



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Εφαρμογές της ολοκληρωμένης οπτικής τεχνολογίας σε  
αμιγώς οπτικά συστήματα δρομολόγησης και αναγέννησης  
δεδομένων

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Δημήτριος Μ. Πετραντωνάκης

Επιβλέπων : Ηρακλής Αβραμόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2010





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Εφαρμογές της ολοκληρωμένης οπτικής τεχνολογίας σε  
αμιγώς οπτικά συστήματα δρομολόγησης και αναγέννησης  
δεδομένων

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Δημήτριος Μ. Πετραντωνάκης

Συμβουλευτική Επιτροπή : Ηρακλής Αβραμόπουλος  
Νικόλαος Ουζούνγλου  
Εμμανουήλ Βαρβαρίγος

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 22<sup>α</sup> Μαρτίου 2010.

.....  
Η. Αβραμόπουλος

.....  
Φ. Κωνσταντίνου

.....  
Ν. Ουζούνγλου

.....  
Κ. Δέρος

.....  
Ν. Πλέρος

.....  
Ε. Βαρβαρίγος

.....  
Κ. Βλάχος

Αθήνα, Μάρτιος 2010

.....  
**Δημήτριος Μ. Πετραντωνάκης**

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

Copyright © Δημήτριος Μ. Πετραντωνάκης, 2010.

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

Ο κύριος στόχος της παρούσας διατριβής είναι η ανάπτυξη αμιγώς οπτικών κυκλωμάτων δρομολόγησης και αναγέννησης δεδομένων, βασισμένα στην χρήση ολοκληρωμένων οπτικών στοιχείων. Δια μέσω των κυκλωμάτων αυτών γίνεται ταυτόχρονα αξιολόγηση των τελευταίων τεχνικών ολοκλήρωσης οι οποίες προωθούν την φωτονική τεχνολογία σε πορεία αντίστοιχη της ηλεκτρονικής για περαιτέρω ανάπτυξη των οπτικών τηλεπικοινωνιών. Βασικά δομικά στοιχεία των υπο μελέτη κυκλωμάτων αποτέλεσαν το συμβολόμετρο *Mach-Zehnder (MZI)* καθώς και ένας αναδιατάξιμος οπτικός add-drop πολυπλέκτης (*Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer- ROADM*), ο οποίος αποτελείται από συστοιχίες φίλτρων μικροδοκτυλίου. Οι διατάξεις που υλοποιήθηκαν εκμεταλλεύονται πλήρως τα ιδιαίτερα, χαρακτηριστικά των φωτονικών στοιχείων από τα οποία αποτελούνται, προσφέροντας διαφάνεια στο ρυθμό και την μορφή των εισερχόμενων δεδομένων, υψηλή ταχύτητα λειτουργίας, μειωμένη κατανάλωση ενέργειας, και εκλυόμενης θερμότητας αλλά και απλούστευση στην αρχιτεκτονική τους και επομένως στο συνολικό τους μέγεθος και κόστος κατασκευής. Απόρροια των άνωθι είναι τα υπό μελέτη κυκλώματα που αναλύονται στην παρούσα διατριβή να αποτελούν το θεμέλιο λίθο για περαιτέρω ώθηση των τεχνολογικών εξελίξεων προς πλέον εξελιγμένα οπτικά δίκτυα επόμενης γενιάς.

Το πρώτο σημαντικό θέμα που αντιμετωπίσαμε στα πλαίσια της διατριβής ήταν η αμιγώς οπτική ανίχνευση των εισερχόμενων πακέτων δεδομένων σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική επιτελεί ταυτόχρονα και ανάκτηση ρολογιού προκειμένου να επιτυγχάνεται συγχρονισμός τόσο εσωτερικά του κόμβου όσο και μεταξύ του κόμβου και των εισερχόμενων πακέτων. Το σύστημα μας μελετήθηκε τόσο για σύγχρονες όσο και για ασύγχρονες ροές δεδομένων παρουσιάζοντας αλάνθαστη λειτουργία και για τις δυο περιπτώσεις καθώς και καλύτερα αποτελέσματα από ήδη υπάρχουσες αρχιτεκτονικές. Το δεύτερο σημαντικό θέμα στο οποίο εστιάσαμε ήταν η αμιγώς οπτική αναγέννηση του σήματος δεδομένων κατά την μετάδοση του. Η υποβάθμιση της ποιότητας του σήματος αποτελεί σημαντικό περιοριστικό παράγοντα για την μέγιστη απόσταση διάδοσής του και περιορίζει ταυτόχρονα και τον μέγιστο ρυθμό λειτουργίας του δικτύου. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύξαμε ένα 2R κύκλωμα αναγέννησης το οποίο δοκιμάστηκε επιτυχώς σε ρυθμό λειτουργίας 40 Gb/s. Τέλος το τρίτο κύκλωμα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής είναι ένας αμιγώς οπτικός μετατροπέας μήκους κύματος σε ρυθμό λειτουργίας 40 Gb/s, τόσο για RZ όσο και για NRZ ακολουθίες δεδομένων (*μονοκυματική λειτουργία*) καθώς και για πακέτα πληροφορίας (*πολυκυματική λειτουργία*). Το υπό μελέτη σύστημα αποτελεί μια καινοτόμο ιδέα στο τρόπο κατασκευής ενός μετατροπέα μήκους κύματος, καθώς πέραν των άνωθι πλεονεκτημάτων αποτελεί και το υπόβαθρο πάνω στο οποίο θα στηριχθεί η μετέπειτα προσπάθεια της ερευνητικής κοινότητας για νέες τεχνολογίας φωτονικούς δρομολογητές.

Εν κατακλείδι η σημαντικότητα της παρούσας διατριβής καθίσταται στις καινοτόμες και αποδοτικές λύσεις που προσφέρει εκμεταλλευόμενη τις υπάρχουσες τεχνικές ολοκλήρωσης για την προσπάθεια της ερευνητικής κοινότητας προς συστηματική μετάβαση των ήδη υπαρχόντων δικτύων σε αμιγώς οπτικά. Απόρροια δε της αμιγούς «οπτικοποίησης» των δικτύων μέσω των τριών προτεινόμενων κυκλωμάτων που παρουσιάζουμε θα αποτελέσει και η περαιτέρω ανάπτυξη των ρυθμών μετάδοσης σε ταχύτητες που θα φτάνουν την τάξη των Tb/sec, αποδεδειγμένα πλέον από το όριο λειτουργίας των ήδη εγκατεστημένων ηλεκτρονικών συστημάτων.

## **ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ**

Δίκτυα οπτικών ινών, αμιγώς οπτική επεξεργασία σήματος, αμιγώς οπτική ανάκτηση ρολογιού, οπτική ολοκλήρωση, αμιγώς οπτική 2R αναγέννηση, αμιγώς οπτική μετατροπή μήκους κύματος, ημιαγωγίμος οπτικός ενισχυτής - SOA, ολοκληρωμένο συμβολόμετρο Mach-Zehnder, φίλτρο Fabry-Perot, φίλτρο μικροδακτυλίου, οπτικός αναδιατάξιμος add-drop πολυπλέκτης.

# ABSTRACT

The main objective of this doctorate thesis is the development of all optical systems, based on integrated components, for routing and regenerating of optical data. Throughout the developed systems and their performance, we also studied the exploitation of the most recent photonic integration technologies (monolithic, hybrid and silicon on insulator technology), in order to define the gap between the optical and the electronic integration industry. The fundamental building blocks of the proposed systems which are presented in this study are the Mach-Zehnder interferometer (MZI) and the Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer (ROADM) which consists of arrays of micro ring resonator filters. The developed systems, take full advantage of the benefits of the optical integrated components, offering attractive attributes such as transparency in the data format and the data rate, reduced power consumption and complexity, efficient heat dissipation, simplicity, size reduction and cost reduction. Following this rationale, we can claim that the development of those systems will contribute to further development of more advanced all-optical networks.

The first major issue that was studied in this thesis was an all-optical packet detection circuit in an optical node, operating at 10 Gb/s. The proposed architecture performs simultaneously data clock recovery in order to obtain the appropriate intra-node synchronization as well as synchronization between the optical node and the incoming data packets. The proposed system was implemented and tested for synchronous and asynchronous data, presenting error free operation for both scenarios and obtaining better experimental results comparing to previous architectures.

The second major issue, over which we focused on our research, was the development of an all optical 2R regeneration circuit of the transmitted data signal at 40 Gb/s. The various quality degradations that the signal exhibits are major constraints to the maximum transmission distance that can be reached and also to the maximum bit rate of the whole network. In this study, we designed and experimental evaluated a novel 2R regeneration concept based on SOA-MZIs for 40 Gb/s NRZ data. Finally the last system that was developed within the frames of this doctorate thesis was an all-optical wavelength converter operating at 40 Gb/s, for both RZ and NRZ continuous data and packet formatted data. The specific circuit exhibits a novel design architecture for wavelength conversion systems, exploiting all the appropriate benefits that SOI technology provides, in order to become one of the fundamental building blocks of next generation photonic routers.

In conclusion we can claim that, this doctorate study owes its importance to the proposition of novel and efficient solutions concerning data regeneration and routing, by exploiting the advantages of the already existing photonic integration technologies. As such exploiting the proposed three architectures presented in this thesis, the realization

of all-optical next generation networks will become more feasible, leading in parallel to further growth of system's throughput up to Tb/sec and beyond.

## **Keywords**

Fiber optical Networks, all-optical signal processing, all-optical data clock recovery, photonic integration, all-optical 2R regeneration, all-optical wavelength conversion, semiconductor optical amplifier-SOA, integrated optical Mach-Zehnder Interferometer, Fabry-Perot filter, micro-ring resonator filter, Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer-ROADM.

## Πρόλογος...

Οκτώβριος 2004: Μεσημέρι καθημερινής και μπαίνω στο εργαστήριο για πρώτη φορά προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητες συστάσεις. Από την πρώτη στιγμή οι διαθέσεις του ύφους του εργαστηρίου φάνηκαν, αφού αντί να ερωτηθώ για τις σπουδές μου, η πρώτη ερώτηση που μου έκανε ο κ. Αβραμόπουλος ήταν αν πιάνουν τα χέρια μου. Κατάλαβα εξ'αρχής ότι δεν θα έκανα ένα τυπικό διδακτορικό όπως θα περίμενε κάποιος, αλλά ξεκινούσε η ιστορία μου, η οποία θα διαρκούσε 5 χρόνια, μια ιστορία που σκοπό είχε να μου παρέχει όλα εκείνα τα εφόδια που θα με βοηθούσαν στην μετέπειτα καριέρα μου. Στην αρχή όπως και όλοι μας άλλωστε προσπάθησα να καταλάβω ένα βουνό από καινούριες έννοιες, μηχανήματα αλλά και τους ίδιους τους ανθρώπους που επάνδρωναν το εργαστήριο αυτό. Ύστερα από το καθιερωμένο demo που ανέλαβε να μου κάνει ο Δημήτρης Τσιώκος, κουνώντας εγώ το κεφάλι μου δείχνοντας ότι καταλαβαίνω, χαιρέτησα και έφυγα. Στην αρχή σφειλώ να ομολογήσω ότι τα έβλεπα βουνό, μιας και ο τομέας των οπτικών επικοινωνιών ήταν κάτι που ναι μεν μου εξίταρε την φαντασία να ασχοληθώ αλλά από την άλλη όπως κάθε τι καινούριο μου δημιουργούσε και ανασφάλειες. Βασικός παράγοντας στην απόφαση μου τελικά να γίνω μέλος του εργαστηρίου αποτέλεσε το «όραμα» μου ή πεποίθηση αν θέλετε όπως και των υπολοίπων παιδιών ότι οι οπτικές ίνες θα εδραιωθούν ως το μέλλον των τηλεπικοινωνιών τόσο στην Ελλάδα όσο και σε παγκόσμια κλίμακα. Μια πεποίθηση που όπως είναι λογικό, βασική πηγή αποτέλεσε ο ιδρυτής του εργαστηρίου καθηγητής κ. Αβραμόπουλος. Επιπρόσθετα δεν θα πρέπει να παραλείψω να αναφέρω ότι κάθε όραμα ή σκοπός που βάζουμε στην ζωή μας δεν μπορεί να γίνει εφικτός πάντα, εκτός και αν έχεις βάλει τις βάσεις για την συστηματική και μεθοδική υλοποίηση του. Στην περίπτωση μου δεν θα μπορούσε να είναι πιο ευνοϊκές οι συνθήκες για τρεις βασικούς λόγους. Καταρχήν είχα την τύχη να συνεργαστώ με έναν από τους αξιολογότερους καθηγητές που γνώρισα ως φοιτητής, αλλά και στην πορεία μου ως μεταπτυχιακός φοιτητής. Έναν άνθρωπο που δεν καθησυχάστηκε από τις περιγραμμές του εξωτερικού απλά και μόνο για να καταλάβει μια θέση στο δημόσιο, αλλά συνέχισε και συνεχίζει να αγωνίζεται προκειμένου να ανεβάσει ολόένα και περισσότερο τον πήχη των επιτυχιών ακόμα πιο ψηλά. Απόρροια της αποφασιστικότητας τους αυτής αποτέλεσε ο δεύτερος βασικός λόγος της ευμενούς κατάστασης για την επίτευξη των δικών μου στόχων, που ήταν το δημιούργημα του κ. Αβραμόπουλου, και το ουσιαστικά δεύτερο σπίτι μου τα τελευταία πέντε χρόνια, λόγω των αναρίθμητων ωρών που πέρανα εκεί, το οποίο δεν είναι άλλο από το εργαστήριο φωτονικών επικοινωνιών. Ένα εργαστήριο που παρά τις αντίξοες συνθήκες που επικρατούν ως γνωστόν στην Ελλάδα, όταν κάποιος θέλει να κάνει κάτι σωστό, αποτελεί σήμερα που γράφω ένα από τα πλέον εξελιγμένα εργαστήρια και πιο πλήρη σε εξοπλισμό όχι μόνο πανελληνίως, αλλά ακόμα και σε πανευρωπαϊκό επίπεδο, κοιτώντας στα μάτια χώρες που η χρηματοδότηση των νέων τεχνολογιών όπως οι οπτικές τηλεπικοινωνίες υπερβαίνει κατά πολύ την χρηματοδότηση που δίνεται στην χώρα μας. Τρίτο και βασικό στοιχείο δεν θα

μπορούσε να μην είναι το ανθρώπινο δυναμικό που απαρτίζει το εργαστήριο, μιας και χωρίς αυτό δεν θα μπορούσε να γίνει τίποτα από τα παραπάνω.

Ξεινώνοντας από τους παλαιότερους θα ήθελα να ευχαριστήσω καταρχήν τον επίκουρο καθηγητή του πανεπιστημίου Πατρών Κυριάκο Βλάχο αλλά και τον καθηγητή του πανεπιστημίου Πατρών Εμμανουήλ Βαρβαρίγο, μιας και αυτοί ήταν οι βασικοί αρωγοί για την ενσωμάτωση μου στο εργαστήριο του καθ. Κ. Αβραμόπουλου. Εν συνεχεία θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Γιώργο Θεοφιλόπουλο, τον Δρ. Χρήστο Μπιντζά, τον Δρ. Κώστα Γιαννόπουλο αλλά και τον λέκτορα του Αριστοτέλειου πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης Δρ. Νίκο Πλέρο καθώς αυτοί ήταν οι βασικοί στυλοβάτες κυρίως στα πρώτα δύσκολα χρόνια του εργαστηρίου αλλά και μετέπειτα ως μετά διδακτορικοί ερευνητές οι οποίοι συνέβαλαν τα μέγιστα στην δημιουργία των κατάλληλων συνθηκών για την μετέπειτα πορεία και των υπολοίπων.

Περνώντας στην επόμενη γενιά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Λεόντιο Σταμπουλίδη, Δρ. Ευστράτιο Κεχαγιά, Δρ. Γεώργιο Κανέλλο, Δρ. Δημήτριο Τσιώκο, Δρ. Παρασκευά Μπακόπουλο και Δρ. Κωσταντίνο Βυρσοκινό, διότι ως παλαιότεροι εμού με βοήθησαν τόσο στον εγκλιματισμό μου και στην καθολική ενσωμάτωση μου στο εργαστήριο όσο και στην μετάδοση των γνώσεων τους προκειμένου να εφοδιαστώ με τα κατάλληλα εφόδια για την επίτευξη του ερευνητικού μου έργου. Πιστεύω ότι μέσα από τις πολύωρες συζητήσεις μας, σε μεταμεσονύκτιες ώρες στο γραφείο, αναλύοντας τόσο θέματα της δουλειάς μας όσο και προσωπικές μας εμπειρίες, κάνοντας ταυτόχρονα το τσιγάρο μας, κατάφεραν να με κάνουν ακόμα πιο σκεπτόμενο ων αλλά αποτέλεσαν και σχολείο για μένα λόγω της αποφασιστικότητας και του ζήλου που υποδείκνυαν στην εργασία τους. Τους εύχομαι ότι καλύτερο και είμαι σίγουρος ότι θα το πετύχουν.

Εν συνεχεία δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω τα παιδιά που ξεινήσαμε μαζί την πορεία μας στον εργαστήριο φωτονικών επικοινωνιών και αποτέλεσαν και τους βασικούς συνεργάτες μου στα χρόνια αυτά. Ξεινώνοντας από την Δρ. Όλγα Ζουραράκη με την οποία κάναμε και το πρώτο πείραμα μας μαζί, βουτώντας στα βαθιά, θα ήθελα να της ευχηθώ να πετύχει όλους τους στόχους της κάνοντας μια λαμπρή καριέρα έτσι όπως την επιθυμεί. Ιδιαίτερη μνεία θα ήθελα να κάνω στον Δρ. Δημήτριο Αποστολόπουλο και στον συνάδελφο μου και λείαν συντόμως Δρ. Παναγιώτη Ζακυνθινό. Και με τους δύο ζήσαμε μια κοινή ερευνητική ζωή, μοιραζόμενοι τις ίδιες εμπειρίες, τις ίδιες δυσκολίες, τις ίδιες χαρές αλλά και τα ίδια ξενύχτια. Τους οφείλω πολλά και πιστεύω ότι και στο μέλλον θα συνεχίσουμε να μοιραζόμαστε τις στιγμές μας σαν πραγματικοί φίλοι που νιώθω ότι είμαστε.

Από τις μετέπειτα γενιές θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Χρήστο Κουλουμέντα, τον Χρήστο Σταματιάδη, τον Αλέξανδρο Μαζιώτη τον Μάριο Μπουγιούκο αλλά και τους νεοαποικτηθέντες Γιάννη Γιαννούλη και Δημήτρη Καλαβρουζιώτη, και θα ήθελα να τους ευχηθώ να έχουν τόσο την ψυχική όσο και σωματική δύναμη να επιτύχουν ακόμα πιο

υψηλούς στόχους, μιας και είμαι σίγουρος ότι μπορούν να το κάνουν, επιτυγχάνοντας μια λαμπρή σταδιοδρομία τόσο σε ερευνητικό όσο και σε επαγγελματικό επίπεδο. Όπως λέει και ο κ. Αβραμόπουλος *the Nobel is just around the corner!!!! Go for It!!!*

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

Με τιμή,

Δημήτρης Μ. Πετραντωνάκης

Στους γονείς μου Ματθαίο και Ελένη,

Στον αδερφό μου Πάλο και την Αγγελική,

Στον ανιψιό μου,

Στη Μαριάννα



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....</b>	<b>16</b>
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΕΥΝΑΣ .....	16
1.1 Εισαγωγή στις τηλεπικοινωνίες.....	16
1.2 Απαιτήσεις Ευρυζωνικότητας - Η κατάσταση Σήμερα .....	17
1.3 WDM Δίκτυα Δεύτερης Γενιάς.....	21
1.4 Οπτικά δίκτυα τρίτης γενιάς.....	23
1.5 Οπτικά δίκτυα με χρήση Ίνας.....	26
1.6 Τεχνικές Ολοκλήρωσης-Η πορεία προς το οπτικό VLSI.....	29
1.7 Μελλοντική εργασία προόδου των αρχιτεκτονικών ολοκλήρωσης- Βασικά προβλήματα προς διεκπεραίωση ....	43
1.8 Σκοπός και διάρθρωση της διατριβής.....	45
Αναφορές .....	48
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....</b>	<b>54</b>
ΚΥΚΛΩΜΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΠΑΚΕΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΠΥΛΩΝ MACH-ZEHNDER ΣΕ ΡΥΘΜΟ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ 10 Gb/s .....	54
2.1 Εισαγωγή.....	54
2.2 Το κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων – δομή και λειτουργία.....	58
2.3 Πειραματική υλοποίηση του αμιγώς οπτικού υποσυστήματος ανάκτησης πακέτων στα 10 Gb/s.....	61
2.4 Πειραματικά αποτελέσματα & θέματα προς συζήτηση .....	64
2.5 Αμιγώς οπτικό κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού από πακέτο πληροφορίας.....	68
Συμπεράσματα.....	77
Αναφορές .....	79
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....</b>	<b>83</b>
ΑΜΙΓΩΣ ΟΠΤΙΚΗ 2R ΑΝΑΓΕΝΝΗΣΗ NRZ ΣΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΠΥΛΩΝ MACH-ZEHNDER ΣΕ ΡΥΘΜΟ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ 40 Gb/s.....	83
3.1 Εισαγωγή.....	83
3.2 Οπτική αναγέννηση δεδομένων .....	85
3.3 Μετατροπέας Μήκους Κύματος.....	86
3.4 Αρχιτεκτονικές μετατροπής μήκους κύματος με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών αναγεννητών .....	89
3.5 Πειραματική Διάταξη.....	94
3.6 Πειραματικά αποτελέσματα - Θέματα προς συζήτηση.....	97
Αναφορές .....	100
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....</b>	<b>102</b>
ΚΥΚΛΩΜΑ ΑΜΙΓΩΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΦΙΛΤΡΩΝ ΜΙΚΡΟ-ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ ΓΙΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗ RZ/NRZ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΑ 40 Gb/s.....	102
4.1 Εισαγωγή.....	102
4.2 Δομικό διάγραμμα Λειτουργίας του Μετατροπέα Μήκους κύματος. ....	106
4.3 Υλοποίηση Φίλτρων μικρο-δακτυλίου.....	108
4.4 Προκαταρκτική μελέτη μέσω εξομοιώσεων και πειραματικής υλοποίησης της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση ζωνοπερατού φίλτρου έναντι ROADM.....	109
4.5 Πειραματική υλοποίηση συστήματος μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου σε ρυθμούς μετάδοσης 40 Gb/s για RZ ακολουθίες δεδομένων. ....	136
4.6 Πειραματική υλοποίηση συστήματος μετατροπής πολλαπλών μηκών κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου σε ρυθμούς μετάδοσης 40 Gb/s για RZ πακέτα δεδομένων.....	142
4.7 Πειραματική υλοποίηση συστήματος μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου σε ρυθμούς μετάδοσης 40 Gb/s για NRZ ακολουθίες δεδομένων. ....	148
4.8 Πειραματική υλοποίηση συστήματος μετατροπής πολλαπλών μηκών κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s για NRZ πακέτα δεδομένων .....	153
4.9 Εξομοίωση τεχνικής ολοκλήρωσης φίλτρων μικρο-δακτυλίου για χρησιμοποίηση τους σε συστήματα μετατροπής μηκών κύματος σε ταχύτητες μετάδοσης 160 Gb/s.....	157
Συμπεράσματα.....	171
Αναφορές .....	173

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....</b>	<b>177</b>
ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ .....	177
5.1 Σύννοψη αποτελεσμάτων.....	177
5.2 Περαιτέρω έρευνα .....	183
Αναφορές .....	188
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ : ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΕΓΚΡΙΤΑ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ ΚΑΙ ΣΥΝΕΔΡΙΑ.....</b>	<b>189</b>

## ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ

<b>AOLS</b>	All-Optical Label Swapping	<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio
<b>AWGR</b>	Arrayed Waveguide grating	<b>SMF</b>	Single Mode Fiber
<b>BPF</b>	BandPass filter	<b>TCP</b>	Transmission Control Protocol
<b>BERT</b>	Bit Error Rate Tester	<b>UDP</b>	User Datagram Protocol
<b>CW</b>	Continuous Wavelength	<b>VLSI</b>	Very Large Scale of Integration
<b>DSL</b>	Digital Subscriber Line	<b>WAN</b>	Wide Area Network
<b>DFB</b>	Distributed FeedBack	<b>WDM</b>	Wavelength Division Multiplexing
<b>DI</b>	Delayed interferometer	<b>XGM</b>	Cross Gain Modulation
<b>DCF</b>	Dispersion compensated fiber	<b>XPM</b>	Cross Phase Modulation
<b>FTTH</b>	Fiber to the Home		
<b>FSR</b>	Free Spectral Range		
<b>FWHM</b>	Full Width Half Maximum		
<b>FPF</b>	Fabry Perot Filter		
<b>HDTV</b>	High Definition T.V		
<b>IP</b>	Internet Protocol		
<b>LD</b>	Laser Diode		
<b>MZI</b>	Mach Zehnder Interferometer		
<b>NRZ</b>	Non Return to Zero		
<b>OLT</b>	Optical Line Terminal		
<b>OADM</b>	Optical Add Drop Multiplexer		
<b>OXC</b>	Optical Cross Connect		
<b>OBS</b>	Optical Burst Switching		
<b>OEO</b>	Optical to Electrical to Optical		
<b>PRBS</b>	PseudoRandom Bit Sequence		
<b>RZ</b>	Return to Zero		
<b>ROADM</b>	Reconfigurable Optical Add drop Multiplexer		
<b>SOI</b>	Silicon on Insulator		
<b>SOA</b>	Semiconductor Optical Amplifier		

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Εισαγωγή και σκοπός έρευνας

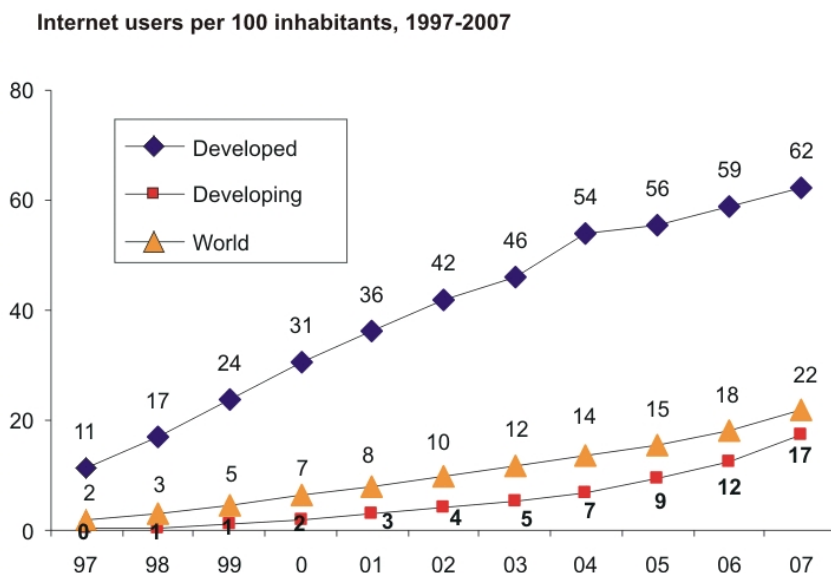
### 1.1 Εισαγωγή στις τηλεπικοινωνίες

Είναι ευρέως αποδεκτό, ότι η βιωσιμότητα των σημερινών τηλεπικοινωνιακών δικτύων, θα επηρεαστεί σημαντικά από την ραγδαία αύξηση της ζήτησης για ολοένα και μεγαλύτερο εύρος ζώνης[1.1-1.5]. Η ραγδαία αυτή αύξηση μιας πληθώρας ανθρωποκεντρικών δραστηριοτήτων έχει προκαλέσει σημαντικές αλλαγές, στην βιομηχανία των τηλεπικοινωνιών, καθώς η ανάγκη αυτή συντελεί στη συνεχή ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και στην κατασκευή δικτύων με πολύ υψηλές ταχύτητες μετάδοσης καθώς και την δυνατότητα μετάδοσης φωνής, εικόνας και δεδομένων (Triple Play – Voice, Video, Data) χρησιμοποιώντας την ίδια υποδομή και τον ίδιο εξοπλισμό δικτύου[1.6]. Τα παραπάνω συνηγορούν στην επέκταση της οπτικής τεχνολογίας από τα δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος που χρησιμοποιούνται σήμερα στα οπτικά δίκτυα κορμού με μεταγωγή πακέτου, και στην ανάδειξη των οπτικών τεχνολογιών στα δίκτυα πρόσβασης όπως τα δίκτυα με χρήση ίνας (Fiber To The Home – FTTH) ως μαζική λύση στην τηλεπικοινωνιακή αγορά του τελικού χρήστη[1.7-1.9]. Η εξέλιξη αυτή εντείνει τις απαιτήσεις σε τεχνολογία ολοκληρωμένων

οπτικών συστημάτων με αυξημένη λειτουργικότητα και ελιυστικά χαρακτηριστικά επιχειρησιακής δράσης, όπως μικρή κατανάλωση ισχύος και φυσικού χώρου, διατηρώντας ταυτόχρονα το κόστος σε ανταγωνιστικά επίπεδα.

Η παρούσα διατριβή επικεντρώνεται στην ανάδειξη και υλοποίηση αμιγώς οπτικών συστημάτων τα οποία επιτελούν κείριες λειτουργίες επεξεργασίας σήματος για τα μελλοντικά οπτικά δίκτυα. Η σχεδίαση τους εκμεταλλεύεται πλήρως τις πλέον πρόσφατες καινοτομίες στον τομέα της οπτικής ολοκλήρωσης, επιτυγχάνοντας για πρώτη φορά τη βιώσιμη υλοποίηση κεντρικών αμιγώς οπτικών λειτουργιών με ιδιαίτερα θελκτικά χαρακτηριστικά. Επιπλέον, αναγνωρίζοντας την ανάπτυξη της τεχνολογίας οπτικής ολοκλήρωσης ως μονόδρομο για τη μετάβαση στα οπτικά δίκτυα επόμενης γενιάς, η σχεδίαση των προτεινόμενων οπτικών υποσυστημάτων γίνεται με γνώμονα την αποκλειστική χρήση πανομοιότυπων συμβολομετρικών δομικών μονάδων ικανών να επιτελούν τις στοιχειώδεις λογικές λειτουργίες. Η διαδικασία παρακολουθεί το παράδειγμα εξέλιξης της ηλεκτρονικής εδώ και 50 χρόνια, που αναγνώρισε τα τρανζίστορ ως βασικές λογικές μονάδες και προώθησε την ολοκλήρωσή τους σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερους αριθμούς σ' ένα και μόνο πλινθίο. Κατ' αντιστοιχία επομένως της ηλεκτρονικής τεχνολογίας, η ερευνητική προσπάθεια της παρούσας διατριβής παρουσιάζει βασικά βήματα που δεικτοδοτούν το δρόμο για την ανάπτυξη του οπτικού VLSI.

## 1.2 Απαιτήσεις Ευρυζωνικότητας - Η κατάσταση Σήμερα



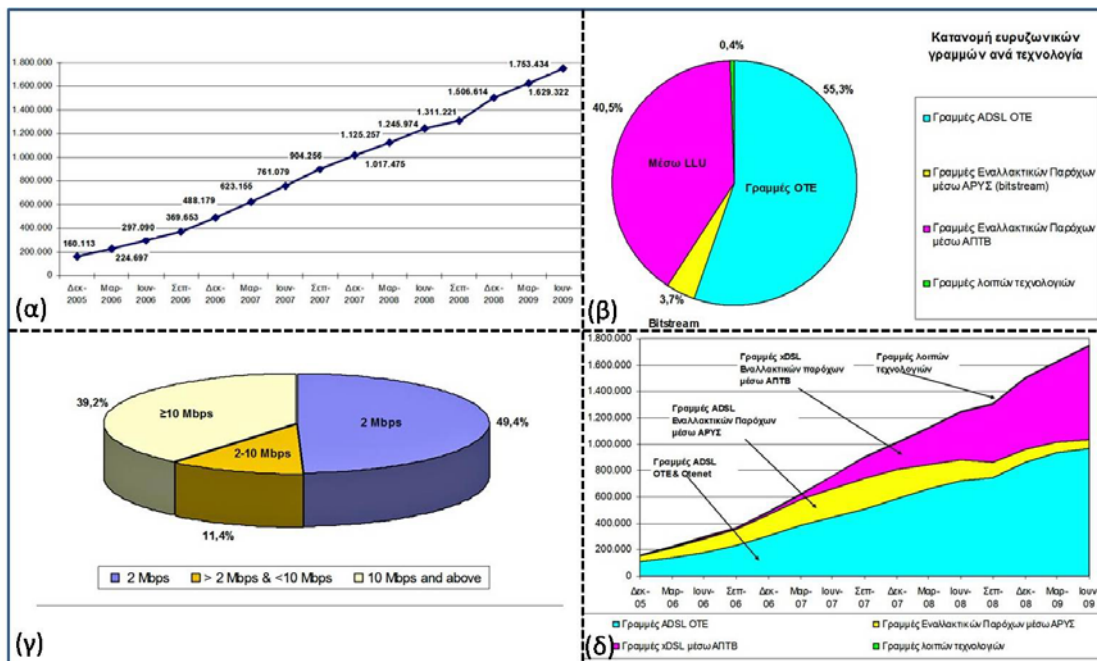
Σχήμα 1: Χρήστες Διαδικτύου ανά 100 κατοίκους για α) αναπτυγμένες χώρες, β) αναπτυσσόμενες χώρες και γ) παγκόσμια

Κάνοντας μια σύντομη ιστορική αναδρομή στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, παρατηρούμε ότι η ραγδαία ανάπτυξη της ευρυζωνικότητας έχει προέλθει από την ευρεία χρήση υπηρεσιών όπως η χρήση του διαδικτύου γεγονός που φαίνεται και από το Σχήμα 1. Οι αρχικές προσπάθειες στήριξης της τάσης αυτής περιορίζονταν από την τεχνολογία των modem που

## Εισαγωγή στις Οπτικές τηλεπικοινωνίες

επέτρεπε την εκμετάλλευση μόνο των τηλεφωνικών γραμμών, με εύρος ζώνης στα 4 kHz, και αφετέρου από τη λογική της χρονοχρέωσης της χρήσης του πελάτη. Την περίοδο εκείνη η μέση χρήση αντιστοιχούσε σε μερικές δεκάδες λεπτά της ώρας ανά μέρα και ο μέσος ρυθμός μετάδοσης ήταν της τάξης των δεκάδων Kb/sec [1.10].

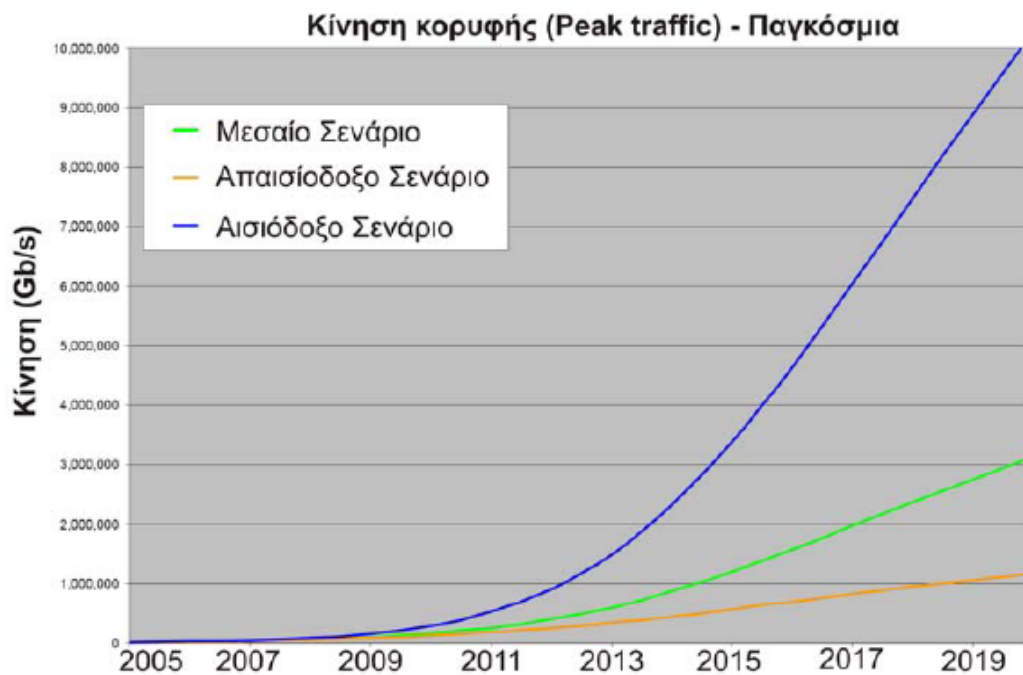
Η μορφή του τρόπου χρήσης του διαδικτύου άλλαξε ριζικά μετά την εμφάνιση των ψηφιακών συνδρομητικών γραμμών (*Digital Subscriber Line-DSL, VDSL*) [1.11,1.12], όχι μόνο με την παροχή μεγαλύτερων ταχυτήτων μετάδοσης, αλλά και με την χρέωση πλέον του χρήστη να ανάγεται σε πάγια μηνιαία συνδρομή. Μέχρι τα τέλη του 2006 η μέση χρήση του εύρους ζώνης είχε αυξηθεί κατά δύο με τρεις φορές με ταυτόχρονη αύξηση της χωρητικότητας των δικτύων πρόσβασης κατά τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους [1.13].



Σχήμα 2: Διαγράμματα δεικτοδότησης της ευρείας ανάπτυξης των ψηφιακών ευρυζωνικών γραμμών α) Αύξηση ζήτησης ADSL στην Ελλάδα, β) Κατανομή ευρυζωνικών γραμμών ανά τεχνολογία, γ) Καταμερισμός ζήτησης τεχνολογιών με γνώμονα την ταχύτητα μετάδοσης, δ) εγκατάσταση ADSL γραμμών από διάφορους παρόχους στον ελληνικό χώρο

Ο ρυθμός ανάπτυξης της δικτυακής κίνησης αναμένεται να αυξηθεί ακόμα περισσότερο με την έλευση νέων τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών που αφορούν τόσο την επιστημονική κοινότητα, όπως τα δίκτυα καταμερισμένης εργασίας (*grid computing*), όσο και τομείς της καθημερινής ζωής όπως η **τηλε-ιατρική**, η **τηλε-εργασία**, το **τηλε-εμπόριο** και γενικότερα **κάθε μορφής τηλε-υπηρεσία**. Παράλληλα οι ταχύτατα ανερχόμενες ηλεκτρονικές υπηρεσίες πολυμέσων με τη μετάδοση ήχου και εικόνας δημιουργούν μια εντελώς καινούρια ομάδα υπηρεσιών. Απαιτητικές λειτουργίες όπως η εκπομπή εικόνας υψηλής ευκρίνειας σε πολλαπλούς χρήστες ταυτόχρονα (*HDTV*) θα αυξήσουν σημαντικά τη ζήτηση σε εύρος ζώνης[1.14]. Τα επίπεδα της ζήτησης μπορούν να οδηγήσουν σε αύξηση του εύρους ζώνης κατά μια ή δυο τάξεις μεγέθους τα επόμενα 10 χρόνια. Ως αποτέλεσμα της τάσης αυτής, η σημερινή ιεραρχική δομή των δικτύων δεν θα μπορέσει να ανταπεξέλθει ικανοποιητικά τόσο

σε φυσικό επίπεδο όσο και σαν οικονομικό μέγεθος. Η λύση επομένως για το επερχόμενο πρόβλημα είναι η στροφή του ερευνητικού και βιομηχανικού ενδιαφέροντος στην χρήση οπτικών τεχνολογιών, όπως η οπτική ίνα στο σπίτι (*Fiber-to-the-Home*), προκαλώντας μάλιστα νέα αύξηση σε ζήτηση εύρους ζώνης[1.15-1.17]. Το Σχήμα 3 παρουσιάζει μια μελέτη πρόβλεψης της αύξησης της κίνησης του διαδικτύου [1.18] θεωρώντας τρία πιθανά σενάρια. Το αισιόδοξο σενάριο έχει υποθέσει ότι το 50% των ευρυζωνικών συνδέσεων μέχρι το 2020 θα είναι τύπου FTTH, ενώ για τα άλλα δυο σενάρια το αντίστοιχο ποσοστό είναι 25% και 10%.



Σχήμα 3: Μελέτη πρόβλεψης της αύξησης της κίνησης του διαδικτύου για α) Αισιόδοξο σενάριο με 50% των ευρυζωνικών συνδέσεων μέχρι το 2020 θα είναι τύπου FTTH β) μεσαίο σενάριο με ποσοστό 25% γ) απαισιόδοξο σενάριο με αντίστοιχο ποσοστό 10%.

Μέχρι πρότινος οι ηλεκτρονικοί δρομολογητές μπορούσαν να εξυπηρετούν την κίνηση των δεδομένων στα υπάρχοντα δίκτυα. Παρόλα αυτά η εκρηκτική αύξηση της ανάγκης χωρητικότητας ώθησε τους κατασκευαστές των δικτύων να σχεδιάσουν εξ αρχής τους ηλεκτρονικούς δρομολογητές προκειμένου να υπερ-καλύψουν τις ανάγκες των δικτύων. Στόχος τους ήταν να δημιουργήσουν οπτικούς δρομολογητές για ροές 40 Gb/s ανά κανάλι ώστε να διοχετεύσουν στην αγορά συστήματα τα οποία θα ανταπεξέρχονται με επιτυχία στα υψηλής ταχύτητας οπτικά δίκτυα. Παραδείγματα όπως ο CISCO CRS-1 [1.19], ο Juniper T640 [1.20], ο Alcatel Lucent 7670 [1.21], και ο Avici SSR [1.22] δεικτοδοτούν την τάση της επιστημονικής κοινότητας αλλά και της βιομηχανίας γενικότερα για δημιουργία πλατφόρμας που θα καλύπτει της ανάγκες της αγοράς για υψηλή χωρητικότητα συστημάτων,

δίνοντας συνάμα και το έναυσμα για την αναβάθμιση των υπαρχόντων δικτύων ώστε να εξυπηρετούνται οι ανάγκες αυτές.

