashi, “First Demonstration of a Prototype Hybrid Optoelectronic Router”. in Proceedings of European Conference On Optical Communications, (Vienna, Austria, 2009), pp. 1-2.
- [5.38] S. C. Nicholes, M. L. Masanovic, B. Jevremovic, E. Lively, L. A. Coldren, D. J. Blumenthal, “The World’s First InP 8x8 Monolithic Tunable Optical Router (MOTOR) Operating at 40 Gbps Line Rate per Port”, in Proceedings of Optical Fiber Communications, (San Diego, Calif., 2009), pp. 1-3.
- [5.39] L. Stampoulidis, D. Apostolopoulos, D. Petrantonakis, P. Zakyntinos, P. Bakopoulos, O. Zouraraki, E. Kehayas, A. Poustie, G. Maxwell, H. Avramopoulos, “ Enabling Tb/s Photonic Routing: Development of Advanced Hybrid Integrated Photonic Devices to Realize High-Speed, All-Optical Packet Switching,” J. Sel. Quantum Electron. 14, 849-860 (2008)
- [5.40] N. Pleros, D. Apostolopoulos, D. Petrantonakis, C. Stamatiadis, H. Avramopoulos, “Optical Static Ram Cell ” IEEE Photon. Technol. Lett. 21, 73-75, (2009).
- [5.41] P. Zakyntinos, D. Apostolopoulos, L. Stampoulidis, E. Kehayas, A. Poustie, G. Maxwell, R. Van Caenegem, D. Colle, M. Pickavet, E. Tangdionga, H. J. S Dorren, H. Avramopoulos, “Successful Interconnection of SOA-MZI Arrays and Flip-Flops to Realize Intelligent, All-optical Routing,” in Proceedings of European Conference On Optical Communications, (Brussels, Belgium, 2008), pp. 1-2.
- [5.42] J. A. Summers, M. L. Masanovic, V. Lal, D. J. Blumenthal, “Design and Operation of a Monolithically Integrated Two-Stage Tunable All-Optical Wavelength Converter” IEEE Photon. Technol. Lett.19, 1248-1250, (2007).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Σύνοψη αποτελεσμάτων και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η έκρηξη της τηλεπικοινωνιακής κίνησης τα τελευταία χρόνια καθώς επίσης και η εμφάνιση νέων ευρυζωνικών εφαρμογών και υπηρεσιών είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη συστημάτων δρομολόγησης με μεγαλύτερη χωρητικότητα για την εξυπηρέτηση, διαχείριση και επεξεργασία του ολοένα αυξανόμενου όγκου πληροφοριών. Μέχρι πρότινος τις ανάγκες ανταλλαγής και δρομολόγησης δεδομένων αναλάμβαναν ηλεκτρονικές συσκευές οι οποίες λειτουργώντας σε ταχύτητες δεδομένων 40Gb/s μπορούσαν να επεκταθούν και να διασυνδεθούν σε μεγαλύτερες διατάξεις παρέχοντας υψηλές χωρητικότητες μεταγωγής. Με την εδραίωση όμως του πρωτοκόλλου διαδικτύωσης και την επανάσταση στις παρεχόμενες μορφές επικοινωνίας, επήλθε ο κορεσμός των ηλεκτρονικών συστημάτων καθώς η περαιτέρω διασύνδεση και επεκατασιμότητά τους καθίστατο απαγορευτική λόγω της αυξημένης ενεργειακής κατανάλωσης, του μεγάλου όγκου επιφανείας και του αρκετά δαπανηρού κόστους. Υπό αυτό το πρίσμα η ανάπτυξη και εξέλιξη εναλλακτικών μορφών δρομολόγησης και επεξεργασίας ήταν επιβεβλημένη.

Ο ρόλος των οπτικών στο σχεδιασμό και κατασκευή φωτονικών αρχιτεκτονικών μεταγωγής αποτελεί αντικείμενο συστηματικής έρευνας και μελέτης την τελευταία δεκαετία. Μπορεί η διάδοση της πληροφορίας να γίνεται με χρήση οπτικών ινών, λόγω του τεράστιου εύρους ζώνης που διαθέτουν, ωστόσο οι κύριες λειτουργίες διαχείρισης και μεταγωγής εκτελούνται από ηλεκτρονικές διατάξεις. Με την πρόσφατη όμως ανάπτυξη διαφόρων τεχνικών φωτονικής ολοκλήρωσης, άρχισε να γίνεται εφικτή η δημιουργία μικρο-οπτικών κυκλωμάτων με επεξεργαστική ισχύ αντίστοιχη και μεγαλύτερη από εκείνη των αμιγώς ηλεκτρονικών συστημάτων δρομολόγησης με σημαντικά οφέλη στην τοπολογία και διαχείριση του δικτύου. Με τη δυνατότητα μάλιστα ολοκλήρωσης πολυστοιχειακών δομών πάνω στο ίδιο υπόστρωμα έγινε εφικτός ο σχεδιασμός αποδοτικών οπτικών κυκλωμάτων για την υλοποίηση πιο σύνθετων και πολύπλοκων διεργασιών οπτικής επεξεργασίας σήματος.

Το πυρίτιο θεωρείται πλέον σήμερα ως το ιδανικό υλικό για την κατασκευή οπτικών διατάξεων ευρείας έκτασης με υπερυψηλές ταχύτητες λειτουργίας. Λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητάς του, της κρυσταλλικής ποιότητας και καθαρότητάς του, των άριστων μηχανικών ιδιοτήτων του και του χαμηλού του κόστους, έχει προσελκύσει παγκοσμίως το ενδιαφέρον πολλών ερευνητικών ομάδων, πανεπιστημιακών ινστιτούτων και εταιρειών (IBM, Cisco, Intel). Όλη η προσπάθεια εστιάζεται στην ανάπτυξη φωτονικών πλινθίων μικρού ίχνους, χαμηλής απώλειας, μικρής ενεργειακής κατανάλωσης και υψηλής απόδοσης με στόχο την αντικατάσταση των οπτοηλεκτρονικών μονάδων διαχείρισης και μεταγωγής των εμπορικών συστημάτων δρομολόγησης. Αν και η μεθοδολογία ή η τεχνική που πρέπει να υιοθετηθεί δεν είναι απολύτως ξεκάθαρη, οι υβριδικές μορφές ολοκλήρωσης αρχίζουν να αποδεικνύουν τη λειτουργικότητά τους και να υπόσχονται μια κοινή πλατφόρμα ολοκλήρωσης για τη δημιουργία καινοτόμων οπτικών συστημάτων επεξεργασίας.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής μελετούνται, υλοποιούνται και αξιολογούνται πρωτότυπες διατάξεις αμιγώς οπτικής επεξεργασίας ψηφιακών οπτικών σημάτων. Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα βασίζονται σε δομές πυριτίου με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά οπτικής μετάδοσης και καινοτόμες τεχνικές φωτονικής ολοκλήρωσης. Συγκεκριμένα μελετούνται πειραματικά μετατροπείς μήκους κύματος υπερυψηλών ταχυτήτων, κυκλώματα ανίχνευσης επικεφαλίδας, συστήματα αμιγώς οπτικής δρομολόγησης και αρχιτεκτονικές επίλυσης σύγκρουσης πακέτων πληροφορίας. Τα κυριότερα αποτελέσματα των πειραματικών αυτών εφαρμογών συνοψίζονται στις παραγράφους που ακολουθούν.

6.1 Σύνοψη και αποτίμηση αποτελεσμάτων

6.1.1 Μετατροπείς μήκους κύματος με χρήση ημιαγωγικών οπτικών ενισχυτών και συντονιστών δακτυλίου ανώτερης τάξης

Στα πλαίσια της διατριβής αναπτύχθηκαν μετατροπείς μήκους κύματος σε ταχύτητες έως 160Gb/s χρησιμοποιώντας ημιαγωγικούς οπτικούς ενισχυτές και συντονιστές δακτυλίου δεύτερης και τρίτης τάξης. Ο μηχανισμός της μετατροπής μήκους κύματος στηρίχτηκε στην ετεροδιαμόρφωση κέρδους και φάσης μέσα στον ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή και στην επιλογή φασματικών συνιστωσών με τετέρισμα (chirp) χρησιμοποιώντας τεχνικές φιλτραρίσματος. Καθώς όμως οι κυκλωματικές διατάξεις που είχαν επιδειχθεί με αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιούσαν στοιχεία χωρίς δυνατότητα ολοκλήρωσης σε ένα κοινό υπόστρωμα, ερευνήθηκε η χρήση μικρο-δομών δακτυλίου ανώτερης τάξης με

φασματικές αποκρίσεις παρόμοιες με εκείνες των αντίστοιχων εμπορικών φίλτρων. Μετά από μια σύντομη θεωρητική μελέτη διαφόρων μορφών αντηχειών, αναπτύχθηκαν μοντέλα προσομοίωσης εξετάζοντας την επίδραση των συντονιστών δακτυλίου στο μηχανισμό μετατροπής μήκους κύματος. Για ταχύτητες λειτουργίας έως 40Gb/s ήταν δυνατή η χρήση δομών δεύτερης τάξης ενώ για ρυθμοδότηση έως 160Gb/s ήταν απαραίτητη η χρήση συντονιστών δακτυλίου τρίτης τάξης με συναρτήσεις μεταφοράς μεγάλου λόγου σβέσης. Μετά από σχεδίαση και προσδιορισμό των παραμέτρων κάθε δομής δακτυλίου, τα στοιχεία αυτά ολοκληρώθηκαν σε πυρίτιο και χαρακτηρίστηκαν χρησιμοποιώντας μηχανικά συστήματα ευθυγράμμισης οπτικών ινών εστίασης και κυματοδηγών.