Η εγκατάσταση και μελέτη αυτών των συστημάτων βοήθησε στην εμπειριστατωμένη έρευνα τόσο των δυνατοτήτων που παρείχαν τα συστήματα αυτά όσο και των τυχόν προβλημάτων / μειονεκτημάτων που εμφανίζονταν κατά την διάρκεια της χρήσης τους. Τα προβλήματα που προέκυψαν ήταν κυρίως πρακτικά και επικεντρώνονταν στην **μεγάλη κατανάλωση ενέργειας**, στην **εκπομπή υψηλής θερμοότητας**, αλλά και στην **προϋπόθεση ύπαρξης μεγάλου χώρου για την τοποθέτηση τους**. Εν παραλλήλω, οι πάροχοι δικτύων αναφέρουν ήδη προβλήματα **έλλειψης τόσο διαθεσιμότητας εύρους ζώνης** όσο και **προβλήματα υπέρ-κατανάλωσης ενέργειας και διαχείρισης ισχύος** από τα υπάρχοντα συστήματα δρομολόγησης που διαθέτουν. Παραδείγματος χάριν ο τελευταίος τεχνολογίας CISCO CRS-1 δρομολογητής ο οποίος λειτουργεί στα 40 Gb/s, με 640 Gb/s συνολική δυνατότητα μεταγωγής από όλα τα κανάλια του, καταλάμβανε 213x60x91 cm<sup>3</sup> χώρο, ενώ κατανάλωνε 10.92 kW και ζύγιζε 723 kg. Το συγκεκριμένο σύστημα μπορεί να επεκτείνει τις δυνατότητες λειτουργίας του φτάνοντας στην κλίμακα των Tb/s με την πρόσθεση περαιτέρω εισόδων / εξόδων καθώς και με την χρήση αλγορίθμων για πολλαπλές ανατροφοδοτήσεις. Αντίκτυπο όμως της αύξησης της ταχύτητας του αποτελεί και η μη γραμμική αύξηση του βάρους και της καταναλισκόμενης ενέργειας λειτουργίας του. Πιθανές λύσεις όπως η αύξηση του εύρους μετάδοσης του κάθε καναλιού άνω των 40 Gb/s είναι κάτι απαγορευτικό λόγω της χρήσης ηλεκτρονικών διατάξεων που δομούν τον δρομολογητή και τα οποία αν και αποτελούν την αιχμή της τεχνολογικής ανάπτυξης δεν δύναται να υπερβούν την ταχύτητα των 40 Gb/s.

Είναι αναμενόμενο λοιπόν τα προσεχή χρόνια ότι η όλο και περισσότερο αυξανόμενη απαίτηση των χρηστών για μεγαλύτερη χωρητικότητα στο δίκτυο θα επιφέρει τον κορεσμό στην χωρητικότητα των ηλεκτρονικών αυτών δρομολογητών. Τα υπάρχοντα δίκτυα μεταγωγής δεδομένων θα εμφανίσουν συμπτώματα κορεσμού κατά την χρησιμοποίησή τους σε δίκτυα υπέρ υψηλών ταχυτήτων άνω των 100 Gb/s με αποτέλεσμα τυχόν προσπάθειες για περαιτέρω ανάπτυξη της ταχύτητας των δικτύων να ναυαγήσει επιφέροντας ως επακόλουθο την εγκατάλειψή τους από την βιομηχανία.

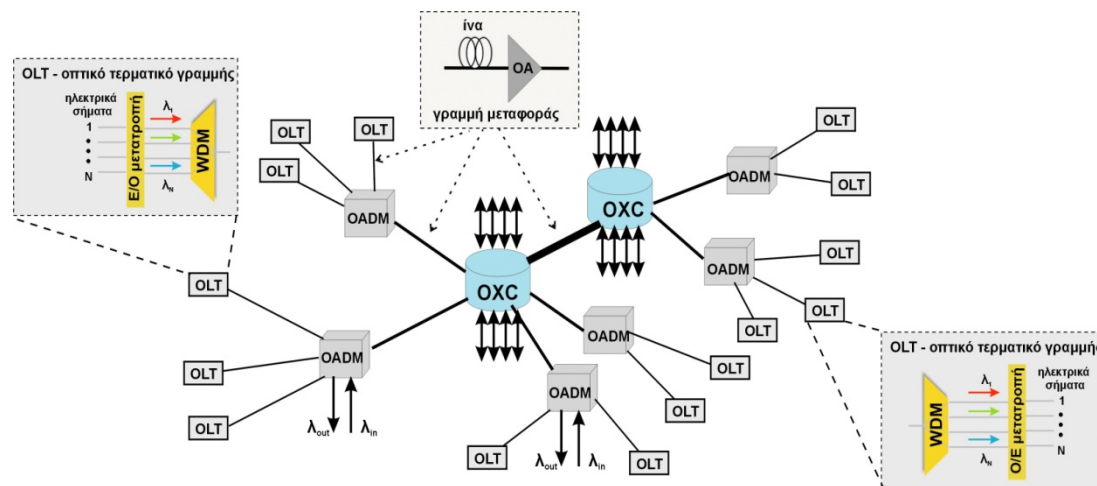
Συνακόλουθο των προαναφερθέντων αποτελεί η αναπόφευκτη έως επιτακτική ανάγκη για **μεταστροφή της βιομηχανίας στην τεχνολογία των οπτικών δρομολογητών** [1.23,1.24]. Ο ρόλος των οπτικών στα υψηλής ταχύτητας κυκλώματα μεταγωγής έχει ήδη μελετηθεί εμπειριστατωμένα, με τους ειδικούς να υποστηρίζουν ότι οι οπτικές τεχνολογίες επιδεικνύουν μια εξαιρετική δυνατότητα χρησιμοποίησής τους σε υψηλής χωρητικότητας δρομολογητές. Παραδείγματα της τάσης αυτής αποτελούν η ανάπτυξη έντονου ενδιαφέροντος από πρωτοπόρους στον τομέα των επιστημών γενικότερα όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής αλλά και η Ιαπωνία για την χρηματοδότηση και την ανάπτυξη υψηλής



χωρητικότητας οπτικών δρομολογητών καθώς και την σταδιακή διοχέτευση τους στα ήδη υπάρχοντα δίκτυα με αντικατάσταση των παλαιότερων δρομολογητών.

### 1.3 WDM Δίκτυα Δεύτερης Γενιάς

Αν και τα οπτικά δίκτυα υιοθετήθηκαν αρχικά μόνο για τη μετάδοση των δεδομένων, πολύ γρήγορα διαπιστώθηκε ότι έχουν τις δυνατότητες για την υλοποίηση περισσότερων λειτουργικών διεργασιών πέραν της ζεύξης από σημείο σε σημείο. Μεταφέροντας ορισμένες από τις διεργασίες μεταγωγής και δρομολόγησης, που επιτελούνταν από ηλεκτρονικά κυκλώματα, απευθείας στο οπτικό επίπεδο, προκύπτουν ορισμένα πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς έτσι ορισμένες λειτουργίες γίνονται σε συντομότερο χρονικό διάστημα και ταυτόχρονα απαλλάσσονται τα ηλεκτρονικά κυκλώματα από την επεξεργασία όλου του όγκου δεδομένων. Η διαπίστωση αυτή οδήγησε στα οπτικά δίκτυα



Σχήμα 4: Αρχιτεκτονική ενός WDM Δικτύου δεύτερης γενιάς

δεύτερης γενιάς, τα οποία έχουν ήδη αρχίσει να εγκαθίστανται σταδιακά [1.25]. Στα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς είναι δυνατή η χρήση και των δύο ειδών πολυπλεξίας, της WDM και της OTDM, όμως τα σημερινά δίκτυα περιορίζονται στην πολυπλεξία WDM, καθότι η OTDM πολυπλεξία δεν θεωρείται ακόμη πρακτική λύση. Η αρχιτεκτονική των WDM οπτικών δικτύων δεύτερης γενιάς φαίνεται στο Σχήμα 4.

Τα βασικά δομικά συστήματα αυτών των δικτύων είναι τα οπτικά τερματικά γραμμής (*optical line terminal-OLT*), οι οπτικοί πολυπλέκτες προσθήκης / αφαίρεσης δεδομένων (*optical add/drop multiplexer-OADM*) και τα οπτικά στοιχεία διασύνδεσης (*optical cross-connect-OXC*). Σημαντικά δομικά συστήματα είναι επίσης, οι **οπτικοί ενισχυτές**, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ανά τακτές αποστάσεις μετάδοσης για την επανενίσχυση των οπτικών σημάτων. Τα WDM οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς παρέχουν συνδέσεις μήκους κύματος μεταξύ των τερματικών, και για το λόγο αυτό αποκαλούνται και δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος (*wavelength-routed networks*). Κατά συνέπεια οι συνδέσεις μεταξύ των τερματικών γραμμής είναι υψηλής χωρητικότητας και παρέχονται σε

σταθερή βάση. Εφόσον όμως οι συνδέσεις μήκους κύματος στα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς παραμένουν στατικές αφού εδραιωθούν, διατηρούν τα χαρακτηριστικά της τεχνικής μεταγωγής κυκλώματος (*circuit switching*). Για το λόγο αυτό, τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς βρίσκουν κυρίως εφαρμογή στα δίκτυα ευρείας περιοχής (WANs), στα οποία η τηλεπικοινωνιακή κίνηση συναθροίζεται σε οντότητες δεδομένων μεγάλου μεγέθους, χρησιμοποιώντας υψηλής χωρητικότητας στατικές συνδέσεις μηκών κύματος για τη διασύνδεσή τους. Ως αποτέλεσμα έχει τα ψηφιακά δεδομένα που μεταδίδονται σήμερα τείνουν να είναι όλο και περισσότερο της μορφής IP/MPLS [1.26,1.27].

Το IP πρωτόκολλο αποτελεί άλλωστε ένα εξαιρετο τρόπο ανταλλαγής δεδομένων, κυρίως λόγω της ευελιξίας και της απλότητας του, με αποτέλεσμα την χρησιμοποίηση του από την βιομηχανία των τηλεπικοινωνιών όχι μόνο για την μετάδοση πληροφορίας αλλά και για άλλες υπηρεσίες. Οι ήδη υπάρχουσες υποδομές όπως η τηλεφωνία, η συνδρομητική τηλεόραση αλλά και τα υπάρχοντα δίκτυα μετάδοσης δεδομένων συγκλίνουν στην δημιουργία μιας κοινής πλατφόρμας μετάδοσης δεδομένων βασισμένη στην IP τεχνολογία. Δοθείσας λοιπόν της κατάστασης αυτής και δεδομένης της συνεχούς ανάπτυξης όλο και πιο απαιτητικών υπηρεσιών, η ανάγκη για ανάπτυξη μεγαλύτερου εύρους τόσο στα δίκτυα πρόσβασης όσο και στα δίκτυα long haul είναι πλέον επιτακτική. Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος για την επιτυχή αξιοποίηση του αυξανόμενου ρυθμού μετάδοσης, οι επιστημονικές έρευνες επικεντρώθηκαν κυρίως στην αξιοποίηση νέων αρχιτεκτονικών δικτύων, με κυριότερο παράδειγμα την αξιοποίηση των οπτικών δικτύων, παράλληλα όμως αναπτύχθηκε και η υλοποίηση ολοκληρωμένων οπτικών συσκευών τα οποία θα επιτελούν τις λειτουργίες που ήδη καλύπτουν τα ηλεκτρονικά σε υψηλότερους όμως ρυθμούς μετάδοσης, ανοίγοντας έτσι τον δρόμο για μια νέα εποχή κυρίως στο τομέα της ολοκλήρωσης και ανάπτυξης οπτικών συστημάτων μετάδοσης.

Στα σημερινά δίκτυα ένας κόμβος της υπάρχουσας τεχνολογία IP over WDM, αποτελεί το συνδυασμό της WDM τεχνολογίας ελεγχόμενη από ηλεκτρονικούς δρομολογητές IP κίνησης (*IP router*). Στα δίκτυα αυτά, όλα τα κανάλια της WDM γραμμής πρέπει να μετατραπούν σε ηλεκτρικά σήματα για και να τερματιστούν στην είσοδο κάθε κόμβου. Η συνολική χωρητικότητα μιας σύνδεσης (*link*) δρομολογείται κατάλληλα για κάθε πακέτο ξεχωριστά, βασισμένη στις επικεφαλίδες (*header*) των πακέτων. Ωστόσο, στα IP δίκτυα, τα περισσότερα πακέτα απλώς διέρχονται από τον κόμβο και μόνο ένα μικρό τμήμα της συνολικής κίνησης πρέπει να τερματιστεί στον κόμβο. Επομένως, αν η κίνηση των διερχόμενων πακέτων μπορούσε να αποφύγει την οπτό-ηλεκτρονική μετατροπή και την ανά πακέτο επεξεργασία, τότε η απόδοση του κόμβου θα αυξανόταν σημαντικά.

### 1.3.1 Εξέλιξη και προκλήσεις των σύγχρονων οπτικών δικτύων

Η προηγούμενη συζήτηση αποκάλυψε την επικείμενη δραματική αύξηση του εύρους ζώνης λόγω των νέων υπηρεσιών που αναπτύσσονται. Στην προσπάθεια των διαχειριστών δικτύων

(*network operators*) να ανταποκριθούν με νέες οικονομικά ανταγωνιστικές λύσεις στην ανάγκη για κλιμάκωση των δικτύων, η έρευνα έχει στραφεί στην ανάπτυξη νέων προτύπων οπτικών δικτύων κορμού. Ο στόχος των προτεινόμενων αρχιτεκτονικών οπτικών δικτύων τρίτης γενιάς αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση της χρήσης του διαθέσιμου εύρους ζώνης της οπτικής ίνας, με παράλληλη απλοποίηση της δομής των ενδιάμεσων και τερματικών κόμβων. Η πρόκληση των νέων αρχιτεκτονικών βρίσκεται στην αντικατάσταση των ακριβών ηλεκτρονικών συστημάτων επεξεργασίας που απαιτούνται στα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς με αντίστοιχα απλά αμιγώς οπτικά συστήματα.

### 1.4 Οπτικά δίκτυα τρίτης γενιάς.

Η απάντηση στα προβλήματα της δεύτερης γενιάς οπτικών δικτύων βρίσκεται στην υιοθέτηση της τεχνική της οπτικής μεταγωγής πακέτου η οποία θα επιτυγχάνει τη δρομολόγηση των πακέτων στα διάφορα μήκη κύματος απευθείας στο οπτικό επίπεδο, εξαλείφοντας τη συμφόρηση από τους κόμβους δρομολόγησης. Η υψηλής ταχύτητας οπτική επεξεργασία μειώνει τις ανάγκες για σειριακή-σε-παράλληλη μετατροπή των δεδομένων και την ηλεκτρονική επεξεργασία, ενώ προσφέρει αποδοτικότερη εκμετάλλευση του εύρους ζώνης μίας οπτικής τηλεπικοινωνιακής ζεύξης. Ο βασικός στόχος των οπτικών δικτύων τρίτης γενιάς με τη χρήση μεταγωγής πακέτου είναι η αποδοτική εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης της οπτικής ίνας, υπό την έννοια της παροχής συνδέσεων υψηλής χωρητικότητας μόνο κατά το χρονικό διάστημα, για το οποίο οι συνδέσεις αυτές είναι ενεργές.

#### 1.4.1 Αμιγώς οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων

Στα αμιγώς οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων η πληροφορία αποστέλλεται με τη μορφή οπτικών πακέτων δεδομένων και όχι με τη μορφή μεγάλου μεγέθους συνεχών ροών δεδομένων [1.28-1.30]. Το κάθε πακέτο δεδομένων αποτελείται από το πεδίο της επικεφαλίδας (*header*), το οποίου το περιεχόμενο καθορίζει τον προορισμό του πακέτου μέσα στο δίκτυο, από το πεδίο του φορτίου (*payload*), το περιεχόμενο του οποίου είναι τα χρήσιμα δεδομένα προς μετάδοση, και από την προστατευτική ζώνη διφυών (*guard band*), η οποία περιέχει τον απαραίτητο αριθμό βοηθητικών διφυών για την υποστήριξη των διαφόρων λειτουργικών διαδικασιών του δικτύου.

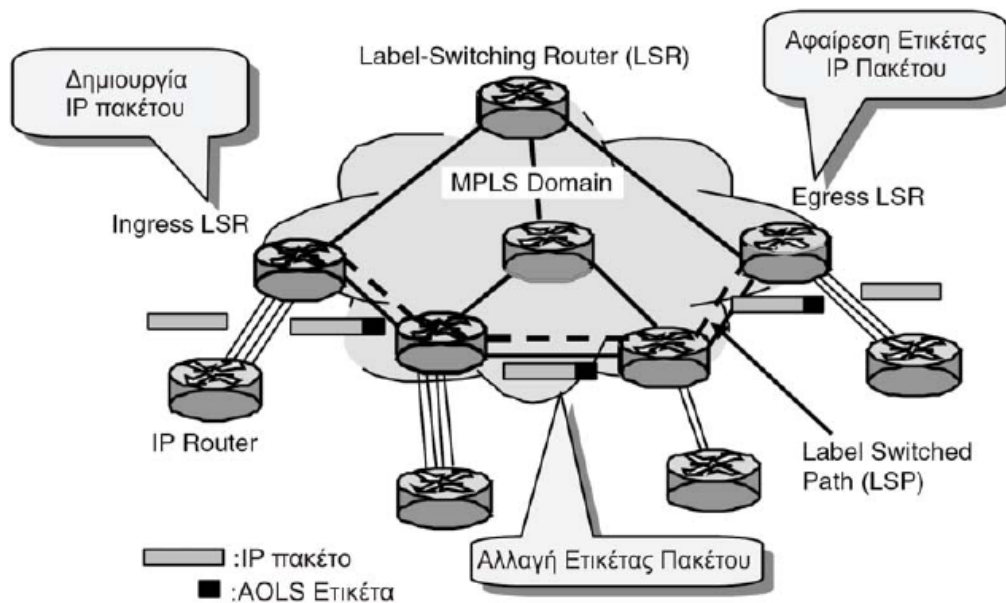
Τα βασικά χαρακτηριστικά που διακρίνουν ένα οπτικό δίκτυο μεταγωγής πακέτων είναι το γεγονός ότι η μεταγωγή και η δρομολόγηση των δεδομένων επιτελούνται απευθείας στο οπτικό επίπεδο χωρίς την μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό και αντίστροφα, ενώ παράλληλα η μεταγωγή γίνεται σε επίπεδο μεμονωμένου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

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

Τα οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων προσφέρουν μια σειρά από πλεονεκτήματα, τα οποία απορρέουν από τα δύο βασικά τους χαρακτηριστικά, την αμιγώς οπτική τους υπόσταση και τη δρομολόγηση των δεδομένων σε επίπεδο μεμονωμένου πακέτου. Καταρχήν, είναι εφικτή η επεξεργασία δεδομένων μικρού μεγέθους (*granularity*) με άμεση συνέπεια τη δυνατότητα της δέσμευσης εύρους ζώνης κατ' απαίτηση (*bandwidth-use on demand*) και την αποδοτικότερη εκμετάλλευση της χωρητικότητας του δικτύου, χωρίς να παραμένει μία σύνδεση ανενεργή για μεγάλο χρονικό διάστημα. Το γεγονός αυτό καθιστά, επίσης, τα δίκτυα αυτά περισσότερο ευέλικτα (*flexibility*), υπό την έννοια ότι προσαρμόζονται σχετικά εύκολα στα συνεχώς εξελισσόμενα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, αφού μπορούν να παρέχουν ταυτόχρονα πολλαπλές υπηρεσίες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της ευελιξίας τους αποτελεί η ευρεία χρήση των IP δρομολογητών, καθώς αυτοί μπορούν να μεταφέρουν πληροφορία προσανατολισμένης σύνδεσης (*connection-oriented*), όπως TCP κίνηση, καθώς επίσης και πληροφορία ασύνδετης υπηρεσίας (*connectionless*), όπως είναι η κίνηση UDP, οπότε είναι συμβατά με διάφορες τεχνολογίες χαμηλότερου τηλεπικοινωνιακού στρώματος (*ATM ή SONET*). Επιπλέον, τα οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων μπορούν να είναι «διαφανή» στο είδος της εισερχόμενης πληροφορίας (*data-format transparency*) [1.31], καθώς διαχειρίζονται εξίσου επιτυχώς σύγχρονες ή ασύγχρονες ροές πακέτων δεδομένων με σταθερό ή μεταβλητό μέγεθος πακέτων και συνεχείς ροές δεδομένων. Τελευταίο, αλλά πολύ σημαντικό προτέρημα, είναι το γεγονός ότι τα παραπάνω πλεονεκτήματα της τεχνικής μεταγωγής πακέτων παρέχονται στα οπτικά δίκτυα αυτού του είδους σε **πολύ υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης συγκριτικά με τα αντίστοιχα ηλεκτρονικά δίκτυα**, ως αποτέλεσμα της διεκπεραίωσης όλων των λειτουργικών διαδικασιών του δικτύου από αμιγώς οπτικά στοιχεία.

Για την υλοποίηση των οπτικών δικτύων μεταγωγής πακέτων υπάρχουν, όμως, ορισμένοι σημαντικοί ανασταλτικοί παράγοντες, οι οποίοι συνιστούν βασικούς περιορισμούς. Οι παράγοντες αυτοί είναι α) η δρομολόγηση των πακέτων με βάση τον τελικό τους προορισμό με αποτέλεσμα να δημιουργούνται πίνακες δρομολόγησης (*routing look-up tables*) υπερβολικά μεγάλου μεγέθους, ιδιαίτερα στα IP δίκτυα, και να αυξάνει δραματικά η πολυπλοκότητα της δρομολόγησης, β) η μέχρι στιγμής αδυναμία των οπτικών κυκλωμάτων να παρέχουν αξιόπιστη καταχώρηση και αποθήκευση δεδομένων (*buffering*) [1.32] ανταγωνιστική της ηλεκτρονικής μνήμης τυχαίας προσπέλασης (*Random Access Memory - RAM*), ώστε να αποφεύγονται οι συγκρούσεις των πακέτων. Ο πρώτος από τους δύο περιορισμούς αίρεται με την υιοθέτηση του πρωτοκόλλου MPLS (*Multi-Protocol Label Switching*) [1.33,1.34], το οποίο προτείνει την προώθηση των δεδομένων με χρήση αλγορίθμων απευθείας σύγκρισης, και την υλοποίηση αντίστοιχων οπτικών δικτύων μεταγωγής ετικέτας (*All-Optical Label Switched Networks - AOLS*) [1.35]. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5, σε κάθε πακέτο του AOLS δικτύου εισάγεται μία επιπλέον ετικέτα με

μικρότερο μέγεθος από την επικεφαλίδα και η δρομολόγηση του πακέτου γίνεται πλέον με βάση το περιεχόμενο της ετικέτας και όχι της επικεφαλίδας.



Σχήμα 5: Τοπολογία οπτικών δικτύων μεταγωγής ετικέτας. Η ετικέτα προσκολλάται στο πακέτο στον κόμβο εισόδου, αλλάζει από κόμβο σε κόμβο ανάλογα με τον πίνακα δρομολόγησης και αφαιρείται στον κόμβο εξόδου

Μόνο η μικρού μεγέθους ετικέτα χρησιμοποιείται για τη δρομολόγηση του πακέτου, ενώ το μήκος κύματος του πακέτου χρησιμοποιείται μόνο για την προώθηση αυτού. Κατά συνέπεια, οι πίνακες δρομολόγησης απλουστεύονται σε σημαντικό βαθμό, η διαδικασία της δρομολόγησης είναι λιγότερο πολύπλοκη λόγω του μικρότερου μεγέθους της ετικέτας. Για την αντιμετώπιση του δεύτερου περιοριστικού παράγοντα έχουν προταθεί τα οπτικά δίκτυα πακέτων εκρηκτικής ροής (*Optical Burst-Switched Networks - OBS*) [1.36]. Σε αυτά τα δίκτυα, πολλαπλά πακέτα IP συναθροίζονται σε μία μεγαλύτερου μεγέθους οντότητα δεδομένων (*burst*), η οποία αποστέλλεται στη συνέχεια στο δίκτυο. Το απαιτούμενο εύρος ζώνης για τη μετάδοση αυτού του σήματος δεσμεύεται εκ των προτέρων στο δίκτυο με τη βοήθεια ενός επιπλέον σήματος ελέγχου- καθορισμού της διαδρομής (*control set-up signal*), το οποίο αποστέλλεται πριν το burst στο δίκτυο. Κατά συνέπεια, κάθε κόμβος στη διαδρομή του burst ενημερώνεται για την επιθυμητή διαδρομή του burst πριν αυτό φτάσει στον κόμβο, οπότε αποφεύγεται η χρήση καταχωρητών και στοιχείων αποθήκευσης της πληροφορίας για την πρόληψη των συγκρούσεων. Η πιο σημαντική διαφορά στη δομή των δεδομένων σε αυτά τα δίκτυα συγκριτικά με τη δομή δεδομένων στα δίκτυα μεταγωγής πακέτων είναι ότι τα πακέτα έχουν σίγουρα μεταβλητό και μεγαλύτερο μέγεθος ενώ τα πακέτα μπορεί να αποκλίνουν σημαντικά σε ισχύς.

## 1.5 Οπτικά δίκτυα με χρήση Ίνας

Η αιχμή της τεχνολογίας στον τομέα των οπτικών επικοινωνιών σήμερα αναδεικνύει μια νέα μορφή τεχνολογίας που είναι η χρήση της ίνας στο σπίτι [1.37]. Δεδομένης της ειρημικής ροής της τάσης για μεγαλύτερο εύρος ζώνης αλλά και των προηγμένων τεχνολογιών, κυρίως στον τομέα της οπτικής ολοκλήρωσης, έκαναν επιτακτική την ανάγκη για μελέτη και υλοποίηση νέων τεχνολογιών στον τομέα της μετάδοσης πληροφορίας, μέσω των οποίων θα ελαχιστοποιηθεί η αναγκαιότητα χρήσης των χάλκινων καλωδίων και η αντικατάστασή τους με οπτικές ίνες.

Τα δίκτυα πρόσβασης οπτικών ινών (*FTTx solutions*) [1.38-1.40] είναι υλοποιήσεις που στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση του μήκους του χάλκινου βρόχου, φέροντας το ευρυζωνικό μέσο μετάδοσης (*οπτική ίνα*) κοντά στο συνδρομητή. Τα τελευταία χρόνια, η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει παρουσιάσει αλματώδεις ρυθμούς ανάπτυξης λόγω του πολύ μεγάλου εύρους ζώνης που μπορεί να διαθέσει στους χρήστες, αλλά και της μακροπρόθεσμης αντοχής της τεχνολογίας σε αυξανόμενες απαιτήσεις εύρους ζώνης.

Ανάλογα με το βαθμό προσέγγισης του συνδρομητή με ίνα, οι λύσεις που υπάρχουν χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

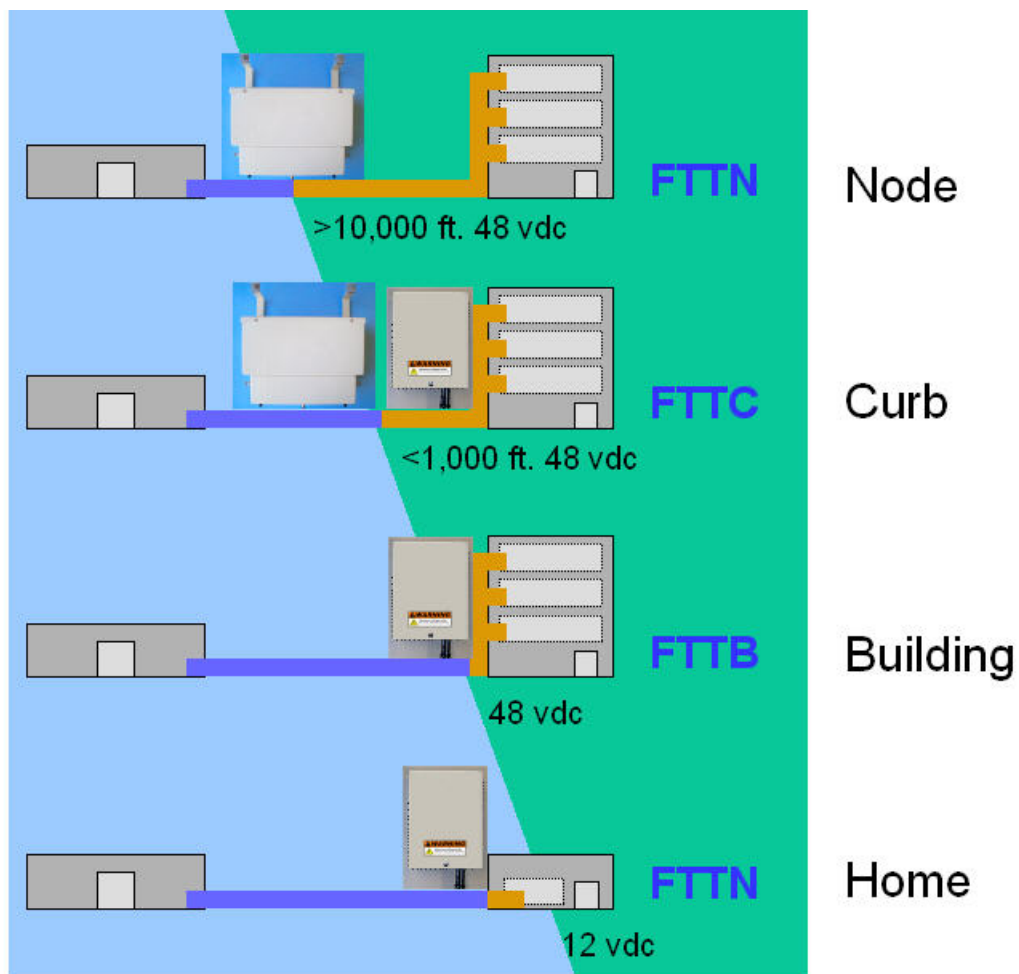
**Οπτική Ίνα στην Καμπίνα - Fiber To The Node (FTTN) ή Fiber To The Cabin (FTTCab):** Στην περίπτωση αυτή, η οπτική ίνα φτάνει μέχρι μία καμπίνα του πεζοδρομίου και εξυπηρετεί τους χρήστες της γύρω περιοχής μέσω δικτύου χαλκού, συνήθως του υπάρχοντος τοπικού βρόχου. Η περίπτωση αυτή περιορίζει το μήκος του χαλκού μέχρι μερικές εκατοντάδες μέτρα, επιτρέποντας ταχύτητες πρόσβασης μέχρι μερικές δεκάδες Mb/s, π.χ. χρησιμοποιώντας συστήματα VDSL. Η λύση αυτή έχει θεωρηθεί κατάλληλη για την εξυπηρέτηση μεγάλου αριθμού συνδρομητών, οι οποίοι είναι συγκεντρωμένοι σε μία μικρή περιοχή (π.χ. *οικοδομικό τετράγωνο*), και έχουν σχετικά μικρές απαιτήσεις ταχύτητας πρόσβασης.

**Οπτική Ίνα στον βρόγχο - Fiber To The Curve (FTTC):** Σε αυτήν την τοπολογία, η οπτική ίνα φτάνει μέχρι τον τελευταίο βρόγχο/κατανεμητή δίπλα από τα σπίτια των συνδρομητών (*καράο*). Τα τελευταία δεκάδες μέτρα της ζεύξης μεταξύ κτιρίων και κατανεμητή καλύπτονται είτε από ομοαξονικά καλώδια είτε από συνεστραμμένα ζεύγη καλωδίων. Στους συνδρομητές του δικτύου παρέχεται ευρυζωνική κάλυψη με χρήση της τεχνολογίας ADSL 2+ και η μέγιστη ταχύτητα τις υπηρεσίας εξαρτάται από την απόσταση του συνδρομητή από τον κατανεμητή και την παλαιότητα των καλωδίων. Τυπικές τιμές είναι από 24 έως 50 Mbps.

**Οπτική Ίνα στο Κτίριο - Fiber To The Building (FTTB):** Η οπτική ίνα φτάνει μέχρι και το κτίριο των συνδρομητών (συγκρότημα γραφείων, πολυκατοικία) και οι ενεργός εξοπλισμός δικτύου τοποθετείται εσωτερικά μέσα στο κτίριο εξυπηρετώντας τους συνδρομητές του κτιρίου. Το μήκος του χαλκού περιορίζεται σε αυτό της δομημένης

καλωδίωσης του κτιρίου, επιτρέποντας πρακτικά οποιαδήποτε ταχύτητα πρόσβασης. Η λύση αυτή θεωρείται κατάλληλη για την εξυπηρέτηση μεμονωμένων μεγάλων επιχειρήσεων με μεγάλες απαιτήσεις ταχύτητας ή κτιρίων με μεγάλη συγκέντρωση συνδρομητών σχετικά μικρών απαιτήσεων (π.χ. εμπορικά και επαγγελματικά κέντρα).

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

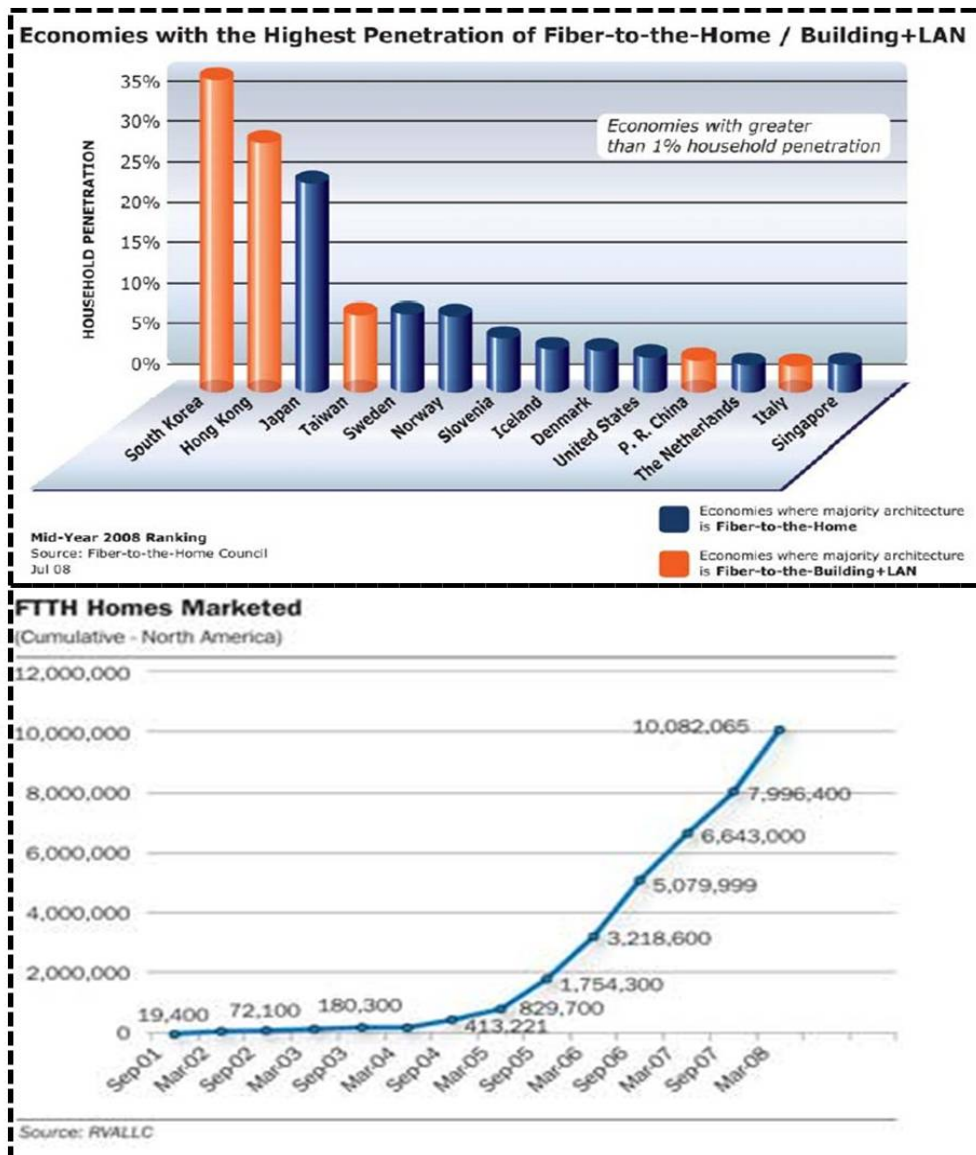


Σχήμα 6: Σχηματική αναπαράσταση τοπολογιών δικτύων με χρήση ίνας

Το Σχήμα 6 παρουσιάζει τις προαναφερθείσες διαφορετικές τοπολογίες της αρχιτεκτονικής οπτικών δικτύων με χρήση ίνας. Οι FTTH αρχιτεκτονικές μπορούν να ταξινομηθούν με τη σειρά τους σε ενεργές και παθητικές τοπολογίες. Οι ενεργές τοπολογίες δικτύων FTTH είναι περαιτέρω ταξινομημένες σε *point to point* ή *point-to-multipoint*. Κάθε τοπολογία έχει τα δικά της μοναδικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα και η βέλτιστη επιλογή εξαρτάται από το

υπάρχον δίκτυο, τις δαπάνες επέκτασης και τον αριθμό πιθανών συνδρομητών σε κάθε περίπτωση. Η εγκατάσταση FTTH τοπολογιών έχει παρουσιάσει σημαντική αύξηση τα τελευταία χρόνια, δείχνοντας ότι η πλήρης αντικατάσταση του χαλκού σε όλα τα μέρη του δικτύου είναι αναγκαία για την περαιτέρω αύξηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης στους καταναλωτές. Μέχρι στιγμής, πρωτοπόρες στον τομέα της εγκατάστασης FTTH δικτύων αναδεικνύονται η χώρες της ανατολικής Ασίας και πιο συγκεκριμένα, η Ιαπωνία, η Νότια Κορέα και η Κίνα (βλέπε σχήμα 7). Στην Ιαπωνία, η FTTH αγορά αριθμούσε περισσότερους από 1.6 εκατομμύριο συνδρομητές το 2004, με τον αριθμό αυτό να έχει αυξηθεί σε περίπου 3 εκατομμύρια μέσα στο 2006. Στόχος της κυβέρνησης της Ιαπωνίας είναι η σύνδεση συνολικά 30 εκατομμυρίων σπιτιών με ίνα μέχρι το 2010. Στατιστικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν το 2005 στην Κίνα και την Νότια Κορέα έδειξαν ότι περισσότερο από 1/4 και 1/8 των συνολικών ευρυζωνικών συνδέσεων αντίστοιχα, ακολουθούν FTTx και Ethernet LAN αρχιτεκτονικές. Μάλιστα, η Νότια Κορέα πρόσφατα ανακοίνωσε την συνέχιση του αναπτυξιακού της σχεδίου για εκσυγχρονισμό των τηλεπικοινωνιακών της υποδομών, επιδιώκοντας επέκταση των FTTH συνδέσεων και την παροχή 100 Mb/s ανά συνδρομητή. Οι FTTx τεχνολογίες έχουν αρχίσει να κερδίζουν μερίδιο της αγοράς και των Η.Π.Α., με την Verizon να είναι η πρωτοπόρος στην αξιοποίηση-διασύνδεση FTTH τεχνολογιών παρέχοντας μέχρι 50 Mb/s σε κάθε συνδρομητή. Αξίζει να σημειώσουμε ότι στις Η.Π.Α., ο αριθμός των FTTH συνδρομητών υπερέβη το ένα εκατομμύριο το τελευταίο τρίμηνο του 2006 [1.41].





Σχήμα 7 :Διαγράμματα αυξητικής πορείας της τεχνολογίας FTTx παγκοσμίως αλλά και στην Η.Π.Α ειδικότερα.

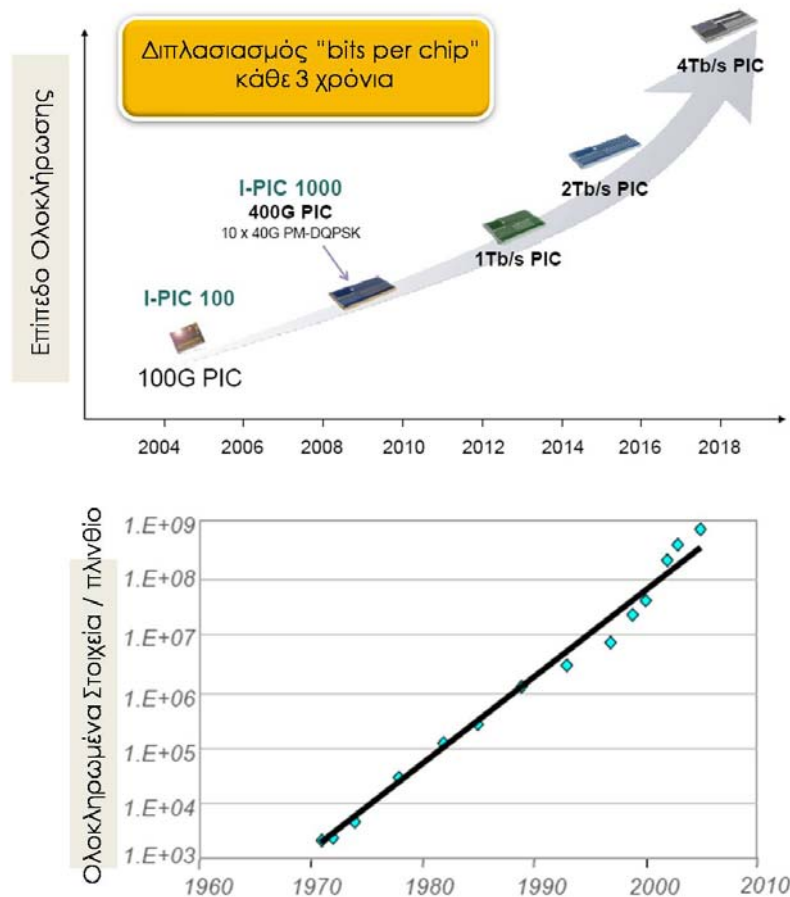
## 1.6 Τεχνικές Ολοκλήρωσης-Η πορεία προς το οπτικό VLSI

Η τεχνολογία οπτικής ολοκλήρωσης έχει αναδειχθεί ως μονόδρομος στην πορεία για το σχεδιασμό κομψών λύσεων αμιγώς οπτικών συστημάτων, που θα ικανοποιούν την απαίτηση για μειωμένο κόστος, κατανάλωση ισχύος και φυσικού χώρου καθώς και των απαιτούμενων εξωτερικών διασυνδέσεων (interconnections) ανάμεσα στα οπτικά στοιχεία [1.42,1.43]. Τα σημερινά διακριτά οπτικά στοιχεία καταναλώνουν μεγάλο φυσικό χώρο, καθώς οι διαστάσεις τους δεν μπορούν να είναι μικρότερες από τις διαστάσεις εξωτερικής συσκευασίας τους. Επιπλέον, κατά την υλοποίηση μιας πλήρους οπτικής διάταξης που απαρτίζεται από πληθώρα οπτικών στοιχείων, όλες οι διασυνδέσεις που απαιτούνται γίνονται εξωτερικά με τη χρήση οπτικής ίνας. Για το λόγο αυτό οι απώλειες οπτικής ισχύος είναι μεγαλύτερες, γεγονός που οδηγεί σε κατανάλωση μεγαλύτερης ηλεκτρικής ισχύος για την

## Εισαγωγή στις Οπτικές τηλεπικοινωνίες

ενίσχυση των οπτικών σημάτων. Τέλος, οι εξωτερικές διασυνδέσεις με οπτικές ίνες μειώνουν την αξιοπιστία και σταθερότητα λειτουργίας των κυκλωμάτων, καθώς οι οπτικές ίνες είναι ευαίσθητες σε περιβαλλοντικές μεταβολές (θερμοκρασίας, πίεσης κ.τ.λ.).

Προκειμένου να μπορέσουμε να δημιουργήσουμε οπτικούς δρομολογητές οι οποίοι θα υποστηρίζουν την δυνατότητα επιτυχούς μεταγωγής των δεδομένων σε αρκετά υψηλές ταχύτητες, η ερευνητική δραστηριότητα επικεντρώθηκε στην υλοποίηση ολοκληρωμένων οπτικών διατάξεων τα οποία απαρτίζουν έναν οπτικό κόμβο και τα οποία θα μπορούν να λειτουργούν σε υψηλές ταχύτητες με χαμηλό κόστος κατασκευής, χαμηλή κατανάλωση ισχύος αλλά και μικρό μέγεθος. Ως εκ τούτου θα προσφέρει την δυνατότητα της επεκτασιμότητας σε πιο πολύπλοκα υπέρ-υψηλής ολοκλήρωσης συστήματα που θα εξυπηρετούν και περισσότερες αλλά και πιο πολύπλοκες δικτυακές λειτουργίες. Ενδεικτικό παράδειγμα της τάσης αυτής για ολοένα και μικρότερα σε μέγεθος οπτικά συστήματα που θα χρειάζονται λιγότερη ισχύς παρουσιάζονται στα ακόλουθο διάγραμμα.



Σχήμα 8: Ενδεικτικό διάγραμμα υπόδειξης της αυξητικής τάσης ολοκλήρωσης σε ένα σύστημα σε σχέση με την εκρηκτική ροή της αύξησης των δεδομένων μετάδοσης.

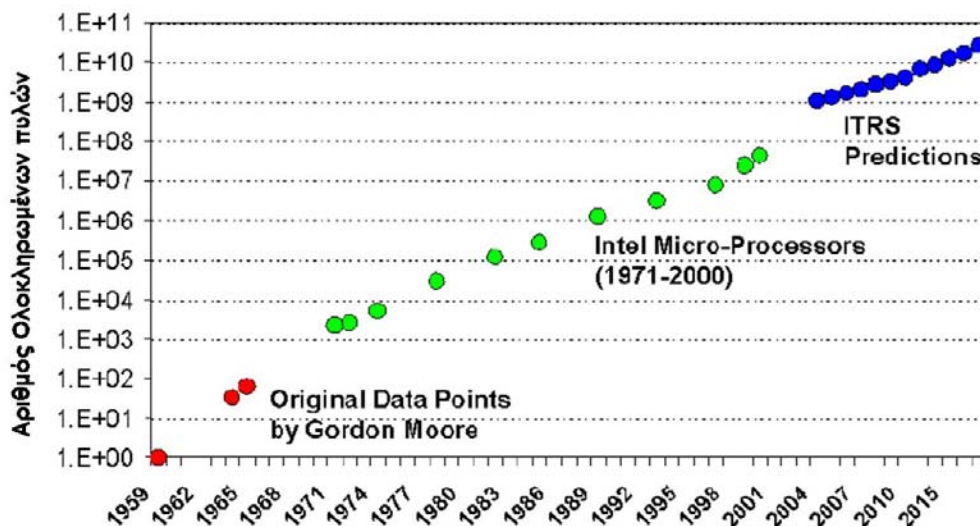
Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής παρουσιάζεται επίσης μια θεωρητική μελέτη πάνω στις τεχνικές ολοκλήρωσης για την κατασκευή ολοκληρωμένων αμιγώς οπτικών κυκλωμάτων, τα οποία θα επιτυγχάνουν την σταδιακή αντικατάσταση των ήδη υπαρχόντων ηλεκτρονικών.

Οι τρεις επικρατέστερες τεχνολογίες οι οποίες αποτέλεσαν τους βασικούς άξονες υλοποίησης της τάσης αυτής προκειμένου να κατασκευάσουμε ολοκληρωμένες διατάξεις οπτικών κυκλωμάτων είναι η α) **μονολιθική** [1.44] , β) **υβριδική** [1.45] και γ) **ολοκλήρωση με χρήση πυριτίου** [1.46,1.47]. Και οι τρεις αρχιτεκτονικές έχουν να επιδείξουν αρκετά σημαντικά αποτελέσματα στον τομέα της ολοκλήρωσης ενώ στις ακόλουθες παραγράφους παρουσιάζονται ενδεικτικά σημαντικά επιτεύγματα, στο τομέα των τηλεπικοινωνιών, με άμεση εφαρμογή τους στα εγκατεστημένα δίκτυα μετάδοσης δεδομένων.

### 1.6.1 Μετάβαση από τα ηλεκτρονικά στα οπτικά ολοκληρωμένα κυκλώματα

Μια από τις σημαντικότερες καινοτομίες του 20<sup>ου</sup> αιώνα αποτέλεσε η δημιουργία ολοκληρωμένων διατάξεων. Βασικοί εμπνευστές αυτής της προσπάθειας αποτέλεσαν οι Robert Noyce , Jack Kilby και Gordon Moore [1.48] οι οποίοι δημιούργησαν το πρώτο ολοκληρωμένο τρανζίστορ με χρήση πυριτίου. Η τεχνολογία αυτή έγινε αμέσως αποδεκτή από την βιομηχανία κατασκευής ολοκληρωμένων διατάξεων, η οποία κατάφερε μέχρι σήμερα να επιφέρει αλματώδεις αλλαγές στον τομέα της ολοκλήρωσης μέσω της επενδυτικής διάθεσης άνω των 100 δισεκατομμυρίων δολαρίων στο χώρο αυτό.

Η αυξανόμενη τάση της ηλεκτρονικής ολοκλήρωσης όπως διατυπώθηκε και από τον νόμο του Moore διαφαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα υποδεικνύοντας ότι μέχρι το 2015 η πυκνότητα ολοκλήρωσης σε ένα πλινθίο θα αυξηθεί δυο με τρεις τάξεις παραπάνω.



Σχήμα 9: Ο νόμος του Moore προβλέπει τον διπλασιασμό του αριθμού της πυκνότητας των τρανζίστορ κάθε 18 μήνες. Η έμπρακτη απόδειξη του κανόνα αυτού οδήγησε και στην μείωση του κόστους μονάδας των τρανζίστορ.

Βασικό ερώτημα αποτέλεσε ο ρόλος των ηλεκτρονικών ολοκληρωμένων στα οπτικά δίκτυα, μιας και τα οπτικά δίκτυα διαχειρίζονται φωτόνια και όχι ηλεκτρόνια!! Η απάντηση στο ερώτημα αυτό βρίσκεται στην αξιοποίηση των συστημάτων αυτών με την διαχείριση και τον έλεγχο βασικό

εφαρμογών που λαμβάνονται από τα αξιόπιστα δίκτυα μετάδοσης. Εφαρμογές όπως επίβλεψη της αποδοτικότητας στην μετάδοση των δεδομένων, ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων στο δίκτυο, μεταγωγή ροών δεδομένων σε ευρύτερες μονάδες μετάδοσης, επαναπροσδιορισμός της αρχιτεκτονικής ενός δικτύου με γρήγορο τρόπο, καθώς και εφαρμογές που σχετίζονται με την προστασία του όλου συστήματος, αποτελούν τους βασικούς άξονες για την υλοποίηση τέτοιων συστημάτων.

Επομένως μιας και τα αμιγώς οπτικά δίκτυα με χρήση πολυπλεξίας μήκους κύματος καθώς και οι οπτικοί ενισχυτές παρέχουν την δυνατότητα ευελιξίας και αύξησης της αποδοτικότητας μεταξύ των κόμβων, όλες οι άλλες κύριες λειτουργίες γίνονται με συνδυασμό των ηλεκτρονικών συστημάτων και λογισμικού. Παραδείγματα χρήσης των ηλεκτρονικών σε SONET/SDH οπτικά δίκτυα ή σε συστήματα μεταγωγής πακέτων είναι η επαναδρομολόγηση των ροών δεδομένων που μετακινούνται μέσα σε ένα οπτικό δίκτυο. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι ανάλογα με την εφαρμογή που είναι σχεδιασμένο να εκτελεί το ολοκληρωμένο, μπορεί να μεταγεί την πληροφορία με διαφάνεια στο είδος αυτής.



**Σχήμα 10: Εφαρμογές ηλεκτρονικών ολοκληρωμένων συστημάτων με χαμηλό κόστος κατασκευής**

Τα ηλεκτρονικά συστήματα χρησιμοποιούνται επίσης για την βελτίωση της οπτικής μετάδοσης των διαφόρων σημάτων. Παραδείγματος χάριν η διόρθωση λαθών με προώθηση, η ηλεκτρονική αντιστάθμιση της διασποράς αλλά και οι τεχνικές διαμόρφωσης χρησιμοποιούνται με σκοπό την ανάκαμψη των υποβαθμισμένων διφύων, την σταθεροποίηση των οπτικών σημάτων λόγω διασποράς καθώς και την αύξηση της αποδοτικότητας των εν λόγω συστημάτων στα οποία ανήκουν [1.49,1.50].

Από την άλλη σε ότι αφορά το κόστος κατασκευής των διατάξεων αυτών, παρατηρούμε ότι τα ηλεκτρονικά υπερτερούν των οπτικών, είναι λιγότερο πολύπλοκα σαν συστήματα και παρέχουν επί το πλείστον περισσότερες εφαρμογές [1.51]. Σε αυτή λοιπόν την περίπτωση είναι και η πλεονεκτική στρατηγική θέση των ηλεκτρονικών μιας και με λιγότερα λεφτά εν τέλει καταφέρνεις να επιτύχεις περισσότερες δυνατότητες.

Συνεπώς διαβάζοντας κανείς τα άνωθι, δημιουργείται η απορία γιατί τελικά θέλουμε να δημιουργήσουμε αμιγώς οπτικά συστήματα αφού τα ηλεκτρονικά μας παρέχουν

**περισσότερα πλεονεκτήματα; Γιατί επομένως δεν θέλουμε την οπτική-ηλεκτρική-οπτική μετάβαση του σήματος;**

Η απάντηση στο τόσο σημαντικό πρόβλημα έχει να κάνει όχι με το κόστος κατασκευής των ηλεκτρονικών ολοκληρωμένων διατάξεων, όσο με το κόστος μετατροπής του μεταδιδόμενου σήματος από το οπτικό στο ηλεκτρονικό επίπεδο.

Ο βασικός λόγος που μια τέτοια διαδικασία μετατροπής είναι τόσο ακριβή εναπόκειται στο γεγονός ότι χρειάζονται πολλά μεμονωμένα διακριτά οπτικά στοιχεία τα οποία θα εξυπηρετούν μια απλή εφαρμογή προκειμένου να επιτευχθεί η μετάβαση αυτή. Σε ένα τυπικό οπτικό δίκτυο παραδείγματος χάριν, κάθε οπτο-ηλεκτρική και μετέπειτα ηλεκτρονικό-οπτική μετατροπή (ΟΕΟ) εκτιμάται ότι χρειάζεται μισή ντουζίνα οπτο-ηλεκτρονικών ή οπτικών στοιχείων, ενώ ένας πλήρης τερματικός κόμβος WDM μετάδοσης 40 καναλιών δύναται να χρειαστεί περισσότερα από 120 στοιχεία διασυνδεδεμένα μεταξύ τους από 260 ή περισσότερες οπτικές συνδέσεις.

Απόρροια των ανωτέρω και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι απαιτήσεις για μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης και περισσότερα κανάλια μετάδοσης αποτελεί η ασταθής και οικονομικά μη βιώσιμη χρήση της ΟΕΟ μετατροπής. Επιπρόσθετα δε μιας και τα στοιχεία κατασκευάζονται μεμονωμένα η δυνατότητα για κατασκευή πολύπλοκων συστημάτων με αυξημένη αποδοτικότητα μειώνεται δραστικά σε σχέση με τα ηλεκτρονικά.

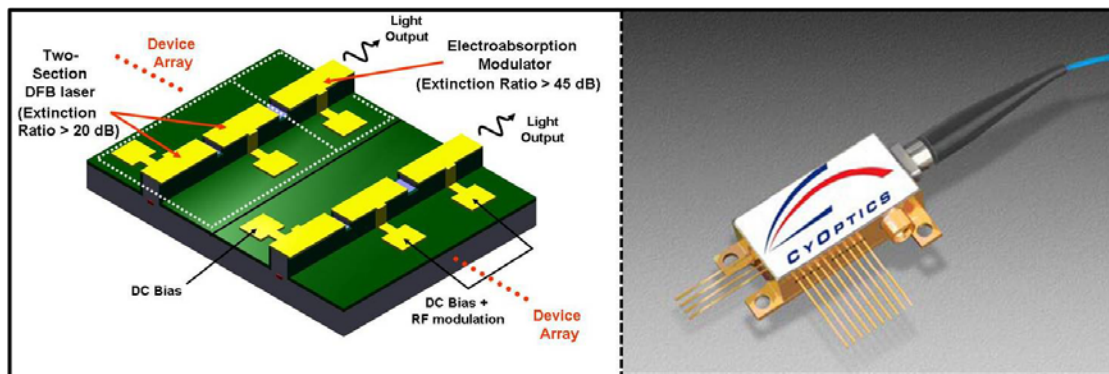
Τέλος εκτός της μεγιστοποίησης του κόστους κατασκευής, ένα ακόμα βασικό μειονέκτημα είναι η οριοθέτηση των ταχυτήτων από τα ηλεκτρονικά στοιχεία η οποία έως και σήμερα δεν έχει καταφέρει να ξεπεράσει τα 40 Gb/s. Σε συστήματα επομένως που μας ενδιαφέρει ο ρυθμός μετάδοσης να υπερβεί τα 40 Gb/s, η χρήση ηλεκτρονικών λειτουργεί δεσμευτικά.

Για τον λόγο αυτό οι προσπάθειες για φωτονική ολοκλήρωση με συνδυασμό οπτικών και ηλεκτρονικών στοιχείων σε ένα πλινθίο (*chip*) αποτέλεσαν βασικό όπλο στην ανάπτυξη των οπτικών ολοκληρωμένων συστημάτων διαμέσου καινοτόμων τεχνολογιών οπτικής ολοκλήρωσης, τα οποία ώθησαν με την σειρά τους και την ανάπτυξη των οπτικών δικτύων τρίτης γενιάς, τα οποία όπως αναφέραμε σε προηγούμενες παραγράφους κατάφεραν να μετάγουν την συνολική επεξεργασία των μεταδιδόμενων σημάτων σε αμιγώς οπτική μειώνοντας στο ελάχιστο την χρήση των ηλεκτρονικών διατάξεων.



## 1.6.2 Μονολιθική Ολοκλήρωση

Τα συστήματα υψηλής ολοκλήρωσης με χαρακτηριστικό γνώρισμα την χρήση ενός υποστρώματος που αποτελείται από ένα μόνο ενιαίο υλικό *InP* (*Indium Phosphide*, *Gallium Arsenide* (*GaAs*), *Lithium Niobate* (*LiNbO<sub>3</sub>*)), αποτελούν μια καινοτόμο λύση στην κατασκευή ολοκληρωμένων διατάξεων επιδεικνύοντας πληθώρα πλεονεκτημάτων όπως αξιόλογη μείωση της πολυπλοκότητας των συστημάτων, το μέγεθος, την κατανάλωση ενέργειας ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζουν και σημαντική βελτίωση της αποδοτικότητας συγκριτικά με αντίστοιχα συστήματα που απαρτίζονται από μεμονωμένα στοιχεία. Επιπρόσθετα μειώνοντας το κόστος της αναγκαστικής μετάβασης του σήματος από οπτικό σε ηλεκτρικό και ξανά οπτικό, επιτυγχάνεται η αναβάθμιση της λειτουργίας του όλου συστήματος κάνοντας το πιο ευέλικτο και λιγότερο πολύπλοκο στον τρόπο σχεδίασης του.



Σχήμα 11: Ολοκληρωμένο προϊόν με χρήση μονολιθικής ολοκλήρωσης. Αριστερά παρουσιάζεται η δομή ενός ολοκληρωμένου Ηλεκτρο-διαμορφωμένου πομπού εκπομπής φωτός (EML), δεξιά παρουσιάζεται το EML αφότου έχει υποστεί και το τελευταίο στάδιο της συναρμολόγησης (packaging), προτού γίνει εμπορικά διαθέσιμο

Λόγω της ομοιομορφίας του υλικού καθ' όλη την διαδικασία κατασκευής των ολοκληρωμένων που παρέχει η τεχνική αυτή επιτυγχάνεται επίσης μείωση των εξωτερικών διασυνδέσεων μεταξύ των στοιχείων, μεγαλύτερη ευστάθεια και βέλτιστη μείωση του χώρου που καταλαμβάνει το σύστημα. Τέλος σημαντική είναι και η συνολική μείωση της κατανάλωσης θερμότητας λόγω του σχεδιασμού.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μεγάλη πρόκληση προκειμένου να επιτύχουμε αποδοτικού κόστους βιώσιμα ολοκληρωμένα συστήματα είναι η επιλογή του υλικού από το οποίο αποτελείται το υπόστρωμα κατασκευής των ολοκληρωμένων. Πλην του Indium Phosphide (*InP*) αξιόλογης αποδοτικότητας υλικά που μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν είναι το Gallium Arsenide (*GaAs*) καθώς και το Lithium Niobate (*LiNbO<sub>3</sub>*). Παρόλη την δυνατότητα ολοκλήρωσης και με τα προαναφερθέντα υλικά βασικότερος «εκπρόσωπος» της μονολιθική ολοκλήρωσης είναι το *InP*. Είναι το μοναδικό υλικό το οποίο κατάφερε να συνδυάσει τα παθητικά με τα ενεργά στοιχεία στα 1310 nm αλλά και στο πεδίο των τηλεπικοινωνιών στα 1550 nm με αρκετά αποδοτικό τρόπο. Μιας και το υλικό αυτό υποστηρίζει την δημιουργία πομπών εκπομπής φωτός, την ενίσχυση, την διαμόρφωση και

την ανίχνευση του φωτός μπορεί να ενεργοποιήσει όλες τις εφαρμογές κλειδιά στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, προκειμένου να δημιουργήσει ολοκληρωμένα συστήματα με χαμηλό κόστος στα οπτικά συστήματα μετάδοσης. Παρόλα αυτά μέχρι σήμερα η μονολιθική ολοκλήρωση έχει επικεντρωθεί στην δημιουργία ολοκληρωμένων διατάξεων με συγκεκριμένες λειτουργίες, αλλά και στην αξιοποίηση του βασικού πλεονεκτήματος της κατασκευής ενεργών στοιχείων με χρήση InP για εκπομπή φωτός. Ένα από τα παράδειγματα της τεχνολογίας αυτής είναι η δημιουργία ενός ηλεκτρο-απορροφημένης διαμόρφωσης πομπού εκπομπής φωτός (Electro-absorption Modulated Laser (EML)) όπως φαίνεται και στο Σχήμα 11[1.52].

Σε ότι αφορά τα παθητικά στοιχεία όπως πολυπλέκτες μηκών κύματος, αποπολυπλέκτες, μεταβλητής εξασθένισης στοιχεία, μεταγωγείς και αντισταθμιστές διασποράς υπάρχει μια ευρεία γκάμα τέτοιων στοιχείων κατασκευασμένα με InP. Δεδομένου δε του γεγονότος ότι οι κυματοδηγοί για την διασύνδεση τόσο των ενεργών όσο και των παθητικών στοιχείων μπορούν να γίνουν σε μια πλατφόρμα κατασκευασμένη από InP, η τεχνολογία αυτή δύναται να δημιουργήσει συστήματα σε ένα μόνο πλινθίο (**Systems on a chip**) που θα εξυπηρετούν πολύπλοκες εφαρμογές αρχειτά αποδοτικότερα σε σχέση με τον συνδυασμό μεμονωμένων στοιχείων. Ιδιαίτερη αναφορά αξίζει το επίτευγμα της εταιρίας Infinera [1.53], η οποία σήμερα κρατά το ρεκόρ των οπτικών στοιχείων που έχουν ολοκληρωθεί μονολιθικά σ' ένα μόνο πλινθίο. Πρόκειται, για έναν πολυκυματικό πομπό που απαρτίζεται από 10 κανάλια, καθένα από τα οποία έχει τη δυνατότητα παραγωγής διαμορφωμένου οπτικού σήματος 10 Gb/s. Το πλινθίο περιέχει μονολιθικά ολοκληρωμένα 41 οπτικά στοιχεία, με κάθε κανάλι να απαρτίζεται από μια πηγή διοδικού laser DFB, έναν μεταβλητό εξασθενητή (variable attenuator), έναν απομονωτή (isolator) και έναν ηλεκτρο-οπτικό διαμορφωτή. Συνολικά το ολοκληρωμένο έχει τη δυνατότητα να παράγει οπτικά δεδομένα σε ρυθμό 100 Gb/s. Παρόμοια έχει ολοκληρωθεί ο αντίστοιχος πολυκυματικός δέκτης στα 10x10 Gb/s που περιέχει 21 οπτικά στοιχεία [1.54-1.59].

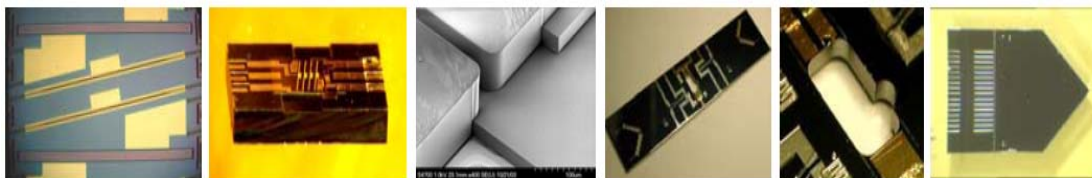
Βασικότερο ίσως όλων των πλεονεκτημάτων της μονολιθικής ολοκλήρωσης αποτελεί η δραστηνή μείωση του κόστους συναρμολόγησης και εναπόθεσης της ολοκληρωμένης πλακέτας μέσα στο οπτικό κουτί του. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται “packaging” και μέσω μελετών έχει αποδειχθεί ότι αποτελεί το βασικό κόστος στην ολοκλήρωση των οπτικών στοιχείων με ποσοστό από 50% έως και 80% του συνολικού κόστους. Επιπρόσθετα μέσω της τεχνικής αυτής μειώνεται ο κίνδυνος κακής ευθυγράμμισης των διαφόρων στοιχείων μεταξύ τους μιας και οι κυματοδηγοί χαράσσονται μαζί με τα στοιχεία στην ίδια πλατφόρμα. Απορία δε αυτού είναι η αύξηση της αποδοτικότητας του συνολικού συστήματος και την μείωση των απωλειών ισχύος μεταξύ των στοιχείων. Τα συστήματα γίνονται ανθεκτικότερα στους κραδασμούς, καθώς και σε δραματικές διαφοροποιήσεις της θερμοκρασίας κατά περιοχές που προκαλεί καιρό έλεγχο του όλου συστήματος σε ότι αφορά

την διαχείριση της εκλυόμενης θερμότητας. Τέλος μιας και όλα τα στοιχεία είναι συγκεντρωμένα σε μια πλατφόρμα, ο συνολικός χρόνος ελέγχου του συστήματος μπορεί να γίνει ευκολότερα, μειώνοντας τον χρόνο και το κόστος παρασκευής σε σύγκριση με τον μεμονωμένο και χρονοβόρο έλεγχο κάθε στοιχείου ξεχωριστά.

### 1.6.3 Υβριδική Ολοκλήρωση

Η υβριδική ολοκλήρωση αποτελεί έναν ακόμα παράλληλο άξονα για την κατασκευή ολοκληρωμένων διατάξεων [1.60, 1.61]. Παρόλα αυτά πολλοί είναι εκείνοι που διαχωρίζουν την επιλογή των δύο αυτών τεχνικών με βάση την εφαρμογή που καλούνται να επιτελέσουν τα ολοκληρωμένα συστήματα, δίνοντας έμφαση στην προτίμηση της υβριδικής ολοκλήρωσης για εφαρμογές υψηλής αποδοτικότητας, εν αντιθέσει με αυτή της μονολιθικής για λιγότερο πολύπλοκες και περισσότερο διακριτές εφαρμογές. Όπως η μονολιθική έτσι και η υβριδική ολοκλήρωση επιτυγχάνει την μείωση του κόστους, την αύξηση της αποδοτικότητας των συστημάτων, την μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας καθώς και την μείωση της πολυπλοκότητας των ολοκληρωμένων διατάξεων.

Προκειμένου να επιτευχθεί η μείωση του κόστους στην κατασκευή των ολοκληρωμένων διατάξεων υιοθετήθηκε η τεχνική της παθητικής ταξινόμησης των ενεργών οπτικών στοιχείων πάνω στην μητρική πλατφόρμα πυριτίου, επιτρέποντας την δημιουργία οπτικών διατάξεων με υψηλές αποδόσεις και χαμηλό κόστος ολοκλήρωσης. Ο βασικός τρόπος επίτευξης αυτής της τεχνικής στηρίζεται σε μηχανισμούς παθητικής ευθυγράμμισης και υψηλής ακρίβειας σχεδιασμό και υλοποίηση. Απόρροια δε της ευελιξίας των στοιχείων μέσω της παθητικής ευθυγράμμισης να ρυθμίζονται οι ενώσεις με υψηλή ακρίβεια είναι η μείωση των εσωτερικών απωλειών αλλά και η αύξηση του συνδυασμού περισσότερων του ενός συστημάτων μεταξύ τους, η δυνατότητα συνδυασμού πολλών διαφορετικών στοιχείων μεταξύ τους, και γενικά η μείωση κατασκευαστικών σφαλμάτων στο ολοκληρωμένο που επιφέρουν και αύξηση στο κόστος κατασκευής.



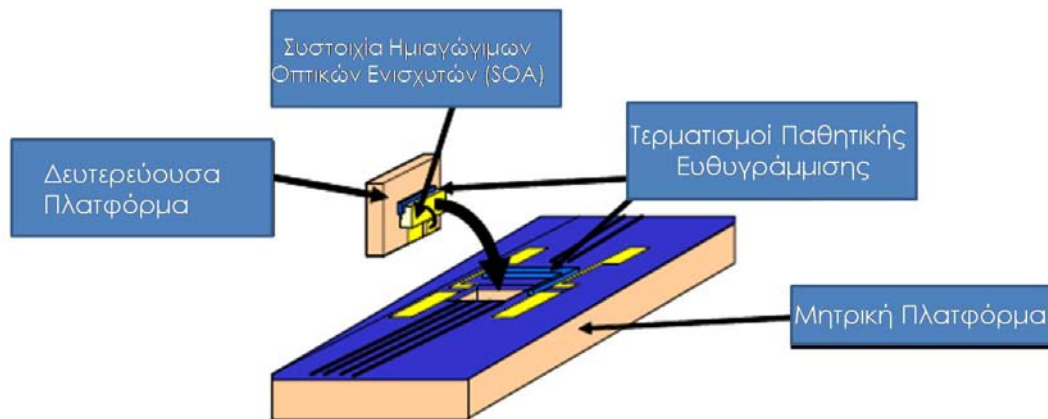
**Σχήμα 12:** Φωτογραφίες υβριδικής ολοκλήρωσης: (από αριστερά προς τα δεξιά): υψηλής ακρίβειας διασχισμένοι ημιαγωγιμοί οπτικοί ενισχυτές, ολοκληρωμένη δευτερεύουσα πλατφόρμα (daughterboard), εικόνα SEM daughterboard, τερματισμοί από πολυμερή για παθητική ευθυγράμμιση, μητρική, διασχίσεις μητρικής για εναπόθεση της daughterboard, μετατροπείς για την ένωση των προεκτάσεων ίνας με τους κυματοδηγούς.

Βασικός λόγος της επιτυχίας της υβριδικής ολοκλήρωσης είναι ο συνδυασμός ενεργών στοιχείων φτιαγμένα από InP (π.χ ημιαγωγιμοί οπτικοί ενισχυτές (SOAs)) με παθητικά στοιχεία διασυνδεδεμένα μέσω κατάλληλης χάραξης των κυματοδηγών προκειμένου να



δημιουργηθούν εν τέλει οπτικά συστήματα επεξεργασίας σήματος. Τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιούν τις μη γραμμικές ιδιότητες των SOAs προκειμένου να αφήσουν μια δέσμη φωτός να μετατραπεί σε μια άλλη. Οι SOAs αποτελούν ελκυστικά στοιχεία λόγω μεγέθους, παρέχουν οπτική ενίσχυση και χρειάζονται χαμηλές ισχύς για να λειτουργήσουν. Προκειμένου να λειτουργήσουν σε υψηλότερες ταχύτητες ( $>40$  Gb/s) οι SOAs ενσωματώνονται σε ένα οπτικό συμβολόμετρο, όπως το Mach-Zehnder [1.61,1.62] προκειμένου να εκμεταλλευτούμε φαινόμενα όπως έτερο-διαμόρφωση φάσης και έτερο-διαμόρφωση κέρδους. Οι συμβολομετρικές αυτές διατάξεις είναι αρκετά συμβατές με την υβριδική ολοκλήρωση παρέχοντας χαμηλές απώλειες και προβάλλοντας διάφορες εφαρμογές όπως αναγεννητές, μετατροπείς μήκους κύματος κλπ, έχουν καταφέρει να αποτελέσουν σημαντικό αρωγό στην μελέτη και βελτίωση της υβριδικής πλατφόρμας ολοκλήρωσης.

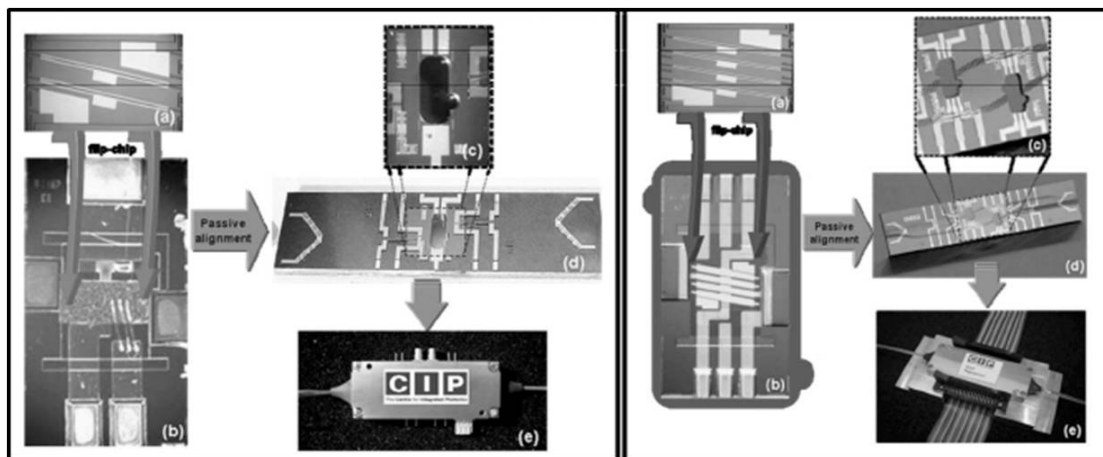
### 1.6.3.1 Υβριδική πλατφόρμα ολοκλήρωσης



Σχήμα 13: Υβριδική Πλατφόρμα Ολοκλήρωσης

Η υβριδική πλατφόρμα ολοκλήρωσης [1.63] αποτελεί μια αξιόλογη λύση για κατασκευή ολοκληρωμένων διατάξεων που στηρίζεται στην παθητική συναρμολόγηση των στοιχείων προσφέροντας έτσι χαμηλό κόστος υλοποίησης. Η βασική αρχή της τεχνολογίας αυτής είναι ότι τα ενεργά στοιχεία καθώς και τα παθητικά στοιχεία σχεδιάζονται ταυτόχρονα έτσι ώστε το ολοκληρωμένο κύκλωμα να έχει την βέλτιστη αρχιτεκτονική. Οπτικά στοιχεία διασύνδεσης μέσω κατάλληλης προσαρμογής μεταξύ διαφορετικών επιφανειών καθώς και μηχανικά στοιχεία διάσχισης με υψηλή ακρίβεια αποτελούν βασικά χαρακτηριστικά που αν και αυξάνουν το συνολικό μέγεθος των ολοκληρωμένων, βοηθάνε στην παθητική ευθυγράμμιση των εν λόγω ενεργών στοιχείων στην κεντρική πλατφόρμα. Η κεντρική πλατφόρμα έχει επίσης διαστολές εύρους κυματοδηγών για να ελαχιστοποιεί τις απώλειες κατά την σύζευξη των ενεργών στοιχείων με τους κυματοδηγούς αλλά και της οπτικής ίνας με την μητρική πλατφόρμα διατηρώντας κατ' αυτό τον τρόπο την συνολική απώλεια του σήματος που καθοδηγείται μέσα από αυτή σε χαμηλά επίπεδα ( $<0.1$  dB/cm). Προκειμένου δε τα ενεργά στοιχεία να ευθυγραμμιστούν με την κεντρική πλατφόρμα και να

τοποθετηθούν πάνω σε αυτήν, ενσωματώνονται σε μια άλλη δευτερεύουσα πλατφόρμα πυριτίου (daughterboard) και εν συνεχεία η πλατφόρμα αυτή εναποτίθεται στην μητρική σε προκαθορισμένες περιοχές που έχουν υποστεί κατάλληλη διάσχιση προκειμένου να εφάπτονται πλήρως οι δύο πλατφόρμες. Η τελική θέση της πλατφόρμας που φιλοξενεί τα ενεργά στοιχεία καθορίζεται με υψηλής ακριβείας πολυμερή (SU 8) τερματισμούς οι οποίοι είναι σχεδιασμένοι με την μέθοδο της λιθογραφίας πάνω στην μητρική πλακέτα. Σε ότι αφορά την κατακόρυφη θέση των ενεργών στοιχείων αυτή καθορίζεται από το ύψος των προστατευτικών επιστρώσεων πυριτίου τα οποία βρίσκονται πάνω στην μητρική πλατφόρμα κυματοδηγών. Αυτές οι διεργασίες παρέχουν μια ευελιξία στον τρόπο που γίνεται η ευθυγράμμιση των ενεργών στοιχείων με τους κυματοδηγούς, παρέχοντας ως αποτέλεσμα



Σχήμα 14: Μετάβαση από ένα μεμονωμένο στοιχείο σε ένα φωτονικό πλινθίο πολλαπλών στοιχείων. (Αριστερά) Μονός οπτικός διακόπτης SOA-MZI: (a) ζεύγος SOAs με δυνατότητα ανάστροφης εναπόθεσης στην δευτερεύουσα πλακέτα πυριτίου (b) Τοποθέτηση στην δευτερεύουσα πλακέτα πυριτίου (daughterboard) (c) Λεπτομερής αναπαράσταση της διάσχισης της μητρικής για την τοποθέτηση της daughterboard (d) Μητρική πλακέτα χωρητικότητας ζεύγους SOAs και (e) Συσσκευασία εναπόθεσης ολοκληρωμένου κυκλώματος του οπτικού διακόπτη (Δεξιά) Τετραπλός οπτικός διακόπτης (a) Τετράδα SOAs με δυνατότητα ανάστροφης εναπόθεσης στην δευτερεύουσα πλακέτα πυριτίου; (b) αναβαθμισμένης μορφής δευτερεύουσα πλακέτα εναπόθεσης των τεσσάρων SOAs (c) λεπτομερής αναπαράσταση δυο διασχίσεων για την τοποθέτηση δυο δευτερεύοντων πλακετών που περιλαμβάνουν τετράδα από SOAs d) αναβαθμισμένη μητρική πλακέτα χωρητικότητας 8 SOAs (2 ζεύγη των τεσσάρων) και (e) συσκευασία εναπόθεσης του τετραπλού SOA-MZI οπτικού διακόπτη

ένα σημαντικό πλεονέκτημα της υβριδικής ολοκλήρωσης το οποίο είναι η παρουσίαση χαμηλών απωλειών οι οποίες κυμαίνονται σε τιμές μικρότερες του 1 dB.

Ένα ακόμα βασικό πλεονέκτημα της υβριδικής ολοκλήρωσης επίσης είναι ότι τα ενεργά InP στοιχεία τα οποία χρησιμοποιούνται μπορούν να βελτιωθούν σχεδιαστικά χωρίς αυτό να καθιστά πρόβλημα για το υπόλοιπο σύστημα, μιας και αποτελούν ξεχωριστό κομμάτι του όλου συστήματος. Απόρροια αυτού είναι να χρησιμοποιούνται εξελιγμένοι πρωτότυποι ημιαγώγιμοι οπτικοί ενισχυτές κβαντικών φρεατίων (*quantum well SOAs*) αυξάνοντας με απλό τρόπο την αποδοτικότητα αλλά και την ολοκληρωσιμότητα των οπτικών συσκευών. Παθητικά στοιχεία για την διαστολή των κυματοδηγών (*mode expanders*), κεκλιμένες

επιφάνειες προσαρμογής των ενεργών στοιχείων (*tilted facets*) αλλά και επιπλέον διαστρώματα επικάλυψης για την απόλυτη εφαρμογή των ενεργών στοιχείων με την πλατφόρμα ολοκλήρωσης (*coating*) αποτελούν βασικά βοηθητικά στοιχεία της υβριδικής τεχνολογίας με σκοπό να μειωθούν φαινόμενα ανακλάσεων σε τάξεις  $<10^{-5}$  και επομένως να διατηρήσουν υψηλό οπτικό κέρδος στην ενίσχυση του σήματος ( $>30$  dB). Η απόδοση αυτή είναι σημαντική για την επίτευξη λειτουργιών σε πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Παράδειγμα της διαδικασίας ολοκλήρωσης με υβριδικό τρόπο ενός μονού οπτικού διακόπτη τύπου SOA-MZI αλλά και ενός εξελιγμένου μοντέλου υψηλότερης ολοκλήρωσης τετραπλού οπτικού διακόπτη τύπου SOA-MZI φαίνεται στο Σχήμα 14.

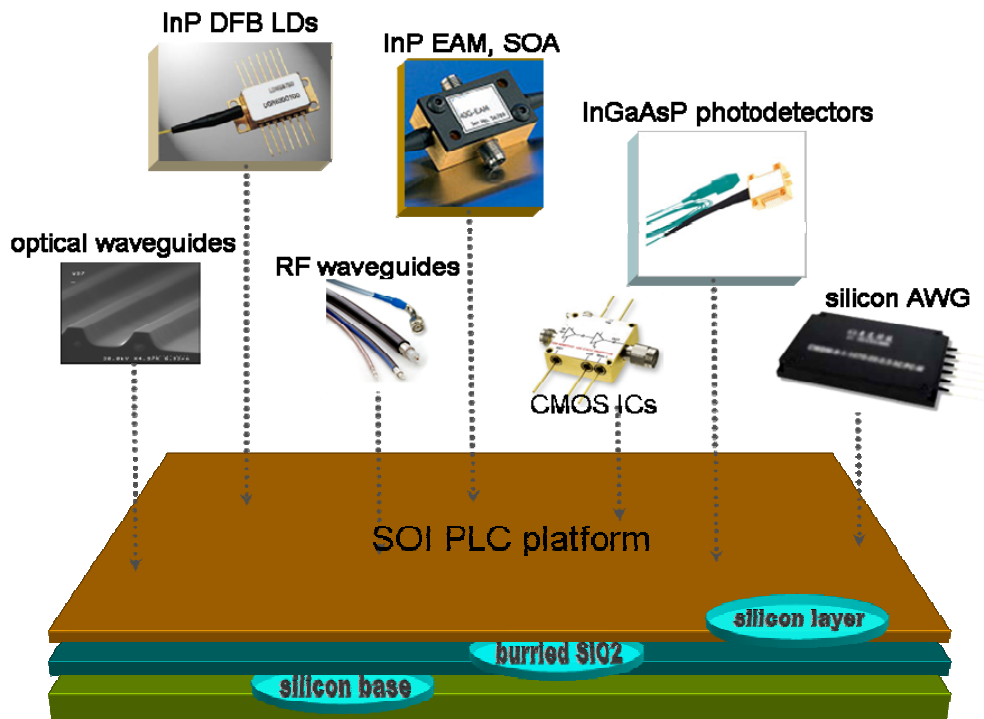
Εν κατακλείδι πρέπει να τονίσουμε ότι συνδυάζοντας τις λειτουργίες των ενεργών και παθητικών στοιχείων της υβριδικής πλατφόρμας ολοκλήρωσης επιτυγχάνεται η υλοποίηση διαφόρων εφαρμογών με άμεση εφαρμογή στην αξιοποίηση τους στα οπτικά δίκτυα νέας γενιάς. Παραδείγματα όπως αναγεννητές εκρηκτικής ροής, μετατροπείς μήκους κύματος, οπτικοί διακόπτες μεταγωγής δεδομένων, οπτικοί μανδαλωτές αλλά και οπτικές μνήμες είναι μερικά από τα βασικά δομικά στοιχεία που έχουν υλοποιηθεί με την χρήση της υβριδικής πλατφόρμας [1.64-1.70]. Παραδείγματα των στοιχείων αυτών φαίνονται και στις ακόλουθες εικόνες.