Οι χαρακτηριστικές φίλτρου που εξάχθηκαν είχαν λόγο σβέσης έως και 30dB με συνολικές απώλειες έως και 10dB, επιτρέποντας την πειραματική αξιολόγηση τους. Συγκεκριμένα μελετήθηκε η συμπεριφορά δακτυλίων Si_3N_4 με ακτίνα $>50\mu\text{m}$, λόγο σβέσης $<16\text{dB}$, ταχύτητες μετατροπής μήκους κύματος έως 40Gb/s και ποινές ισχύος $<2.2\text{dB}$. Στη συνέχεια αξιολογήθηκαν δομές δακτυλίου σε SOI με ακτίνα $>5\mu\text{m}$, λόγο σβέσης $<30\text{dB}$, ταχύτητες μετατροπής μήκους κύματος $<160\text{Gb/s}$ και ποινές ισχύος $<3.5\text{dB}$. Ανάμεσα στις δύο διαφορετικές δομές υλικών έγινε κατανοητό ότι οι δακτύλιοι Si_3N_4 παρουσιάζουν χαμηλές απώλειες της τάξης 0.1dB/cm, αναισθησία στην πόλωση αλλά ακτίνες $>50\mu\text{m}$ λόγω της διαφυγής του πεδίου σε πιο καμπύλες δομές. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στον περιορισμένο βαθμό συγκέντρωσης του πεδίου μέσα στους κυματοδηγούς λόγω της χαμηλής τιμής δείκτη διάθλασης του υλικού (low index contrast). Αντίθετα στις δομές SOI η απώλεια κυματοδότησης είναι της τάξης 4dB/cm, υπάρχει πλήρη εξάρτηση από την πόλωση του πεδίου, ωστόσο ακτίνες δακτυλίου μπορούν να κατασκευαστούν $<5\mu\text{m}$ λόγω της υψηλής τιμής δείκτη διάθλασης του υλικού (high index contrast).

Ως τελικό συμπέρασμα στα πλαίσια της ερευνητικής προσπάθειας υλοποιήθηκε για πρώτη φορά μετατροπέας μήκους κύματος με δυνατότητα ολοκλήρωσης τόσο του ημιαγωγίου ενισχυτή όσο και των δομών φίλτρου σε υπόστρωμα πυριτίου. Επιπλέον με τη χρήση συντονιστών δακτυλίου έγινε εφικτή η μετάδοση σημάτων πολυπλεξίας μήκους κύματος χρησιμοποιώντας τις περιοδικές συναρτήσεις μεταφοράς των θυρών πτώσης του αντηχείου. Μάλιστα με τη χρήση πυριτίου το ίχνος των διατάξεων μειώθηκε αισθητά δίνοντας τη δυνατότητα ολοκλήρωσης πολλών μετατροπέων στο ίδιο υπόστρωμα για την εξυπηρέτηση μεγαλύτερων ταχυτήτων μεταγωγής. Τέλος με τη χρήση ολοκληρωμένων θερμαντικών στοιχείων στις δομές δακτυλίου επιτεύχθηκαν φασματικές αποκρίσεις υψηλού λόγου σβέσης και απόδοσης, εύκολα και γρήγορα αναδιατάξιμες στα εισερχόμενα μήκη κύματος των πακέτων πληροφορίας.

6.1.2 Αμιγώς οπτικοί μετατροπείς μήκους κύματος με χρήση ημιαγωγικών οπτικών ενισχυτών, συμβολομέτρων καθυστέρησης και τεχνικών υβριδικής ολοκλήρωσης σε υπόστρωμα SOI

Στα πλαίσια της διατριβής αναπτύχθηκε ένα φωτονικό κύκλωμα μετατροπής μήκους κύματος ολοκληρώνοντας ημιαγωγικούς οπτικούς ενισχυτές και συμβολόμετρα καθυστέρησης σε υπόστρωμα SOI. Ο μηχανισμός της μετατροπής μήκους κύματος στηρίχτηκε στην ετεροδιαμόρφωση κέρδους και φάσης μέσα στον ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή, στην επιλογή φασματικών συνιστωσών με τετέρισμα (chirp) και στην αναστροφή της πόλωσης του τελικώς μετατρεπόμενου σήματος χρησιμοποιώντας τις χαρακτηριστικές των δύο συμβολομέτρων καθυστέρησης. Για πρώτη φορά επιδείχθηκε υβριδική ολοκλήρωση InP ημιαγωγικών ενισχυτών σε υπόστρωμα πυριτίου με άριστη μηχανική, ηλεκτρική και οπτική συμπεριφορά. Για την ολοκλήρωση του SOA πάνω στο υπόστρωμα SOI χρησιμοποιήθηκε ένα μηχανικό σύστημα ευθυγράμμισης ακρίβειας 1μm (flip-chip bonder) το οποίο ανέλαβε την τοποθέτηση και συγκόλληση των επιμέρους στοιχείων μέσω τήξης σφαιριδίων χρυσού. Το αμιγώς ολοκληρωμένο σύστημα μετατροπής μήκους κύματος χαρακτηρίστηκε οπτικά παρουσιάζοντας απώλειες μικρότερες από 4dB, φασματικές αποκρίσεις υψηλού λόγου σβέσης <30dB, φασματική απόδοση θερμαντικών στοιχείων ~ 6pm/mW και χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση. Στη συνέχεια αξιολογήθηκε πειραματικά σε ταχύτητες λειτουργίας 160Gb/s εμφανίζοντας ποινές ισχύος <4.4dB.

Η συμπεριφορά του αμιγώς ολοκληρωμένου μετατροπέα μήκους κύματος ερευνήθηκε και σε πραγματικές συνθήκες δικτύου για μετάδοση δεδομένων, φωνής και βίντεο. Συγκεκριμένα το οπτικό κύκλωμα διασυνδέθηκε ανάμεσα σε δύο ηλεκτρονικούς δρομολογητές και ανάλογα με το μήκος κύματος λειτουργίας του έγινε εφικτή η δρομολόγηση πακέτων πληροφορίας διαμέσου ενός πυκνού δικτύου οπτικών κόμβων και συστημάτων πολυπλεξίας μήκους κύματος. Η διαδικασία μεταγωγής υλοποιήθηκε χωρίς απώλειες δεδομένων ή υποβάθμιση των παρεχομένων υπηρεσιών ενώ επιτεύχθηκε και λειτουργία ρυθμοδότησης 40Gb/s με ποινές ισχύος περίπου 5dB. Η πειραματική αυτή προσπάθεια ανέδειξε την αξία των φωτονικών στοιχείων στη διαχείριση και επεξεργασία δεδομένων με ποιότητα μετάδοσης και μεταγωγής ανάλογη αυτής των ηλεκτρονικών αρχιτεκτονικών με χρήση όμως διατάξεων μικρού μεγέθους, χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης και μεγαλύτερης επεξεργαστικής ισχύος.

Με τη χρήση των δομών πυριτίου και τις τεχνικές υβριδικής ολοκλήρωσης έγινε κατανοητό ότι είναι πλέον υλοποιήσιμη η ανάπτυξη πολυστοιχειακών διατάξεων σε υπόστρωμα πυριτίου με στόχο την υλοποίηση τηλεπικοινωνιακών συστημάτων νέας γενιάς με χαμηλότερο κόστος και υψηλές χωρητικότητες λειτουργίας. Υιοθετώντας την τεχνολογία CMOS γίνεται πλέον πραγματοποιήσιμη η κατασκευή φωτονικών κυκλωμάτων ευρείας έκτασης για την υλοποίηση πολύπλοκων και σύνθετων διεργασιών που μέχρι πρότινος αποτελούσαν το μονοπώλιο των ηλεκτρονικών μορφών επεξεργασίας.