Σχήμα 15: α) 3R αναγεννητής, β) 2R αναγεννητής & μετατροπέας μήκων κύματος, γ) οπτικός μανδαλωτής

### 1.6.4 Ολοκληρωμένες διατάξεις με χρήση πυριτίου

Μετά την ολοκληρωτική κατάκτηση της βιομηχανίας των ηλεκτρονικών για αρκετές δεκαετίες, το πυρίτιο ήρθε να εδραιωθεί και σαν το βασικό στοιχείο ολοκλήρωσης και στην βιομηχανία των φωτονικών επικοινωνιών. Η απαρχή της χρήσης του πυριτίου σαν μέσο ολοκλήρωσης στην βιομηχανία των οπτικών μπορεί να ανιχνευτεί από τα τέλη της δεκαετίας του 80' και τις αρχές της δεκαετίας των 90. Στα πρωταρχικά στάδια η χρήση του πυριτίου βρήκε πρόσφορο έδαφος με απτά στοιχεία προόδου για την κατασκευή παθητικών στοιχείων ενώ στα τέλη της δεκαετίας των 90 λόγω της ειρηνικής ανάπτυξης της τεχνολογίας είχε ως συνεπακόλουθο τον ραγδαίο ρυθμό ανάπτυξης στο πεδίο της οπτικής ολοκλήρωσης. Η ραγδαία αυτή ανάπτυξη είχε σαν αποτέλεσμα να προσεγγίσει το επενδυτικό ενδιαφέρον αρκετών εταιριών και μεγάλων κολοσσών στον τομέα της ολοκλήρωσης, με αποτέλεσμα την αλματώδη πρόοδο του τομέα της ολοκλήρωσης με χρήση πυριτίου, ιδίως τα τελευταία πέντε χρόνια. Το βασικότερο ίσως όλων των πλεονεκτημάτων της χρήσης πυριτίου στον τομέα των οπτικά ολοκληρωμένων συσκευών είναι η συμβατότητα της τεχνολογίας αυτής με την βιομηχανία των ηλεκτρονικών ολοκληρωμένων συσκευών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αξιοποίηση των ήδη υπάρχουσών υποδομών για την παρασκευή χαμηλού κόστους και υψηλής ποιότητας ολοκληρωμένων διατάξεων[1.71-1.73].



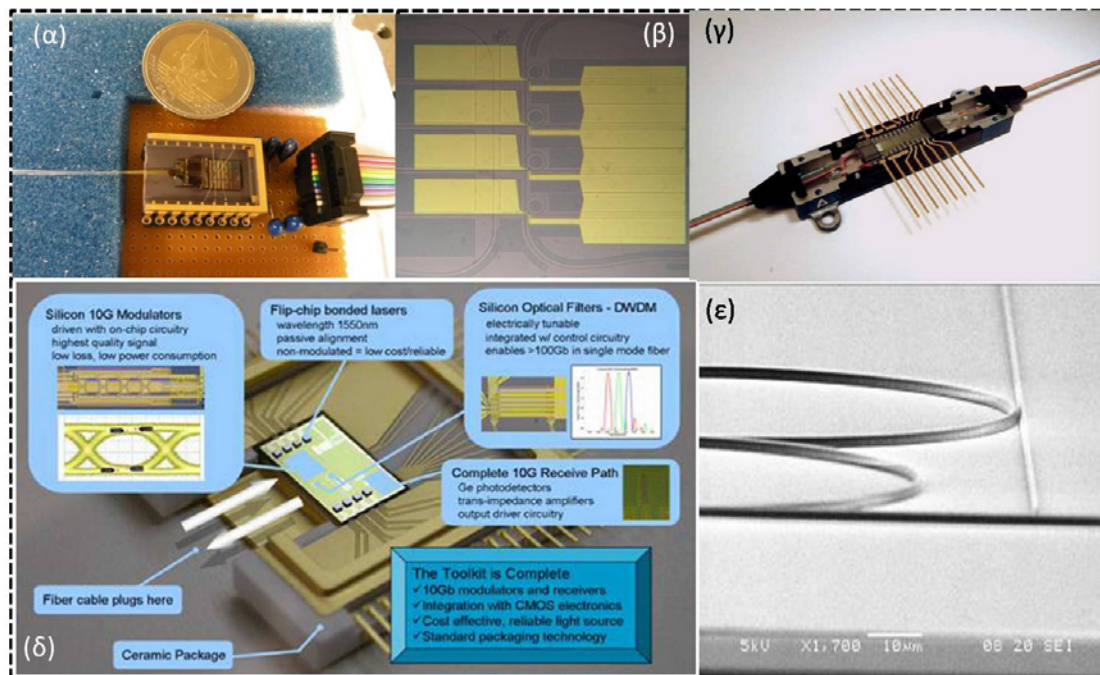
Σχήμα 16: Γενικό πλαίσιο ολοκλήρωσης με χρήση πυριτίου: Μέσω της χρήσης πυριτίου επιτυγχάνεται η ολοκλήρωση μεγάλου εύρους οπτικών και ηλεκτρονικών κυκλωμάτων στην ίδια μητρική πλατφόρμα.

Προκειμένου να επιτευχθεί η δυνατότητα ολοκλήρωσης με χρήση πυριτίου αξιοποιήθηκε ένα βασικό χαρακτηριστικό της πλατφόρμας αυτής. Συγκεκριμένα η μεγάλη διαφορά του

δείκτη διάθλασης μεταξύ του υποστρώματος πυριτίου και του υποστρώματος  $\text{SiO}_2$  ( $n=3.45$  έναντι  $n=1.45$ ) βοήθησε στην πραγματοποίηση της ολοένα και μεγαλύτερης σμίκρυνσης των οπτικών διατάξεων σε μεγέθη εκατοντάδων νανομέτρων αλλά ακόμα βασικότερα της κυματοδότησης του φωτός μέσα στο πυρίτιο, και επομένως της χάραξης κυματοδηγών πάνω σε αυτήν. Η δε σμίκρυνση αυτή τόσο σε οριζόντιο όσο και στον κάθετο άξονα αποτέλεσε και βασικό κριτήριο για την πραγματική εφαρμογή τους με την τεχνολογία των ηλεκτρονικών, λόγω της δυνατότητας ολοκλήρωσης των αρκετά μικρότερων σε μέγεθος μέχρι πρότινος ηλεκτρικών διατάξεων.

Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί στην περίπτωση αυτή ότι λόγω της μεγάλης διαφοράς του δείκτη διάθλασης των δυο υποστρωμάτων είναι εμφανή μη γραμμικά φαινόμενα όπως RAMAN και KERR φαινόμενα [1.74] τα οποία παράγουν μια σειρά από οπτικές λειτουργίες όπως ενίσχυση του σήματος, μετατροπή μήκους κύματος και εκπομπή φωτός, λειτουργίες οι οποίες μέχρι πρόσφατα ήταν αδύνατον να γίνουν με την χρήση του πυριτίου.

Αν και τα παραπάνω χαρακτηριστικά αποτελούν βασικά στοιχεία που ωθούν την τεχνολογία της ολοκλήρωσης με πυρίτιο δεν είναι τα μόνα στοιχεία που ενισχύουν την τεχνολογία αυτή. Η χρήση του πυριτίου έχει σημαντικές ιδιότητες από την φύση του ως υλικό ολοκλήρωσης με σημαντικότερα χαρακτηριστικά την αποδοτική απαγωγή θερμότητας ( $10x$  υψηλότερη από το  $\text{GaAs}$ ), υψηλότερη ανοχή σε οπτική ισχύς ( $10x$  μεγαλύτερη ανοχή από το  $\text{GaAs}$ ) και τέλος παρέχει υψηλές τρίτης τάξης μη γραμμικότητες.



Σχήμα 17: Διαθέσιμα στοιχεία ολοκληρωμένα με χρήση πυριτίου: α) Αναδιατάξιμος οπτικός πολυπλέκτης (Reconfigurable Add-drop Multiplexer), β) Συστοιχία φίλτρων μικροδακτυλίου, γ) οκτακάναλος οπτικός εξασθενητής μεταβλητής εξασθένησης, δ) ολοκληρωμένος οπτικός πομποδέκτης, ε) οπτικά φίλτρα μικρο-δακτυλίου 2<sup>ης</sup> τάξης.

Προωθώντας χαμηλού κόστους υποστρώματα και υψηλής ωριμότητας κατασκευαστικές υποδομές, η φωτονική ολοκλήρωση με χρήση πυριτίου παρουσιάζει μια μεγάλη ποικιλία διακριτών οπτικών συσκευών όπως επίσης και ολοκληρωμένων πομποδεκτών για σύγχρονα οπτικά δίκτυα, gigabit Ethernet καθώς και εφαρμογές στα δίκτυα κορμού. Παραδείγματα εμπορικά διαθέσιμων οπτικών συσκευών με χρήση πυριτίου είναι ο οπτικοακουστικός εξασθενητής μεταβλητής εξασθένισης ο οποίος παρουσιάστηκε από την Kotura Corporation [1.75]. Επιπρόσθετα ακολουθώντας την τάση της σύμπτυξης και συγχώνευσης των οπτικών με τα ηλεκτρικά η Luxtera Corp.[1.76] παρουσιάζει πως πιθανόν να είναι τα συστήματα νέας γενιάς με την χρήση πυριτίου (σχήμα 16δ) στο σύντομο μέλλον. Είναι αξιοσημείωτο ότι όλα τα στοιχεία είναι ολοκληρωμένα πάνω στην ίδια πλατφόρμα όπως φίλτρα, πομπό-δέκτες, ηλεκτρονικούς ενισχυτές και οδηγούς για την λειτουργία των ηλεκτρικά τροφοδοτούμενων οπτικών ενεργών στοιχείων. Οι τεχνικές δε ολοκλήρωσης [1.77] και συναρμολόγησης των στοιχείων αυτών ακολουθούν επίσης την ροή της αλματώδους τεχνολογικής ανάπτυξης των διατάξεων με χρήση πυριτίου, μερικές εκ των πιο σύγχρονων και αποτελεσματικότερων είναι:

- Συνένωση ενεργών στοιχείων με μητρική πλακέτα με χρήση AuSn υλικού (*AuSn bumping*)
- Διαδικασία ολοκλήρωσης μέσω ετερογενούς κλιμάκωσης υποστρωμάτων
- Εξελιγμένες τεχνολογίες μη επικαλυπτόμενων κυματοδηγών
- Αντιστρεφόμενη συνένωση των ενεργών στοιχείων (*flip chip bonding*)

Μια άλλη εφαρμογή εκτός από την δημιουργία των οπτικών διατάξεων που αναφέραμε είναι η χρήση τους σε ολοκληρωμένα CMOS συστήματα όπου η διασύνδεση πλέον των επιμέρους υποσυστημάτων θα γίνεται με οπτικό τρόπο. Η μετάβαση από την ηλεκτρική στην αμιγώς οπτική διασύνδεση θα επιφέρει την αποδέσμευση των ταχυτήτων και γενικά των ρυθμών μετάδοσης των δεδομένων από την εν δυνάμει οριοθέτηση που βάζουν τα ηλεκτρονικά οδηγώντας έτσι με την βοήθεια πάντα αμιγώς οπτικών συστημάτων επεξεργασίας του σήματος σε υψηλότερες ταχύτητες. Βασικό κριτήριο στην προκειμένη περίπτωση θα αποτελεί και πάλι η δυνατότητα του υπό κατασκευή συστήματος να λειτουργεί αποδοτικά σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης με όσο το δυνατόν μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, γεγονός που αποτελεί και θα αποτελεί και στο μέλλον βασικό στοιχείο για την αξιολόγηση των αναπτυσσόμενων συστημάτων.

Προκειμένου να επιτευχθεί η ταυτοποίηση του μεγέθους των οπτικών με τα CMOS ολοκληρωμένα γεγονός που βοηθάει και στην οικονομική ανάπτυξη τους είναι ευρέως αποδεκτή η χρήση της τεχνολογίας των νάνο φωτονικών καλωδίων. Παρόλα αυτά αν και συντελεί σημαντικά στην ανάπτυξη των φωτονικών με χρήση νάνο καλωδίων για την



κυματοδότηση του φωτός, το κλειδί στην περαιτέρω ανάπτυξη είναι η τρισδιάστατη ολοκλήρωση των ηλεκτρονικών μαζί με τα οπτικά. Για να το επιτύχουμε αυτό αξιοποιείται η πολύ-επίπεδη δομή της SOI αρχιτεκτονικής ή αλλιώς αρχιτεκτονικής με χρήση πυριτίου με την ολοκλήρωση πρώτα των οπτικών συσκευών και εν συνεχεία με την ολοκλήρωση σε επόμενο επίπεδο των ηλεκτρονικών στοιχείων και συνδέσεων.

Τέλος δεν θα πρέπει να παραλείψουμε ότι η χρήση του πυριτίου για την κατασκευή χαμηλού κόστους, χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας αλλά και μικρού μεγέθους συστημάτων θα μπορούσε να διευρυνθεί και στον τομέα της βιοτεχνολογίας και συγκεκριμένα στους βιοαισθητήρες. Ξεφεύγοντας λοιπόν από τον τομέα των τηλεπικοινωνιών, παρατηρούμε ότι η ολοκλήρωση με χρήση πυριτίου μπορεί να επεκταθεί στην δημιουργία των λεγόμενων lab-on-a chip εφαρμογών όπου τόσο η επεξεργασία όσο και η διάγνωση θα γίνονται με χρήση ενός και μόνο ολοκληρωμένου βιοαισθητήρα[1.78]. Σε συνεργασία δε με τεχνολογίες όπως τα ηλεκτρονικά η ασύρματη μετάδοση και η τεχνητή νοημοσύνη θα επιφέρουν συστήματα βασικά για την μελέτη περιβαλλοντολογικών συνθηκών, προωθώντας μια νέα γενιά ολοκληρωμένων συσκευών.

### **1.7 Μελλοντική εργασία προόδου των αρχιτεκτονικών ολοκλήρωσης-Βασικά προβλήματα προς διεκπεραίωση**

Η ειρηνική ανάπτυξη της πυκνότητας ισχύος που συσσωρεύεται σε ένα ολοκληρωμένο πλινθίο θα συνεχίσει να οδηγεί σε προβλήματα αύξησης της εκλυόμενης θερμότητας και σε εύρεση μεθόδων απαγωγής της με αποδοτικό τρόπο. Τρανταχτό παράδειγμα που υποδεικνύει την δυσκολία αυτή είναι η τάση της βιομηχανίας πλέον να διατηρήσει σταθερή την επεξεργαστική ισχύ οδηγώντας την τεχνολογία σε παράλληλους πολυπύρηνους επεξεργαστές.

Στο τομέα της ολοκλήρωσης με χρήση πυριτίου ένα βασικό θέμα προς μελέτη αποτελεί η δημιουργία lasers με χρήση πυριτίου . Μέχρι στιγμής η κατασκευή του παραμένει εκτός chip γεγονός βέβαιο που διατηρεί την συνολική απόδοση του συστήματος σε χαμηλές θερμοκρασίες. Η μετάβαση σε χρήση μόνο πυριτίου για την κατασκευή τους είναι ένα βασικό πρόβλημα λόγω της μη προβλέψιμης συμπεριφοράς των lasers σε υψηλές θερμοκρασίες, παρόλα αυτά η δημιουργία ενός τέτοιου laser θα βοηθήσει στην ανάπτυξη νέων εφαρμογών όπως οπτό-ηλεκτρονικά συστήματα απεικόνισης και εκπομπή φωτός.

Στην μονολιθική ολοκλήρωση το πρόβλημα επικεντρώνεται κυρίως στο σχεδιαστικό κομμάτι της όλης διαδικασίας το οποίο έχει ως αντίκτυπο και στην μείωση των εφαρμόσιμων λειτουργιών που μπορεί να επιτελέσει ένα τέτοιο σύστημα. Συγκεκριμένα η σχεδίαση και η κατασκευή νέων κυκλωμάτων είναι πρακτικά δύσκολο να επιτευχθεί εκτός και αν περιλαμβάνουν συνδυασμό ήδη υπαρχόντων κυκλωμάτων λόγω του ότι η διαδικασία κατασκευής είναι αργή και αρκετά αυξημένου κόστους, στην περίπτωση που τα κυκλώματα

## Εισαγωγή στις Οπτικές τηλεπικοινωνίες

είναι πολύπλοκα. Επιπρόσθετα η κατασκευή πολύπλοκων συστημάτων μέσω της μονολιθικής ολοκλήρωσης είναι αρκετά δύσκολη, μιας και τα σφάλματα κατασκευής αυξάνονται εκθετικά όσο αυξάνονται τα στοιχεία προς ολοκλήρωση στην κοινή πλατφόρμα ολοκλήρωσης. Τέλος δεν υφίσταται θέμα επεκτασιμότητας λόγω της ανάγκης επανασχεδίασης συνολικά της πλατφόρμας το οποίο συνεπάγεται και την μην δυνατότητα λειτουργίας των στοιχείων αυτών σε υψηλές ταχύτητες.

Στην υβριδική ολοκλήρωση το πρόβλημα εναπόκειται κυρίως στην προσπάθεια μείωσης περειαίρω του συνολικού μεγέθους των ολοκληρωμένων στοιχείων. Συγκεκριμένα προκειμένου να διατηρηθούν οι συνολικές απώλειες σε χαμηλά επίπεδα, και λόγω του χαμηλού δείκτη διάθλασης μεταξύ των δύο πλατφόρμων (δευτερεύουσας και μητρικής), η κλίση των κυματοδηγών δεν μπορεί να υπερβεί κάποιες συγκεκριμένες μοίρες με αποτέλεσμα να αυξάνουν το μέγεθος της διάταξης και επομένως να μην αξιοποιείται πλήρως η επιφάνεια εργασίας της πλακέτας ολοκλήρωσης.

Για διευκόλυνση του αναγνώστη τα βασικά πλεονεκτήματα των τριών τεχνολογιών που μόλις αναφέραμε στις προηγούμενες παραγράφους συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Μονολιθική Ολοκλήρωση	Υβριδική Ολοκλήρωση	Ολοκλήρωση με χρήση Πυριπίου
<ul style="list-style-type: none"><li>+ Απλότητα στον Έλεγχο</li><li>+ Μείωση εξωτερικών συνδέσεων μεταξύ στοιχείων</li><li>+ Ευστάθεια</li><li>+ Μέγιστη μείωση χώρου</li><li>+ Μείωση Κόστους συναρμολόγησης</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>+ Ευελιξία στον σχεδιασμό</li><li>+ Ποικιλία διατάξεων</li><li>+ Μείωση κόστους εξοπλισμού (παθητική Ολοκλήρωση)</li><li>+ Γρηγορότερος έλεγχος και επανασχεδιασμός</li><li>+ Ευρεία γκάμα εμπορικά διαθέσιμων προϊόντων</li><li>+ Σχεδιαστική Απλότητα</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>+ Συμβατότητα με CMOS τεχνολογία</li><li>+ Κοινή πλατφόρμα ολοκλήρωσης για οπτικά και ηλεκτρονικά</li><li>+ Υψηλή ανοχή σε οπτική Ισχύς</li><li>+ Αποδοτικότερη απαγωγή Θερμότητας</li><li>+ Δραστική Μείωση Μεγέθους</li><li>+ Ποικιλία εφαρμογών σε τηλεπικοινωνίες &amp; άλλους τομείς (βιοιατρική κλπ)</li></ul>

Πίνακας 1: Βασικά πλεονεκτήματα των τριών τεχνολογιών ολοκλήρωσης



## 1.8 Σκοπός και διάρθρωση της διατριβής

Από την περιγραφή των ανωτέρω ενοτήτων του κεφαλαίου 1, γίνεται σαφές ότι βρισκόμαστε σε μια μεταβατική περίοδο, όπου τόσο οι τεχνολογίες ολοκλήρωσης όσο και τα συστήματα αμιγούς οπτικής επεξεργασίας των μεταδιδόμενων σημάτων, είτε φτάνουν σε οριακές καταστάσεις αποδοτικότητας, είτε σε πιλοτικά στάδια εκμετάλλευσής τους για τον πλήρη χαρακτηρισμό τους και την μετέπειτα χρήση τους σε πιο απαιτητικές καταστάσεις, οι οποίες θα δεικτοδοτήσουν και την απαρχή νέας γενιάς δικτύων μετάδοσης δεδομένων. Βασικό χαρακτηριστικό της μεταβατικής αυτής περιόδου είναι η προσπάθεια της απομάκρυνσης της ΟΕΟ μετατροπής η οποία και κρατάει δέσμια τόσο την περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης όσο και του διαθέσιμου εύρους ζώνης των οπτικών δικτύων, προκαλώντας συμφόρηση στους κόμβους των δικτύων.

Σκοπός της παρούσας διατριβής αποτέλεσε η μελέτη της μεταβατικής αυτής περιόδου, μέσω της σχεδίασης και ανάπτυξης αμιγώς οπτικών κυκλωμάτων, βασισμένα στις πιο εξελιγμένες τεχνικές ολοκλήρωσης, οι οποίες και δίνουν την δυνατότητα για μεταγωγή και αναγέννηση των δεδομένων σε ρυθμούς μετάδοσης άνω των 40 Gb/s. Αξιοποιώντας πλήρως τα πλεονεκτήματα που μας παρέχουν τα προερχόμενα μέσω των τεχνολογιών αυτών στοιχεία, όπως διαφάνεια στον ρυθμό μετάδοσης και την μορφή των δεδομένων, υψηλή ταχύτητα επεξεργασίας, ανεξαρτησία της κατανάλωσης ισχύος από τον ρυθμό μετάδοσης, υψηλό επίπεδο ολοκλήρωσης κ.α γίνονται τα πρώτα βήματα για την απομάκρυνση της ΟΕΟ διαδικασίας, διατελώντας όλες τις λειτουργικές διαδικασίες στο οπτικό επίπεδο.

Στα πλαίσια αξιολόγησης της μονολιθικής και υβριδικής τεχνολογίας ολοκλήρωσης, βασικό δομικό στοιχείο αποτέλεσε **ο ολοκληρωμένος οπτικός διακόπτης Mach-Zehnder**. Οι λειτουργίες που συντελέστηκαν επιτυχώς με αμιγώς οπτικό τρόπο ήταν ένα **υποσύστημα ανίχνευσης των εισερχόμενων πακέτων σε ένα οπτικό κόμβο με ταυτόχρονη αμιγώς οπτική ανάκτηση ρολογιού το οποίο υλοποιήθηκε σε ρυθμούς μετάδοσης 10 Gb/s** καθώς και η υλοποίηση ενός **συστήματος μετατροπής μήκους κύματος με ταυτόχρονη 2R αναγέννηση των δεδομένων για διαμορφωμένα σήματα εισόδου μη-επιστροφής-στο-μηδέν (Non-Return-to-Zero), το οποίο και υλοποιήθηκε σε ρυθμούς μετάδοσης 40 Gb/s**.

Παρομοίως σε ότι αφορά την τεχνολογία ολοκλήρωσης με χρήση πυριτίου, η λειτουργία που συντελέστηκε ήταν τόσο η θεωρητική όσο και η πρακτική μελέτη και κατασκευή αντιστοίχως ενός **αμιγώς οπτικού πολυκυματικού μετατροπέα μήκους κύματος, τόσο για RZ (Return-to-Zero) όσο και για NRZ ακολουθίες και πακέτα δεδομένων**, αποδεικνύοντας με τον σαφέστερο τρόπο, την διαφάνεια στο είδος της πληροφορίας, αλλά και την δυνατότητα πολυκυματικής λειτουργίας του συστήματος αυτού για χρήση σε WDM οπτικά δίκτυα με ρυθμούς μετάδοσης που υπερβαίνουν τα 40 Gb/s. Βασικό δομικό στοιχείο στην ακολουθία αυτών των πειραματικών διατάξεων αποτέλεσε η **χρήση ενός**

ολοκληρωμένου αναδιατάξιμου οπτικού add-drop πολυπλέκτη ο οποίος αποτελείται από συστοιχίες φίλτρων μικροδακτυλίου ( $\mu$ -ring resonator filters).

Πιο συγκεκριμένα η διάρθρωση του κειμένου έχει την ακόλουθη μορφή:

- **Κεφάλαιο 1:** Εισαγωγή στα οπτικά δίκτυα, παρουσίαση των πιο σύγχρονων αρχιτεκτονικών οπτικών δικτύων, αλλά και μελέτη των τεχνολογιών ολοκλήρωσης για την κατασκευή ολοκληρωμένων στοιχείων και εφαρμογή τους στα υπάρχοντα δίκτυα μετάδοσης πληροφορίας
- **Κεφάλαιο 2:** Περιγραφή ενός κυκλώματος ανίχνευσης πακέτων με χρήση του οπτικού συμβολόμετρου Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s. Αρχή λειτουργίας του υποσυστήματος ανάκτησης ρολογιού. Το κύκλωμα αυτό αναγνωρίζει την έναρξη ενός εισερχόμενου πακέτου και την ίδια χρονική στιγμή παράγει έναν οπτικό παλμό στην έξοδό του. Η πειραματική του υλοποίηση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας σε σειρά ένα κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού με φίλτρο Fabry-Perot και κορεσμένο οπτικό διακόπτη τύπου MZI και ένα κύκλωμα εξαγωγής προπορευόμενου παλμού εκμεταλλευόμενο το φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης κέρδους (Cross Gain Modulation - XGM) και ετεροδιαμόρφωσης φάσης (Cross Phase Modulation-XPM) σε ένα δεύτερο οπτικό συμβολόμετρο τύπου MZI. Η έξοδος του υπό-κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού παρέχει το σήμα συγχρονισμού του κόμβου σε επίπεδο δεδομένων και ταυτόχρονα οδηγεί το κύκλωμα εξαγωγής προπορευόμενου παλμού, το οποίο με τη σειρά του παρέχει στον κόμβο το σήμα συγχρονισμού σε επίπεδο πακέτου. Στο σύνολό του λοιπόν, το κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων μπορεί να χαρακτηριστεί ως μία ολοκληρωμένη λύση για τον συγχρονισμό των συστημάτων επεξεργασίας και δρομολόγησης, αφού παρέχει τα κατάλληλα σήματα για τον συγχρονισμό του κόμβου σε επίπεδο ροής δεδομένων (bit-wise) αλλά και σε επίπεδο πακέτων (packet-wise).
- **Κεφάλαιο 3:** Παρουσίαση του κυκλώματος Αμιγώς Οπτικής 2R Αναγέννησης NRZ σημάτων με χρήση οπτικών πυλών Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s. Συγκεκριμένα η μελέτη περιελάμβανε την αξιολόγηση των οπτικών πυλών MZI για NRZ δεδομένα για ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s. Απόρροια αυτού αποτέλεσε ο σχεδιασμός μιας καινούργιας συνδεσμολογίας για μετατροπή μήκους κύματος NRZ δεδομένων. Η νέα διάταξη βασίστηκε στην συνδεσμολογία αντίρροπων σημάτων ελέγχου, όπου με την προσθήκη ενός επιπλέον συνεχούς σήματος (continuous wave – CW) επιτεύχθη καλύτερος έλεγχος της απόκρισης των SOAs του MZI, τόσο ως προς τα κέρδη όσο και ως προς τη φάση, με αποτέλεσμα το σήμα εξόδου να παρουσιάζει βελτιωμένα χαρακτηριστικά σε σχέση με παλαιότερες συνδεσμολογίες. Η καλύτερη επίδοση της νέας συνδεσμολογίας επιβεβαιώθηκε μετά την επανάληψη των μετρήσεων

που πραγματοποιήθηκαν για τις άλλες συνδεσμολογίες και σύγκριση των αποτελεσμάτων.

- **Κεφάλαιο 4: Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.** Στο πρώτο στάδιο της μελέτης μας παρουσιάζεται μια προκαταρκτική πειραματική διάταξη με χρήση ενός ζωνοπερατού φίλτρου αντί των φίλτρων μικροδακτυλίου προκειμένου να επαληθευτεί η ορθότητα της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής για την μετατροπή μήκους κύματος μέσω της τεχνικής οπτικού φιλτραρίσματος. Εν συνεχεία δεδομένων των τεχνικών χαρακτηριστικών που εξάγονται από το προκαταρκτικό πείραμα, αναπτύχθηκε ένα θεωρητικό μοντέλο για τον πλήρη χαρακτηρισμό των φίλτρων μικροδακτυλίου, που θα αντικαταστήσουν το ζωνοπερατό φίλτρο. Τα συγκεκριμένα φίλτρα μικροδακτυλίου εν συνεχεία χρησιμοποιούνται σε μια ακολουθία πειραματικών διατάξεων σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s, ξεκινώντας από την μελέτη του συστήματος για RZ δεδομένα, τόσο για ένα όσο και για περισσότερα του ενός μήκη κύματος. Εν συνεχεία η μελέτη μας επικεντρώνεται στα NRZ δεδομένα για ένα και περισσότερα μήκη κύματος προκειμένου να διαπιστωθεί η αποδοτικότητα του σε περισσότερο απαιτητικές καταστάσεις μετάδοσης δεδομένων. Τέλος αφότου ολοκληρωθεί η πειραματική μελέτη της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής μας, αναπτύσσουμε ένα θεωρητικό μοντέλο για την περαιτέρω μελέτη των φίλτρων μικροδακτυλίου προκειμένου να επεκτείνουμε την χρήση τους σε συστήματα που θα δίνεται να λειτουργούν αποδοτικά σε ταχύτητες άνω των 160 Gb/s.
- **Κεφάλαιο 5: Σύνοψη αποτελεσμάτων και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.** Συγκεκριμένα στο κεφάλαιο 5 συνοψίζονται όλα τα αποτελέσματα της διατριβής, γίνεται μία αποτίμηση αυτών και προτείνονται περαιτέρω ερευνητικές δραστηριότητες για την υλοποίηση αμιγώς οπτικών υποσυστημάτων και δικτύων στο επίπεδο του συστήματος και στο επίπεδο της φωτονικής τεχνολογίας.

## Αναφορές

- [1.1] <http://www.useit.com/alertbox/980405.html>
- [1.2] Ioannis P. Chochliouros and George A. Heliotis “*Optical Access Networks and Advanced Photonics: Technologies and Deployment Strategies*”
- [1.3] <http://www.midconews.com/index.php/2009/07/the-need-for-more-bandwidth-is-on-the-rise>
- [1.4] Kadzielski, Z. “*Multimedia need more bandwidth - may internet collapse?*” ICTON, Volume , Issue , 6-8 Dec. 2007 Page(s):1 – 1
- [1.5] Roberts, L.G., “*Beyond Moore's law: Internet growth trends*” Computer, Volume 33, Issue 1, Jan. 2000 Page(s):117 – 119
- [1.6] Baldi, M. “*Triple Play Support for the Next Generation Internet*” Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium, 2006. NETWORKS 12th International Nov. 2006 Page(s):1 – 7
- [1.7] Cisco Systems, “*Fiber-to-the-Home Architectures*”, Technology White Paper,2007.[http://www.cisco.com/application/pdf/en/us/guest/netsol/ns547/c654/cdcont\\_0900aec805df841.pdf](http://www.cisco.com/application/pdf/en/us/guest/netsol/ns547/c654/cdcont_0900aec805df841.pdf)
- [1.8] D.B.Payne, R.P.Davey, “*The future of fibre access systems*”, BT Technology Journal Vol.20 No.4 October 2002
- [1.9] G. P. Agrawal, “*Fiber-Optic Communication Systems*”, 2nd Ed., John Wiley & Sons Inc., NY, 1997.
- [1.10] <http://www.itu.int/ITU-D/ict/statistics/ict/graphs/internet.html>
- [1.11] Lin, D.W, Chen, C.T, Hsing T.R, “*Video on phone lines: technology and applications*” Proceedings of the IEEE, Volume 83, Issue 2, Feb 1995 Page(s):175 – 193
- [1.12] Czajkowski I.K, “*High-speed copper access: a tutorial overview* ” Electronics & Communication Engineering Journal Volume 11, Issue 3, Jun 1999 Page(s):125-148
- [1.13] [www.eett.gr](http://www.eett.gr)
- [1.14] [http://www.ebu.ch/CMSimages/en/tec\\_doc\\_t3299\\_tcm6-23327.pdf](http://www.ebu.ch/CMSimages/en/tec_doc_t3299_tcm6-23327.pdf)
- [1.15] Jeff Halpern, George Garceau, Sammy Thomas, “*Fibre: Revolutionizing the Bell's telecoms Networks*”, May 2004, [http://www.telcordia.com/products/ftp/bernstein\\_report.html](http://www.telcordia.com/products/ftp/bernstein_report.html)
- [1.16] P. Warren, J. Davies, D. Brown. “*ICT Futures: Delivering Pervasive, Real-time and Secure Services*”, editors; Chapter 8.”*The Future All Optical Network – Why we need it and how we get there*” Wiley, April 2008, ISBN: 978- 0-47099770-3.
- [1.17] Cisco Systems, “*Fiber-to-the-Home Architectures*”, Technology White Paper, 2007.[http://www.cisco.com/application/pdf/en/us/guest/netsol/ns547/c654/cdcon\\_0900aec805df841 .pdf](http://www.cisco.com/application/pdf/en/us/guest/netsol/ns547/c654/cdcon_0900aec805df841.pdf)

- [1.18] David Payne, “*World bandwidth growth over the next decade – is it viable?*”, Institute of Advanced Telecommunications, Swansea University, CIP technologiew white paper, 2008
- [1.19] <http://www.cisco.com/en/US/products/ps5842/index.html>
- [1.20] <http://www.juniper.net/us/en/products-services/routing/t-tx-series/t640/>
- [1.21] [http://www1.alcatel-lucent.com/lead/lightreading\\_7670.html](http://www1.alcatel-lucent.com/lead/lightreading_7670.html)
- [1.22] <http://www.highbeam.com/doc/1G1-93182423.html>
- [1.23] L. Stampoulidis, D. Apostolopoulos, **D. Petrantonakis**, P. Zakynthinos, P. Bakopoulos, O. Zouraraki, E. Kehayas, A. Poustie, G. Maxwell and H. Avramopoulos, “*Enabling Tb/s Photonic Routing: Development of Advanced Hybrid Integrated Photonic Devices to Realize High-Speed, All-Optical Packet Switching*”, Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of, Volume 14, Issue 3, May-June 2008 Page(s):849 – 860
- [1.24] Ramos F., Kehayas E., Martinez J.M., Clavero R., Marti J., Stampoulidis L., Tsiokos D., Avramopoulos H., Zhang, J., Holm-Nielsen P.V., Chi N., Jeppesen P., Yan N., Monroy I.T., Koonen A.M.J., Hill M.T., Liu Y., Dorren H.J.S., Van Caenegem R., Colle D., Pickavet M., Riposati, B., “*IST-LASAGNE: towards all-optical label swapping employing optical logic gates and optical flip-flops*”, Lightwave technology , Journal of Volume 23, Issue 10, Oct. 2005, Pages 2993-3011
- [1.25] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, “*Optical networks: A practical perspective*”, Academic Press Inc., NY, 2nd Ed.,2002
- [1.26] K. H. Liu, “*IP over WDM*”, Wiley, October 15, 2002
- [1.27] Bocci M, Cowburn I, Guillet J, “*Network high availability for Ethernet services using IP/MPLS networks*” Communications Magazine, IEEE Volume 46, Issue 3, March 2008 Pages 90-96
- [1.28] D.K. Hunter and I. Andonovic, “*Approaches to optical internet packet switching*”, IEEE Comm. Mag. pp. 116-122, Sept. 2000
- [1.29] Chia M.C, Hunter D.K., Andonovic I, Ball P., Wright I, “*Optical packet switches: a comparison of designs*”, ICON 2000 IEEE 5-8 Sept. pp 365-369.
- [1.30] Gambini, P., Renaud, M., Guillemot, C., Callegati, F., Andonovic, I., Bostica, B., Chiaroni, D., Corazza, G., Danielsen, S.L., Gravey, P., Hansen, P.B., Henry, M., Janz, C., Kloch, A., Krahenbuhl, R., Raffaelli, C., Schilling, M., Talneau, A., Zucchelli, L., “*Transparent optical packet switching: network architecture and demonstrators in the KEOPS project*”, Comm. Mag. IEEE volume 16, Issue 7, pp. 1245-1259
- [1.31] E Kehayas, G.T.Kanellos, L.Stampoulidis, D. Tsiokos, N. Pleros, G. Guekos and H. Avramopoulos, “*Packet-format and Network-Traffic transparent Optical Signal Processing*”, IEEE/OSA, J. Lightwave Tech. Special Issue on Metro and Access Networks, vol. 22 pp.2548-2556, Nov. 2004

- [1.32] A. Jourdan et al., “*The perspective of optical packet switching in IP dominant backbone and metropolitan networks*”, IEEE Commun. Mag., vol. 39, pp. 136-141, March 2001.
- [1.33] S. Okamoto, “*Future of IP backbone networks comprising hikari (photonic MPLS) routers*,” 28th European Conf. Optical Commun. (ECOC) 2002, Copenhagen, Denmark, Sept. 2002, 10.2.1.
- [1.34] E. Rosen, A. Viswanathan, and R. Callon, “RFC 3031: Multiprotocol Label Switching Architecture”, IETF Request of Comments, 2001.
- [1.35] B. Meagher et al., “*Design and Implementation of Ultra-Low Latency Optical Label Switching for Packet-Switched WDM Networks*”, J. of Lightwave Technol., vol. 18, no. 12, pp. 1978-1987, Dec. 2000
- [1.36] I. Baldine et al., “*Just-in-time optical burst switching implementation in the atdnnet alloptical networking testbed*”, IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '03) 2003 ,Vol. 5, pp. 2777-2781, Dec. 2003
- [1.37] Chang-Hee Lee and Ki-Man Choi, “*Fiber to the Home*” OFC 2007, Invited paper, ThDD2
- [1.38] El-Bawab T.S, “*FTTx: The rise of Broadband Optical Acces*” Globecom 07, IEEE pp. 1-2
- [1.39] Hutcheson L., “ *FTTx: Current Status and the Future*”, Comm. Mag. IEEE volume 46, Issue 7, July 2008, pp. 90-95
- [1.40] J. Wellen, “*Outlook: Next Generation FTTx Access Networks*”, Mo.4.1.4., ECOC 2004, Stockholm, Sweden.
- [1.41] [http://www.networks2008.org/data/upload/file/Technical/A2\\_4\\_Stordahl.pdf](http://www.networks2008.org/data/upload/file/Technical/A2_4_Stordahl.pdf)
- [1.42] Apsel A, Pappu A, Tao Yin, “*Merging traditional VLSI with photonics*”, Lightwave Technologies in Instrumentation and Measurement Conf. 2004, pp 91-99
- [1.43] Radhakrishnan Nagarajan and Meint Smit Infinera ”*Photonic Integration*” , 169 Java Drive, Sunnyvale, CA 95014, USA COBRA -TU Eindhoven, Den Dolech 2, 5612 AZ Eindhoven, the Netherlands, LEOS Newsletters Vol21(3) June 2007 pp4-10.
- [1.44] [www.infinera.com](http://www.infinera.com)
- [1.45] [www.ciphotonics.com](http://www.ciphotonics.com)
- [1.46] Graham T., Reed A., Knights P., “*Silicon Photonics*” chapter 4 “*Silicon on Insulator Photonics*”
- [1.47] [www.lionixbv.nl](http://www.lionixbv.nl)
- [1.48] Moore, Gordon E. (1965). "Cramming more components onto integrated circuits" (PDF) 4. Electronics Magazine. Retrieved on 06-11-11.
- [1.49] Praveen B., Praveen J., C. Siva Ram Murthy, “*On using forward error correction for loss recovery in optical burst switched networks*”, Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking, Volume 51 , Issue 3 (February 2007) Pages 559-568

- [1.50] Soumya Sen and V.K. Chaubey, “*A novel electronic device for high speed WDM optical network operations capable of intelligent routing based on simulated electrical network approach*” Optics Communications Volume 248, Issues 1-3, 1 April 2005, Pages 131-146
- [1.51] Ronald W. Waynant, John K. Lowell, “*Electronics and Photonic Circuits and Devices*”, December 1998, Wiley-IEEE Press
- [1.52] <http://www.asipinc.com/>
- [1.53] [www.infinera.com](http://www.infinera.com)
- [1.54] J. H. den Besten, R. G. Broeke, M. van Geemert, J. J. M. Binsma, E. Heinrichsdorff, T. van Dongen, E. A. J. M. Bente, X. J. M. Leijtens and M. K. Smit, “*An integrated 4 × 4-channel multiwavelength laser on InP,*” IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 15, No. 3, pp. 368-370, Mar. 2003.
- [1.55] H. G. Bach, A. Beling, G. G. Mekonnen and W. Schlaak, “*Design and fabrication of 60 Gb/s InP-based monolithic photoreceiver OEICs and modules,*” IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron., Vol. 8, No. 6, pp. 1445 -1450, Nov.-Dec. 2002.
- [1.56] R. Takeyari, K. Watanabe and M. Akashi, “*The 40 Gb/s optical transceiver using monolithic InP and SiGe ICs,*” in proc. LEOS Annual Meeting 2002, Vol. 1, pp. 257 -258, Nov. 2002.
- [1.57] Steven C. Nicholes, Milan L. Mašanović, Member, IEEE, Biljana Jevremović, Erica Lively, Student Member, IEEE, Larry A. Coldren, Fellow, IEEE, and Daniel J. Blumenthal, “*An 8×8 InP Monolithic Tunable Optical Router (MOTOR) Packet Forwarding Chip*”, IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 27, No. 24, 2009
- [1.58] A. Buxens, A. T. Clausen, H. N. Poulsen, P. Jeppesen, S. Fischer, M. Dulk, E. Gamper, W. Vogt, W. Hunziker, E. Gini and H. Melchior, “*All-optical regenerative OTDM add/drop multiplexing at 40 Gb/s using monolithic InP Mach-Zehnder interferometer,*” in proc. CLEO 2000, pp. 255.
- [1.59] David F. Welch et al. “*Large-Scale InP Photonic Integrated Circuits: Enabling Efficient Scaling of Optical Transport Networks?*” IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 13, NO. 1, JANUARY/FEBRUARY 2007
- [1.60] D.W. Smith “*Hybrid Integration for Next Generation Metro and Access Networks*” OIDA Photonic Integration Forum, Santa Clara, October 2009
- [1.61] Efstratios Kehayas, Dimitris Tsiokos, Paraskevas Bakopoulos, Dimitris Apostolopoulos, **Dimitrios Petrantonakis**, Leontios Stampoulidis, Alistair Poustie, Rob McDougall, Graeme Maxwell, Yong Liu, Shaoxian Zhang, Harmen J. S. Dorren, Jorge Seoane, Pablo Van Holm-Nielsen, Palle Jeppesen, and Hercules Avramopoulos, “*40-Gb/s All-Optical Processing Systems Using Hybrid Photonic Integration Technology*” JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 24, NO. 12, DECEMBER 2006



- [1.62] **Petrantonakis, D.**, Zakyntinos, P., Apostolopoulos, D., Poustie, A., Maxwell, G., Avramopoulos, H., “*All-Optical Four-Wavelength Burst Mode Regeneration Using Integrated Quad SOA-MZI Arrays*”, *Photonics Technology Letters, IEEE* Volume 20, Issue 23, Dec.1, 2008 Page(s):1953 – 1955
- [1.63] [http://www.ciphotonics.com/cip\\_press.htm](http://www.ciphotonics.com/cip_press.htm)
- [1.64] Pleros, N., Apostolopoulos, D., **Petrantonakis, D.**, Stamatiadis, C., Avramopoulos, H. “*Optical Static RAM*” *Photonics Technology Letters, IEEE* Volume 21, Issue 2, Jan.15, 2009 Page(s):73 – 75
- [1.65] Apostolopoulos, D., Petrantonakis, D., Zouraraki, O., Kehayas, E., Pleros, N., Avramopoulos, H., “*All-Optical Label/Payload Separation at 40 Gb/s*” *Photonics Technology Letters IEEE* volume 18, Issue 19, Pages 2023-2025
- [1.66] Zouraraki, O., Yiannopoulos, K., Zakyntinos, P., **Petrantonakis, D.**, Varvarigos E., Poustie A., Maxwell, G., Avramopoulos, H., “*Implementation of an All-Optical Time-Slot-Interchanger Architecture*” *Photonics Technology Letters, IEEE* Volume 19, Issue 17, Sept.1, 2007 Page(s):1307 – 1309
- [1.67] Bakopoulos, P., Zakyntinos, P., Kehayas, E., Stampoulidis, L., Fresi, F., Porzi, C., Calabretta, N., Kouloumentas, C., **Petrantonakis, D.**, Maziotis, A., Stamatiadis, C., Apostolopoulos, D., Guina, M., Klonidis, D., Poti, L., Tangdiongga, E., Poustie, A., Maxwell, G., Tomkos, I., Bogoni, A., Dorren, H.J.S., Avramopoulos, H., “*160 Gb/s all-optical contention resolution with prioritization using integrated photonic components*”, *Optical Communication, 2009. ECOC '09. 35th European Conference on 20-24 Sept. 2009* Page(s):1 – 2
- [1.68] Zakyntinos, P., Apostolopoulos, D., Zouraraki, O., **Petrantonakis, D.**, Theophilopoulos, G., Poustie, A., Maxwell, G., Avramopoulos, H. “*Single Chip Quad MZI array in a 40 Gb/s AOLS Front-end*” *OFC/NFOEC 2007* Volume , Issue , 25-29 March 2007 Page(s):1 – 3
- [1.69] R. McDougall, Y. Liu, G. Maxwell, M. T. Hill, R. Harmon, S. Zhang, L. Rivers, F.M. Huijskens, A. Poustie and H.J.S. Dorren, “*Hybrid integrated, all-optical flip-flop memory element for optical packet networks?*”, paper Th1.4.5, *ECOC2006, Cannes, France, 2006.*
- [1.70] H. J. S. Dorren, J. Herrera, O. Raz, E. Tangdiongga, Y. Liu, J. Marti, F. Ramos, G. Maxwell, A. Poustie, H.C.H. Mulvad, M. T. Hill, H. de Waardt, A. M. J. Koonen, G. D. Khoe, “*All-optical devices for ultrafast packet switching*”, invited paper ThE5, *IEEE LEOS Annual Meeting, Orlando, U.S.A. (2007).*
- [1.71] Jalali, B., Paniccia, M., Reed, G., “*Silicon Photonics*” *Microwave Magazine, IEEE* Volume 7, Issue 3, June 2006 Page(s):58 – 68
- [1.72] G. Roelkens, W. Bogaerts, D. Taillaert, P. Dumon, L. Liu, S. Selvaraja, J. Brouckaert, J. Van Campenhout, K. De Vos, P. Debackere, D. Van Thourhout,



- R. Baets “*Silicon nanophotonics: towards VLSI photonic integrated circuits*”, International Union of radio Science, 7-16 August 2008, Chicago USA.
- [1.73] K. Kato, and Y. Tohmori, “*PLC Hybrid Integration Technology and Its Application to Photonic Components*”, IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., vol. 6, No. 1, pp. 4-13, 2000.
- [1.74] Ηρακλής Αβραμόπουλος, “ Φωτονική τεχνολογία για Τηλεπικοινωνίες”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ
- [1.75] <http://www.kotura.com/>
- [1.76] <http://www.epixnet.org/>
- [1.77] [www.luxtera.com](http://www.luxtera.com)
- [1.78] <http://www.hindawi.com/journals/aot/2008/383927.html>

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## Κυκλώμα ανίχνευσης πακέτων δεδομένων με χρήση οπτικών πυλών Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s

### 2.1 Εισαγωγή

Ξεκινώντας από τα πρώτα στάδια της ανάπτυξης των οπτικών δικτύων (οπτικά δίκτυα πρώτης γενιάς), ήταν έντονη η τάση χρησιμοποίησης ηλεκτρονικών δρομολογητών υψηλών ταχυτήτων. Συγκεκριμένα, στα οπτικά δίκτυα πρώτης γενιάς η οπτική ίνα χρησιμοποιούνταν μόνο ως φυσικό μέσο μετάδοσης και παροχής χωρητικότητας, ενώ η μεταγωγή, η δρομολόγηση, καθώς και όλες οι άλλες ευφείς δικτυακές διεργασίες επιτελούνταν από ηλεκτρονικά κυκλώματα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα των οπτικών δικτύων πρώτης γενιάς είναι το Σύγχρονο Οπτικό Δίκτυο (*Synchronous Optical NETWORK-SONET*) και το *SDH*, τα οποία σχηματίζουν τον κορμό της τηλεπικοινωνιακής υποδομής στη Βόρεια Αμερική, την Ασία και την Ευρώπη [2.1,2.2]. Παρόλα ταύτα η ανάγκη μετατροπής του σήματος σε ηλεκτρονική μορφή επέφερε αρκετά προβλήματα στην αποδοτικότητα της

## **Κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων δεδομένων με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών πυλών Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s**

εφαρμογής της αρχιτεκτονικής αυτής και γενικότερα των δικτύων πρώτης γενιάς στις τηλεπικοινωνίες. Συγκεκριμένα η αναγκαιότητα μετατροπής του σήματος εισόδου από οπτικό σε ηλεκτρικό προκειμένου να υποστεί την οποιαδήποτε επεξεργασία και μετέπειτα την επαναδιαμόρφωση του από ηλεκτρικό σε οπτικό – προκειμένου να συνεχίσει την πορεία του προς τον επόμενο κόμβο- είχε ως αντίκτυπο την υποβάθμιση των ρυθμών μετάδοσης σε αυτές χαμηλότερου ρυθμού καθώς και την έντονη συμφόρηση στον κόμβο δρομολόγησης τόσο για τον εκάστοτε κόμβο στον οποίο διατελείτε η επεξεργασία των δεδομένων όσο και στο συνολικό δίκτυο, μέσω του οποίου το σήμα ταξιδεύει.

Όσο, όμως, οι ρυθμοί μετάδοσης αυξάνονται στην οπτική ίνα, με πιο γρήγορο ρυθμό σε σύγκριση με τις ταχύτητες επεξεργασίας των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, τόσο η έρευνα θα βρίσκεται καθοδόν προς την ανάπτυξη οπτικών δικτύων επόμενης γενιάς, τα οποία θα παρέχουν συνεχή οπτικά μονοπάτια μέσω του δικτύου χρησιμοποιώντας αμιγώς οπτικά στοιχεία για την μετάδοση δεδομένων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων δικτύων αποτελούν τα οπτικά δίκτυα δεύτερης και τρίτης γενιάς, τα οποία και αναλύθηκαν εκτενώς στο κεφάλαιο 1. Μέσω των δικτύων δεύτερης γενιάς, επιτεύχθη η απαρχή της μεταφοράς ορισμένων εκ των διεργασιών μεταγωγής και δρομολόγησης, που επιτελούνταν από ηλεκτρονικά κυκλώματα, απευθείας στο οπτικό επίπεδο, με αποτέλεσμα ορισμένες λειτουργίες να γίνονται σε συντομότερο χρονικό διάστημα απαλλάσσοντας ταυτόχρονα τα ηλεκτρονικά κυκλώματα από την επεξεργασία όλου του όγκου δεδομένων. Σήμερα προκειμένου να επιτευχθεί πραγματικά ευέλικτη μεταγωγή πακέτου που εκτείνεται από τα κανάλια μονού μήκους κύματος στα μεμονωμένα πακέτα, η έρευνα έχει στραφεί πλέον στα οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων τρίτης γενιάς με οπτικούς δρομολογητές, οι οποίοι συνδέονται με οπτικά στοιχεία διασύνδεσης (OXC) και οπτικούς πολυπλέκτες προσθήκης/αφαίρεσης δεδομένων (OADM) απευθείας σε οπτικό επίπεδο.

Τα δίκτυα μεταγωγής πακέτων τρίτης γενιάς αναμένεται να παρέχουν πολύ περισσότερα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με παλαιότερες αρχιτεκτονικές. Τα βασικά χαρακτηριστικά που διακρίνουν ένα οπτικό δίκτυο μεταγωγής πακέτων είναι το γεγονός ότι η μεταγωγή και η δρομολόγηση των δεδομένων επιτελούνται απευθείας στο οπτικό επίπεδο χωρίς την μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό και αντίστροφα, ενώ παράλληλα η μεταγωγή γίνεται σε επίπεδο μεμονωμένου πακέτου και κάθε πακέτο επεξεργάζεται ως ξεχωριστή οντότητα. Με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι τα οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων αποσκοπούν στην παροχή των υπηρεσιών, που προσφέρουν τα αντίστοιχα ηλεκτρονικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων, αλλά σε πολύ υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, εκμεταλλευόμενα το κατεξοχήν πλεονέκτημα της οπτικής έναντι της ηλεκτρονικής τεχνολογίας στον τομέα αυτό.

## Κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων δεδομένων με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών πυλών Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s

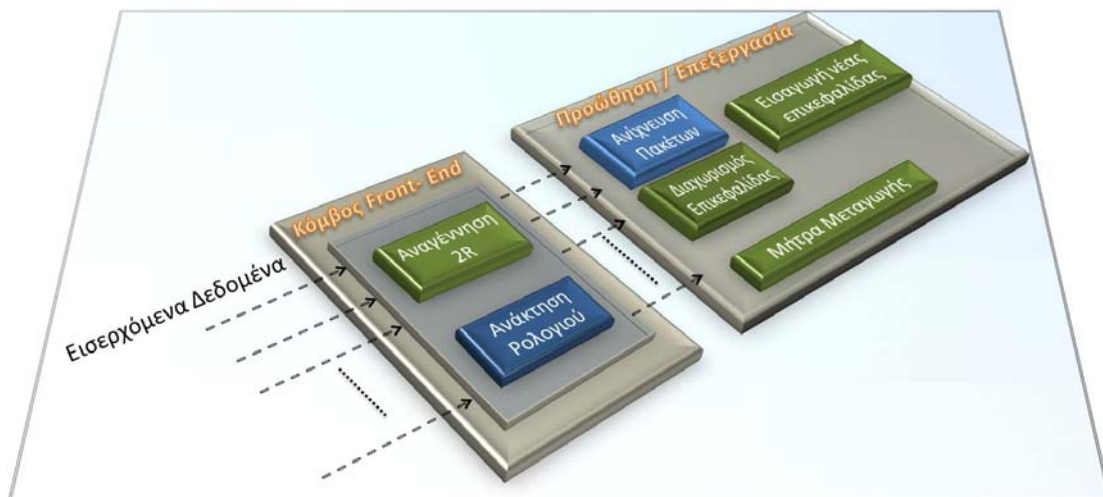
Στα πλαίσια της προσπάθειας για την ανάπτυξη οπτικών συστημάτων επεξεργασίας και δρομολόγησης πακέτων δεδομένων, αναδείχθηκε η ανάγκη για κατάλληλα κυκλώματα συγχρονισμού των κόμβων του δικτύου με τα διακινούμενα δεδομένα. Ένα από τα βασικότερα οπτικά κυκλώματα συγχρονισμού που αναπτύχθηκαν από διάφορα ερευνητικά εργαστήρια ανά τον κόσμο, αποτελεί το αμιγώς οπτικό κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού το οποίο με τη σειρά του οδήγησε στην υλοποίηση μίας σειράς από αμιγώς οπτικά κυκλώματα επεξεργασίας σήματος [2.3-2.10]. Στα πλαίσια αυτά και αξιοποιώντας πλήρως την χρήση του αμιγώς οπτικού κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού, καταφέραμε να σχεδιάσουμε, να υλοποιήσουμε και να μελετήσουμε ένα πρωτοποριακό κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων δεδομένων, το οποίο αποτελεί και το βασικό αντικείμενο προς μελέτη του κεφαλαίου αυτού της παρούσας διδακτορικής διατριβής [2.8,2.11-2.13].

Η λειτουργία του κυκλώματος αυτού, περιορίζεται στην “αναγνώριση” του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων που περιλαμβάνονται στο εισερχόμενο πακέτο παρέχοντας στην έξοδό του το αντίστοιχο «ρολόι». Μία επιπλέον λειτουργία η οποία σε συνδυασμό με αυτή της ανάκτησης ρολογιού θα κάλυπταν πλήρως τις ανάγκες συγχρονισμού του κόμβου, είναι η παραγωγή ενός σήματος το οποίο θα παρέχει στον κόμβο πληροφορία αναφορικά με τη ροή των πακέτων και όχι των δεδομένων. Το κύκλωμα το οποίο θα πραγματοποιεί την παραπάνω λειτουργία, θα αναγνωρίζει την έναρξη ενός εισερχόμενου πακέτου δεδομένων και την ίδια χρονική στιγμή θα παράγει ένα οπτικό παλμό στην έξοδό του. Το κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων δεδομένων, όπως χαρακτηριστικά ονομάστηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, εκτελεί ακριβώς αυτή τη λειτουργία. Έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχει στον κόμβο το οπτικό εκείνο σήμα το οποίο θα περιέχει πληροφορία για την ροή πακέτων δεδομένων τα οποία εισέρχονται στον κόμβο, με σκοπό τον σκανδαλισμό περαιτέρω κυκλωμάτων και συστημάτων επεξεργασίας και δρομολόγησης των πακέτων αυτών. Το κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων επωφελείται από το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού χρησιμοποιώντας το ανακτημένο ρολόι των πακέτων δεδομένων για την λειτουργία του. Στο σύνολό του λοιπόν, το κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων μπορεί να χαρακτηριστεί ως μία ολοκληρωμένη λύση για τον συγχρονισμό των συστημάτων επεξεργασίας και δρομολόγησης, αφού παρέχει τα κατάλληλα σήματα για τον συγχρονισμό του κόμβου σε επίπεδο ροής δεδομένων αλλά και σε επίπεδο πακέτων, με αμιγώς οπτικό τρόπο.

Αναφερόμενοι στις λειτουργίες ενός κόμβου θα πρέπει να επισημάνουμε τι εννοούμε ως λειτουργικές διαδικασίες ενός κόμβου και ενός δικτύου γενικότερα. Οι βασικές λειτουργίες χαμηλού επιπέδου που απαιτούνται σε έναν αμιγώς οπτικό κόμβο μεταγωγής πακέτου είναι η δρομολόγηση, η επίλυση πιθανών συγκρούσεων πακέτων δεδομένων, ο συγχρονισμός, η αναγέννηση και η εισαγωγή επικεφαλίδας καθώς και η ικανότητα διαδοχικών συνδέσεων των οπτικών αυτών ολοκληρωμένων διατάξεων [2.5-2.7, 2.10, 2.14-2.15]. Η λειτουργία της δρομολόγησης απαιτείται για να κατευθύνει τα πακέτα από την πηγή στον προορισμό δια

## Κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων δεδομένων με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών πυλών Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s

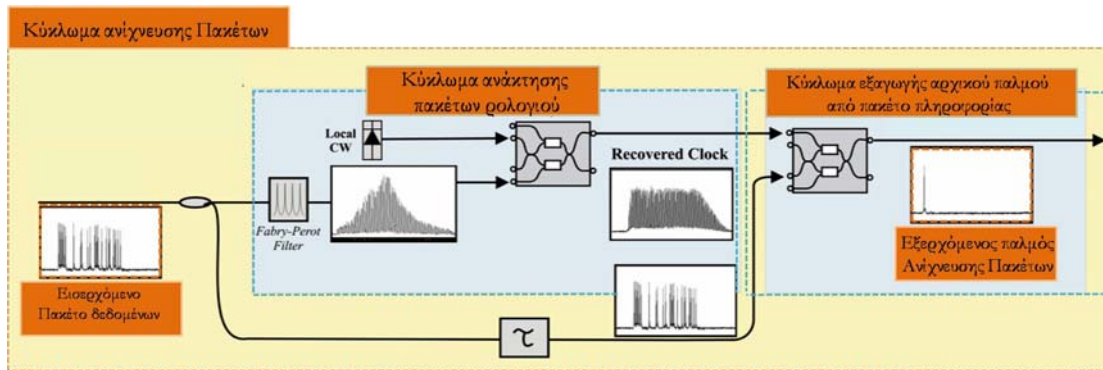
μέσου διαφόρων κόμβων μεταγωγής πακέτων. Η επίλυση της σύγκρουσης πακέτων πληροφορίας απαιτείται για να εμποδίσει παραπάνω από ένα πακέτα να βγουν από το διακόπτη μεταγωγής ταυτόχρονα και στο ίδιο μήκος κύματος. Ο συγχρονισμός απαιτείται για τη χρονική ευθυγράμμιση των πακέτων σε κάθε μία από τις θύρες εισόδου του διακόπτη μεταγωγής με σκοπό τη διάδοσή τους μέσα από τη μήτρα μεταγωγής (*switching matrix*).



Σχήμα 18: Αρχιτεκτονική ανώτερου επιπέδου ενός αμιγώς οπτικού κόμβου μεταγωγής πακέτων.

Όλα τα υποσυστήματα αυτά διασυνδέονται μεταξύ τους προκειμένου να λειτουργεί ομαλά και με αμιγώς οπτικό τρόπο ο οπτικός κόμβος ενός δικτύου. Ένα υποσύστημα ανίχνευσης πακέτων (ή υποσύστημα ανάκτησης του ρυθμού άφιξης των πακέτων δεδομένων) διασυνδέεται απευθείας με το υποσύστημα ανάκτησης του ρυθμού άφιξης των δεδομένων (ή υποσύστημα ανάκτησης ρολογιού) σε ένα κόμβο μεταγωγής πακέτων. Το υποσύστημα ανίχνευσης πακέτων χρησιμοποιεί τα πακέτα εξόδου του υποσυστήματος ανάκτησης ρολογιού (πακέτα που περιέχουν το ανακτημένο ρολόι) προκειμένου να παράγει έναν μοναδικό παλμό για κάθε πακέτο δεδομένων που αφινείται στην είσοδο του κόμβου, παρέχοντας με αυτόν τον τρόπο ένα σήμα συγχρονισμού στο ρυθμό μετάδοσης (άφιξης) των πακέτων. Το υποσύστημα ανίχνευσης πακέτων απαιτεί για τη λειτουργία του την αλληλεπίδραση μεταξύ τριών σημάτων με συγκεκριμένο συγχρονισμό στο πεδίο του χρόνου. Πιο συγκεκριμένα, τα πακέτα με το ανακτημένο ρολόι μπαίνουν μέσα στο υποσύστημα ανίχνευσης πακέτων με καθυστέρηση ενός διφίου σε σχέση με τα εισερχόμενα πακέτα δεδομένων. Όλα τα παραπάνω φαίνονται παραστατικά στο Σχήμα 18. Ο εξερχόμενος παλμός ανίχνευσης πακέτων εν συνεχεία χρησιμοποιείται για την παραγωγή με αμιγώς οπτικό τρόπο της νέας επικεφαλίδας η οποία περιλαμβάνει τις απαραίτητες πληροφορίες δρομολόγησης των πακέτων που εξέρχονται από τον κόμβο μεταγωγής.

## Κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων δεδομένων με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών πυλών Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s



Σχήμα 19: Λεπτομερής διάταξη του κυκλώματος ανίχνευσης πακέτων.

Συμπεραίνουμε επομένως ότι το παρών κεφάλαιο περιγράφει το αμιγώς οπτικό κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων με δεδομένα στα 10 Gb/s, το οποίο σχεδιάστηκε, υλοποιήθηκε και δοκιμάστηκε πειραματικά στα πλαίσια της διατριβής αυτής, και του οποίου η σημαντικότητα είναι μεγάλη λόγω της καιρίας θέσης του σε ένα κόμβο μεταγωγής πακέτων. Η υλοποίηση του υπό μελέτη κυκλώματος πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας σε σειρά ένα κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού με φίλτρο Fabry-Perot και κορεσμένο οπτικό διακόπτη τύπου SOA-MZI και ένα κύκλωμα εξαγωγής προπορευόμενου παλμού εκμεταλλευόμενο το φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης φάσης (Cross Phase Modulation - XPM) και ετεροδιαμόρφωσης κέρδους (Cross Gain Modulation) [2.16] σε ένα δεύτερο οπτικό διακόπτη τύπου SOA-MZI για την παραγωγή ενός οπτικού παλμού για κάθε εισερχόμενο πακέτο δεδομένων. Η έξοδος του υπό-κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού παρέχει το σήμα συγχρονισμού του κόμβου σε επίπεδο δεδομένων και ταυτόχρονα οδηγεί το κύκλωμα εξαγωγής προπορευόμενου παλμού, το οποίο με τη σειρά του παρέχει στον κόμβο το σήμα συγχρονισμού σε επίπεδο πακέτου. Η πειραματική υλοποίηση του κυκλώματος ανίχνευσης πακέτων διεξήχθη τόσο για σύγχρονες όσο και για ασύγχρονες ροές δεδομένων, η ανάλυση των οποίων γίνεται εκτενώς στις ακόλουθες παραγράφους.

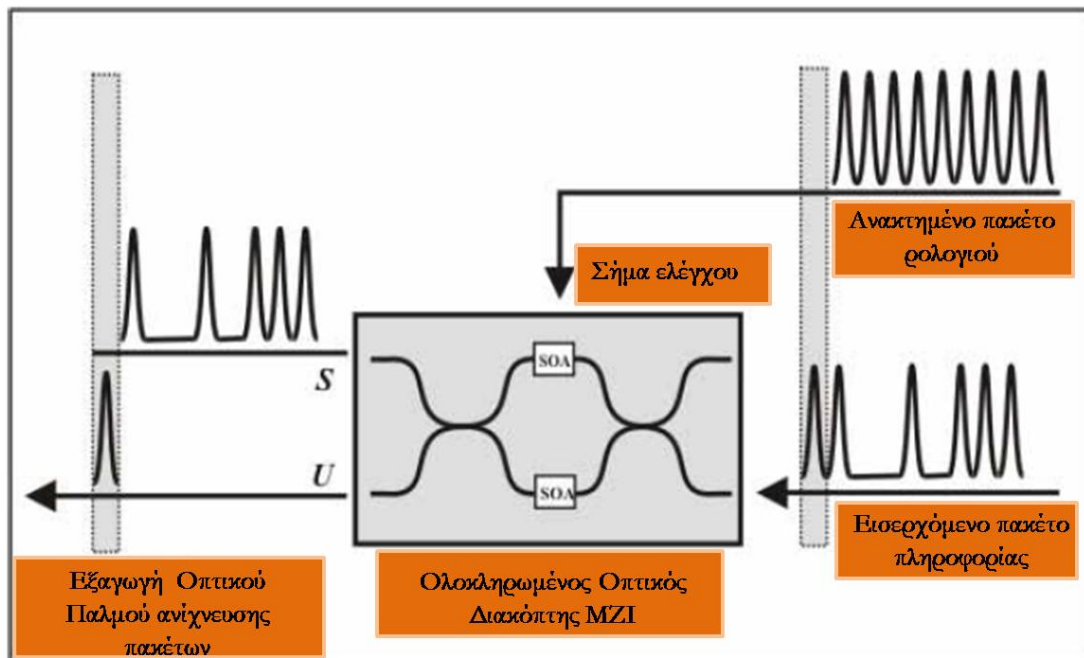
### 2.2 Το κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων – δομή και λειτουργία

Το κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να παρέχει συγχρονισμό σε επίπεδο πακέτου στον εκάστοτε κόμβο του δικτύου, παράγοντας έναν παλμό στην αρχή κάθε εισερχόμενου πλαισίου πληροφορίας, με αποτέλεσμα την εξαγωγή πληροφορίας για τη χρονική στιγμή άφιξης του πακέτου.

Μια σειρά από τεχνικές έχει προταθεί στη βιβλιογραφία για την παραγωγή παλμών ανίχνευσης πακέτου ή συγχρονισμού. Παλαιότερες τεχνικές επεμβαίνουν στον πομπό χρησιμοποιώντας έναν παλμό-δείκτη (*marker pulse*) στην αρχή του πακέτου και σε διαφορετική κατάσταση σε σχέση με το υπόλοιπο πακέτο. Παλμο-δείκτες σε διαφορετικό μήκος κύματος [2.17], πόλωση [2.18], περίοδο bit [2.19] ή πλάτος [2.20] έχουν εφαρμοστεί σε πειράματα. Οι μέθοδοι αυτές όμως έχουν ιδιαίτερα αυξημένη πολυπλοκότητα ως προς την

## Κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων δεδομένων με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών πυλών Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s

παραγωγή των πακέτων πληροφορίας στον πομπό και την διάδοσή τους στην ίνα. Πιο πρόσφατες προσεγγίσεις εξάγουν τον παλμό ανίχνευσης από πακέτα πληροφορίας όπου όλοι οι παλμοί βρίσκονται στην ίδια κατάσταση [2.21, 2.22]. Οι τεχνικές αυτές εκμεταλλεύονται τη διακύμανση του κέρδους και τη δυναμική της φάσης ενός οπτικού ενισχυτή ημιαγωγού (SOA) σε επίπεδο διφύου [2.23-2.26]. Όμως στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιείται SOA με πολύ μεγάλο χρόνο ανάκαμψης, δημιουργώντας την απαίτηση για μεγάλες προστατευτικές ζώνες διφύων μεταξύ των μεταδιδόμενων πακέτων για ορθή λειτουργία. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε εξάρτηση της αποδοτικότητας του συστήματος και δημιουργεί την ανάγκη αυστηρής κωδικοποίησης καθώς και χρησιμοποίησης συγκεκριμένων μορφών πακέτου.



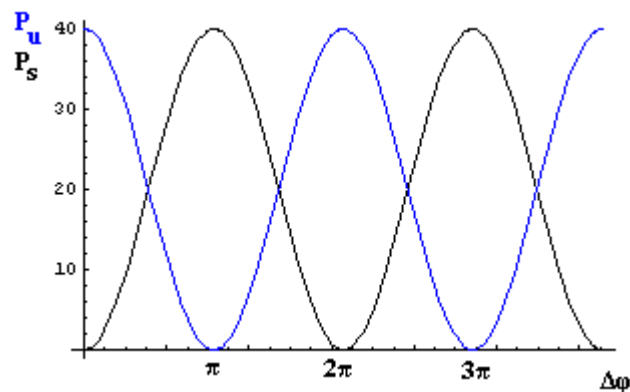
Σχήμα 20: Δομή και αρχή λειτουργίας του οπτικού κυκλώματος ανίχνευσης πακέτων.

Το κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων που προτείνεται στην παρούσα διατριβή, εκμεταλλεύεται τη λειτουργία του κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού [2.27, 2.28], εκτελώντας αμιγώς οπτική επεξεργασία των ανακτημένων πακέτων ρολογιού για την εξαγωγή του παλμού συγχρονισμού. Επιπρόσθετα το υπό εξέταση κύκλωμα εκμεταλλεύεται πλήρως τα πλεονεκτήματα χρήσης των υβριδικά ολοκληρωμένων συμβολόμετρων τύπου Mach-Zehnder [2.29], διασφαλίζοντας την αποφυγή χρήσης παλμό-δεικτών ή αυστηρής κωδικοποίησης των δεδομένων σε κώδικες όπως ο κώδικας Manchester.

Η ακριβής δομή καθώς και η αρχή λειτουργίας του υποσυστήματος απεικονίζεται στην Σχήμα 20. Στο πρώτο στάδιο του κυκλώματος ανίχνευσης πακέτου, πραγματοποιείται η ανάκτηση του πακέτου ρολογιού που αντιστοιχεί στο εισερχόμενο πακέτο δεδομένων. Κατόπιν το ανακτημένο πακέτο ρολογιού εισέρχεται στο κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων

## Κυκλώμα ανίχνευσης πακέτων δεδομένων με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών πυλών Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s

δεδομένων με το οποίο επιλέγεται μόνο ο πρώτος παλμός από κάθε πακέτο ρολογιού. Για την εξαγωγή του προπορευόμενου παλμού, χρησιμοποιείται ο οπτικός διακόπτης τύπου MZI ο οποίος ακολουθεί του κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού, έτσι ώστε τα πακέτα δεδομένων εισόδου και τα αντίστοιχα ανακτημένα πακέτα ρολογιού να εισάγονται στην οπτική πύλη ομόρροπα, με το πακέτο ρολογιού να εισέρχεται από την πόρτα ελέγχου του διακόπτη MZI και το πακέτο πληροφορίας από την μια εκ των δύο εισόδων του. Η οπτική πύλη MZI είναι διαμορφωμένη με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτελεί την λογική πράξη AND κατά την διάρκεια της παρουσίας και των δύο σημάτων (σήμα εισόδου & σήμα ελέγχου) μέσα στην οπτική πύλη. Για να κατανοήσουμε την AND λειτουργία πρέπει καταρχήν να επισημάνουμε τα εξής: Ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση μη μεταγωγής (OFF) για όλη τη διάρκεια όπου το σήμα ελέγχου του διακόπτη είναι ακολουθία μηδενικών, με αποτέλεσμα οτιδήποτε εισέρχεται στην οπτική πύλη την χρονική διάρκεια απουσίας σήματος ελέγχου να εξέρχεται αυτούσιο από τη θύρα μη μεταγωγής U. Αντίθετα, ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση μεταγωγής (ON) καθ' όλη τη χρονική διάρκεια παρουσίας σήματος ελέγχου, το οποίο στην προκειμένη περίπτωση μας είναι το ανακτημένο πακέτο ρολογιού. Στην περίπτωση αυτή, τα δυφία του εισερχόμενου πακέτου δεδομένων που συμπίπτουν χρονικά με το σήμα ελέγχου, μεταφέρονται και εξέρχονται από τη θύρα μεταγωγής S του MZI.



Σχήμα 21: Ισχύς στη θύρα S και U, συναρτήσει του  $\Delta\varphi$

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 21 ο λόγος της επιτυχούς λειτουργίας της πύλης στην λογική πράξη AND οφείλεται στο γεγονός ότι το σήμα εισόδου στρέφει ή όχι την πόλωσή του κατά  $90^\circ$  ανάλογα με την παρουσία του ισχυρού σήματος ελέγχου. Στην έξοδο της πύλης επομένως και δεδομένου του γεγονότος ότι στο σήμα ελέγχου εισάγεται καθυστέρηση έτσι ώστε αυτό να υπολείπεται χρονικά του πακέτου δεδομένων κατά ένα bit, επιτυγχάνουμε να πάρουμε τον παλμό συγχρονισμού στην πόρτα μη μεταγωγής (unswitched port) και όλη την υπολειπόμενη πληροφορία που μεταφέρει το οπτικό μας πακέτο δεδομένων, στην πόρτα μεταγωγής (switched port). Συμπερασματικά λοιπόν διακρίνουμε ότι στο switched port



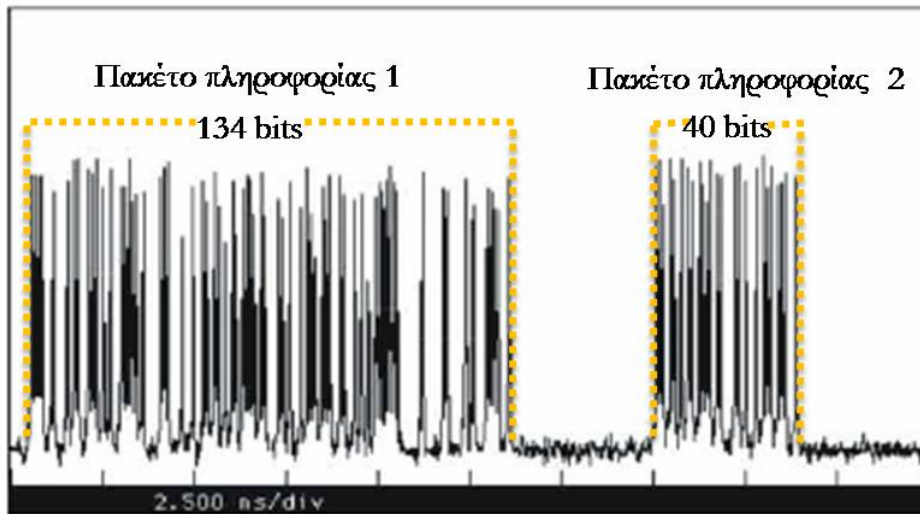
εμφανίζεται το αποτέλεσμα της λογικής πράξης AND ενώ στο un-switched port παίρνουμε το αποτέλεσμα της NAND.

### **2.3 Πειραματική υλοποίηση του αμιγώς οπτικού υποσυστήματος ανάκτησης πακέτων στα 10 Gb/s**

Το αμιγώς οπτικό κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων αξιολογήθηκε πειραματικά. Στην παρούσα ενότητα περιγράφεται αναλυτικά η πειραματική διάταξη του κυκλώματος ανίχνευσης πακέτων, αλλά και τα πειραματικά αποτελέσματα που καταγράφηκαν κατά τη δοκιμή του κυκλώματος για πακέτα δεδομένων.

#### **2.3.1 Πειραματική διάταξη**

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του αμιγώς οπτικού κυκλώματος ανίχνευσης πακέτων φαίνεται στην Σχήμα 22. Η διάταξη αυτή αποτελείται από τη γεννήτρια παραγωγής των πακέτων δεδομένων στα 10 Gb/s, ικανή να παράγει τόσο σύγχρονες όσο και ασύγχρονες ροές δεδομένων, το αμιγώς οπτικό κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού και το αμιγώς οπτικό κύκλωμα εξαγωγής του πρώτου παλμού από κάθε πακέτο. Προκειμένου να δημιουργήσουμε το αρχικό μας σήμα, το οποίο εν συνεχεία θα αποτελέσει και το σήμα εισόδου στο προς εξέταση κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων χρησιμοποιούμε μια διοδική πηγή λέιζερ κατανεμημένης ανάδρασης (LD1- DFB laser) με συχνότητα λειτουργίας 10.229 GHz, η οποία λειτουργεί με τη μέθοδο απολαβής κέρδους (*gain switching*), εκπέμποντας στα 1549nm. Οι παλμοί είναι τύπου «επιστροφής-στο-μηδέν» (Return-to-Zero) και σχήματος Gauss με χρονικό εύρος ημίσειας ισχύος ίσο με περίπου 10 ps, μετά από γραμμική συμπίεση. Η γραμμική συμπίεση επιτυγχάνεται μέσω της αλληλεπίδρασης της μη-γραμμικότητας της οπτικής ίνας και του φαινομένου της διασποράς με τη βοήθεια ενός συμπίεστη οπτικής ίνας που αποτελείται από δύο κομμάτια οπτικής ίνας DCF και SMF συνδεδεμένα σε σειρά. Το συνεχές σήμα ρολογιού το οποίο παράγει η πηγή μας εν συνεχεία διαμορφώνεται σε πακέτα δεδομένων, τα οποία εμπεριέχουν ψευδοτυχαίες ακολουθίες (PRBS), με την βοήθεια μιας προγραμματιζόμενης μικροκυματικής γεννήτριας ψευδοτυχαίας ακολουθίας (*Pseudo-Random Bit Sequence Generator – PRBS Generator*) και ενός ηλεκτρο-οπτικού διαμορφωτή πλάτους νιοβικού λιθίου με προσμίξεις τιτανίου (*Ti:LiNbO3 modulator*). Συγκεκριμένα σε ότι αφορά την μορφή των πακέτων, στην περίπτωση της σύγχρονης μετάδοσης των πακέτων πληροφορίας, η γεννήτρια της ψευδοτυχαίας ακολουθίας είναι προγραμματισμένη για να παράγει δύο πακέτα διαφορετικού μεγέθους, το ένα μήκους 40 διφών και το ακόλουθο του μήκους 134 διφών (βλέπε Σχήμα 22) , τα οποία επαναλαμβάνονται κάθε 24.83 ns.