6.1.3 Αμιγώς οπτικά συστήματα δρομολόγησης σε υπερυψηλές ταχύτητες λειτουργίας χρησιμοποιώντας ολοκληρωμένα φωτονικά στοιχεία σε πυρίτιο

Στα πλαίσια της διατριβής αναπτύχθηκε ένα αμιγώς οπτικό σύστημα δρομολόγησης πακέτων πληροφορίας χρησιμοποιώντας κυκλώματα μικροδομών πυριτίου. Πιο συγκεκριμένα υλοποιήθηκαν τέσσερα καινοτόμα συστήματα οπτικής επεξεργασίας για την εκτέλεση διαφόρων διεργασιών φωτονικής δρομολόγησης. Για την ανίχνευση επικεφαλίδας συγχρονισμένων πακέτων πληροφορίας χρησιμοποιήθηκαν συντονιστές δακτυλίου ανώτερης τάξης με στενό εύρος ημίσειας ισχύος $\sim 0.04\text{nm}$ και ολοκληρωμένα θερμοαντικείμενα στοιχεία για τη μεταβολή των φασματικών αποκρίσεών τους. Για τη γένεση σημάτων ελέγχου δρομολόγησης έγινε χρήση οπτικών μαδαλωτών σε πυρίτιο με μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας 5Gb/s, μέγιστο λόγο σβέσης σημάτων $\sim 11\text{dB}$ και δυνατότητα αξιοποίησης δύο συμπληρωματικών εξόδων. Για τη μετατροπή μήκους κύματος των εισερχομένων πακέτων πληροφορίας χρησιμοποιήθηκε ένας ημιαγωγικός οπτικός ενισχυτής και ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα πυριτίου με δύο συμβολόμετρα καθυστέρησης σε σειρά. Η εν λόγω διάταξη είχε δυνατότητα λειτουργίας σε ταχύτητες ρυθμοδότησης έως 160Gb/s και μετάδοσης σημάτων πυκνής πολυπλεξίας μήκους κύματος χρησιμοποιώντας τις περιοδικές συναρτήσεις μεταφοράς των συμβολομέτρων καθυστέρησης. Για τη δρομολόγηση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν συστοιχίες φραγμάτων περίθλασης (AWG) δημιουργώντας μήτρες μεταγωγής πολλαπλών θυρών εξόδου. Τα επιμέρους κυκλώματα διασυνδέθηκαν σε μια κοινή πλατφόρμα δρομολόγησης επιδεικνύοντας ασύγκριτα μεγάλες ταχύτητες μεταγωγής με διαφάνεια λειτουργίας και ποινές ισχύος $< 4\text{dB}$.

Κάθε υποσύστημα που αναπτύχθηκε περιλαμβάνει φωτονικά στοιχεία τα οποία είναι ολοκληρώσιμα σε κοινά υποστρώματα πυριτίου. Αυτή η ιδιότητα παρέχει την ευελιξία υλοποίησης αμιγώς οπτικών αρχιτεκτονικών επεξεργασίας σήματος με μικρό ίχνος, μεγάλη επεξεργαστική ισχύ και υποστήριξη ευρυζωνικών εφαρμογών και υπηρεσιών. Με την αξιολόγηση των πειραματικών διατάξεων, γίνεται σαφές ότι τα οπτικά κυκλώματα μπορούν να προσδώσουν μεγαλύτερες χωρητικότητες λειτουργίας, να προσφέρουν διαφάνεια σε μεγάλο εύρος τιμών μήκων κύματος και να εκτελέσουν σύνθετες διεργασίες μεταγωγής. Με τη χρήση μάλιστα υβριδικών μορφών ολοκλήρωσης γίνεται εφικτός ο σχεδιασμός φωτονικών συστημάτων σε οπτικά πλινθία επιφανείας $< 100\text{mm}^2$ με μικρό κόστος και χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση. Έτσι γίνεται δυνατή η διαχείριση και μετάδοση της πληροφορίας χωρίς ενδιάμεσα στάδια οπτοηλεκτρονικής μετατροπής τα οποία αποτελούν σε μεγάλο βαθμό περιοριστικό παράγοντα στην απόδοση των δικτύων. Μπορεί η εμπορική χρήση των φωτονικών διατάξεων να εμποδίζεται προς στιγμήν από την ευαισθησία και την εξάρτηση στην πόλωση, ωστόσο οι ερευνητικές προσπάθειες βρίσκονται σε εξέλιξη αναδεικνύοντας συνεχώς τη δυναμική των οπτικών διατάξεων στις τηλεπικοινωνίες.

6.1.4 Αμιγώς οπτικά συστήματα επίλυσης σύγκρουσης πακέτων χρησιμοποιώντας μετατροπείς μήκους κύματος υπερυψηλών ταχυτήτων.

Σε αντίθεση με τα ηλεκτρικά συστήματα μεταγωγής όπου η σύγκρουση πακέτων επιλύεται με την τεχνική της αποθήκευσης και της μετάδοσης (store and forwarding), η οπτική επίλυση σύγκρουσης πακέτων πραγματοποιείται με εναλλακτικές μεθόδους επεξεργασίας λόγω απουσίας οπτικών μνημών τυχαίας προσπέλασης. Στα πλαίσια της διατριβής υλοποιήθηκε ένα κύκλωμα επίλυσης χρησιμοποιώντας μετατροπείς μήκους κύματος και οπτικούς μανδαλωτές. Τα δεδομένα κατευθύνονταν σε ένα σύστημα επεξεργασίας το οποίο αναλάμβανε την εξαγωγή επικεφαλίδας, την παροχή κατάλληλων σημάτων ελέγχου, τη μετατροπή μήκους κύματος σε ταχύτητες ρυθμοδότησης 40Gb/s και την τελική επίλυση των φαινομένων σύγκρουσης. Ο μηχανισμός λειτουργίας βασίστηκε στην αλλαγή των μηκών κύματος των εισερχομένων πακέτων πληροφορίας και στη δρομολόγησή τους σε διαφορετικές θύρες εξόδου. Η κυκλωματική διάταξη αξιολογήθηκε σε διάφορα σενάρια τηλεπικοινωνιακής κίνησης με ποινές ισχύος <4dB. Λαμβάνοντας υπόψη το μικρό αριθμό στοιχείων που συνθέτουν το εν λόγω κύκλωμα, τη δυνατότητα ολοκλήρωσής τους σε κοινό υπόστρωμα πυριτίου και την ικανότητα εξυπηρέτησης υψίρρυθμων ταχυτήτων λειτουργίας, η φωτονική διάταξη παρέχει ευελιξία, απλότητα και μεγάλη επεξεργαστική ισχύ.

6.1.5 Πλεονεκτήματα χρήσης οπτικών στοιχείων επεξεργασίας σήματος

Είναι γεγονός ότι τα ηλεκτρονικά συστήματα επεξεργασίας σήματος εμφανίζουν υψηλό κόστος, μεγάλη κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος και εξυπηρετούν συγκεκριμένες ταχύτητες δεδομένων. Οι εταιρείες Intel και IBM επιτυγχάνουν κάθε χρόνο ολοκλήρωση ολοένα και μεγαλύτερου αριθμού ηλεκτρονικών στοιχείων σε μικρότερες μονάδες επιφάνειας αυξάνοντας έτσι αποτελεσματικά την ταχύτητα των παραγόμενων δομών. Ενώ το 1970 ο αριθμός των τρανζίστορ που μπορούσαν να ολοκληρωθούν ήταν 5000, το 2010 ο αριθμός αυτός έφτασε τα 5 δισεκατομμύρια. Ωστόσο η απαιτούμενη χωρητικότητα επιτυγχάνεται με πιο πυκνή ολοκλήρωση ή με διασύνδεση πολλαπλών μονάδων επεξεργασίας, χωρίς η ταχύτητα κάθε μεμονωμένου ολοκληρώσιμου στοιχείου να αυξάνεται σημαντικά. Από την άλλη τα οπτικά κυκλώματα μετάδοσης και μεταγωγής διαθέτουν τεράστιο εύρος ζώνης, δυνατότητα μικρο-ολοκλήρωσης και ταχύτητες ρυθμοδότησης που φθάνουν έως και Tb/s. Με αυτόν τον τρόπο η ολοκλήρωση πολλαπλών φωτονικών στοιχείων στο ίδιο υπόστρωμα έχει τη δυνατότητα να εξασφαλίσει συνολικές χωρητικότητες ασύγκριτα μεγαλύτερες από τα αντίστοιχα ηλεκτρονικά συστήματα με μικρότερο κόστος και χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση. Για παράδειγμα ο Cisco-CRS-1 μονής διάταξης χρησιμοποιεί 16 κάρτες επεξεργασίας στα 40Gb/s και έχει συνολική χωρητικότητα 640Gb/s. Αν

αυτές οι ηλεκτρονικές κάρτες επεξεργασίας μπορούσαν να αντικατασταθούν από 8 οπτικές με ταχύτητα λειτουργίας στα 160Gb/s, είναι φανερό ότι θα υπήρχε συνολική χωρητικότητα $8 \times 160 \text{Gb/s} = 1.28 \text{Tb/s}$ με σημαντική μείωση στο συνολικό μέγεθος και στην ενεργειακή κατανάλωση της διάταξης. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι ένας φωτονικός δρομολογητής θα μπορούσε να έχει κατανάλωση ισχύος 650W/Terabit και κόστος 111Euro/Terabit, ενώ τα αντίστοιχα μεγέθη για τον Cisco-CRS-1 είναι 750W/ Terabit και 370Euro/ Terabit.

6.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Όπως φάνηκε στα πλαίσια της διατριβής οι οπτικές ολοκληρωμένες διατάξεις έχουν πλέον διεισδύσει σε όλες τις μορφές διαδικτύωσης συμβάλλοντας αποφασιστικά στην εξυπηρέτηση ολοένα και περισσότερο ευρυζωνικών εφαρμογών και υπηρεσιών. Αν και σε πρώιμο στάδιο εξέλιξης έχουν επιδείξει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά λειτουργίας καθιστώντας τη χρήση τους αναγκαία στην αντιμετώπιση της τηλεπικοινωνιακής έκρηξης που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια. Οι ερευνητικές και πειραματικές μελέτες υπόσχονται υψηλές χωρητικότητες διάδοσης και νέες αρχιτεκτονικές μεταγωγής χρησιμοποιώντας πολυστοιχειακές δομές μικρού αποτυπώματος, χαμηλού κόστους και περιορισμένης ενεργειακής κατανάλωσης. Ωστόσο υπάρχουν κάποιες λειτουργίες που δεν έχουν υλοποιηθεί ακόμα στο οπτικό πεδίο και οι οποίες είναι χρήσιμες για την κατασκευή άρτιων και πλήρως εξοπλισμένων φωτονικών συστημάτων. Μια σημαντική αδυναμία των οπτικών διατάξεων είναι η απουσία μονάδων αποθήκευσης με αποτέλεσμα τη χρήση οπτοηλεκτρονικών μετατροπών. Με δεδομένη την ύπαρξη οπτικών μονάδων προσπέλασης γίνεται εφικτή η αποτελεσματική διαχείριση και επεξεργασία των πληροφοριών με γρήγορο και εύελο τρόπο. Επίσης μπορεί οι δομές πυριτίου να παρέχουν φωτονικά κυκλώματα μικρού ίχνους, ωστόσο κρίνεται αναγκαία η αναζήτηση νέων υλικών και μεθόδων κυματοδηγησης παρέχοντας ακόμα πιο συμπαγές διατάξεις. Τέλος μπορεί η οπτική διαμόρφωση πλάτους να θεωρείται επικρατούσα στις οπτικές επικοινωνίες, ωστόσο νέες πιο αποδοτικές τεχνικές διαμόρφωσης είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν για τη μετάδοση ολοένα και μεγαλύτερου όγκου δεδομένων. Στα επόμενα κεφάλαια περιγράφονται κάποιες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στον τομέα της φωτονικής τεχνολογίας.

6.2.1 Προς την υλοποίηση αμιγώς οπτικών μονάδων μνήμης

Είναι γεγονός ότι τα οπτικά κυκλώματα αποτελούν σήμερα το κυρίαρχο μέσο μετάδοσης πληροφοριών επιτρέποντας ταχύτητες διάδοσης Tb/s. Ωστόσο, όλες οι διεργασίες δρομολόγησης και μεταγωγής βρίσκονται ακόμα στην κυριαρχία των ηλεκτρονικών λόγω των πανίσχυρων μνημών που διαθέτουν. Η ηλεκτρονική

μνήμη τυχαίας προσπέλασης (RAM) ήταν πάντα η κινητήριος δύναμη κάθε ηλεκτρονικής συσκευής για την εκτέλεση ενός ευρύ φάσματος λειτουργιών όπως δρομολόγηση, αποθήκευση ή κρυπτογράφηση δεδομένων. Για την υλοποίηση αντίστοιχων οπτικών συστημάτων μεταγωγής χρησιμοποιούνται υβριδικές αρχιτεκτονικές στηριζόμενες σε πολυάριθμα στάδια οπτοηλεκτρονικών μετατροπών και επεξεργασίας. Με αυτές τις τοπολογίες όμως οι ταχύτητες διάδοσης περιορίζονται από την ταχύτητα των ηλεκτρονικών επιφέροντας τον κορεσμό στα σύγχρονα συστήματα επικοινωνίας.

Η δημιουργία μιας αμιγώς οπτικής μνήμης αποθήκευσης αποτελεί αντικείμενο έντονης ερευνητικής και πειραματικής προσπάθειας με σκοπό την κατάργηση των σύνθετων και χρονοβόρων οπτοηλεκτρονικών μετατροπών. Μέχρι στιγμής, η αποθήκευση δεδομένων έχει βασιστεί στη χρήση οπτικών ινών καθυστέρησης [6.1][6.2], συζευγμένων ημιαγωγικών λείζερ [6.3][6.4] και συζευγμένων συμβολομετρικών διακοπών [6.5]. Πρόσφατα παρουσιάστηκε ένα φωτονικό κύκλωμα αποθήκευσης 1 διφύου χρησιμοποιώντας έναν οπτικό μανδαλωτή και δύο ημιαγωγικούς ενισχυτές [6.6]. Η εν λόγω διάταξη είχε ταχύτητα λειτουργίας 5Gb/s και δυνατότητες τόσο ανάγνωσης όσο και εγγραφής. Το επόμενο βήμα είναι η υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου φωτονικού κυκλώματος μνήμης χρησιμοποιώντας συμβολομετρικές διατάξεις και ημιαγωγικούς ενισχυτές σε υπόστρωμα πυριτίου. Υποστηρίζεται ότι με τη μεθοδολογία αυτή αναμένεται μια οπτική μονάδα αποθήκευσης με χρόνους μεταγωγής 10ps, ταχύτητα λειτουργίας 100Gb/s, ενεργειακή κατανάλωση 15 mW/Gbit/sec και συνολική επιφάνεια $2 \times 5 \text{ mm}^2$. Μάλιστα με την υβριδική ολοκλήρωση πολλαπλών φωτονικών στοιχείων στο ίδιο υλικό αναμένεται να αναπτυχθεί μια τράπεζα μνήμης 24bit κατάλληλη για υπολογιστικές εφαρμογές [6.7]. Τα κύρια χαρακτηριστικά που βρίσκονται υπό διερεύνηση είναι η δομή των ημιαγωγικών ενισχυτών, η τεχνική ολοκλήρωσή τους σε υποστρώματα πυριτίου και η διασυνδεσιμότητά τους με τις συμβολομετρικές διατάξεις.

6.2.2 Προς την υλοποίηση πλασμονικών ολοκληρωμένων διατάξεων

Οι ολοένα μεγαλύτερες απαιτήσεις εύρους ζώνης για την εξυπηρέτηση νέων εφαρμογών και υπηρεσιών είχαν ως αποτέλεσμα τα τελευταία χρόνια την ανάπτυξη παράλληλων συστημάτων επεξεργασίας. Για τη διασύνδεση των επιμέρους κυκλωμάτων ήταν αναγκαία η χρήση μεγάλου αριθμού οπτικών ινών καθιστώντας το μηχανισμό διασύνδεσης μια πολύπλοκη, δαπανηρή και ασύμφορη διαδικασία. Για παράδειγμα το σύστημα της IBM Roadrunner με 1 Pflor υπολογιστική ισχύ χρειάζεται 5000 ενεργά οπτικά καλώδια των 100m για τη διασύνδεση 296 κριωμάτων επεξεργασίας [6.8]. Το υπολογιστικό σύστημα της Fujitsu με 3Pflor υπολογιστική ισχύ χρειάζεται 20000 km ενεργών καλωδίων [6.9]

ενώ αντίστοιχη είναι η κατάσταση και στους δρομολογητές της Cisco για τη διασύνδεση των 72 μονάδων μεταγωγής συνολικής χωρητικότητας 92 Tb/s. Οι συμβατικές διασυνδέσεις οπτικών ινών έχουν την ικανότητα μετάδοσης μεγάλου όγκου πληροφοριών αλλά αδυνατούν να χρησιμοποιηθούν σε διατάξεις υπερυπολογιστών λόγω του φυσικού τους μεγέθους. Επίσης για τη δρομολόγηση δεδομένων πληροφορίας είναι αναγκαία η χρήση οπτικών δομών μικρότερου μεγέθους και πιο συμπαγών συστημάτων φωτονικής επεξεργασίας σήματος.

Τα προβλήματα αυτά είχαν ως συνέπεια την αναζήτηση νέων υλικών για την υλοποίηση των οπτικών διασυνδέσεων. Η πλασμονική τεχνολογία άρχισε να μελετάται εκτενώς τη δεκαετία του 1980 και η ευρεία διάδοσή τους στηρίζεται στη γνωστή ιδιότητα των μετάλλων να μην απορροφούν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, αλλά για συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων να της επιτρέπουν να διεισδύει σε κάποιο ελάχιστο βάθος της επιφάνειάς τους, μεταδίδοντας οπτική ισχύ σε διαστάσεις μικρότερες από το μήκος κύματος λειτουργίας τους. Το ζητούμενο στις διατάξεις πλασμονικής τεχνολογίας είναι η κυματοδήγηση οπτικής ισχύος σε διαστάσεις νανομέτρων (nm), ορίζοντας μια επιφάνεια μεταξύ ενός μετάλλου και ενός διηλεκτρικού, συνήθως πολυμερούς, στην οποία είναι δυνατή η διέγερση ταλαντώσεων των ελεύθερων ηλεκτρονίων του. Αυτές, όταν συζευγνύονται με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία συγκεκριμένης συχνότητας λαμβάνουν τη μορφή κύματος της ίδιας συχνότητας. Έτσι, επιτυγχάνεται κυματοδήγηση της οπτικής ισχύος στην επιφάνεια των δύο μέσων, και όχι σε μια περιοχή με χωρικά όρια, όπως στην περίπτωση των διηλεκτρικών κυματοδηγών τεχνολογίας SOI. Οι πλασμονικές δομές αποτελούν στις μέρες μας ερευνητικό αντικείμενο μελέτης για τη δημιουργία συστημάτων δρομολόγησης μικρού μεγέθους και υπολογιστικών συστημάτων μικρών διαστάσεων [6.10].