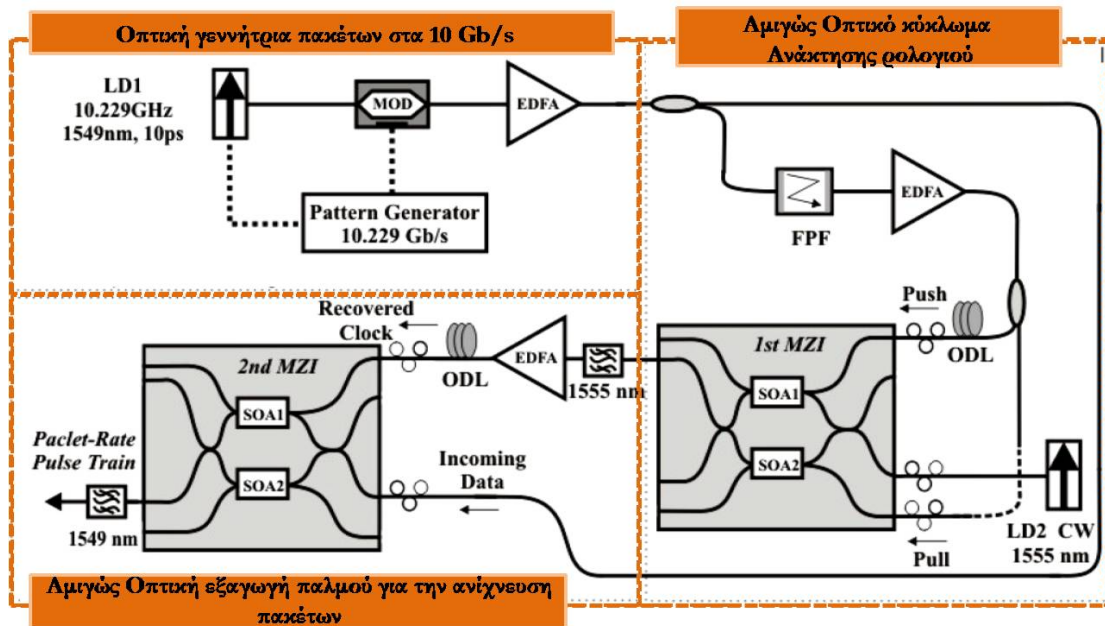
Σχήμα 22: Διαμορφωμένα πακέτα πληροφορίας δεδομένων

Στην περίπτωση της ασύγχρονης λειτουργίας, η δομή των πακέτων διατηρείται ίδια με την περίπτωση της σύγχρονης λειτουργίας ενώ διπλασιάζεται η περίοδος στα 49.66 ns λόγω του διπλασιασμού των πακέτων από την χρήση ενός πολυπλέκτη πακέτων. Προκειμένου να επιτύχουμε ακριβής διεύθυνση της φάσης των πολύ-πλεγμένων μεταξύ τους πακέτων χρησιμοποιούμε μια χρονικά μεταβαλλόμενη οπτική γραμμή καθυστέρησης σε ένα από τους δυο κλάδους του πολυπλέκτη. Το διαμορφωμένο σήμα κατά την έξοδο του από την πηγή αφού ενισχυθεί με την χρήση ενός οπτικού ενισχυτή ίνας ερβίου (EDFA) διαχωρίζεται σε δυο πανομοιότητα «αντίγραφα», εκ των οποίων το ένα εισέρχεται στο κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού και το δεύτερο αποτελεί το σήμα εισόδου στο κύκλωμα εξαγωγής του πρώτου παλμού από κάθε πακέτο. Το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού παρουσιάζεται λεπτομερώς σε επόμενη ενότητα του ίδιου κεφαλαίου συνεπώς η περιγραφή της πειραματικής μας διάταξης στην συγκεκριμένη ενότητα επικεντρώνεται κυρίως στο συνολικό σύστημα ανίχνευσης πακέτων δεδομένων. Εν συντομία λοιπόν το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού αποτελείται από ένα περιοδικό φίλτρο τύπου Fabry-Perot (FFP) με φασματικό εύρος ίσο του ρυθμού μετάδοσης της πληροφορίας στο σύστημα μας και με λεπτότητα ίση με 47, καθώς και από ένα οπτικό διακόπτη τύπου MZI (MZI 1), στον οποίο εισέρχεται σαν σήμα εισόδου ένα συνεχές μήκος κύματος στα 1555nm [2.27]. Σκοπός του FFP φίλτρου είναι η μετατροπή των εισερχόμενων πακέτων πληροφορίας σε πακέτα ρολογιού με έντονη διαμόρφωση πλάτους και διάρκειας σχεδόν ίσης με το μήκος των πακέτων δεδομένων. Το εξερχόμενο του Fabry-Perot φίλτρου σήμα εισέρχεται εν συνεχεία στο MZI 1 το οποίο λόγω της κατάστασης κορεσμού στην οποία έχει επέλθει, λειτουργεί ως ψαλιδιστής μειώνοντας την διαμόρφωση πλάτους των πακέτων [2.30], το οποίο εν τέλει συντελεί στην δημιουργία καλής ποιότητας πακέτων ρολογιού. Για την όσο το δυνατόν βέλτιστη απόκτηση των πακέτων ρολογιού χρησιμοποιούμε την τεχνική push-pull [2.31] η οποία βοήθησε στην μείωση του παράθροου μεταγωγής του οπτικού διακόπτη και επομένως στην

## Κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων δεδομένων με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών πυλών Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s

επιτάχυνση του ρυθμού λειτουργίας του. Στην περίπτωση μας ο παλμός του κάθε πακέτου ρολογιού που εξέρχεται από το MZI 1 είναι 12.5 ps. Ο δεύτερος οπτικός διακόπτης είναι κατάλληλα διαμορφωμένος ώστε να εκτελεί την λειτουργία της λογικής πράξης AND μεταξύ των δύο οπτικών σημάτων – των πακέτων πληροφορίας που παράγει η πηγή μας και των παραγόμενων πακέτων ρολογιού από το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού- τα οποία είναι κατάλληλα συγχρονισμένα ώστε να επιτυγχάνεται η απόκτηση του παλμού για την ανίχνευση των πακέτων στην θύρα μεταγωγής (*switched port*) εμφανίζοντας το αποτέλεσμα της λογικής πράξης AND ενώ στην θύρα μη μεταγωγής (*un-switched port*) να παίρνουμε το αποτέλεσμα της NAND. Στην περίπτωση της AND λειτουργίας χρησιμοποιείται μόνο ένα σήμα ελέγχου μιας και δεν μας ενδιαφέρει η «bit per bit» λειτουργία προκειμένου να εξαχθεί ο πρώτος παλμός από κάθε πακέτο. Ο συγχρονισμός τόσο στην πρώτη οπτική πύλη MZI 1 μεταξύ των δύο σημάτων ελέγχου (push-pull λειτουργία) όσο και στην δεύτερη πύλη μεταξύ του σήματος ελέγχου (πακέτο ρολογιού) και του εισερχόμενου σήματος εισόδου γίνονται με την χρήση μεταβαλλόμενων οπτικών γραμμών καθυστέρησης. Οι ημιαγωγιμοί οπτικοί ενισχυτές (SOAs) οι οποίοι εμπεριέχονται στους οπτικούς διακόπτες δύναται να παρέχουν έως 22 dB κέρδος στην περιοχή χαμηλού σήματος, καλύπτοντας μια ευρεία περιοχή για εύρος μηκών κύματος από 1547nm έως 1557 nm με 80 ps χρόνο ανάκαμψης του κέρδους όταν το ρεύμα που οδηγεί τους ενισχυτές είναι στα 270 mA [2.29]. Εν τέλει θα πρέπει να επισημάνουμε ότι στην πειραματική μας διάταξη χρησιμοποιήσαμε τρεις οπτικούς ενισχυτές ίνας ερβίου (EDFA) [2.32] προκειμένου να αντισταθμίσουμε τις τυχόν απώλειες του συστήματος, καθώς και ένα ζωνοπερατό φίλτρο εύρους 1nm στην έξοδο κάθε οπτικής πύλης για την απομόνωση του εξωτερικού θορύβου που παράγουν οι οπτικοί ενισχυτές συμπεριλαμβανομένου εκτός των EDFAs και των SOAs που βρίσκονται στην ολοκληρωμένη οπτική πύλη τύπου Mach-Zehnder. Η πειραματική μας διάταξη όπως αυτή αναπτύχθηκε στα πλαίσια του πειράματος στο εργαστήριο φωτονικών επικοινωνιών (ΕΦΕ) φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.

## Κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων δεδομένων με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών πυλών Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s



Σχήμα 23: Πειραματική διάταξη για το αμιγώς οπτικό κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων στα 10 Gb/s.

### 2.4 Πειραματικά αποτελέσματα & θέματα προς συζήτηση

Όπως αναφέραμε στην προηγούμενη ενότητα για την αξιολόγηση της πειραματικής μας διάταξης χρησιμοποιήσαμε πακέτα δεδομένων διαφορετικού μήκους μεταδιδόμενα τόσο με σύγχρονη όσο και με ασύγχρονη ροή. Θα πρέπει να επισημάνουμε ότι ως ασύγχρονες ροές δεδομένων ορίζουμε τις ροές δεδομένων μίας σύνδεσης που μεταδίδονται σε σχετικά τυχαίες χρονικές στιγμές χωρίς να υπάρχει κάποια συγκεκριμένη συνθήκη για το χρονισμό μεταξύ τους. Θα πρέπει δε να επισημανθεί ότι στα δίκτυα αυτά δεν απαιτείται συγχρονισμός των πακέτων διαφορετικών συνδέσεων στον κόμβο, με αποτέλεσμα η μεταγωγή και η δρομολόγηση αυτών να καθίστανται περισσότερο πολύπλοκες διαδικασίες.

Τα πειραματικά αποτελέσματα από την υλοποίηση του ανωτέρω πειράματος για την σύγχρονη αλλά και την ασύγχρονη λειτουργία του κυκλώματος φαίνονται αντίστοιχα στην δεξιά και αριστερή στήλη του σχήματος 24. Προκειμένου να λειτουργήσει το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού, το Fabry-Perot φίλτρο χρειάζεται δυο συνεχόμενα “1” στην αρχή κάθε πακέτου προκειμένου να ανακτήσουμε το ρολόι ενώ ο χρόνος απόσβεσης διαρκεί 15 bits. Οι χρόνοι που απαιτούνται τόσο για την ανάκτηση του ρολογιού όσο και για την απόσβεση του καθορίζουν την συνολική επιβάρυνση του ρυθμού λειτουργίας του κυκλώματος ανίχνευσης πακέτων. Αναλυτικότερα ξεκινώντας από το Σχήμα 24 α) παρατηρούμε ότι απεικονίζονται τα διαμορφωμένα πακέτα δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση του συστήματος ανίχνευσης πακέτων. Συγκεκριμένα σε ότι αφορά την σύγχρονη λειτουργία του κυκλώματος παρουσιάζεται το πακέτο πληροφορίας μήκους 40 διφύων ενώ στην ασύγχρονη λειτουργία τα δύο πακέτα

## Κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων δεδομένων με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών πυλών Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s

διαφορετικού μήκους 134 και 40 διψύων αντίστοιχα. Εν συνεχεία στο Σχήμα 24 β) βλέπουμε τα ανακτημένα πακέτα ρολογιού τα οποία έχουν προκύψει στην έξοδο του πρώτου οπτικού διακόπτη και αντιστοιχούν σε κάθε ένα από τα πακέτα των σημάτων εισόδου όπως φαίνονται στο σχήματος 24α). Η βέλτιστη λειτουργία του κύκλωματος ανάκτησης ρολογιού επιτυγχάνεται με 790  $\mu\text{W}$  οπτικής ισχύος από την πηγή συνεχούς εκπομπής μήκους κύματος στα 1555nm και 200 fJ/παλμό για το push σήμα ελέγχου και 178fJ/παλμό για το pull σήμα ελέγχου αντίστοιχα. Τα σχήματα 24γ) και 24δ) δείχνουν τον αντίστοιχο εξαχθέντα παλμό από την αρχή κάθε πακέτου καθώς και το αντίστοιχο διάγραμμα ματιού το οποίο αντιστοιχεί στον παλμό αυτό. Ο λόγος σβέσης που επιτυγχάνεται στην έξοδο της πύλης MZI 2 μεταξύ των εξερχομένων πρώτων παλμών των πακέτων και του υπόλοιπου πακέτου πληροφορίας είναι 10 dB ενώ χρειάστηκαν 22 fJ/παλμό οπτική ισχύς για τα εισερχόμενα πακέτα δεδομένων και 80 fJ/παλμό για το σήμα ελέγχου, δηλ. το ανακτημένο πακέτο ρολογιού.

Θα πρέπει να επισημάνουμε ότι ο βαθμός επιβάρυνσης του ρυθμού μετάδοσης στο σύστημα μας επηρεάζεται μόνο από τον χρόνο ανάκτησης και τον χρόνο σβέσης του πακέτου ρολογιού. Αυτό από την μεριά του καθορίζεται από την λεπτότητα του φίλτρου Fabry-Perot το οποίο και επιλέγεται με βάση τον αριθμό των συνεχόμενων μηδενικών τα οποία εμπεριέχονται σε ένα πακέτο πληροφορίας [2.33]. Στην περίπτωση επομένως όπου έχουμε μεγαλύτερες τάξεις ψευδοτυχαίων ακολουθιών χρειαζόμαστε ένα φίλτρο με μεγαλύτερη λεπτότητα, το οποίο βέβαια έχει ως αντίκτυπο την ανάγκη για περισσότερα συνεχόμενα “1” στην αρχή κάθε πακέτου. Δεδομένου λοιπόν του μειονεκτήματος αυτού και προκειμένου να αποφύγουμε την αύξηση της πολυπλοκότητας των πακέτων, μπορούμε να παρεμβάλουμε “1” στα σημεία όπου υπάρχουν συνεχόμενα μηδενικά, μια μέθοδος η οποία αποκαλείται “*scrambling*” [2.34]. Με την μέθοδο αυτή επιτυγχάνουμε επομένως να διατηρήσουμε σε χαμηλές τιμές τόσο την λεπτότητα του φίλτρου όσο και τον αριθμό των συνεχόμενων “1” στην επικεφαλίδα και το σύστημα μας να λειτουργεί επιτυχώς. Βέβαια πρέπει να τονίσουμε ότι ακόμα και στην περίπτωση της μη χρήσης της τεχνικής *scrambling* η αύξηση της πολυπλοκότητας στο σύστημα μας είναι πολύ μικρότερη από άλλες μεθόδους ηλεκτρονικής η οπτικής ανάκτησης του πακέτου ρολογιού.

Εν κατακλείδι λοιπόν το προτεινόμενο σύστημα ανίχνευσης πακέτων εμμεταλλεύεται όλα εκείνα τα γρήγορα χαρακτηριστικά που προσφέρει το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού παρέχοντας τόσο ένα σήμα ρολογιού όσο και το σήμα ανίχνευσης των πακέτων δεδομένων, χωρίς περαιτέρω αύξηση των προστατευτικών διψύων που βάζει το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού και επομένως της πολυπλοκότητας του συνολικού συστήματος. Επιπρόσθετα ο χρόνος ανάκτησης του ρολογιού και ο χρόνος σβέσης του, δεν εξαρτώνται από το μήκος των πακέτων αυξάνοντας έτσι το συνολικό εύρος του συστήματος μας [2.3]. Απόρροια του φαινομένου της διαφάνειας του προτεινόμενου συστήματος σε επίπεδο διαμόρφωσης

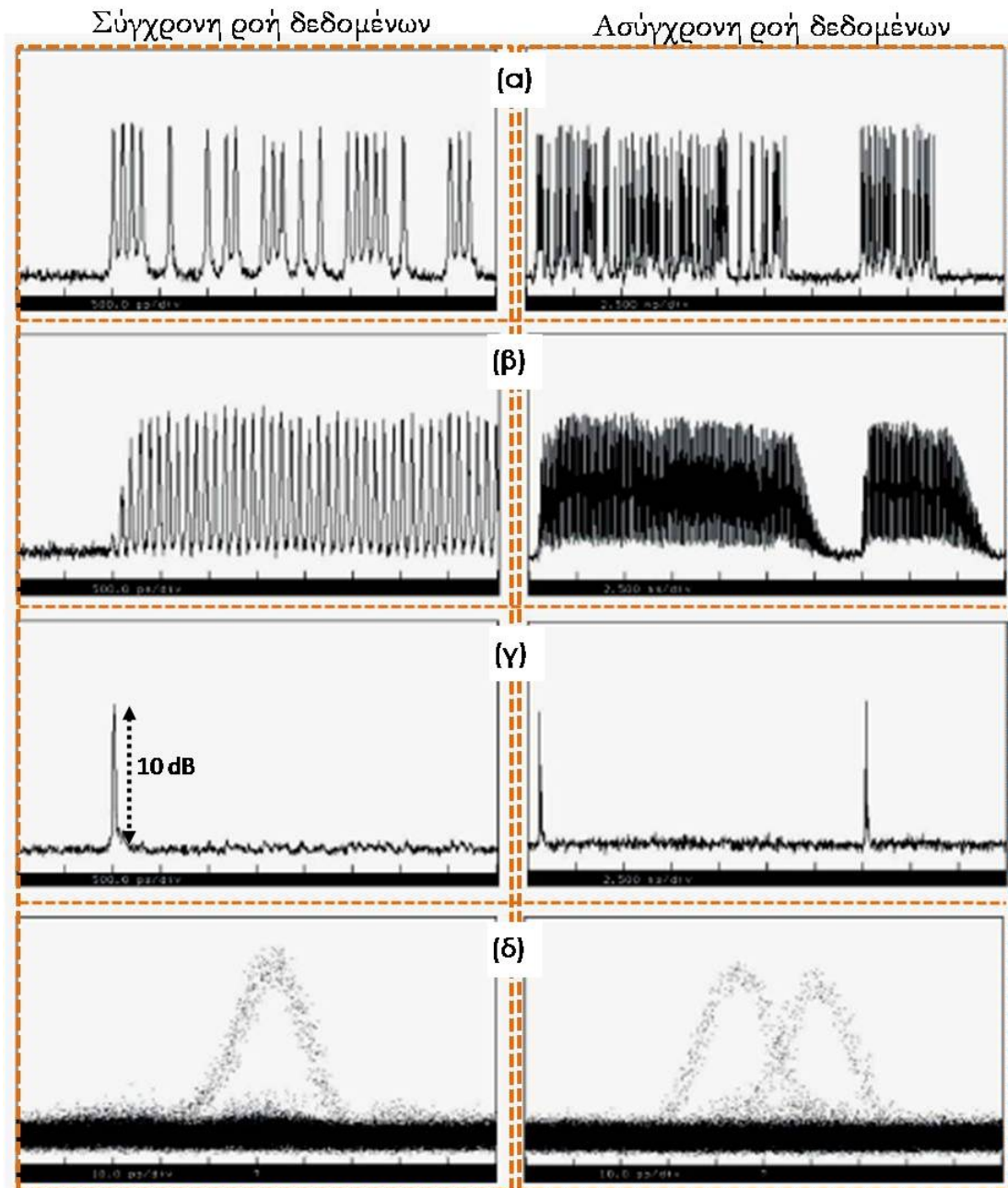
## Κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων δεδομένων με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών πυλών Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s

πακέτων δεδομένων αποτελεί η δυνατότητα του να υλοποιηθεί σε μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης 40 Gb/s και άνω [2.35]. Αξίζει δε να σημειωθεί ότι η συνολική επιβάρυνση στο εύρος μετάδοσης μειώνεται καθώς αυξάνεται το μέγεθος των πακέτων και είναι 10 % για 13 ns μήκος πακέτων ενώ μειώνεται σε 8% για ATM πακέτα.

Η χρησιμότητα του συστήματος δεν περιορίζεται μόνο στην ανίχνευση των εισερχομένων πακέτων δεδομένου του γεγονότος ότι το ανακτημένο ρολόι το οποίο εξάγεται από το υποσύστημα ανάκτησης ρολογιού είναι καλής ποιότητας, και επομένως θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως εισερχόμενο σήμα και σε ένα κύκλωμα 3R αναγέννησης ενός ολοκληρωμένου οπτικού κόμβου μεταγωγής πακέτων, όπως και αναλύθηκε αυτός εκτενώς σε προηγούμενη ενότητα. [2.36]

Τέλος δεν θα πρέπει να παραλείψουμε το γεγονός ότι το σύστημα ανίχνευσης πακέτων υλοποιήθηκε αξιοποιώντας την χρήση ολοκληρωμένων οπτικών διατάξεων, όπως οι οπτικές πύλες MZI. Το γεγονός αυτό αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα της αξιολόγησης του συστήματός μας μιας και συμβαδίζει με τις επιστημονικές αλλά και γενικού ερευνητικού χαρακτήρα τάσεις της εποχής μας για δημιουργία συστημάτων τα οποία θα δύναται να ολοκληρωθούν σε ένα πλινθίο (*chip*) προκειμένου να μειωθεί τόσο το μέγεθος όσο και το κόστος κατασκευής και συντήρησης ενός αμιγώς οπτικού κόμβου μετάδοσης δεδομένων [2.37].

Κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων δεδομένων με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών πυλών Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s



Σχήμα 24: Πειραματικά αποτελέσματα για το αμιγώς οπτικό κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων στα 10 Gb/s τόσο για σύγχρονη όσο και για ασύγχρονη ροή δεδομένων. 5α) Σήμα εισόδου, 5β) ανακτημένα πακέτα ρολογιού, 5γ)εξερχόμενοι παλμοί συγχρονισμού σε επίπεδο πακέτου, 5δ) διαγράμματα ματιού παλμών συγχρονισμού πακέτων. Χρονική κλίμακα 10 ps/div για τα διαγράμματα ματιού, 2.5 ns/div για την παλμοσειρές στην ασύγχρονη λειτουργία και 500 ps/div για τις παλμοσειρές της σύγχρονης λειτουργίας.

Για διευκόλυνση του αναγνώστη παραθέτουμε ένα συγκεντρωτικό πίνακα με τα ενεργειακά επίπεδα των υποσυστημάτων που απαρτίζουν το κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων πληροφορίας και ο οποίος δίνεται ακολούθως.



## Κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων δεδομένων με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών πυλών Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s

Πίνακας 2: Ισχύς μεταγωγής για το αμιγώς οπτικό κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων στα 40 Gb/s. Οι ισχύεις εξόδου μετρήθηκαν μετά από οπτικό φιλτράρισμα.

Ενεργειακά Δεδομένα	Σήμα Εισόδου	Σήμα ελέγχου 1	Σήμα ελέγχου 2
Υποσύστημα ανάκτησης ρολογιού	790 $\mu$ W	200 fJ/παλμό	178 fJ/παλμό
Υποσύστημα ανάκτησης πρώτου παλμού από κάθε πακέτο	22 fJ/παλμό	80 fJ/παλμό	--

Λόγω της σημαντικότητας του κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού για την ορθή λειτουργία του υπό μελέτη συστήματος ανίχνευσης πακέτων, δεν θα γινόταν να παραληφθεί η αναφορά μας στον σύστημα αυτό, στα στοιχεία που το δομούν αλλά και στον τρόπο λειτουργίας του. Η επόμενη ενότητα επομένως αφορά το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού έτσι όπως υλοποιήθηκε στο ΕΦΕ και αποτέλεσε υποσύστημα του κυκλώματος ανίχνευσης πακέτων.

### 2.5 Αμιγώς οπτικό κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού από πακέτο πληροφορίας

#### 2.5.1 Εισαγωγή

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

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

Γενικά, ένα κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού χρειάζεται ένα καθορισμένο χρόνο για να συγχρονιστεί με την ακολουθία των δεδομένων και οφείλεται στον χρόνο που χρειάζεται το



## Κύκλωμα ανάκτησης πακέτων δεδομένων με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών πυλών Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s

σύστημα ανάκτησης ρολογιού μέχρι να κλειδώσει. Βασικός παράγοντας καθορισμού του χρόνου κλειδώματος αποτελεί ο χρόνος ανύψωσης του πακέτου ρολογιού (*rise time*). Αυτό σημαίνει ότι τα πρώτα bits κάθε πακέτου που εκπέμπεται δε μπορούν να περιέχουν πληροφορία, αλλά χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για το συγχρονισμό του κυκλώματος. Επίσης, το ρολόι που παράγεται από ένα τέτοιο κύκλωμα έχει κάποιο χρόνο ζωής (*lifetime*), που συνίσταται στο χρονικό διάστημα που το κύκλωμα παραμένει «κλειδωμένο» μετά το πέρας του πακέτου. Έτσι, προκειμένου να διαχειριστούμε ασύγχρονη κίνηση, είμαστε υποχρεωμένοι να διατηρούμε ανάμεσα στα πακέτα χρονικά διαστήματα απραξίας ίσα με αυτό το χρόνο ζωής τα οποία ονομάζονται προστατευτικά διαστήματα δυφίων. Αποτέλεσμα είναι η σπατάλη εύρους ζώνης, που γίνεται αρκετά υπολογίσιμη όσο πιο μικρά πακέτα χρησιμοποιούνται, οπότε ο λόγος προστατευτικά δυφία / δεδομένα μεγαλώνει. Από τα παραπάνω προκύπτουν οι απαιτήσεις από ένα κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού: α) **γρήγορος συγχρονισμός** και β) **μικρός χρόνος ζωής**. Ιδανικά αυτό που επιζητούμε είναι το ρολόι να έχει το μέγεθος του πακέτου που το παρήγαγε.

Στην οπτική τεχνολογία έχουν εφαρμοστεί πολλές τεχνικές για την ανάκτηση ρολογιού. Πολλές από αυτές χρησιμοποιούσαν και ηλεκτρονικά μέσα, γεγονός που αποτελεί μειονέκτημα, καθώς η περιορισμένη ταχύτητά τους δεν επιτρέπει την πλήρη εκμετάλλευση του τεράστιου εύρους ζώνης των οπτικών διατάξεων. Τέτοιες τεχνικές είναι τα συγχρονισμένα lasers δακτυλίου [2.38], οι ηλεκτρονικοί βρόχοι εγκλειδωσης φάσης [2.39] και τα αυτό-παλλόμενα DFB lasers [2.40,2.41]. Οι τεχνικές αυτές απαιτούν μεγάλα κενά χρονικά διαστήματα μεταξύ των πακέτων, γεγονός που της καθιστά ακατάλληλες για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης ή μικρό μήκος πακέτων. Αντίθετα, ένα κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού που πετυχαίνει μικρό χρόνο ανύψωσης και παράγει ρολόι στο μήκος περίπου του οπτικού πακέτου, μπορεί να υλοποιηθεί με συνδυασμό ενός φίλτρου Fabry-Perot και ενός MZI.

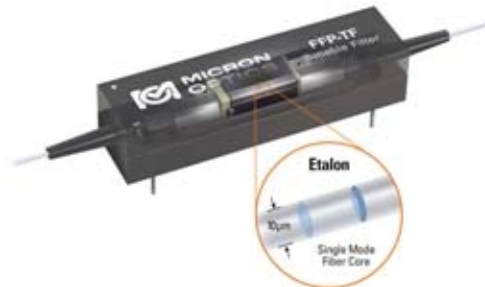
Το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού που υλοποιήσαμε λειτουργεί αποκλειστικά στο οπτικό επίπεδο, ώστε να μπορεί να εκμεταλλευτεί τις δυνατότητες των οπτικών μέσων και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα μελλοντικά δίκτυα τρίτης γενιάς. Βασικό πλεονέκτημά του είναι ότι παράγει ρολόι μήκους περίπου ίσου με το μήκος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

## Κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων δεδομένων με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών πυλών Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s

Τέλος όπως προαναφέρθηκε στο κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων, ένα βασικό κριτήριο αξιολόγησης ενός συστήματος αποτελεί και η δυνατότητα ολοκλήρωσης του σε ένα μόνο πλινθίο. Το προτεινόμενο κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού αποτελείται από ένα φίλτρο Fabry-Perot καθώς και ενός συμβολόμετρου τύπου MZI, τα οποία στοιχεία είναι ολοκληρωμένα ήδη παρέχοντας την δυνατότητα για περαιτέρω ολοκλήρωση τους σε αυτή ενός μόνο πλινθίου.

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

### 2.5.2 Το φίλτρο Fabry-Perot



Σχήμα 25: Απεικόνιση του Φίλτρου Fabry-Perot

Το φίλτρο Fabry-Perot (FPF: *Fabry-Perot Filter*) αποτελείται από μία συντονισμένη κοιλότητα που σχηματίζεται από δύο παράλληλα κάτοπτρα [2.42]. Το φως εισέρχεται από μία ίνα εισόδου και αφού γίνει κάθετο στα κάτοπτρα με τη βοήθεια κατάλληλου φακού, περνά μέσα από την κοιλότητα και τέλος εστιάζεται ξανά με άλλον ένα φακό στο άκρο της ίνας εξόδου. Η λειτουργία του FPF βασίζεται στη συμβολή με διαίρεση πλάτους. Στην ανάλυση που ακολουθεί, έχουμε λάβει υπόψη μόνο τα φαινόμενα που συμβαίνουν μέσα στην κοιλότητα και θα παραλείψουμε τις ίνες εισόδου και εξόδου καθώς και τους φακούς και τις απώλειες που εισάγουν στο σήμα. Στο Σχήμα 25 βλέπουμε τη μορφή ενός ολοκληρωμένου φίλτρου Fabry-Perot. Στην πράξη, για να μην παρουσιάζονται ανεπιθύμητοι συντονισμοί από ανακλάσεις μεταξύ των δύο εξωτερικών πλευρών των κατόπτρων, οι εξωτερικές τους επιφάνειες βρίσκονται υπό ελαφριά κλίση και συχνά φέρουν αντί-ανακλαστική επιστρωση. Ωστόσο, οι εσωτερικές επιφάνειες των κατόπτρων βρίσκονται σε πλήρη παραλληλισμό.

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

$$L = \frac{i\lambda}{2n} = \frac{ic}{2nf} \quad (\text{εξίσωση 1})$$

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

### 2.5.3 Λειτουργία και χαρακτηριστικά

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

$$\vec{E}_{in} = E_{in} e^{-j\omega t} \quad (\text{εξίσωση 2})$$

τότε περνώντας από το πρώτο κάτοπτρο, το διαδιδόμενο πεδίο γίνεται

$$E = \sqrt{1 - R - A} E_{in} e^{-j\omega t} \quad (\text{εξίσωση 3})$$

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

$$E_{1T} = (1 - R - A) E_{in} e^{-j\omega t} e^{-j\beta L} \quad (\text{εξίσωση 4})$$

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

$$E_{1R} = \sqrt{R} \sqrt{1 - R - A} E_{in} e^{-j\omega t} e^{-j\beta L} \quad (\text{εξίσωση 5})$$

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

$$E_{2T} = R(1 - R - A) E_{in} e^{-j\omega t} e^{-3j\beta L} = R \cdot e^{-2j\beta L} E_{1T} \quad (\text{εξίσωση 6})$$

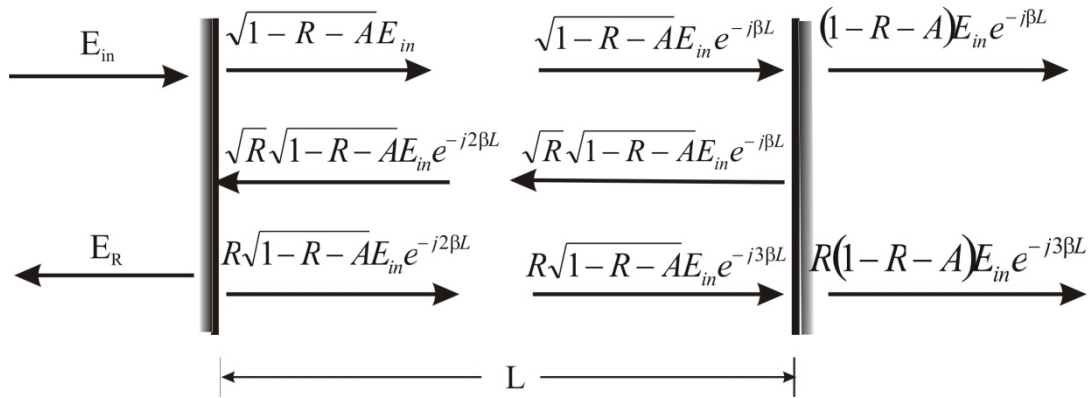
Κατά τον ίδιο τρόπο καταλήγουμε ότι:

**Κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων δεδομένων με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών πυλών Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s**

$$E_{NT} = (R \cdot e^{-2j\beta L})^N \cdot E_{IT} \quad (\text{εξίσωση 7})$$

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

Οι συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου και ο μηχανισμός των ανακλάσεων φαίνονται στο σχήμα 26.



**Σχήμα 26: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου των διαδοχικών ανακλάσεων**

Προσθέτοντας όλες τις συνεισφορές στην ένταση εξόδου και χρησιμοποιώντας τη σχέση  $\beta_x = 2\pi f\tau$  καταλήγουμε στη μιγαδική συνάρτηση μεταφοράς της έντασης του πεδίου:

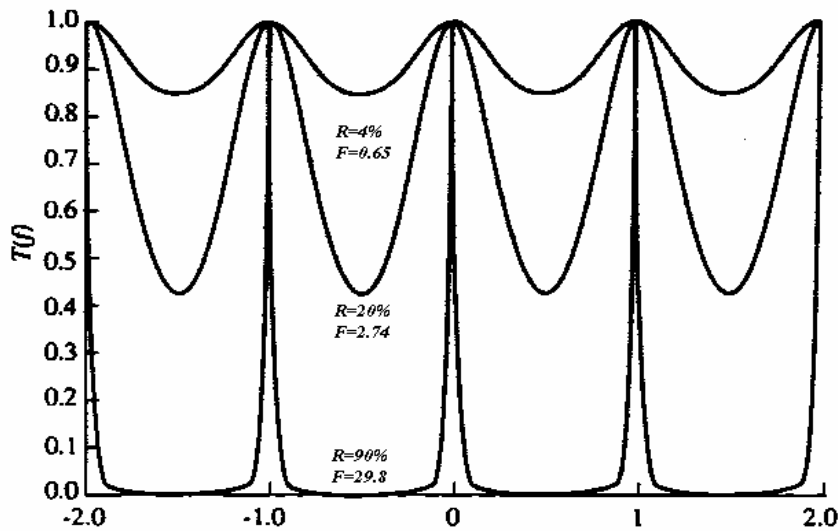
$$H(f) = \frac{E_o(f)}{E_i(f)} = (1 - A - R) \cdot e^{-j2\pi f\tau} \sum_{m=0}^{\infty} R^m \cdot e^{-j4\pi m f\tau} = \frac{1 - A - R}{1 - R \cdot e^{-j4\pi f\tau}} \cdot e^{-j2\pi f\tau} \quad (\text{εξίσωση 8})$$

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

$$T(f) = \left(1 - \frac{A}{1 - R}\right)^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{2\sqrt{R}}{1 - R} \cdot \sin \frac{4\pi f\tau}{2}\right)^2\right]^{-1} \quad (\text{εξίσωση 9})$$

και η γραφική της παράσταση φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα .

Κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων δεδομένων με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών πυλών Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s



Σχήμα 27: Η συνάρτηση μεταφοράς ισχύος (ή συνάρτηση του Airy) για απλά ‘πρότυπα’ συμβολόμετρα (etalon) με διαφορετική λεπτότητα

Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι έχουμε ενισχυτική συμβολή για συχνότητες  $f = \frac{m \cdot c}{2nL}, m = 1, 2, 3, \dots$  η οποία προσδίδει στο φίλτρο/συμβολόμετρο Fabry-Perot συμπεριφορά φίλτρου που επιτρέπει την προσπέλαση μόνο επιλεγμένων συχνοτήτων. Η περιοδικότητα με την οποία επαναλαμβάνεται η ενισχυτική συμβολή ονομάζεται «Ελεύθερη Φασματική Περιοχή» (*Free Spectral Range – FSR*), αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος του φίλτρου Fabry-Perot και δίνεται από τη σχέση:

$$FSR = \frac{c}{2nL} \quad (\text{εξίσωση 10})$$

εξαρτάται δηλαδή από το μήκος  $L$  της κοιλότητας.

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

$$FWHM = \frac{c}{2nL} \frac{1-R}{\pi\sqrt{R}} \quad (\text{εξίσωση 11})$$

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

$$F = \frac{FSR}{FWHM} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \quad (\text{εξίσωση 12})$$

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 27 το εύρος ημίσειας ισχύος της κάθε κορυφής μικραίνει όσο αυξάνεται η ανακλαστικότητα, άρα και το Finesse. Αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερη διακριτική ευχέρεια για το φίλτρο καθώς συμπιέζονται οι πλευρικοί λοβοί και είναι γενικά επιθυμητό.

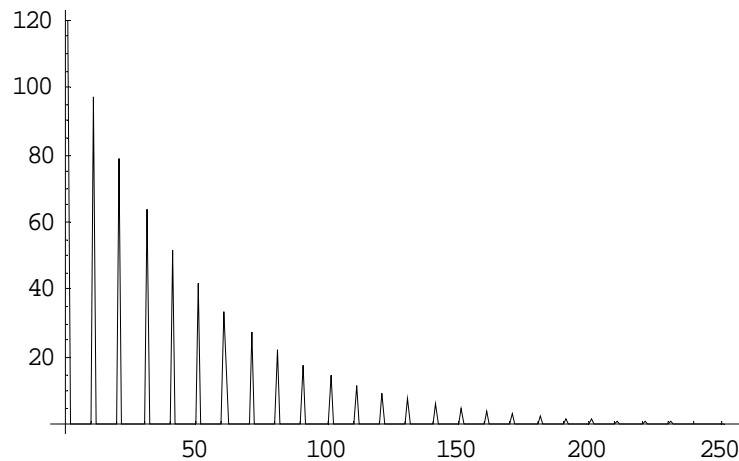
#### 2.5.4 Απόκριση του φίλτρου Fabry-Perot στο πεδίο του χρόνου

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

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

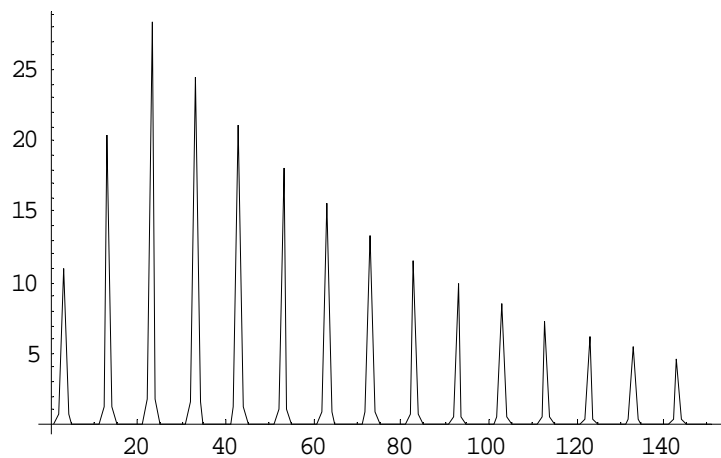
Είδαμε λοιπόν ότι αν κάποια χρονική στιγμή εισέλθει ένας παλμός στο συμβολόμετρο και δεν ακολουθήσει άλλος, θα πάρουμε στην έξοδο μία ακολουθία παλμών που τα πλάτη τους θα φθίνουν εκθετικά, όπως βλέπουμε στο Σχήμα 28. Ο χρόνος μέχρι να μηδενιστούν οι δευτερογενείς παλμοί καθορίζεται από την τιμή της λεπτότητας (Finesse) του φίλτρου, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από την ανακλαστικότητα των κατόπτρων. Τα πλάτη φθίνουν στην έξοδο γιατί κάθε παλμός αποτελείται από ένα ποσοστό της ισχύος που βρίσκεται εγκλωβισμένη στην κοιλότητα, η οποία και μειώνεται διαρκώς.

**Κύλιωμα ανίχνευσης πακέτων δεδομένων με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών πυλών Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s**



**Σχήμα 28:** Έξοδος του Fabry-Perot στο πεδίο του χρόνου για είσοδο ενός παλμού

Στην περίπτωση που έχουμε περισσότερους από έναν παλμό, η έξοδος του φίλτρου θα προκύπτει από την επαλληλία των εξόδων του κάθε παλμού χωριστά, χρονικά μετατοπισμένες μεταξύ τους. Σαν παράδειγμα παρουσιάζουμε στο Σχήμα 29 την έξοδο του φίλτρου αν στην είσοδο έχουμε τρεις διαδοχικούς παλμούς.

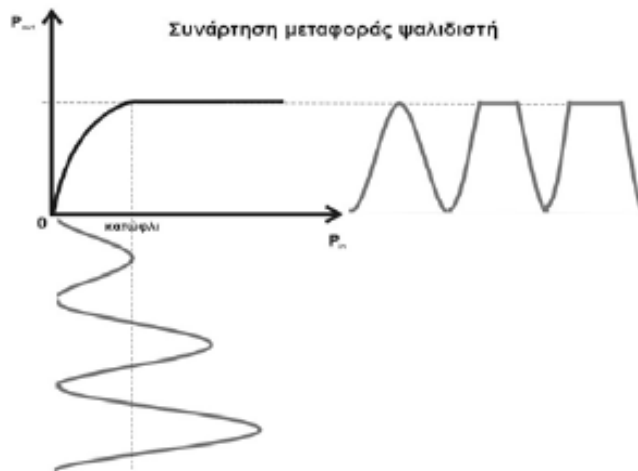


**Σχήμα 29:** Έξοδος του Fabry-Perot στο πεδίο του χρόνου για είσοδο τριών διαδοχικών παλμών

Τέλος, τα φίλτρα Fabry-Perot έχουν ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών σε πολλούς τομείς της οπτικής. Ιδιαίτερα όσον αφορά τον τομέα των φωτονικών τηλεπικοινωνιών, τα φίλτρα Fabry-Perot έχουν χρησιμοποιηθεί για αποπολυπλεξία μήκους κύματος (wavelength demultiplexing) [2.43,2.44], για ανάκτηση σήματος ρολογιού [2.45,2.46], για την καταπίεση ανεπιθύμητων αρμονικών και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης υψίρρυθμων οπτικών πηγών δακτυλίου ίνας [2.47], για τον πολλαπλασιασμό του ρυθμού μετάδοσης οπτικών παλμικών πηγών [2.48-2.51], καθώς, επίσης, και για την παραγωγή σημάτων ελέγχου-απόφασης από δυφία επικεφαλίδας για κόμβους μεταγωγής πακέτων [2.52].

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

Το συμβολόμετρο Mach-Zehnder λειτουργεί σαν κύκλωμα ψαλιδισμού υπό την επίδραση ισχυρού CW σήματος. Η βασική λειτουργία ενός κυκλώματος ψαλιδισμού συνίσταται στον περιορισμό της ισχύος εξόδου της διάταξη του εισερχόμενου σήματος. Τα κυκλώματα ψαλιδισμού βασίζονται στον έντονο κορεσμό του ενεργού στοιχείου μεταγωγής. Στην περίπτωση λειτουργίας ως ψαλιδιστής επιτυγχάνεται με κορεσμό των ημιαγωγικών οπτικών ενισχυτών που το απαρτίζουν μέσω της χρήσης του ισχυρού CW σήματος. Σχηματικά, η συνάρτηση μεταφοράς και η λειτουργία του κυκλώματος ψαλιδισμού φαίνονται στο Σχήμα 30, όπου η συνάρτηση μεταφοράς ισχύος τείνει να παραλληλιστεί προς τον οριζόντιο άξονα τιμών μετά από ένα συγκεκριμένο κατώφλι ισχύος εισόδου. Με τον τρόπο αυτό, σήματα ή παλμοί με διαφορετική στάθμη ισχύος στην είσοδο εξισώνονται στην έξοδο του στοιχείου.

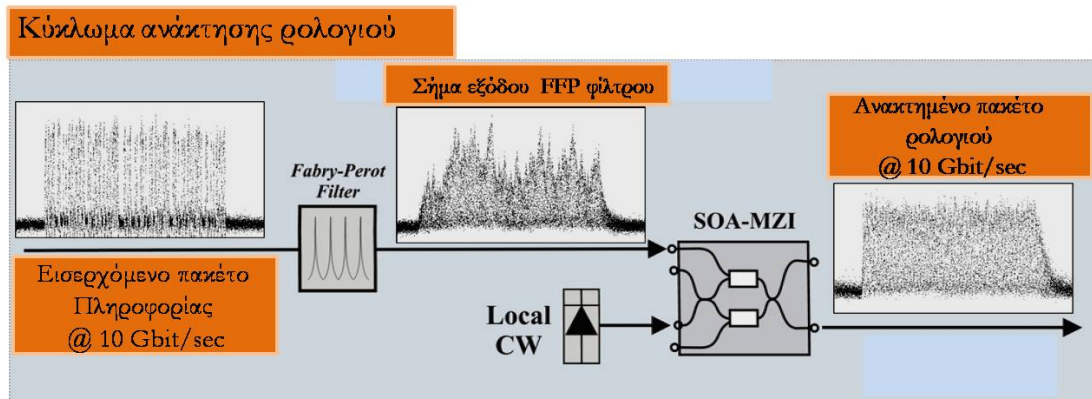


Σχήμα 30: Συνάρτηση μεταφοράς ενός κυκλώματος ψαλιδισμού και η έξοδος του κυκλώματος για ημιτονοειδή είσοδο μεταβαλλόμενου πλάτους.