6.2.3 Προς τη χρήση εναλλακτικών μορφών διαμόρφωσης

Την τελευταία δεκαετία, παράλληλα με την εξέλιξη των φωτονικών συστημάτων διαμόρφωσης πλάτους, παρατηρήθηκε έντονη ερευνητική δραστηριότητα στην ανάπτυξη προηγμένων μορφών διαμόρφωσης (advanced modulation formats) με σκοπό την καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος και τη μεγαλύτερη ανθεκτικότητα των οπτικών σημάτων στα μη γραμμικά φαινόμενα και τα φαινόμενα διασποράς. Για τη μεταφορά δεδομένων σε ταχύτητες λειτουργίας 100Gb/s χρησιμοποιώντας τις διαθέσιμες 10 / 40 Gb/s συνδέσεις δικτύου ήταν αναγκαία η χρήση εναλλακτικών μορφών διαμόρφωσης [6.11]. Με τη χρήση τεχνικών ολίσθησης σε φάση (PSK, QPSK) επιτεύχθηκε μετάδοση δεδομένων σε ταχύτητα λειτουργίας έως και 8 Tb/s χρησιμοποιώντας μια απλή μονορρυθμική οπτική ίνα ενώ με πολυεπίπεδη διαμόρφωση πλάτους (QAM) έγινε εφικτή η μετάδοση ακόμα υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης. Σκοπός των σύγχρονων

ερευνητικών προσπαθειών είναι η ανάπτυξη φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλώματων ικανών να υποστηρίξουν μια σειρά από οπτικές διεργασίες χρησιμοποιώντας τις νέες μορφές οπτικής διαμόρφωσης. Το ενδιαφέρον εστιάζεται στην κατασκευή οπτικών διαμορφωτών, δεκτών, αναγεννητών και μετατροπέων μήκους κύματος σε μια κοινή πλατφόρμα ολοκλήρωσης εξασφαλίζοντας την κατασκευή δομών με μικρό αποτύπωμα, χαμηλό κόστος, υψηλές ταχύτητες λειτουργίας και περιορισμένη ενεργειακή κατανάλωση [6.12].

Αναφορές

- [6.1] D. K. Hunter, M. C. Chia, and I. Andonovic, "Buffering in optical packet switches," *J. Lightw. Technol.*, vol. 16, no. 12, pp. 2081–2094, Dec. 1998.
- [6.2] J.P. Mack, H.N. Poulsen, E.F. Burmeister, J.E. Bowers, and D.J. Blumenthal, "A 40 Gb/s asynchronous optical packet buffer based on an SOA gate matrix for contention resolution", in *Proc. Optical Fiber Commun. Conf (OFC) 2007, OWH7, USA, 2007.*
- [6.3] M. T. Hill et al, "A fast low-power optical memory based on coupled micro-ring lasers", *Nature*, Vol. 432, pp. 206-209, Nov.2004.
- [6.4] G. Yuan and S. Yu, "Analysis of dynamic switching behavior of bistable semiconductor ring lasers triggered by resonant optical pulse injection", *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 13, no. 5, pp. 1227–1234, Sep./Oct. 2007.
- [6.5] Y. Liu et al, "Packaged and hybrid integrated all-optical flip-flop memory", *Electron. Lett.*, Vol. 42, No. 24, pp. 1399-1400, Nov. 2006.
- [6.6] N. Pleros, D. Apostolopoulos, D. Petrantonakis, C. Stamatidis and H. Avramopoulos, "Optical Static RAM Cell", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 21, No 2, pp. 73-75, Jan. 2009.
- [6.7] <http://www.ict-ramplas.eu/>
- [6.8] Yurii Vlasov, "Silicon photonics for next generation computing systems" (Tutorial), ECOC 2008, Brussels.
- [6.9] Kimura, "PetaFlops-Class Computer and Optical Technology", *Symposium for Next Generation Optical Information and Communication Technology*, Sept. 2005
- [6.10] <http://www.ict-platon.eu/>
- [6.11] "100 Gb/s – How, Where, When?" WS5 Workshop at ECOC 2009, Vienna, Austria. Organizers: Jörg-Peter Elbers, ADVA AG Optical Networking; Glenn Wellbrock, Verizon Business.
- [6.12] <http://www.ict-galactico.eu/>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Δημοσιεύσεις σε έγκριτα περιοδικά και διεθνή επιστημονικά συνέδρια

Στο παράρτημα αυτό παρατίθενται οι δημοσιεύσεις της διατριβής σε έγκριτα επιστημονικά περιοδικά και διεθνή επιστημονικά συνέδρια.

Δημοσιεύσεις σε έγκριτα επιστημονικά περιοδικά με κρίση

[1] N. Pleros, D. Apostolopoulos, D. Petrantonakis, C. Stamatiadis and H. Avramopoulos, "Optical Static RAM cell", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 21, No. 2, pp. 73-75, Jan. 2009

[2] L. Stampoulidis, D. Petrantonakis, C. Stamatiadis, E. Kehayas, P. Bakopoulos, Ch. Kouloumentas, P. Zakyntinos, K. Vyrsoinos, R. Dekker, E.J. Klein, "Micro-ring resonator assisted, all-optical wavelength conversion using a single SOA and a 2nd order Si₃N₄-SiO₂ ROADM," Journal of Lightwave Technology, 4, 476-483 (2010)

[3] C. Reis, A. Maziotis, Ch. Kouloumentas, C. Stamatiadis, M. Bougioukos, N. Calabretta, P. Andre, R. Dionisio, B. Neto, H.J.S. Dorren, H. Avramopoulos and A. Teixeira, " All-Optical synchronous S-R flip-flop based on active interferometric devices" Electronics Letters, 46 , 709 – 710, (2010).

[4] C. Kouloumentas, C. Stamatiadis, P. Zakyntinos and H. Avramopoulos, "Repetition rate multiplication of pseudorandom-bit-sequences", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 21, No. 7, April, 2009

[5] C. Stamatiadis, K. Vyrsoinos, L. Stampoulidis, I. Lazarou, B. Schrenk, A. Leinse, R. Heideman, C. Bruinink, E.J. Klein and H. Avramopoulos, "Fabrication and Experimental demonstration of a four-channel x40Gb/s TriPleX all-optical

wavelength conversion platform," Journal of Lightwave Technology, 29, 1886-1891, (2011)

[6] K. Vyrsoinos, A. Maziotis, C. Kouloumentas, C. Stamatiadis and N. Pleros, "An optical MEMS-based dynamic capacity allocation scheme for handoff using moving extended cells in radio-over-fiber networks", Optics Communications. 284 (19), pp. 4390-4393

[7] C. Stamatiadis, K. Vyrsoinos, L. Stampoulidis, I. Lazarou, A. Maziotis, J. Bolten, M. Karl, T. Wahlbrink, P. De Heyn, Z. Sheng, D. Van Thourhout and Hercules Avramopoulos, "Silicon-on-insulator nanowire resonators for compact and ultra-high speed all-optical wavelength converters", JLT, 29, 3054-3060, (2011).

[8] C. Stamatiadis, F. Gomez-Agis, L. Stampoulidis, K. Vyrsoinos, I. Lazarou, H.J.S Dorren, L. Zimmermann, K. Voigt, D. Van Thourhout, P. De Heyn and H. Avramopoulos, "The BOOM project: 160 Gb/s Packet Switching Using SOI Photonic Integrated Circuits and Hybrid Integrated Optical Flip-flops", Journal of Lightwave Technology, 30, 22-30, 2012.

[9] C. Stamatiadis, L. Stampoulidis, D. Kalavrouziotis, I. Lazarou, K. Vyrsoinos, L. Zimmermann, K. Voigt, G. B. Preve, L. Moerl, J. Kreissl and H. Avramopoulos, "Fabrication and Experimental Demonstration of the First 160 Gb/s Hybrid Silicon-on-Insulator Integrated All-Optical Wavelength Converter", Optics Express, Vol. 20 Issue 4, pp.3825-3831 (2012).

[10] I. Lazarou, C. Stamatiadis, B. Schrenk, L. Stampoulidis, L. Zimmermann, K. Voigt, G.B. Preve, L. Moerl, J. Kreissl and H. Avramopoulos, "Colorless ONU with Discolored Source and Hybrid SOI Integrated Wavelength Converter", accepted to Photonics Technology Letters, to be published.

[11] H. Brahmi, G. Giannoulis, M. Menif, V. Katopodis, D. Kalavrouziotis, C. Stamatiadis, C. Kouloumentas, H. Avramopoulos and D. Erasme, "Experimental Demonstration of an Elastic Packet Routing Node Based On OCDMA Label Coding", IEEE Photon. Technol. Lett., accepted, to be published.

Δημοσιεύσεις σε έγκριτα επιστημονικά συνέδρια με κρίση

[1] N. Pleros, D. Apostolopoulos, D. Petrantonakis, C. Stamatiadis, and H. Avramopoulos, "All-Optical Static RAM Cell with Read/Write functionality at 5 Gb/s", Proceedings of 34th European Conf. On Optical Communication (ECOC) 2008, Vol. 3, We.2.C.5, pp. 107-108, Brussels, Belgium, September 2008 (2 pages).

- [2] L. Stampoulidis, C. Vyrsoinos, C. Stamatiadis, H. Avramopoulos, J. Kreissl, L. Mörl, D. Van Thourhout, J. Bolten, T. Wahlbrink, L. Zimmermann, K. Voigt, F. Gomez-Agis, E. Tangdionga, H. J. S. Dorren, C. Scheytt, R. Dekker, A. Pagano, E. Riccardi, "The BOOM project: A new Generation of Photonic Routing Subsystems using Hybrid Integration on Silicon-on-Insulator Waveguide boards", in Proc. SPIE Photonics Europe, 12-16 April 2010, Brussels .
- [3] C. Stamatiadis, M. Bougioukos, A. Maziotis, P. Bakopoulos, L. Stampoulidis, and H. Avramopoulos, "All-Optical Contention Resolution Using a Single-Optical Flip-Flop And Two-Stage All-Optical Wavelength Conversion," OFC 2010, San Diego.
- [4] K. Vyrsoinos, L. Stampoulidis, Z. Sheng, E. Kehayas, P. Bakopoulos, D. Petrantonakis, C. Stamatiadis, Ch. Kouloumentas, P. Zakyntinos, R. Dekker, E.J. Klein, D.V. Thourhout, M.T. Korthorst, H. Avramopoulos, "High-order micro-ring resonator assisted wavelength converters for scalable and power efficient photonic routers," in Proc. ECOC 2009, Vienna Austria, paper P2.08.
- [5] C. Stamatiadis, K. Vyrsoinos, L. Stampoulidis, A. Maziotis, Z. Sheng, D. Van Thourhout, J. Bolten, M. Karl, T. Wahlbrink and H. Avramopoulos, "All-Optical Wavelength Conversion at 160Gb/s Using an SOA and a 3rd Order SOI Nanowire Periodic Filter", IEEE Photonics Annual, Denver, Colorado, November 2010.
- [6] A. Pagano , E. Riccardi, L. Stampoulidis, C. Stamatiadis, K. Vyrsoinos , L. Zimmermann, C. Scheytt, F. Gomez-Agis, H. Dorren, Z. Sheng, D. Van Thourhout, L. Moerl, J. Kreissl, T. Wahlbrink , A. Leinse, "The European ICT-BOOM project: Silicon photonic TB/s routers," in Proc. FOTONICA 2010, Pisa, Italy, invited paper A4.1.
- [7] H. Brahmi, M. Bougioukos, M. Menif, A. Maziotis, C. Stamatiadis, Ch. Kouloumentas, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos and D.Erasme, " Experimental demonstration of an all-optical packet forwarding gate based on a single SOA-MZI at 40Gb/s", OFC 2011, OSA Tech. Dig. OMK5, Los Angeles, CA, USA.
- [8] B. Schrenk, C. Stamatiadis, I. Lazarou, A. Maziotis., G. de Valicourt, J.A. Lazaro, J. Prat and Hercules Avramopoulos, " On an ONU for full-duplex 10.5 Gb/s with shared delay interferometer for format conversion and chirp-filtering", In Proc. OFC'11, Los Angeles, California (United States), Mar. 2011, OThB7.
- [9] C. Stamatiadis, Ch. Kouloumentas, P. Zakyntinos, and H. Avramopoulos, " Rep rate multiplication of pseudorandom bit sequences" OFC 2009, Tech. Dig. OThF1, San Diego, USA, 2009.
- [10] C. Stamatiadis, D. Petrantonakis, P. Bakopoulos, E. Kehayas, P. Zakyntinos, Ch. Kouloumentas, L. Stampoulidis, R. Dekker, E. J. Klein and H. Avramopoulos " First

demonstration of WDM-enabled all-optical wavelength conversion with a SOA and a 2nd order Micro-Ring resonator ROADM", OFC 2009, Tech. Dig. PDPA8, San Diego, USA, 2009 (includes post-deadline papers).

[11] C. Stamatiadis, I. Lazarou, L. Stampoulidis, K. Vyrsoinos, B. Schrenk, A. Leinse, R. Heideman, C. Bruinink, E. Klein and H. Avramopoulos, "4x40Gb/s All-Optical Wavelength Conversion using SOAs and integrated arrays of ring resonators and DIs", in Proc. OFC 2011, Los Angeles, (2011), OThY4.

[12] C. Stamatiadis, L. Stampoulidis, K. Vyrsoinos, I. Lazarou, L. Zimmermann, K. Voigt, L. Moerl, J. Kreissl, B Sedighi, Z. Sheng, P. De Heyn, D. Van Thourhout, M. Karl, T. Wahlbrink, J. Bolten, A. Leinse, R. Heideman, F. Gomez Agis, H. Dorren, A. Pagano, E. Riccardi and H. Avramopoulos, "The ICT-BOOM project: Photonic routing on a silicon-on-insulatorhybrid platform," in Proc. ONDM 2011, Bologna, Italy, invited paper.

[13] A. Pagano, E. Riccardi, C. Stamatiadis, L. Stampoulidis, K. Vyrsoinos and H. Avramopoulos, "The European ICT-BOOM project: silicon photonics Tb/s routers for improved energy efficiency in optical networks", in Proc. SPIE 2011.

[14] D. Petrantonakis, C. Stamatiadis, L. Stampoulidis, P. Zakyntinos, P. Bakopoulos, E. Kehayas, R. Dekker, E.J. Klein and H. Avramopoulos, "A 40 Gb/s all-optical wavelength converter for RZ and NRZ data formats employing a single SOA and a microring resonator ROADM", AIP Conference Proceedings, Volume 1288, 2010, Pages 97-100.

[15] C. Reis, P. Andre, R. Dionisio, B. Neto, A. Teixeira, A. Maziotis, Ch. Kouloumentas, C. Stamatiadis, M. Bougioukos, H. Avramopoulos, N. Calabretta and H.J.S Dorren, "Experimental evaluation of all-optical asynchronous and synchronous memories", ICENCO'2010 - 2010 International Computer Engineering Conference: Expanding Information Society Frontiers.

[16] A. Maziotis, C. Stamatiadis, Ch. Kouloumentas, K. Vyrsoinos and N. Pleros, "Dual-user wireless heterogeneous services over a single optical carrier using optical frequency multiplication", Conference Proceedings - Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting-LEOS 2009, Article number 5343383, Pages 691-692.

[17] P. Bakopoulos, P. Zakyntinos, E. Kehayas, L. Stampoulidis, F. Fresi, C. Porzi, N. Calabretta, Ch. Kouloumentas, D. Petrantonakis, A. Maziotis, C. Stamatiadis, A. Apostolopoulos, M. Guina, D. Klondis, L. Potì, E. Tangdionga, A. Poustie, G. Maxwell, I. Tomkos, A. Bogoni, H.J.S. Dorren and H. Avramopoulos, "160 Gb/s all-optical contention resolution with prioritization using integrated photonic

components", European Conference on Optical Communication, ECOC 2009, Article number 5287142.

[18] I. Lazarou, C. Stamatiadis, B. Schrenk, L. Stampoulidis, L. Zimmermann, K. Voigt, G. B. Preve, L. Moerl, J. Kreissl and H. Avramopoulos, "Migrating Legacy PON Equipment towards Colorless ONU through Hybrid Integrated SOI All-Optical λ -Converter", accepted for presentation to OFC 2012.

[19] C. Stamatiadis, L. Stampoulidis, K. Vyrsoinos, I. Lazarou, D. Kalavrouziotis, L. Zimmermann, K. Voigt, G. B. Preve, L. Moerl, J. Kreissl and H. Avramopoulos, "A Hybrid Photonic Integrated Wavelength Converter on a Silicon-on-Insulator Substrate", accepted for presentation to OFC2012