Το κύκλωμα της αμιγώς οπτικής αναγέννησης ρολογιού φαίνεται στο Σχήμα 31. Τα πακέτα δεδομένων εισέρχονται στο φίλτρο Fabry-Perot στην έξοδο του οποίου παράγεται ένα πακέτο ρολογιού παρόμοιου μήκους με το αρχικό πακέτο του οποίου όμως οι παλμοί παρουσιάζουν έντονη διαμόρφωση πλάτους. Το πακέτο αυτό στην συνέχεια εισέρχεται στο διακόπτη MZI ο οποίος είναι ρυθμισμένος να λειτουργεί σαν ψαλιδιστής ισχύος κάτω από την επήρεια ισχυρού σήματος σταθερής ισχύος (*Continuous Wave – CW*). Απόρροια της λειτουργίας αυτής του οπτικού διακόπτη είναι η δημιουργία πακέτων ρολογιού παρόμοιου μήκους με τα αρχικά πακέτα δεδομένων.



## Κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων δεδομένων με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών πυλών Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s



Σχήμα 31: Το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι για τον σωστό συγχρονισμό του κυκλώματος απαιτούνται τουλάχιστον δύο bits στην αρχή του κάθε πακέτου, αριθμός σαφώς μικρότερος από οποιαδήποτε άλλη αμιγώς οπτική υλοποίηση. Οι χρόνοι κλειδώματος και σβέσης του ρολογιού εξαρτώνται από την λεπτότητα του φίλτρου Fabry-Perot, όπως ήδη αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Τέλος οι τυπικές τιμές σε ότι αφορά την χρησιμοποίηση του κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού σαν υποσύστημα στο κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων είναι δύο bits για το χρόνο κλειδώματος και 14 bits για τον χρόνο σβέσης.

### Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε ένα αμιγώς οπτικό κύκλωμα για την ανίχνευση πακέτων δεδομένων στα 10 Gb/s. Το προτεινόμενο κύκλωμα αποτελείται από το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού πακέτων με τη χρήση κορεσμένου διακόπτη τύπου MZI με ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή SOA και από ένα επιπλέον κύκλωμα το οποίο εκμεταλλεύεται το φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης κέρδους (XGM) σε ένα δεύτερο διακόπτη τύπου MZI, η οποία επιτελεί την λογική πράξη ΚΑΙ για την εξαγωγή του προπορευόμενου παλμού του εισερχόμενου πακέτου πληροφορίας. Συγκρίνοντας το με τα επιμέρους συστήματα ανίχνευσης πακέτων δεδομένων τα οποία έχουν ήδη αναπτυχθεί και παρουσιαστεί σε προηγούμενες ενότητες του κεφαλαίου αυτού, παρατηρούμε ότι η προτεινόμενη αρχιτεκτονική πάνω στην οποία βασίστηκε το συγκεκριμένο σύστημα υπερτερεί λόγω της απλότητας της, της διαφάνειας της στο είδος της πληροφορίας (σύγχρονες και ασύγχρονες ροές) καθώς και της δυνατότητας του συστήματος για περαιτέρω αύξηση της τάξης ολοκλήρωσης του καταλαμβάνοντας όσο το δυνατόν μικρότερο χώρο. Επιπρόσθετα λόγω της χρήσης ολοκληρωμένων διατάξεων MZI, οι ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος προκειμένου να λειτουργεί εποικοδομητικά είναι αρκετά χαμηλές καθιστώντας το βασικό ανταγωνιστή για την άμεση εφαρμογή του σε οπτικούς κόμβους μεταγωγής δεδομένων επόμενης γενιάς. Τέλος λόγω της αξιοποίησης του αμιγώς οπτικού υπό-κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού το οποίο παρουσιάστηκε στην

## **Κύλιωμα ανίχνευσης πακέτων δεδομένων με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών πυλών Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s**

ενότητα 2.5 παρέχεται τόσο συγχρονισμός του δικτύου σε επίπεδο δεδομένων (συγχρονισμός δεδομένων-κόμβου), όσο και συγχρονισμός του δικτύου σε επίπεδο πακέτων (συγχρονισμός πακέτων-κόμβου) στην έξοδο του υπο μελέτη συστήματος. Το τελευταίο, μπορεί να χαρακτηριστεί και ως σήμα σκανδαλισμού το οποίο θα ενεργοποιήσει περαιτέρω λειτουργίες επεξεργασίας και δρομολόγησης του αντίστοιχου πακέτου μέσα στον κόμβο (βλέπε Σχήμα 18) .

## Αναφορές

- [2.1] <http://www.informit.com/articles/article.aspx?p=26541>
- [2.2] [http://en.wikipedia.org/wiki/Synchronous\\_optical\\_networking#SONET.2FSD\\_network\\_management\\_protocols](http://en.wikipedia.org/wiki/Synchronous_optical_networking#SONET.2FSD_network_management_protocols)
- [2.3] E Kehayas, G.T.Kanellos, L.Stampoulidis, D. Tsiokos, N. Pleros, G. Guekos and H. Avramopoulos, “*Packet-format and Network-Traffic transparent Optical Signal Processing*”, IEEE/OSA, J. Lightwave Tech. Special Issue on Metro and Access Networks, vol. 22 pp.2548-2556, Nov. 2004.
- [2.4] D. Tsiokos et al., “*All-Optical Signal Processing Using Integrated Mach Zehnder Interferometric Switches for 40 Gb/s All-Optical Label-Swapped Networks*”, Conference on Broadband Networks (BROADNETS) 2006, Jan Hose, California.
- [2.5] D. Apostolopoulos, **D. Petrantonakis**, O. Zouraraki, L. Stampoulidis, E. Kehayas, N. Pleros and H. Avramopoulos, “*All-Optical Label/Payload Separation at 40 Gb/s*”, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 18, issue 19, pp.2023-2025, Oct. 2006.
- [2.6] O. Zouraraki, **D. Petrantonakis**, D. Apostolopoulos, E. Kehayas, N. Pleros and H. Avramopoulos, “*A 40 Gbps All-Optical Label/Payload Separation Circuit Using Hybrid Integrated MZI Switches*”, presented in 32th European Conference On Optical Communication - ECOC), Cannes, France 2006.
- [2.7] F. Ramos, et al., “*IST-LASAGNE: Towards All-Optical Label Swapping Employing Optical Logic Gates and Optical Flip-flops*”, IEEE/OSA J. Lightwave Technol., vol. 23, pp. 2993-3011, Oct. 2005
- [2.8] P. Bakopoulos, D. Tsiokos, D. Apostolopoulos, **D. Petrantonakis**, E. Kehayas, and H. Avramopoulos, “*All-Optical SOA-based Packet Detection for Packet-Rate Synchronization*”, presented at the European Conference of Optical Communications (ECOC) 2005, Tech. Dig. We. 2.4.5, Glasgow, Scotland, 2005
- [2.9] 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*,” *Opt. Express*, vol.13, no. 2, pp. 475–480, Jan. 2005
- [2.10] **Petrantonakis, D.**, Zakyntinos, P., Apostolopoulos, D., Poustie, A., Maxwell, G., Avramopoulos, H., “*All-Optical Four-Wavelength Burst Mode Regeneration Using Integrated Quad SOA-MZI Arrays*”, *Photonics Technology Letters, IEEE* Volume 20, Issue 23, Dec.1, 2008 Page(s):1953 – 1955
- [2.11] **D. Petrantonakis**, D. Apostolopoulos, O. Zouraraki, D. Tsiokos, P. Bakopoulos, and H.Avramopoulos, “*Packet-level synchronization scheme for optical packet switched network nodes*”, *Optics Express*, Vol. 14, Issue 26, pp. 12665-12669

- [2.12] Hassan Teimoori, Dimitrios Apostolopoulos, Kyriakos G. Vlachos, Cédric Ware, **Dimitrios Petrantonakis**, Leontios Stampoulidis, Hercules Avramopoulos, and Didier Erasme, “*Optical-Logic-Gate Aided Packet-Switching in Transparent Optical Networks*” *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 26, Issue 16, pp. 2848-2856
- [2.13] P. Bakopoulos, D. Tsiokos, D. Apostolopoulos, **D. Petrantonakis**, E. Kehayas and H. Avramopoulos “*All Optical SOA-based Packet Detection for Packet Rate Synchronization*”, ECOC 2005 Tech. Dig. We. 2.4.5, Glasgow, Scotland, 2005
- [2.14] K. Vyrsoinos, K. Christodouloupoulos, E. Kehayas, L. Stampoulidis, K. Vlachos, E. A. Varvarigos and H. Avramopoulos, “*ARTEMIS: A New Architecture for All-Optical Asynchronous Self-Routing Network with Efficient Contention Protection and QoS Differentiation*”, ECOC 2005, Tech. Dig. We4.P.083, Glasgow, Scotland, 2005
- [2.15] L. Stampoulidis, E. Kehayas, K. Vyrsoinos, K. Christodouloupoulos, D. Tsiokos, P. Bakopoulos, G. T. Kanellos, K. Vlachos, E. A. Varvarigos and H. Avramopoulos “*ARTEMIS: A 40 Gb/s All-Optical Self-Router using Asynchronous Bit and Packet-Level Optical Signal Processing*”, *GlobeCom 2005*, St. Louis, USA, 2005
- [2.16] Nishimura Kosuke et al, “*Bidirectional Injection Operation of SOA-MZI All-Optical Wavelength Converter*” IEIC Technical Report, VOL.105;NO.593(LQE2005 148-160);PAGE.55-60(2006)
- [2.17] Y. Shimazu and M. Tsukada, “*Ultrafast photonic ATM switch with optical output buffers*,” *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 10, pp. 265–272 Feb.1992
- [2.18] I. Glesk, J. P. Solokoff, and P. R. Prucnal, “*All-optical address recognition and self-routing in a 250 Gbit/s packet-switched network*,” *Electron. Lett.*,vol. 30, pp. 1322–1333 Aug. 1994
- [2.19] D. Cotter et al., “*Self-routing of 100 Gbit/s packets using 6 bit ‘keyword’ address recognition*,” *Electron. Lett.*, vol. 31, pp. 2201–2202, Dec. 1995
- [2.20] K.-L. Deng, I. Glesk, K. I. Kang, and P. R. Prucnal, “*Unbalanced TOAD for optical data and clock separation in self-clocked transparent OTDM networks*,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, pp. 830– 832, June 1997
- [2.21] X. Huang, P. Ye, M. Zhang and L.Wang, “*A novel self-synchronization scheme for all-optical packet networks*,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, pp. 645-647, March 2005.
- [2.22] N. Calabretta et al., “*Optical Signal Processing Based on Self-Induced Polarization Rotation in a Semiconductor Optical Amplifier*”, *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 22, pp. 372-381, Feb. 2004.
- [2.23] X. Huang, P. Ye, M. Zhang, and L. Wang, “*A novel self-synchronization scheme for all-optical packet networks*,” *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17**, 645-647 (2005).

- [2.24] T. J. Xia, Y.-H. Kao, Y. Liang, J. W. Lou, K. H. Ahn, O. Boyraz, G. A. Nowak, A. A. Said, and M. N. Islam, “*Novel self-synchronization scheme for high-speed packet TDM networks,*” IEEE Photon. Technol. Lett. **11**, 269-271 (1999).
- [2.25] Z. Yongpeng, and Y. Peida, “*Simple self-synchronization scheme for OTDM packet networks,*” in Proceedings of the 15th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS) 2002, pp. 373-374.
- [2.26] H. J. Lee, H. G. Kim, J. Y. Choi, K. Kim, and J. Lee, “*A simple packet level clock extraction scheme using a terahertz optical asymmetric demultiplexer,*” IEEE Photon. Technol. Lett. **11**, 1310–1312, (1999).
- [2.27] C. Bintjas, K. Yiannopoulos, N. Pleros, G. Theophilopoulos, M. Kalyvas, H. Avramopoulos, and G. Guekos, “*Clock recovery circuit for optical packets,*” IEEE Photon. Technol. Lett. **14**, 1363-1365 (2002).
- [2.28] N. Pleros, K. Vysokinos, C. Bintjas, K. Yiannopoulos, K. Vlachos, H. Avramopoulos and G. Guekos “*All-Optical Clock Recovery from short, asynchronous data packets at 10 Gb/s*”, Photonics Technology Letters, Vol. 15, No. 9, September 2003
- [2.29] [www.ciphotonics.com](http://www.ciphotonics.com)
- [2.30] N. Pleros, G. T. Kanellos, C. Bintjas, A. Hatziefremidis, and H. Avramopoulos, “*Optical Power Limiter Using a Saturated SOA-Based Interferometric Switch*”, Photonics Technology Letters, Vol. 16, No. 10, October 2004
- [2.31] O. Leclerc et al., “*Polarisation-independent InP push-pull Mach-Zehnder modulator for 20 Gbit/s soliton regeneration*”, Electron. Lett., Vol. 34, No.10, pp. 1011-1013, 1998
- [2.32] [http://www.rp-photonics.com/erbium\\_doped\\_fiber\\_amplifiers.html](http://www.rp-photonics.com/erbium_doped_fiber_amplifiers.html)
- [2.33] K. Yiannopoulos et al., “*Pulse Repetition Frequency Multiplication With Spectral Selection in Fabry–Perot Filters*”, IEEE J. Quantum Electron., vol. 40, No. 2, pp. 157-165, 2004
- [2.34] J. Manchester, J. Anderson, B. Doshi, and S. Dravida, “*IP over SONET,*” IEEE Com. Mag. **36**, 136-142 (1998).
- [2.35] D. Apostolopoulos, O. Zouraraki, **D. Petrantonakis**, P. Bakopoulos, D. Tsiokos, E. Kehayas and H. Avramopoulos, “*Bit- and Packet-Level Self-Synchronization for All-Optical Label-Switched Network Nodes with Transparency to Network-Traffic*” presented in the Optical Fiber Communication Conference (OFC) Anaheim, California March 5, 2006, OThS2
- [2.36] P. Bakopoulos, D. Tsiokos, O. Zouraraki, and H. Avramopoulos, “*Clock Compact all-optical packet clock and data recovery circuit using generic integrated MZI switches,*” Opt. Express **13**, 6401 (2005).
- [2.37] P. Zakyntinos, D. Apostolopoulos, O. Zouraraki, **D. Petrantonakis**, G. Theophilopoulos, A. Poustie, G. Maxwell and H. Avramopoulos “*Single Chip*

- Quad MZI array in a 40 Gb/s AOLS Front-end*, OFC 2007, Tech. Dig. OWH7, Anaheim, USA, 2007
- [2.38] E. Tangdiongga et al., “*Clock Recovery by a Fiber Ring Laser Employing a Linear Optical Amplifier*”, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 16, No. 2, pp.611-613, 2004
- [2.39] S. Vehovc et al., “*80 Gbit/s optical clock recovery with automatic lock acquisition using electrical phase-locked loop*”, Electron. Lett., vol. 39, No.8, pp. 673-674, 2003
- [2.40] C. Bornholdt et al., “*Self-pulsating DFB laser for all-optical clock recovery at 40 Gbit/s*”, Electron. Lett., vol. 36, No. 4, pp. 327-328, 2000
- [2.41] L. Yuhua et al., “*Wavelength and polarization insensitive all-optical clock recovery from 96-Gb/s data by using a two-section gain-coupled DFB laser*”, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 15, No. 4, pp. 590-592, 2003
- [2.42] P. E. Green, Jr., “*Fiber optic networks*”, Prentice-Hall Inc., NJ, Μετάφραση Κ. Καρούμπαλος, Ed. Α. Παπασωτηρίου & ΣΙΑ Ο. Ε., 1993.
- [2.43] T. Augustsson, “*Proposal of a DMUX with a Fabry-Perot all-reflection filterbased MMI configuration*”, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 13, No. 3, pp. 215-217, 2001.
- [2.44] M. M. Freire et al., “*Performance assessment of two-channel dispersionsupported transmission systems using single- and double-cavity Fabry-Perot filters as demultiplexers*”, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 7, No. 11, pp. 1360-1362, 1995
- [2.45] Xiang Zhou et al., “*A performance analysis of an all-optical clock extraction circuit based on Fabry-Perot filter*”, J. Lightwave Technol., vol.19, No. 5, pp. 603-613, 2001.
- [2.46] M. Jinno et al., “*Optical tank circuits used for all- optical timing recovery*”, IEEE J. Quantum Electron., vol. 28, No. 4, pp. 895-900, 1992
- [2.47] T. Wang et al., “*Comb-like filter preprocessing to reduce the pattern effect in the clock recovery based on SOA*”, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 14, No. 6, pp. 855-857, 2002
- [2.48] K. Yiannopoulos et al., “*Pulse Repetition Frequency Multiplication With Spectral Selection in Fabry-Perot Filters*”, IEEE J. Quantum Electron., vol. 40, No. 2, pp. 157-165, 2004.
- [2.49] Κ. Γιαννόπουλος, “*Κυκλώματα Υπερυψηλών Ταχυτήτων για Ψηφιακά Οπτικά Δίκτυα*”, Διδακτορική Διατριβή Ε.Μ.Π., Αθήνα 2004
- [2.50] T. Sizer, “*Increase in laser repetition rate by spectral selection,*” IEEE J. Quantum Electron., vol. 25, pp. 97–103, 1989
- [2.51] K. Serkland et al., “*Rate multiplication of a 59-GHz soliton source at 1550 nm,*” J. Lightwave Technol., vol. 16, pp. 670–677, 1998
- [2.52] K. Yiannopoulos et al., “*Generation of 40-GHz control signals from flag pulses for switching all-optical gates for use with optical packets*”, Opt. Lett., vol. 29, No. 3, pp. 241-243, 2004

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## Αμιγώς Οπτική 2R Αναγέννηση NRZ σημάτων με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών πυλών Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s

### 3.1 Εισαγωγή

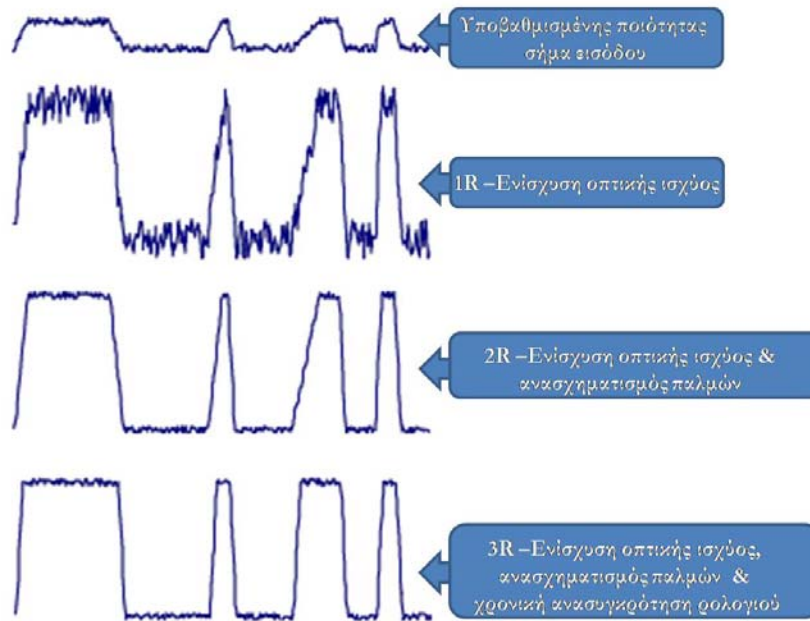
Μελετώντας τις τάσεις της εποχής, είναι εύκολα κατανοητό ότι διανύουμε μια εποχή της οποίας βασικό χαρακτηριστικό αποτελεί η αλματώδης τάση τόσο της αύξησης του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων, όσο και των διαφορετικών μορφών δεδομένων τα οποία ο εκάστοτε χρήστης επιθυμεί να αποστείλει ή να λάβει προκειμένου να εξυπηρετήσει προσωπικές τους ανάγκες [3.1]. Μέσα στα πλαίσια αυτής της κατεύθυνσης για όλο και υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, καθώς και διαφάνεια στο είδος της πληροφορίας, δεν θα ήταν δυνατόν να μην περιληφθούν και τα οπτικά δίκτυα τρίτης γενιάς. Προφανή λύση επομένως στο φαινόμενο αυτό δόθηκε με την χρήση αμιγώς οπτικών διατάξεων, τα οποία εφαρμόστηκαν στα αμιγώς οπτικά δίκτυα τρίτης γενιάς. Κύριο μέλημα δε των προσπαθειών αυτών ήταν η επικέντρωση τους στην πλήρη μετάβαση στο οπτικό επίπεδο των βασικότερων λειτουργιών που επιτελούνται σε ένα κόμβο δικτύου όπως η αναγέννηση των μεταδιδόμενων δεδομένων, αλλά και η μετατροπή μήκους κύματος, μια λειτουργία αναγκαία για την ορθή

δρομολόγηση των εισερχόμενων δεδομένων στους περαιτέρω οπτικούς κόμβους, γεγονός που επέφερε την ανεξαρτητοποίηση των σημερινών οπτικών δικτύων από πολύπλοκες ηλεκτρονικές διατάξεις [3.2].

Τόσο η αναγέννηση όσο και η μετατροπή μήκους κύματος αποτελούν κομβικής σημασίας λειτουργίες για ένα οπτικό δίκτυο τρίτης γενιάς. Η βασική αιτία χρήσης οπτικών αναγεννητών σε ένα οπτικό δίκτυο οφείλεται στην υποβάθμιση/ αλλοίωση του μεταδιδόμενου σήματος λόγω διαφόρων παραγόντων. Οι σημαντικότερες αιτίες που προκαλούν την μείωση της ποιότητας του σήματος είναι ο συσσωρευμένος θόρυβος από την χρήση οπτικών ενισχυτών, η χρωματική διασπορά, διάφορα μη γραμμικά φαινόμενα, η χρονική ολίσθηση καθώς και διάφορες άλλες ατέλειες της μετάδοσης και των παρεμβαλλομένων υποσυστημάτων. Απόρροια των φαινομένων αυτών είναι η μείωση του σηματοθορυβικού λόγου (*Signal to Noise Ratio*), θέτοντας περιορισμό στον αριθμό των συνεχόμενων κόμβων από τους οποίους μπορεί να διέλθει το σήμα έως ότου φτάσει στον επιθυμητό για αυτό κόμβο. Έρευνες έχουν δείξει ότι ο μέγιστος αριθμός κόμβων που μπορεί να ταξιδέψει το σήμα έως ότου καταστραφεί εντελώς είναι μόλις δέκα στον αριθμό, γεγονός που επιφέρει σημαντικό περιορισμό στην επεκτασιμότητα και την λειτουργική ευελιξία ενός οπτικού δικτύου [3.3]. Δεδομένης λοιπόν της κατάστασης αυτής, η αναγέννηση του σήματος δεδομένων αποτελεί κρίσιμη λειτουργία για την επίδοση όλου του δικτύου.



### 3.2 Οπτική αναγέννηση δεδομένων



Σχήμα 32: Μορφές αναγέννησης του υποβαθμισμένου οπτικού σήματος.

Όσον αφορά την οπτική αναγέννηση, αυτή χωρίζεται σε 2R και 3R αναγέννηση. Με τον όρο 2R αναφερόμαστε στην επανενίσχυση (Re-amplification) του εισερχόμενου σήματος καθώς και την επαναδιαμόρφωση του υποβαθμισμένου σήματος ( Re-shaping). Στην περίπτωση της 3R αναγέννησης, επιτελείται και επαναχρονισμός της πληροφορίας ( Re-timing) λόγω της ολίσθησης της φάσης των παλμών δεδομένων του μεταδιδόμενου σήματος. Παρόλο που ένας 3R αναγεννητής [3.4] παρουσιάζει όλα τα πλεονεκτήματα ενός αντίστοιχου 2R [3.5,3.6] και επιπλέον επανασυγχρονίζει το μεταδιδόμενο σήμα, παρουσιάζει επίσης και ένα σημαντικό μειονέκτημα σε σχέση με τον τελευταίο που δεν είναι άλλο από την εξαγωγή ρολογιού για τον επανασυγχρονισμό. Η ανάγκη αυτή οδηγεί σε διάταξη αυξημένης πολυπλοκότητας σε σχέση με μια 2R υλοποίηση, αυξάνοντας επίσης σημαντικά και το κόστος του αναγεννητή. Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε λοιπόν πως από πλευράς κόστους, η βέλτιστη λύση για την αναγέννηση των διαδιδόμενων σημάτων είναι η χρήση 2R αναγεννητών ως επί το πλείστον και η χρήση 3R διατάξεων σε κομβικά σημεία του δικτύου όπου ο επανασυγχρονισμός του σήματος είναι απολυτός αναγκαίος [3.6].

Πέρα από την βασική τους αναγεννητική λειτουργία, οι 2R αναγεννητές μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως εργαλεία για τον έλεγχο (monitoring) του δικτύου απ' ευθείας στο οπτικό στρώμα. Ο έλεγχος της επίδοσης του δικτύου είναι μια εξαιρετικής σημασίας λειτουργία σε ένα υψήρρυθμο δίκτυο μετάδοσης ώστε να επιτυγχάνεται η ομαλή λειτουργία του δικτύου, να προλαμβάνεται η απώλεια πληροφορίας λόγω βλάβης αλλά και να διασφαλίζεται η ποιότητα των προσφερόμενων υπηρεσιών. Οι 2R αναγεννητές που

βασίζονται σε SOA-MZI μπορούν να ελέγχουν το OSNR κατά μήκος του δικτύου καθώς και την διασπορά [3.7].

Η απλότητα, η προσαρμοστικότητα και η ανεξαρτησία από τον ρυθμό μετάδοσης των 2R αναγεννητών είναι ιδιαίτερα ελκυστικά στοιχεία στην κατασκευή πολυπλοκότερων δομών επεξεργασίας σήματος για δικτυακές εφαρμογές. Αριστές επιτυχημένες επιδείξεις οπτικών συστημάτων έχουν αναφερθεί για λειτουργία στα 10 Gb/s με χρήση και οπτικών αναγεννητών, τα οποία μπορούν να λειτουργήσουν και σε ρυθμούς της τάξης των 40 Gb/s. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η διαφανής διασύνδεση κόμβων με χρήση αναγεννητών στα 10 Gb/s [3.8,3.9], η ελεγχόμενη δημιουργία chirp στην έξοδο του 2R αναγεννητή για την καταπολέμηση της διασποράς [3.10] κ.α. Ακόμα, 2R αναγεννητικές διατάξεις βασισμένες σε SOA-MZI έχουν επιτυχημένα δοκιμαστεί σε εγκατεστημένα δίκτυα στη ταχύτητα των 10 Gb/s [3.11].

Εκτός από τους οπτικούς αναγεννητές βασικό στοιχείο στην ορθή λειτουργία ενός οπτικού κόμβου έχουν και οι μετατροπείς μήκους κύματος. Οι μετατροπείς μήκους κύματος αποτελούν ένα από τα βασικότερα, αν όχι το βασικότερο λειτουργικό στοιχείο ενός κόμβου σε ένα WDM δίκτυο [3.12].

### 3.3 Μετατροπέας Μήκους Κύματος

Όπως προαναφέρθηκε και παρουσιάστηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 1 της διατριβής, οι μετατροπείς μήκους κύματος αποτελούν ένα βασικό υποσύστημα για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας ενός οπτικού κόμβου. Η ραγδαία ανάπτυξη τους προήλθε από την αύξηση της χρήσης τους σε συστήματα μετάδοσης με χρήση της WDM και DWDM τεχνολογίας. Ένα σύστημα μετατροπής μήκους κύματος έχει ως βασικό στόχο την αντιγραφή του εισερχόμενου σήματος στον κόμβο στο κατάλληλο μήκος κύματος το οποίο δεικτοδοτεί και την μεταγωγή του πακέτου πληροφορίας στην αντίστοιχη πόρτα εξόδου του οπτικού κόμβου. Η απόδοση λοιπόν ενός τέτοιου συστήματος συνδέεται άμεσα με αυτήν του συνολικού κόμβου αφού μέσω των μετατροπέων μήκους κύματος επιτυγχάνεται η αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ πακέτων ίδιου μήκους κύματος, μέσω της αντιγραφής του ενός εκ των δύο σε διαφορετικό μήκος κύματος. Η αποδοτικότητα όμως του κόμβου δεν περιορίζεται μόνο στην σωστή λειτουργία ενός μετατροπέα μήκους κύματος. Βασικά χαρακτηριστικά που συντελούν στην αξιολόγηση του κόμβου είναι τόσο η δυνατότητα της μετατροπής των μηκών κύματος να γίνεται σε αμιγώς οπτικό επίπεδο, συνεπώς να μην επηρεάζει την συνολική ρυθμαπόδοση του κυκλώματος μειώνοντας την ταχύτητα μετάδοσης των πληροφοριών, αλλά συγχρόνως και η δυνατότητα ευελιξίας του συστήματος μετατροπής μήκους κύματος να λειτουργεί με διαφάνεια στο είδος της πληροφορίας που εισέρχεται στον κόμβο. Τέλος ένα ακόμα σημαντικό στοιχείο αξιολόγησης των αμιγώς οπτικών μετατροπέων μήκους κύματος είναι η δυνατότητα του να ολοκληρωθεί σε ένα πλινθίο,

## Αμιγώς Οπτική 2R Αναγέννηση NRZ σημάτων με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών πυλών Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s

γεγονός το οποίο αυτομάτως επιφέρει και μείωση τόσο του μεγέθους του οπτικού κόμβου, οδηγώντας την τεχνολογία σε υψηλού επιπέδου φωτονική ολοκλήρωση αλλά και μείωση του συνολικού κόστους κατασκευής ενός τέτοιου οπτικού κόμβου και συνολικά ενός αμιγώς οπτικού δικτύου μεταγωγής δεδομένων.

Δοθείσας λοιπόν της αναγκαιότητας χρήσης διατάξεων με χαρακτηριστικά οπτικής αναγέννησης του ληφθέντος σήματος όσο και της δυνατότητας μετατροπής των εισερχομένων μηκών κύματος σε αυτά για την ορθή δρομολόγηση τους με ταυτόχρονη εξυπηρέτηση όλων των προαναφερθέντων χαρακτηριστικών (διαφάνεια στα δεδομένα, ολοκληρωσιμότητα, χαμηλό κόστος και μειωμένο μέγεθος), καταφύγαμε στην χρήση οπτικών διακοπών τύπου Mach-Zehnder και συγκεκριμένα στις ολοκληρωμένες διατάξεις οπτικών αναγεννητών οι οποίες διατίθενται από την αγγλική εταιρία CIP (Centre for Integrated Photonics)[3.13].

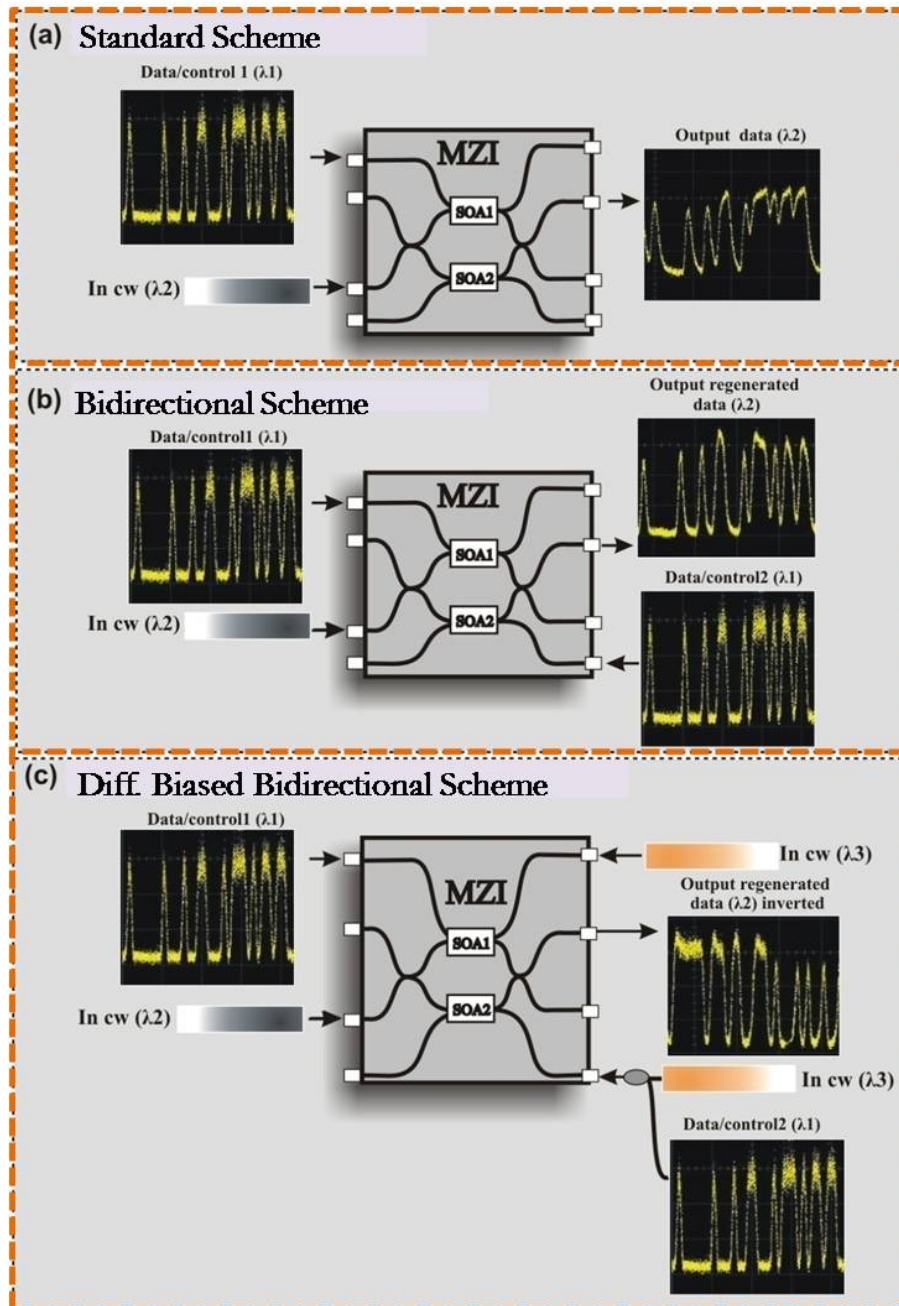
Οι οπτικοί διακόπτες τύπου Mach-Zehnder έχουν αποδειχθεί ότι αποτελούν ιδανικά στοιχεία για τη χρήση τους ως μετατροπείς μήκους κύματος με διαμορφωμένα σήματα επιστροφής στο μηδέν (Return-to-Zero) σε ρυθμούς μετάδοσης άνω των 100 Gb/s [3.14]. Αντίστοιχες περιπτώσεις διαμορφωμένων σημάτων (Non Return-to-Zero) σε ρυθμούς μετάδοσης 100 Gb/s και άνω δεν έχουν επιτευχθεί ακόμα, κυρίως λόγω του χρόνου ανάκαμψης του κέρδους των ημιαγωγικών οπτικών ενισχυτών. Καθώς οι ρυθμοί μετάδοσης αυξάνονται συνεχώς σε επίπεδο διφύου, απομακρύνονται όλο και περισσότερο από το χρόνο ανάκαμψης των οπτικών ενισχυτών, η χρησιμοποίηση του απλού σχήματος μετατροπής μήκους κύματος δεν είναι πλέον εφικτή, δημιουργώντας τόσο διαπλάτυνση στο εύρος του παλμού όσο και ανεπιθύμητη διαμόρφωση συνολικά στην έξοδο των οπτικών πυλών. Τα φαινόμενα αυτά δεν γίνεται να αντισταθμιστούν με την χρήση της διαφορετικής διαμόρφωσης φάσης αξιοποιώντας δυο σήματα ελέγχου (*push-pull αρχιτεκτονική*) όπως συμβαίνει στα RZ σήματα [3.15]. Στα 40 Gb/s έως και σήμερα δύο αρχιτεκτονικές έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς για την μετατροπή μήκους κύματος NRZ διαμορφωμένων πακέτων. Στην πρώτη περίπτωση τα σήματα ελέγχου καθυστερούνται κατά ένα διφύο μεταξύ τους εισερχόμενα ομόρροπα μέσα στην οπτική πύλη [3.15], ενώ στην δεύτερη περίπτωση τα σήματα ελέγχου, τα οποία είναι ακριβώς τα ίδια, εισέρχονται αντίρροπα μέσα στην οπτική πύλη MZI [3.17]. Στο κεφάλαιο αυτό της παρούσας διδακτορικής διατριβής η αρχιτεκτονική η οποία προτείνεται αποτελεί συνέχεια πρόσφατης ερευνητικής μελέτης που διεξήχθη στο εργαστήριο φωτονικών επικοινωνιών σε ρυθμούς μετάδοσης 10 Gb/s, η οποία και ολοκληρώθηκε επιτυχώς, με χαρακτηριστικό σημείο την δυνατότητα αναγέννησης του σήματος στην έξοδο του συστήματος [3.17-3.19]. Επιπρόσθετα η αρχιτεκτονική αυτή χρησιμοποιήθηκε σε διατάξεις επαναλαμβανόμενων βρόγχων, μέσω της οποίας μελετήθηκε η δυνατότητα αξιοποίησης της σε συνεχόμενους κόμβους [3.19]. Το προτεινόμενο σύστημα προς μελέτη αξιοποιεί την βασική αρχή λειτουργίας της αντίρροπης κατεύθυνσης των

**Αμιγώς Οπτική 2R Αναγέννηση NRZ σημάτων με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών πυλών  
Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s**

σημάτων ελέγχου μέσα στην οπτική πύλη με την διαφορά ότι χρησιμοποιείται ένα εξωτερικό σήμα συνεχούς εκπομπής διαφορετικού μήκους κύματος από το εισελθών αλλά και από αυτό των σημάτων ελέγχου με σκοπό την αύξηση της ευελιξίας της ρύθμισης τόσο του κέρδους του κάθε ενισχυτή της οπτικής πύλης όσο και της φάσης που θα δώσει στο εισερχόμενο σήμα κατά την διέλευση του από τις δυο διαδρομές της οπτικής πύλης. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική θα μελετηθεί σε ρυθμούς μετάδοσης 40 Gb/s για την μετατροπή μήκους κύματος NRZ σημάτων, παρουσιάζοντας βελτιστοποίηση του σήματος εξόδου στην διαμόρφωση πλάτους και στην συνολική ισχύ εξόδου (2R –*αναγέννηση*). Το προς μελέτη σύστημα εξετάστηκε με την χρήση πακέτων σε ρυθμούς μετάδοσης 40 Gb/s διαμορφωμένα από ψευδοτυχαία ακολουθία  $2^7-1$ , παρουσιάζοντας βελτιωμένα χαρακτηριστικά αναγέννησης του σήματος σε σύγκριση με τις ήδη υπάρχουσες αρχιτεκτονικές, δίνοντας ένα αρνητικό ενεργειακό «πέναλι» της τάξης των 1.7 dB σε σχέση με το εισερχόμενο σήμα [3.20]. Τόσο η προτεινόμενη αρχιτεκτονική μετατροπής μήκους κύματος με ταυτόχρονη αναγέννηση των εισερχομένων δεδομένων, όσο και οι υπάρχουσες έως και σήμερα άλλες αρχιτεκτονικές αναλύονται στην επόμενη παράγραφο.

### 3.4 Αρχιτεκτονικές μετατροπής μήκους κύματος με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών αναγεννητών

Προκειμένου να επιτευχθεί η αμιγώς οπτική μετατροπή μήκους κύματος ενός σήματος NRZ με χρήση SOA-MZI σε ένα κόμβο έχουν προταθεί διάφορες αρχιτεκτονικές.

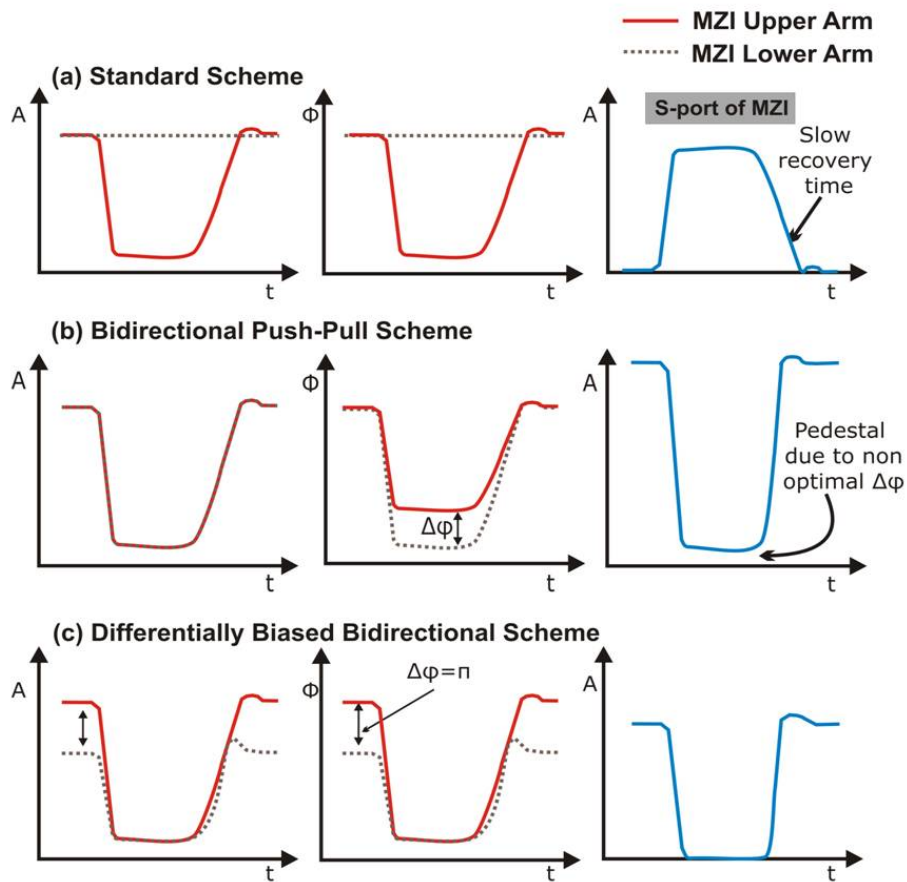


Σχήμα 33: Διάγραμμα λειτουργίας αρχιτεκτονικών μετατροπής μήκους κύματος

Το Σχήμα 33 παρουσιάζει ενδεικτικά τις δυο επικρατέστερες αρχιτεκτονικές για μετατροπή μήκους κύματος στα 40 Gb/s με χρήση του οπτικού διακόπτη Mach-Zehnder καθώς και την προτεινόμενη από εμάς αρχιτεκτονική η οποία μελετήθηκε και υλοποιήθηκε στο ΕΦΕ.