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Παγκόσμια έρευνα τηλεπικοινωνιακής κίνησης το διάστημα 2005-2009	19
Σχήμα 2: Τηλεπικοινωνιακή κίνηση ανά γεωγραφικό διαμέρισμα	20
Σχήμα 3: Αρχιτεκτονική μητροπολιτικού δικτύου	23
Σχήμα 4: Ερευνητικές προσπάθειες παγκοσμίως για την αμιγώς οπτική μεταγωγή πακέτων πληροφορίας [1.19]	24
Σχήμα 5: a) Τεχνική πολυπλεξίας μήκους κύματος (WDM), b) Τεχνική πολυπλεξίας χρόνου (OTDM)	25
Σχήμα 6: Τοπολογία δικτύου με τις βασικές ζεύξεις κορμού	26
Σχήμα 7: Δομή του ηλεκτρονικού δρομολογητή Cisco CRS-1	27
Σχήμα 8: Δομή του ηλεκτρονικού δρομολογητή Juniper Matrix Plus.....	28
Σχήμα 9: Δομή ενός μη συγκρουόμενου Clos δικτύου 3 σταδίων	29
Σχήμα 10: Clos δίκτυο με 5 στάδια μεταγωγής.....	30
Σχήμα 11: Clos δίκτυο με 4x4 διακόπτες μεταγωγής.....	30
Σχήμα 12: Clos δίκτυο με 32 πόρτες εισόδου ανεπτυγμένο με 5 στάδια 4x4 διακοπών μεταγωγής.....	30
Σχήμα 13: Αρχιτεκτονική της ηλεκτρονικής μονάδας επεξεργασίας και μεταγωγής	31
Σχήμα 14: Κατανάλωση ισχύος συναρτήσει της χωρητικότητας των ηλεκτρονικών συστημάτων δρομολόγησης.....	32
Σχήμα 15: Ενεργειακή κατανάλωση των βαθμίδων λειτουργίας ενός ηλεκτρονικού δρομολογητή [1.26].....	33
Σχήμα 16: Εξέλιξη των οπτικών τεχνικών μεταγωγής στα δίκτυα πολυπλεξίας μήκους κύματος [1.26].....	34
Σχήμα 17: Αρχιτεκτονική ηλεκτρονικού δρομολογητή.....	35
Σχήμα 18: Υβριδική μορφή οπτοηλεκτρονικού δρομολογητή.....	35
Σχήμα 19: Αμιγώς οπτικός δρομολογητής δικτύου	36
Σχήμα 20: Φωτονική ολοκλήρωση σε υπόστρωμα πυριτίου.....	37
Σχήμα 21: Πολυστοιχειακή μορφή φωτονικής ολοκλήρωσης.....	39
Σχήμα 22: Δομή αμιγώςμετατροπέα μήκους κύματος με χρήση οπτικού φίλτρου.....	54
Σχήμα 23: Μεταβολή του κέρδους και του τετερίσματος συναρτήσει του χρόνου παρουσία ισχυρού παλμού.....	55
Σχήμα 24: Απεικόνιση της διαδικασίας επιτάχυνσης της ανάκαμψης του ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή	56
Σχήμα 25: Δομή συντονιστή δακτυλίου με έναν κυματοδηγό.....	57
Σχήμα 26: Απόκριση συντονιστή δακτυλίου με έναν κυματοδηγό.....	58
Σχήμα 27: Δομή συντονιστή δακτυλίου με έναν κυματοδηγό εισόδου και έναν κυματοδηγό εξόδου.....	59
Σχήμα 28: Απόκριση συντονιστή δακτυλίου με κυματοδηγό εισόδου-εξόδου (Με συνεχή γραμμή η απόκριση της θύρας μεταφοράς ενώ με τελείες της θύρας πτώσης)	60
Σχήμα 29: Συντονιστής δακτυλίου με ευθύγραμμα τμήματα σύζευξης.....	62
Σχήμα 30: Αντηχείο αποτελούμενο από 2 συζευγμένους συντονιστές δακτυλίου	63
Σχήμα 31: Γεωμετρία δύο συζευγμένων κυματοδηγών	65
Σχήμα 32: Λειτουργία του 4x40Gb/s οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος	68

Σχήμα 33: α) Κυματοδηγός TriPleX, β) Προφίλ ρυθμού, γ) Ολοκληρωμένο φωτονικό στοιχείο, γ) Μάσκα σχεδιασμού του αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος.....	70
Σχήμα 34: Βήματα κατασκευής φωτονικών στοιχείων με την τεχνολογία TriPleX [2.47]....	71
Σχήμα 35: α) Σύστημα ευθυγράμμισης οπτικών ινών με τους κυματοδηγούς του φωτονικού κυκλώματος, β) Οπτικές ίνες εστίασης τοποθετημένες στους κυματοδηγούς του οπτικού κυκλώματος,, γ) Ακίδες τοποθετημένες στα σημεία επαφής των θερμαντικών στοιχείων, δ) Σύζευξη μεταξύ ίνας και κυματοδηγού.....	72
Σχήμα 36: α) Πειραματική διάταξη χαρακτηρισμού του φωτονικού κυκλώματος, β) Μετατόπιση της φασματικής απόκρισης των συντονιστών δακτυλίου, γ) Φασματική μετατόπιση συναρτήσει της ηλεκτρικής κατανάλωσης.....	73
Σχήμα 37: Συνάρτηση μεταφοράς ισχύος κάθε μετατροπέα μήκους κύματος του φωτονικά ολοκληρωμένου κυκλώματος.....	74
Σχήμα 38: Πειραματική διάταξη.....	75
Σχήμα 39: α) Αρχικό σήμα εισόδου, β), d), f), h) Σήματα στην έξοδο των μετατροπέων μήκους κύματος 1-4 (WC1-WC4) με αντεστραμμένη πολικότητα, c), e), g), h) Σήματα εξόδου με ορθή πολικότητα.....	76
Σχήμα 40: α)-d) Μετρήσεις λαθών για τους μετατροπέες μήκους κύματος 1-4.....	77
Σχήμα 41: α)-d) Φασματικό περιεχόμενο των μετατροπέων μήκους κύματος 1-4 για αντεστραμμένη και ορθή πολικότητα.....	78
Σχήμα 42: α) Αρχή λειτουργίας του μετατροπέα μήκους κύματος, β) Σήμα εισόδου, c) Ανάκαμψη κέρδους του SOA, d) 40Gb/s μετατροπή μήκους κύματος με αντεστραμμένη πολικότητα, e) 40Gb/s μετατροπή μήκους κύματος με ορθή πολικότητα, f) 160Gb/s μετατροπή μήκους κύματος με αντεστραμμένη πολικότητα, g) 160Gb/s μετατροπή μήκους κύματος με ορθή πολικότητα.....	81
Σχήμα 43: Μικρογραφίες α) Διατομής κυματοδηγών, β) Χάραξης κυματοδηγών.....	84
Σχήμα 44: Μικρογραφίες α) Συντονιστή δακτυλίου τρίτης τάξης, β) Διάκενου σύζευξης...84	84
Σχήμα 45: α) Άκρη κυματοδηγού εκλέπτυνσης (taper tip), β) SU8 κυματοδηγού εκλέπτυνσης.....	84
Σχήμα 46: α) Διατομή κυματοδηγού SOI με επένδυση SiO ₂ και θερμαντικά στοιχεία τιτανίου, β) Δομή θερμαντικών στοιχείων πάνω από ένα συντονιστή δακτυλίου τρίτης τάξης.....	86
Σχήμα 47: Μικρογραφίες α) Συζεύκτη περίθλασης, β) Συντονιστή δακτυλίου τρίτης τάξης με θερμαντικά στοιχεία.....	86
Σχήμα 48: α) Διάταξη χαρακτηρισμού των ολοκληρωμένων φωτονικών στοιχείων. Φασματικές αποκρίσεις θυρών πτώσης συντονιστών δακτυλίου β) δεύτερης τάξης με ευθύγραμμα τμήματα σύζευξης, c) τρίτης τάξης με ευθύγραμμα τμήματα σύζευξης, d) δεύτερης τάξης με καμπύλα τμήματα σύζευξης, e) τρίτης τάξης με καμπύλα τμήματα σύζευξης.....	87
Σχήμα 49: α) Κατακόρυφο σύστημα ευθυγράμμισης οπτικών ινών, β) Οπτικές ίνες τοποθετημένες κατακόρυφα στους συζεύκτες περίθλασης,, γ) Πλάγια όψη συστήματος ευθυγράμμισης, δ) Σύζευξη μεταξύ ίνας και φράγματος περίθλασης (Εικόνα κάμερας).....	88
Σχήμα 50: α) Απόκριση συζεύκτη περίθλασης, β) Μεταβολή απόκρισης συντονιστή δακτυλίου τρίτης τάξης με χρήση ενός θερμαντικού στοιχείου.....	89
Σχήμα 51: Πειραματική διάταξη για την αξιολόγηση των συντονιστών δακτυλίου ανώτερης τάξης.....	91
Σχήμα 52: α) 40Gb/s σήμα εισόδου, β) Μετατροπή μήκους κύματος με συντονιστή δακτυλίου δεύτερης τάξης ευθύγραμμων τμημάτων σύζευξης (racetrack), c) Μετατροπή	

μήκους κύματος με συντονιστή δακτυλίου δεύτερης τάξης καμπύλων τμημάτων σύζευξης (ring) , d) Καμπύλες από μετρήσεις λαθών, Φάσματα e-f) Μετά τον SOA και racetrack αντιστοιχα, g-h) Μετά τον SOA και ring αντίστοιχα.....	92
Σχήμα 53: a) 160Gb/s μετατροπή μήκους κύματος χρησιμοποιώντας συντονιστή δακτυλίου τρίτης τάξης ευθύγραμμων τμημάτων σύζευξης (racetrack), b) Καμπύλες από μετρήσεις λαθών, Φάσματα c) μετατρεπόμενου μήκος κύματος αντεστραμμένης πολικότητας, d) μετατρεπόμενου μήκους κύματος ορθής πολικότητας.....	93
Σχήμα 54: Δομή του αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος σε πυρίτιο.....	103
Σχήμα 55: a) Μάσκα σχεδιασμού , b) Μικρογραφία ημιαγωγίμου οπτικού εινισχυτή σε υπόστρωμα SOI, c) Διάκενο μεταξύ SOA και κυματοδηγού SOI.....	104
Σχήμα 56: a) Ολοκληρωμένο κύκλωμα μετατροπέα μήκους κύματος, b) Φωτονικό πλινθίο τοποθετημένο σε σύστημα ευθυγράμμισης, c) Χαρακτηριστική του SOA, d) Φασματική απόκριση των συμβολομέτρων καθυστέρησης.....	106
Σχήμα 57: Πειραματική διάταξη για αμιγώς οπτική μετατροπή μήκους κύματος σε ταχύτητες λειτουργίας 160Gb/s	107
Σχήμα 58: Διαγράμμα ματιού a) 80Gb/s σήμα εισόδου, b) 80Gb/s μετατρεπόμενο μήκος κύματος με ανάστροφη πολικότητα, c) 80Gb/s μετατρεπόμενο μήκος κύματος με ορθή πολικότητα, d) 160Gb/s σήμα εισόδου, e) 160Gb/s μετατρεπόμενο μήκος κύματος με ανάστροφη πολικότητα, c) 160Gb/s μετατρεπόμενο μήκος κύματος με ορθή πολικότητα	108
Σχήμα 59: Καμπύλες μετρήσεων λαθών για λειτουργία a) 80Gb/s, b) 160Gb/s. Φάσμα εξόδου του μετατροπέα μήκους κύματος για c) 80Gb/s, e) 160Gb/s. Φάσμα του τελικώς μετατρεπόμενου μήκους κύματος ορθής πολικότητας για d) 80Gb/s, f) 160Gb/s.	109
Σχήμα 60: a-b) Οπτικές ίνες εστίασης ευθυγραμμισμένες στην είσοδο και έξοδο των κυματοδηγών του SOA και SOI αντίστοιχα, c) Συσκευασμένος οπτικός μετατροπέας μήκους κύματος.....	111
Σχήμα 61: Ηλεκτρονικά οδήγησης του φωτονικού μετατροπέα μήκους κύματος.....	112
Σχήμα 62: Ηλεκτρονική πλακέτα οδήγησης του οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος..	113
Σχήμα 63: a) Λογισμικό για τη μεταβολή των παραμέτρων του αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος, b) Ολοκλήρωση φωτονικών και ηλεκτρονικών στοιχείων, c) Φασματική απόκριση των συμβολομέτρων καθυστέρησης για διαφορετικές τιμές τάσης στα θερμαντικά στοιχεία	114
Σχήμα 64: Οπτικό δίκτυο μεταγωγής.....	115
Σχήμα 65: Πυκνό δίκτυο πολυπλεξίας μήκους κύματος.....	116
Σχήμα 66: Ηλεκτρονικοί δρομολογητές διασυνδεδεμένοι στο οπτικό δίκτυο μεταγωγής	116
Σχήμα 67: Διασύνδεση του οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος με το δίκτυο μεταγωγής	117
Σχήμα 68: Πειραματική διάταξη για μετάδοση και μεταγωγή βίντεο	118
Σχήμα 69: Διαγράμματα ματιού a) Σήματος εισόδου, b) Μετατρεπόμενο μήκος κύματος σε $\lambda_1:1547\text{nm}$, c) Μετατρεπόμενο μήκος κύματος σε $\lambda_2: 1550\text{nm}$ μετά από το πυκνό σύστημα πολυπλεξίας (WDM).....	119
Σχήμα 70: a) Φάσματα μετατρεπόμενων σημάτων μήκους κύματος, b) Πειραματική διάταξη συστήματος μεταγωγής, c) Στιγμιότυπο μεταδιδόμενου σήματος βίντεο	119
Σχήμα 71: Ηλεκτρονικός δρομολογητής με 10Gb/s οπτικές διεπαφές (αριστερά), Λογισμικό απεικόνισης της ποιότητας των μεταδιδόμενων σημάτων (δεξιά)	119
Σχήμα 72: Ανάλυση ποιότητας μεταδιδόμενων πακέτων πληροφορίας.....	120
Σχήμα 73: Πειραματική διάταξη για μεταγωγή σε ταχύτητες 40Gb/s	121

Σχήμα 74: Διαγράμματα ματιού a) 40Gb/s σήματος εισόδου, b) Μετατρεπόμενο μήκος κύματος σε $\lambda_1:1547\text{nm}$, c) Μετατρεπόμενο μήκος κύματος σε $\lambda_2: 1550\text{nm}$	121
Σχήμα 75: Καμπύλες μετρήσεων λαθών για τα μετατρεπόμενα μήκη κύματος	121
Σχήμα 76: Αρχιτεκτονική δρομολόγησης πακέτων πληροφορίας.....	128
Σχήμα 77: Αμιγώς οπτικό σύστημα δρομολόγησης πακέτων πληροφορίας	129
Σχήμα 78: a) Δομή ενός κυματοδηγού σε υπόστρωμα SOI 4 μm , b) Τεχνική ολοκλήρωσης ενεργών στοιχείων InP σε πυρίτιο	130
Σχήμα 79: a) Διάταξη συμβολόμετρων καθυστέρησης για επιλογή συχνοτικών συνιστωσών με τετέρισμα (chirp) και αναστροφή πολικότητας (polarity inversion), b) Μάσκα σχεδιασμού του παθητικού στοιχείου	131
Σχήμα 80: a) Συσκευασμένο παθητικό στοιχείο, b) Οπτική ίνα σφραγισμένη σε ένα εξωτερικό μεταλλικό σωλήνα, c) Οπτική ίνα εστίασης ευθυγραμμισμένη στον κυματοδηγό του φωτονικού ολοκληρωμένου κυκλώματος.....	132
Σχήμα 81: Φασματική απόκριση των συμβολομέτρων καθυστέρησης	133
Σχήμα 82: a) Σύγκριση συνάρτησης μεταφοράς συντονιστή δακτυλίου πρώτης και δεύτερης τάξης, b) Φασματική απόκριση 4 συντονιστών δακτυλίου πρώτης τάξης σε διάταξη σειράς, c) Φασματική απόκριση 4 συντονιστών δακτυλίου δεύτερης τάξης σε διάταξη σειράς	134
Σχήμα 83: a) Δομικό διάγραμμα οπτικού μανδαλωτή, b) Παλμοί ενεργοποίησης, c) Παλμοί απενεργοποίησης, d) Κατάσταση 1 του οπτικού μανδαλωτή, e) Κατάσταση 2 του οπτικού μανδαλωτή	136
Σχήμα 84: Πειραματική διάταξη του συστήματος μεταγωγής	138
Σχήμα 85: a) Περιβάλλουσα πακέτων πληροφορίας, b) Περιεχόμενο πακέτου δεδομένων	139
Σχήμα 86: a) 160Gb/s πακέτα εισόδου, b) Διάγραμμα ματιού πακέτων πληροφορίας, c) Οπτική επικεφαλίδα, d) Έξοδος οπτικού μανδαλωτή, e) Αντεστραμμένο σήμα μετατρεπόμενου μήκους κύματος, f) Μετατρεπόμενο σήμα ορθής πολικότητας, g) Διάγραμμα ματιού μετατρεπόμενου σήματος ορθής πολικότητας, h) Διάγραμμα ματιού αντεστραμμένου σήματος, i) Αποπολυπλεγμένο πακέτο πληροφορίας από 160Gb/s σε 10Gb/s.....	140
Σχήμα 87: a) Φάσμα εξόδου του μετατροπέα μήκους κύματος, b) Μετατρεπόμενο μήκος κύματος ορθής πολικότητας, c) Καμπύλες μετρήσεων σφαλμάτων-λαθών.....	141
Σχήμα 88: Αλλοιώσεις μεταδιδόμενου σήματος ύστερα από πολλαπλές μετατροπές μήκους κύματος.....	143
Σχήμα 89: α) Συγχρονισμένο δίκτυο μεταγωγής β) Δίκτυο εκρηκτικής ροής	149
Σχήμα 90: Επίλυση σύγκρουσης πακέτων με: a) Οπτικές γραμμές καθυστέρησης, b) Μετατροπή μήκους κύματος, c) Μεταγωγή/εκτροπή σε πολλαπλούς κόμβους	151
Σχήμα 91: Δομικό διάγραμμα λειτουργίας κυκλώματος επίλυσης σύγκρουσης πακέτων	154
Σχήμα 92: Πειραματική διάταξη επίλυσης σύγκρουσης πακέτων.....	156
Σχήμα 93: Ίχνη και διαγράμματα ματιού a) Εισερχομένων πακέτων P1-P2-P3-P4, b) Μετατρεπόμενου μήκους κύματος στην έξοδο SOA-MZI, c) Μετατρεπόμενου μήκους κύματος αντεστραμμένης πολικότητας στην έξοδο του SOA-OBF1, d) Μετατρεπόμενου μήκους κύματος ορθής πολικότητας στην έξοδο του SOA-OBF1, e) Μετατρεπόμενου μήκους κύματος αντεστραμμένης πολικότητας στην έξοδο του SOA-OBF2, f) Έξοδος O/P1, g) Έξοδος O/P2	158
Σχήμα 94: Καμπύλες μετρήσεων λαθών i) Εισερχομένων πακέτων, ii) Έξοδος μετατροπέα SOA-OBF1, iii) Έξοδος μετατροπέα SOA-OBF2	159

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Οπτικά και ηλεκτρικά ποσοστά ισχύος.....	76
Πίνακας 2: Προδιαγραφές συντονιστών δακτυλίου ανώτερης τάξης.....	82
Πίνακας 3: Αποτελέσματα χαρακτηρισμού συντονιστών δακτυλίου δεύτερης και τρίτης τάξης	88
Πίνακας 4: Οπτικές ισχείς μετατροπών μήκους κύματος (σε dBm)	157