Συγκεκριμένα το πρώτο διάγραμμα (σχήμα 33α) παρουσιάζει την αρχή λειτουργίας της **απλής αρχιτεκτονικής** (*standard scheme*) για την μετατροπή του μήκους κύματος των NRZ δεδομένων. Η αρχιτεκτονική αυτή περιλαμβάνει την χρήση ενός μόνο σήματος ελέγχου, το οποίο επηρεάζει το κέρδος και την φάση του ενός μόνο εκ των δυο CW εισερχομένων σημάτων [3.16]. Η λύση αυτή αν και παρουσιάζει ευκολία στην υλοποίηση της καθώς και χαμηλό κόστος, παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα. Κυριότερα αυτών, είναι η διεύρυνση των παλμών κατά την έξοδό τους από το οπτικό συμβολόμετρο MZI και η εξάρτηση της ποιότητας τους από την αρχική ακολουθία δεδομένων, λόγω του ανομοιογενή κορεσμού του κέρδους των δύο SOAs. Τα προβλήματα αυτά προσπαθεί να τα αντισταθμίσει με την σειρά της η δεύτερη αρχιτεκτονική που έχει προταθεί σήμερα και αποτελεί την **συνδεσμολογία αντίρροπων σημάτων ελέγχου** (*bidirectional scheme*) μέσα στη οπτική πύλη [3.16]. Στο σενάριο αυτό το οποίο απεικονίζεται στο σχήμα 33 (β), δυο πανομοιότυπα σήματα ελέγχου φτάνουν ταυτόχρονα στις εισόδους ελέγχου της οπτικής πύλης MZI, με αποτέλεσμα στην έξοδο του συστήματος μας να λαμβάνουμε ένα αντεστραμμένο αντίγραφο του εισερχόμενου σήματος εισόδου. Τα δύο σήματα ελέγχου προκαλούν την ίδια διαμόρφωση κέρδους στους SOAs (XGM) αλλά προκαλούν διαφορετική στροφή φάσης στις δύο συνιστώσες του CW σήματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την επίτευξη μιας δυναμικής ισορροπίας κερδών στο MZI και μιας σταθερής όσον αφορά το πλάτος του σήματος εξόδου WC λειτουργίας με ενισχυμένα αναγεννητικά χαρακτηριστικά. Παρόλα αυτά όμως η χρήση αυτής της τεχνικής δεν εξασφαλίζει ελεγχόμενη ισορροπία στη στροφή φάσης που προκαλούν οι δύο ημιαγωγοί με αποτέλεσμα η μεταγωγή να μην είναι ιδανική και να εμφανίζεται ένα υπόβαθρο θορύβου στην έξοδο του κυκλώματος. Τέλος το σχήμα 33 (γ) απεικονίζει την συνδεσμολογία της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής η οποία αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και ονομάζεται **διαφορικά πολωμένο σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου** (*differentially biased bidirectional scheme*) [3.20,3.21]. Η αρχιτεκτονική αυτή στηρίζεται στην φιλοσοφία της bidirectional με την διαφορά όμως ότι στην συγκεκριμένη διάταξη χρησιμοποιούνται δυο εξωτερικά σήματα CW για καθένα εκ των δυο ημιαγωγικών οπτικών ενισχυτών που περιλαμβάνει η οπτική πύλη MZI. Το σήμα εξόδου της αρχιτεκτονικής αυτής αποτελεί πανομοιότυπο αντίγραφο του σήματος εισόδου, σε διαφορετικό μήκος κύματος από το αρχικό. Ο ρόλος του του εξωτερικού σήματος σταθερής ισχύος (CW) είναι να πολώνει διαφορικά του δύο SOAs του MZI, επιτρέποντας την επίτευξη ελεγχόμενης ισορροπίας τόσο για το κέρδος των ημιαγωγών όσο και για την φάση τους.

Αμιγώς Οπτική 2R Αναγέννηση NRZ σημάτων με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών πυλών  
Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s



Σχήμα 34: Αρχή λειτουργίας των σχημάτων: (a) κλασσικό σχήμα (standard scheme), (b) σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου (bidirectional scheme) και (c) διαφορικά πολωμένο σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου. Η αριστερή και η μεσαία στήλη δείχνουν το πλάτος και την φάση αντίστοιχα των CW συνιστωσών στην έξοδο των δύο SOAs. Η δεξιά στήλη δείχνει το αντίστοιχο πλάτος του σήματος εξόδου στην θύρα μεταγωγής του MZI.

Το σχήμα 34 παρέχει μια γραφική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας των τριών αρχιτεκτονικών για την μετατροπή των δεδομένων σε διαφορετικό μήκος κύματος. Η αριστερή και μεσαία στήλη παρουσιάζουν το πλάτος και την φάση των δυο CW σημάτων καθώς διέρχονται μέσα από τους ημιαγωγικούς οπτικούς ενισχυτές της οπτικής πύλης, ενώ η δεξιά στήλη απεικονίζει το σήμα που εξέρχεται από την πόρτα μεταγωγής της οπτικής πύλης. Συγκεκριμένα η εικόνα 34 (α) αναφέρεται στην περίπτωση της απλής αρχιτεκτονικής στην οποία οι μεταβολές του κέρδους και της φάσης επιτυγχάνονται μόνο στο ένα από τα δύο CW λόγω της παρουσίας μόνο ενός σήματος ελέγχου σε ένα από τους δυο SOAs που περιλαμβάνει το MZI. Στη περίπτωση αυτή εμφανίζεται το φαινόμενο της διασυμβολικής παρεμβολής καθώς το σήμα εξέρχεται της οπτικής πύλης μεταξύ δυο πεδίων με διαφορετικό πλάτος, με αποτέλεσμα η μεταγωγή του σήματος να είναι ανολοκλήρωτη και να εξαρτάται αρκετά από την μορφή των δεδομένων. Επιπρόσθετα η μη δυνατή αντιστάθμιση του

κέρδους του SOA έχει σαν αποτέλεσμα την αργή μετάβαση του χρόνου ανάκαμψης του κέρδους του SOA το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την διαπλάτυνση των παλμών κατά την έξοδο τους από την οπτική πύλη. Το σχήμα 34(b) απεικονίζει το πλάτος και η φάση των δύο CW συνιστωσών όταν το σύστημα λειτουργεί με την bidirectional αρχιτεκτονική, στην οποία δύο πανομοιότυποι παλμοί ελέγχου ταξιδεύουν στους δύο βραχίονες του MZI σε αντίθετες κατευθύνσεις. Οι δύο παλμοί ελέγχου εισάγουν την ίδια διαμόρφωση στο κέρδος των δύο ημιαγωγικών οπτικών ενισχυτών με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται μια συνεχής ισορροπία κερδών στο MZI, τόσο όταν υπάρχουν παλμοί ελέγχου όσο κατά την απουσία αυτών. Η ελεγχόμενη μεταβολή των κερδών των SOAs οδηγεί και σε ελεγχόμενη διαφορά φάσης μεταξύ των δύο CW συνιστωσών. Η διαφορά της φάσης που δημιουργείται στην περίπτωση του σχήματος αντίρροπων σημάτων ελέγχου, δεν οφείλεται στο μεγαλύτερο ποσοστό της στον διαφορετικό κορεσμό των δύο SOAs με σκοπό την διαφοράς φάσης  $\pi$  μεταξύ των CW συνιστωσών, όπως στην περίπτωση του κλασσικού σχήματος. Σε αυτό το σχήμα, τον καταλυτικό ρόλο για την επίτευξη της μεταγωγής τον έχει ο παράγοντας διεύρυνσης φασματικής γραμμής. Συγκεκριμένα η διαφορά της φάσης που υπόκειται ένα σήμα όταν αυτό διέρχεται από τον SOA εξαρτάται τόσο από την μεταβολή του κέρδους του τελευταίου όσο και από τον παράγοντα διεύρυνσης φασματικής γραμμής του. Ο παράγοντας αυτός όμως λαμβάνει διαφορετική τιμή ανάλογα με την κατεύθυνση διάδοσης του σήματος. Στο σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου λοιπόν, η αντίρροπη διάδοση των παλμών ελέγχου συνοδεύεται και από διαφορετικό παράγοντα διεύρυνσης φασματικής γραμμής για κάθε CW συνιστώσα. Με κατάλληλη ισχύ των σημάτων ελέγχου η διαφορά αυτή στον παράγοντα διεύρυνσης φασματικής γραμμής της κάθε CW συνιστώσα μπορεί να λάβει τέτοια τιμή ώστε η διαφορά φάσης των CW συνιστωσών να λάβει την ιδανική για μεταγωγή τιμή  $\pi$ . Το σήμα εξόδου του MZI, το οποίο είναι το συζυγές του αρχικού σήματος εισόδου, παρουσιάζει μικρότερους χρόνους ανάκαμψης και σβέσης των παλμών σχεδόν διπλάσιο άνοιγμα ματιού σε σχέση με την κλασσική υλοποίηση μετατροπέα μήκους κύματος. Παρόλα αυτά, η βελτιστοποίηση της διαδικασίας επίτευξης ισορροπίας μεταξύ των κερδών των SOAs και η απουσία ελέγχου στην φάση των σημάτων οδηγούν στην μη ιδανική μεταγωγή του σήματος δεδομένων (όχι ακριβώς  $\pi$  στροφή φάσης) και στην εμφάνιση ενός υπόβαθρου θορύβου στην θύρα μεταγωγής του διακόπτη.

Το σχήμα 34(c) τέλος, δείχνει το πλάτος και την φάση των δύο CW συνιστωσών στο διαφορικά πολωμένο σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου. Η επίτευξη της διαφορετικής πόλωσης των δύο SOAs πραγματοποιείται με την χρήση ενός εξωτερικού συνεχούς κύματος (CW), το οποίο εισάγεται στον SOA του κάτω βραχίονα του συμβολόμετρου MZI, με σκοπό την επιβολή διαφοράς φάσης  $\pi$  μεταξύ των δύο CW συνιστωσών εισόδου κατά την απουσία παλμού ελέγχου. Στην περίπτωση που ένας παλμός ελέγχου εισέρχεται στο MZI, οι CW συνιστώσες εισόδου βλέπουν το ίδιο κέρδος και υπόκεινται την ίδια στροφή στην



**Αμιγώς Οπτική 2R Αναγέννηση NRZ σημάτων με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών πυλών  
Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s**

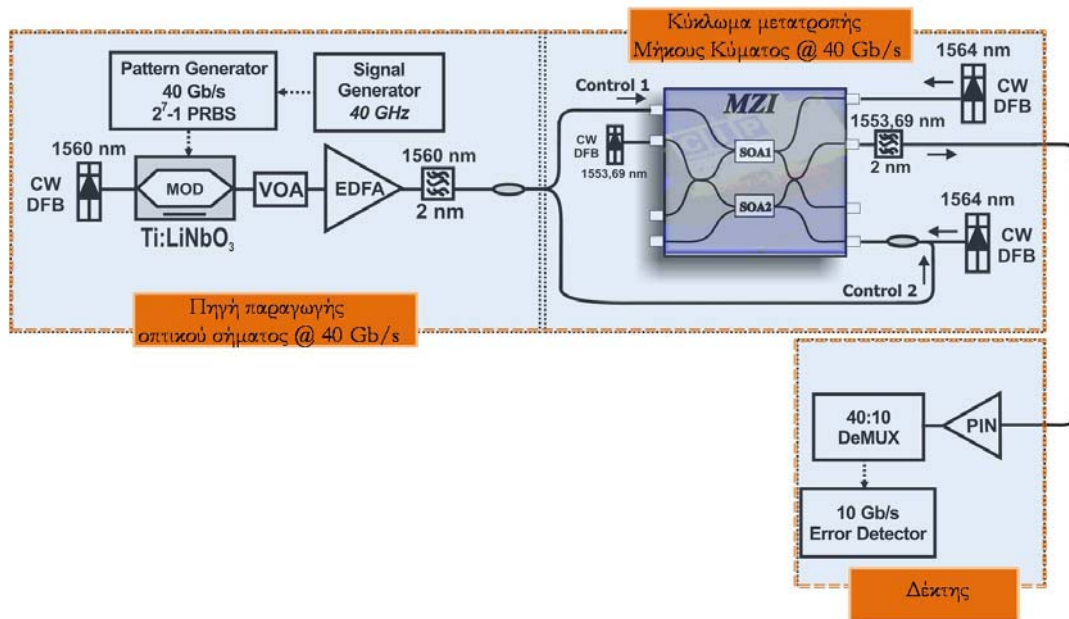
φάση τους, με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται ιδανική αφαιρετική συμβολή στην θύρα μεταγωγής του διακόπτη. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η παρουσία στην έξοδο του διακόπτη ενός σήματος το οποίο παρουσιάζει ιδανικό επίπεδο '0' απουσία οποιουδήποτε υποβάθρου θορύβου. Αξίζει να σημειώσουμε πως και σε αυτή την περίπτωση το σήμα εξόδου του διακόπτη είναι το συζυγές του αρχικού σήματος δεδομένων.

Στην περίπτωση της ύπαρξης σήματος ελέγχου, η μεταβολή του κέρδους και της φάσης είναι η ίδια και στους δύο βραχίονες της οπτικής πύλης, οδηγώντας σε βέλτιστη αναιρετική συμβολή στην έξοδο της πύλης, χωρίς την παρουσία υποβάθρου όπως παρατηρούσαμε στην προηγούμενη αρχιτεκτονική. Με τον τρόπο επομένως αυτό επιτυγχάνουμε όχι μόνο να αξιοποιήσουμε τις δυνατότητες μείωσης του θορύβου που μας προσφέρει η προηγούμενη αρχιτεκτονική αλλά επιπρόσθετα καταφέρνουμε να παρέχουμε και βελτιστοποίηση της μορφής των δεδομένων καταπιέζοντας τον θόρυβο που υπάρχει στο κακό μηδέν του σήματος εξόδου της πύλης μας.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκε λεπτομερής ανάλυση και προσδιορισμός της επίδοσης του προτεινόμενου σχήματος αμιγούς οπτικής αναγέννησης (διαφορικά πολωμένο σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου) και αντιπαράβολή των αποτελεσμάτων με εκείνα των υπολοίπων δύο συνδεσμολογιών [3.22].

### 3.5 Πειραματική Διάταξη

Στο σχήμα 35 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη, η οποία και χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας του προτεινόμενου σχήματος μετατροπής μήκους κύματος στα 40 Gb/s σε σχέση με τις ήδη υπάρχουσες αρχιτεκτονικές για την μετατροπή μήκους κύματος πακέτων με NRZ (Non-Return-to-Zero) διαμόρφωση.



Σχήμα 35: Πειραματική διάταξη

Η διάταξη μπορεί να μελετηθεί μεμονωμένα, διαχωρίζοντας την σε τρία υποσυστήματα, την πηγή παραγωγής οπτικού σήματος σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s, μέσω της οποίας διαμορφώνεται το οπτικό σήμα εισόδου, το υπό μελέτη σύστημα μετατροπής μήκους κύματος το οποίο εκμεταλλεύεται την χρήση μιας υβριδικά ολοκληρωμένης οπτικής πύλης τύπου MZI, καθώς και από τον δέκτη ο οποίος και λαμβάνει σήματα σε ρυθμούς μετάδοσης 40 Gb/s για την ανίχνευση λαθών. Η πηγή παραγωγής του οπτικού σήματος αποτελείται από μια πηγή εκπομπής συνεχούς μήκους κύματος στα 1560 nm (CW 1) το οποίο εισέρχεται σε ένα ηλεκτρο-οπτικό διαμορφωτή πλάτους νιοβικού λιθίου με προσμίξεις τιτανίου ( $\text{Ti:LiNbO}_3$ ) ο οποίος οδηγείται από μια 40 Gb/s παλμογεννήτρια, η οποία παράγει  $2^7-1$  συνεχόμενης ροής ψευδοτυχαίες ακολουθίες. Τα διαμορφωμένα πακέτα πληροφορίας εν συνεχεία εισέρχονται σε ένα μεταβλητής εξασθένησης οπτικό εξασθενητή ο οποίος ακολουθείται από ένα οπτικό ενισχυτή με χρήση ίνας ερβίου, προκειμένου να υποβαθμιστεί η ποιότητα του σήματος σχετικά με το σηματοθορυβικό λόγο, προτού διασπαστεί σε δυο ίδια σήματα ελέγχου, τα οποία προσδιορίζονται στο σχήμα 33 σαν το σήμα ελέγχου 1 και σήμα ελέγχου 2 αντίστοιχα. Ο λόγος αντίθεσης των άσων προς τα

**Αμιγώς Οπτική 2R Αναγέννηση NRZ σημάτων με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών πυλών  
Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s**

μηδενικά (*extinction ratio*) των δύο αυτών σημάτων μπορεί να μειωθεί με την χρήση ενός ελεγκτή πόλωσης πριν το σήμα εισέλθει στον ηλεκτρο-οπτικού διαμορφωτή πλάτους νιοβικού λιθίου με προσμίξεις τιτανίου. Εν συνεχεία το σήμα αφού διαμορφωθεί πλήρως εισέρχεται στο δεύτερο υποσύστημα που είναι και το βασικό κομμάτι του κεφαλαίου αυτού όπου και μετατρέπεται το μήκος κύματος του σε 1553,9 nm. Το εξερχόμενο σήμα φιλτράρεται με την χρήση ενός ζωνοπερατού φίλτρου με εύρος 2 nm, προκειμένου να βελτιώσουμε τον σηματο-θορυβικό λόγο στην έξοδο του οπτικού διακόπτη. Στην περίπτωση της απλής αρχιτεκτονικής χρησιμοποιείται μόνο ένα σήμα ελέγχου. Στην περίπτωση της bidirectional, τα δυο σήματα ελέγχου (*σήμα ελέγχου 1 & σήμα ελέγχου 2*) εισέρχονται αντίρροπα στις θύρες ελέγχου της οπτικής πύλης, με το σήμα ελέγχου ένα να επηρεάζει τον ένα SOA της πύλης και το σήμα ελέγχου 2 να επηρεάζει τον δεύτερο SOA αντίστοιχα. Τα δύο σήματα ελέγχου έχουν συγχρονιστεί προκειμένου να φτάνουν ταυτόχρονα στους δυο SOAs, με αποτέλεσμα στην έξοδο του συστήματος να λαμβάνουμε ένα αντεστραμμένο πανομοιότυπο σήμα με αυτό που εισέρχεται στο υπό μελέτη σύστημα μας. Τέλος στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική μας δυο επιπρόσθετα CW σήματα ίδιου μήκους κύματος στα 1564 nm (CW3 & CW4), εισέρχονται αντίρροπα σε σχέση με το σήμα εισόδου στους SOA 1 & SOA 2. Βασικός στόχος της χρησιμοποίησης των δυο CW, αποτελεί η ευελιξία ανεξάρτητης ρύθμισης του κέρδους κάθε ενισχυτή μεμονωμένα αλλά και της μεταβολής της φάσης των εισερχομένων σημάτων τα οποία κινούνται ανεξάρτητα στις δυο διαδρομές της οπτικής πύλης MZI. Ο βασικός στόχος της αξιοποίησης των εξωτερικών σημάτων CW είναι να βοηθήσει την διαμόρφωση του κέρδους των ημιαγωγικών οπτικών ενισχυτών προκειμένου να επιτυγχάνεται διαφορά φάσης  $\pi$  μεταξύ των σημάτων που διέρχονται του SOAs χωρίς να είναι αναγκαία η παρουσία σημάτων ελέγχου μέσα στην οπτική πύλη. Οι ενεργειακές στάθμες των σημάτων ελέγχου ρυθμίζονται κατάλληλα προκειμένου να διασφαλίσουν την ίδια μεταβολή του κέρδους και της φάσης στους SOAs που προκαλούν τα δυο εξωτερικά CW σήματα. Επιπρόσθετα επιτυγχάνουν την βελτιστοποίηση της αναιρετικής συμβολής στην έξοδο της οπτικής πύλης με αποτέλεσμα να καθαρίζει το «μηδέν» στο σήμα εξόδου αυξάνοντας αισθητά το σηματοθορυβικό λόγο στο εξερχόμενο σήμα του υπό μελέτη συστήματος μας. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι η οπτική μας πύλη αποτελείται από δυο ημιαγωγικούς οπτικούς ενισχυτές μήκους 1.6 μm με 500 μm mode converters και στις δυο πλευρές, κέρδος ασθενούς σήματος 28 dB και 25 ps χρόνο ημίσειας ζωής για το χρόνο ανάκαμψης όταν οι οπτικοί ενισχυτές έχουν κορεσμένο το κέρδος τους. Το ρεύμα των ενισχυτών είναι 300 mA και για τους δυο οπτικούς ενισχυτές. Εν τέλει το σύστημα μας αξιολογήθηκε μέσω μετρήσεων σφαλμάτων στο παραγόμενο σήμα που εξέρχεται του μετατροπέα μήκους κύματος στο δέκτη μας. Ο δέκτης μας λαμβάνει το σήμα που παράγει ο μετατροπέας μήκους κύματος σε ρυθμούς μετάδοσης 40 Gb/s και το αποπολυπλέκει σε τέσσερα κανάλια των 10 Gb/s. Το ηλεκτρικό πλέον σήμα αψότου αποπολυπλεχθεί εισέρχεται στο σύστημα μέτρησης ρυθμού σφαλμάτων BERT (Bit Error

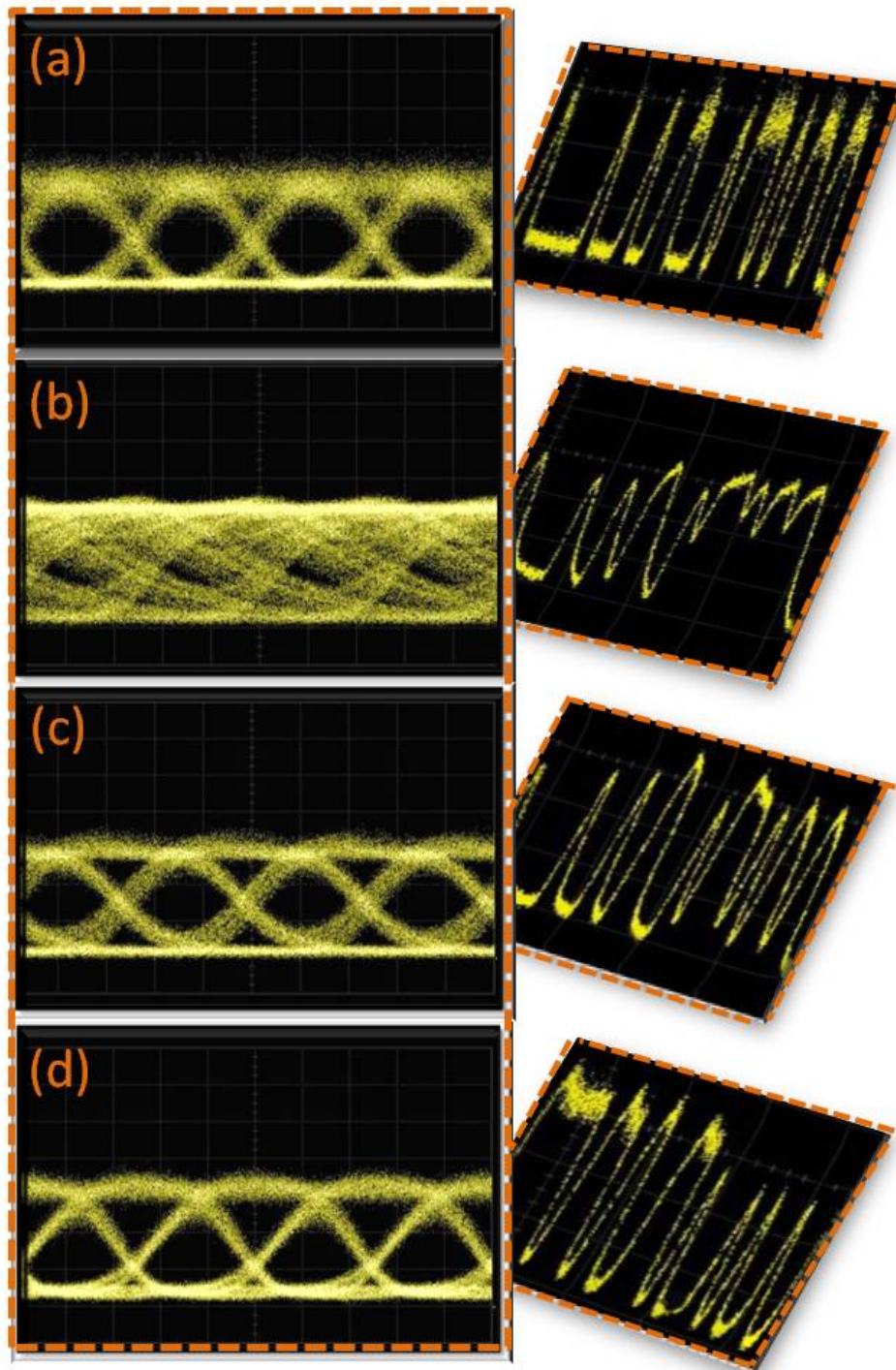
**Αμιγώς Οπτική 2R Αναγέννηση NRZ σημάτων με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών πυλών  
Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s**

Rate Tester) όπου και γίνεται η μέτρηση των σφαλμάτων του σήματος μας. Ο πίνακας που ακολουθεί συνοψίζει τις οπτικές ισχύς όλων των σημάτων και για τις τρεις αρχιτεκτονικές προκειμένου να επιτευχθεί ορθή λειτουργία με χαμηλούς ρυθμούς σφαλμάτων.

**Πίνακας 3: Σύνοψη ενεργειακών απαιτήσεων των τριών υπό μελέτη αρχιτεκτονικών προκειμένου να επιτυγχάνεται ορθή λειτουργία**

<b>Αρχιτεκτονικές Μετατροπής Μήκους Κύματος</b>	<b>Σήμα Εισόδου (dBm)</b>	<b>Σήμα Ελέγχου 1 (dBm)</b>	<b>Σήμα Ελέγχου 2 (dBm)</b>	<b>Σήμα Ελέγχου 3 (dBm)</b>	<b>Σήμα Ελέγχου 4 (dBm)</b>
Standard scheme	7	6.9	—	—	—
Bidirectional scheme	5.6	4.7	4.3	—	—
Diff. Biased Bidirectional scheme	4	6.9	4.7	-8.9	3.2

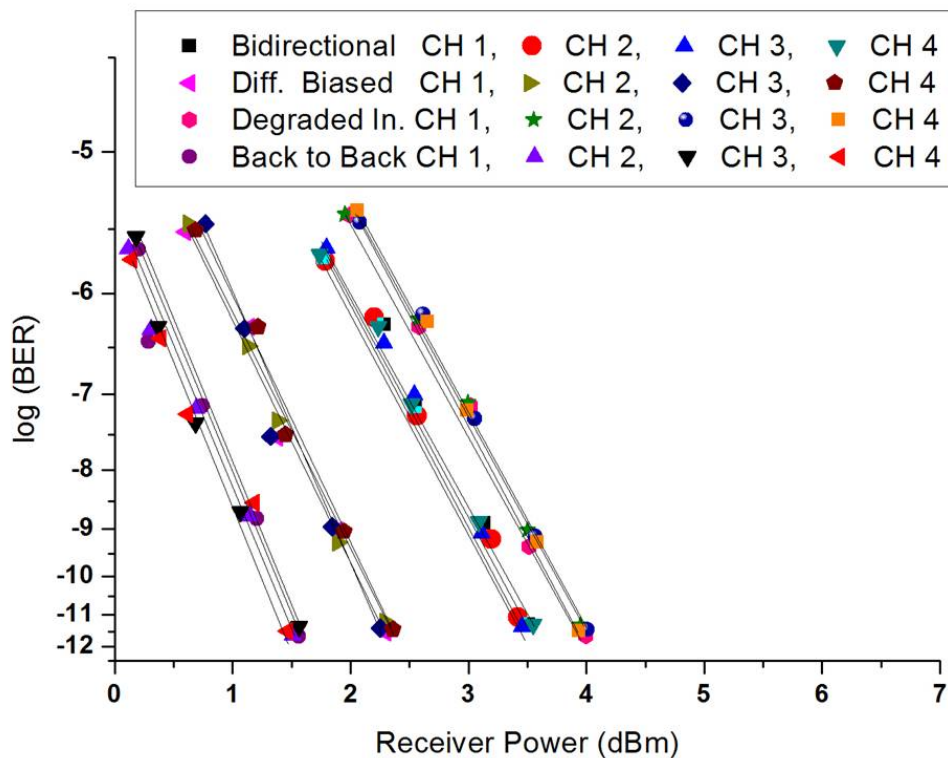
### 3.6 Πειραματικά αποτελέσματα & Θέματα προς συζήτηση



Σχήμα 36: Πειραματικά αποτελέσματα του σήματος εισόδου καθώς και των τριών αρχιτεκτονικών μετατροπής μήκους κύματος. α) υποβαθμισμένης ποιότητας σήμα εισόδου, β) έξοδος απλής αρχιτεκτονικής, γ) έξοδος αρχιτεκτονικής με λήψη δύο σημάτων ελέγχου αντίρροπης κατεύθυνσης, δ) έξοδος αρχιτεκτονικής με λήψη δύο σημάτων αντίρροπης κατεύθυνσης διαφορετικά πολωμένα

**Αμιγώς Οπτική 2R Αναγέννηση NRZ σημάτων με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών πυλών  
Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s**

Το σχήμα 36 παρουσιάζει τα πειραματικά αποτελέσματα μέσω των διαγραμμάτων ματιού καθώς και των αντίστοιχων παλμοσειρών τα οποία επιτεύχθηκαν στην έξοδο του υπό μελέτη συστήματος μας, για κάθε μια από τις τρεις διαφορετικές αρχιτεκτονικές. Συγκεκριμένα στην εικόνα 36 (α) παρουσιάζεται το υποβαθμισμένο σήμα εισόδου. Εν συνεχεία στην εικόνα 36 (β) φαίνεται το αποτέλεσμα της εξόδου της οπτικής πύλης ρυθμισμένη να λειτουργεί με την απλή αρχιτεκτονική. Ακολούθως η εικόνα 36 (γ) και 36(δ) παρουσιάζουν την έξοδο της πύλης στην περίπτωση της bidirectional αρχιτεκτονικής και της differentially Biased bidirectional αρχιτεκτονικής αντιστοίχως. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα των τριών αρχιτεκτονικών μεταξύ τους, διαπιστώνουμε ότι η προτεινόμενη αρχιτεκτονική την οποία και μελετάμε πιο εμπεριστατωμένα στο παρόν κεφάλαιο πλεονεκτεί των υπολοίπων δυο μιας και τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε είναι σαφώς πιο ποιοτικά από τα άλλα. Η ανωτερότητα δε της αρχιτεκτονικής αυτής δεν περιορίζεται μόνο στα πειραματικά αποτελέσματα που αναφέραμε ήδη, αλλά πιστοποιείται και από τις μετρήσεις σφαλμάτων οι οποίες και φαίνονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



**Σχήμα 37: Καμπύλες μέτρησης ρυθμών σφαλμάτων (BER measurements) για τις τρεις αρχιτεκτονικές μετατροπής μήκους κύματος**

Οι μετρήσεις σφαλμάτων επιτεύχθηκαν για κάθε ένα κανάλι ξεχωριστά από τα τέσσερα αποπολυπλεγμένα κανάλια με ρυθμούς μετάδοσης 10 Gb/s. Εμβαθύνοντας την ανάλυση μας παρατηρούμε ότι το υποβαθμισμένης ποιότητας σήμα εισόδου παρουσιάζει ένα ενεργειακό σφάλμα της τάξης των 2.5 dB σε σχέση με το σήμα που παράγει η πηγή μας



## Αμιγώς Οπτική 2R Αναγέννηση NRZ σημάτων με χρήση ολοκληρωμένων οπτικών πυλών Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s

πριν υποστεί την οποιαδήποτε αλλοίωση. Στην bidirectional αρχιτεκτονική η έξοδος του κυκλώματος παρουσιάζει μια βελτίωση της τάξης των 0.4 dB σε σχέση με το υποβαθμισμένης ποιότητας σήμα ενώ η differentially Biased bidirectional αρχιτεκτονική παρουσιάζει βελτίωση του ρυθμού σφαλμάτων κατά 1.7 dB. Σε σύγκριση δε με το σήμα εισόδου πριν υποστεί αλλοίωση της ποιότητας του παρουσιάζουν ένα σχετικό σφάλμα της τάξης των 2.1 dB και 0.8 dB αντίστοιχα, το οποίο λόγω της μεγάλης διαφοράς ενισχύει και την αποδοτικότητα της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής σε σχέση με την bidirectional. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση της απλής αρχιτεκτονικής με χρήση ενός μόνο σήματος ελέγχου, δεν καταφέραμε να λειτουργήσει ο μετατροπέας μήκους κύματος επιτυχώς δίδοντας ένα άνω όριο σφάλματος της τάξης των  $10^{-3}$  ακόμα και για την υψηλότερη δυνατή ενεργειακή στάθμη που μπορεί να λειτουργήσει ο δέκτης μας.

### Συμπεράσματα

Η υποβάθμιση της ποιότητας του σήματος αποτελεί σημαντικό περιοριστικό παράγοντα για την μέγιστη απόσταση διάδοσής του και περιορίζει ταυτόχρονα και τον μέγιστο ρυθμό λειτουργίας του δικτύου. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται έως σήμερα με χρήση ηλεκτρονικών αναγεννητών, οι οποίοι όμως δεν είναι σε θέση να καλύψουν τις σύγχρονες τηλεπικοινωνιακές ανάγκες. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική η οποία και αναλύθηκε λεπτομερώς στο παρόν κεφάλαιο, αποτελεί μια αξιόπιστη λύση σε ότι αφορά την αναγέννηση και μετατροπή μήκους κύματος των εισερχόμενων NRZ πακέτων δεδομένων σε ένα κόμβο, ανοίγοντας τον δρόμο για μετάβαση σε ακόμα υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης. Το νέο σχήμα, που ονομάζεται διαφορικά πολωμένο σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου παρουσίασε βελτιωμένα χαρακτηριστικά σε σχέση με παλαιότερες συνδεσμολογίες εστιάζοντας κυρίως στην μεγαλύτερης κλίμακας δυνατότητα αναγέννησης του εισερχόμενου σήματος. Η αξιοποίηση δε των υβριδικά ολοκληρωμένων συμβολομετρικών διατάξεων τύπου MZI, παρέχει την δυνατότητα υλοποίησης της αρχιτεκτονικής αυτής με απλό τρόπο διατηρώντας χαμηλά τις ενεργειακές απαιτήσεις του, καθιστώντας το σύστημα της αμιγώς οπτικής 2R αναγέννησης NRZ σημάτων σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s ένα από τα σημαντικότερα συστήματα για την εφαρμογή τους σε οπτικούς κόμβους μετάδοσης δεδομένων δικτύων τρίτης γενιάς.

## Αναφορές

- [3.1] <http://www.alphagalileo.org/ViewItem.aspx?ItemId=62040&CultureCode=en>
- [3.2] G. P. Agrawal, “*Fiber-Optic Communication Systems*”, 2nd Ed., John Wiley & Sons Inc., NY, 1997
- [3.3] [www.optolab.uniroma2.it/component/option,com\\_vfm/Itemid,60/do,download/file,lco%7Clezioni%7C2008%7C3R\\_AllOpticalRegeneration.pdf/](http://www.optolab.uniroma2.it/component/option,com_vfm/Itemid,60/do,download/file,lco%7Clezioni%7C2008%7C3R_AllOpticalRegeneration.pdf/)
- [3.4] **D. Petrantonakis**, G. T Kanellos, P. Zakyntinos, D. Apostolopoulos, N. Pleros and H. Avramopoulos, “*40-Gb/s 3R Burst Mode Regenerator Using Four Integrated MZI Switches*”, IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 19, No. 5, pp. 288-290 March 2007
- [3.5] G. T. Kanellos, N. Pleros, **D. Petrantonakis**, P. Zakyntinos, H. Avramopoulos, G. Maxwell, and A. Poustie “*40 Gb/s 2R Burst Mode Receiver with a single integrated SOA-MZI switch*”, Optics Express, Vol. 15, Issue 8, pp. 5043-5049, April 2007
- [3.6] G.T. Kanellos, D. Klonidis, N. Pleros, P. Zakyntinos, D. Apostolopoulos, A. Poustie, G. Maxwell, H. Avramopoulos and I. Tomkos “*Cascaded operation of a 2R burst-mode regenerator with data exhibiting 6 dB power variation*”, OFC 2007, Tech. Dig. OWP4, Anaheim, USA, 2007
- [3.7] P. Vorreau, D. C. Kilper, J. Leuthold, “*Optical Noise and Dispersion Monitoring With SOA-Based Optical 2R Regenerator*”, IEEE Phot. Technol. Lett., 17, p. 244 (2005).
- [3.8] H.S. Chung, R. Inohara, K. Nishimura and M. Usami, “*Transparent interconnection between metro-core and metro-access network by using SOA-MZI based 2R wavelength converter*”, ECOC 2005, paper We4.P.034, Glasgow (2005).
- [3.9] D. Apostolopoulos, D. Klonidis, P. Zakyntinos, K. Vyrsoinos, N. Pleros, I. Tomkos and H. Avramopoulos, “*Demonstration of 8 Error-Free Cascades of 2R NRZ SOA-MZI Wavelength Converter*”, Proc. OFC/NFOEC 2009, paper OThS2
- [3.10] H. Chayet et al, “*Compensation of Chromatic Dispersion by Chirp Control in All-Optical Regenerator Based on Asymmetric Sagnac Loop*”, OFC 2005, paper OFK6, Anaheim (2005).
- [3.11] D. Chen et al, “*Triple 640km cascade of tunable all-optical regenerators in a 10Gb/s WDM field trial over 160km per span distance in MCI’s metro network*”, ECOC 2005, paper We2.4.2, Glasgow (2005).
- [3.12] Leontios Stampoulidis, Efstratios Kehayas, Panagiotis Zakyntinos, Dimitrios Apostolopoulos, **Dimitrios Petrantonakis**, Paraskevas Bakopoulos, Olga Zouraraki and Hercules Avramopoulos, “*New generation integrated photonic systems-on-chip enabling Tb/s-capacity Photonic Routers*”, 3th European Conference on Networks and Optical Communications & 3rd Conference on Optical Cabling & Infrastructure June 30th – July 3rd, 2008, Invited paper



- [3.13] [www.ciphotonics.com](http://www.ciphotonics.com)
- [3.14] S. Nakamura, Y. Ueno and K. Tajima, “168-Gb/s all-optical wavelength conversion with a symmetric-mach-zehnder-type switch”, IEEE Photonics Technology Letters, vol.13 1091(2001)
- [3.15] S. Nakamura et al, “Bit-rate-transparent nonreturn-to-zero all-optical wavelength conversion at up to 42 Gb/s by operating symmetric-Mach-Zehnder switch with new scheme” OFC 2004, (2004), FD3
- [3.16] M. Hattori, K.Nishimura, R. Inohara, and M. Usami, "Bidirectional Data Injection Operation of Hybrid Integrated SOA-MZI All-Optical Wavelength Converter", IEE/OSA J. Light. Tech., 25, 512-519 (2007)
- [3.17] K. Vyrsoinos, Apostolopoulos, D. Zakynthinos, P. Avramopoulos, H. and Pleros, N. “Wavelength conversion for NRZ signals with enhanced regenerative characteristics”, presented at OFC 2009, JWA32
- [3.17] D. Apostolopoulos, K. Vyrsoinos, P. Zakynthinos, N. Pleros and H. Avramopoulos “A SOA-MZI NRZ Wavelength Conversion Scheme with Enhanced 2R Regeneration Characteristics” Photonics Technology Letters, Volume 21, Issue 19, Oct.1, 2009 Page(s):1363 – 1365
- [3.19] D. Apostolopoulos, D. Klonidis, P. Zakynthinos, K. Vyrsoinos, N. Pleros, I. Tomkos and H. Avramopoulos, “Cascadability Performance Evaluation of a New NRZ SOA-MZI Wavelength Converter”, IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 21, No. 18, pp. 1341-1343, Sept. 2009
- [3.20] **D. Petrantonakis**, D. Apostolopoulos, M. Spyropoulou, N. Pleros, K. Vyrsoinos, and H. Avramopoulos “40 Gb/s NRZ Wavelength Conversion with Enhanced 2R Regeneration Characteristics using a Differentially-biased SOA-MZI switch”, presented at 22<sup>nd</sup> Meeting of IEEE Photonics Society, Belek-Antalya, Turkey October 2009.
- [3.21] D. Apostolopoulos, H. Simos, **D. Petrantonakis**, A. Bogris, M. Spyropoulou, M. Bougioukos, K. Vyrsoinos, N. Pleros, D. Syvridis and H. Avramopoulos, “A New Scheme for Regenerative 40 Gb/s NRZ Wavelength Conversion using a Hybrid Integrated SOA-MZI”, will be published in OFC/NFOEC 2010.
- [3.22] M. Spyropoulou, N. Pleros, G. Papadimitriou and I. Tomkos, “Small-signal analysis of SOA-MZI wavelength conversion schemes” presented at International Conference on Photonics in Switching, Pisa 2009.

Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

## 4.1 Εισαγωγή

Η διείσδυση των φωτονικών συστημάτων μεταγωγής στα επόμενης γενιάς δίκτυα δρομολόγησης αποτελεί ένα πολλά υποσχόμενο μονοπάτι για την επίλυση προβλημάτων διασύνδεσης και επεκτασιμότητας των σημερινών ηλεκτρονικών δρομολογητών [4.1-4.3]. Συγκεκριμένα η κατασκευή των νέων φωτονικών δρομολογητών έχει ως στόχο:

- Την δραστηκή μείωση της κατανάλωσης ενέργειας από 10 KW που είναι σήμερα σε κάποιες εκατοντάδες Watts.
- Δυνατότητα μεταγωγής άνω του 1Tb/s δεδομένων από ένα μόνο rack μηχανημάτων

**Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.**

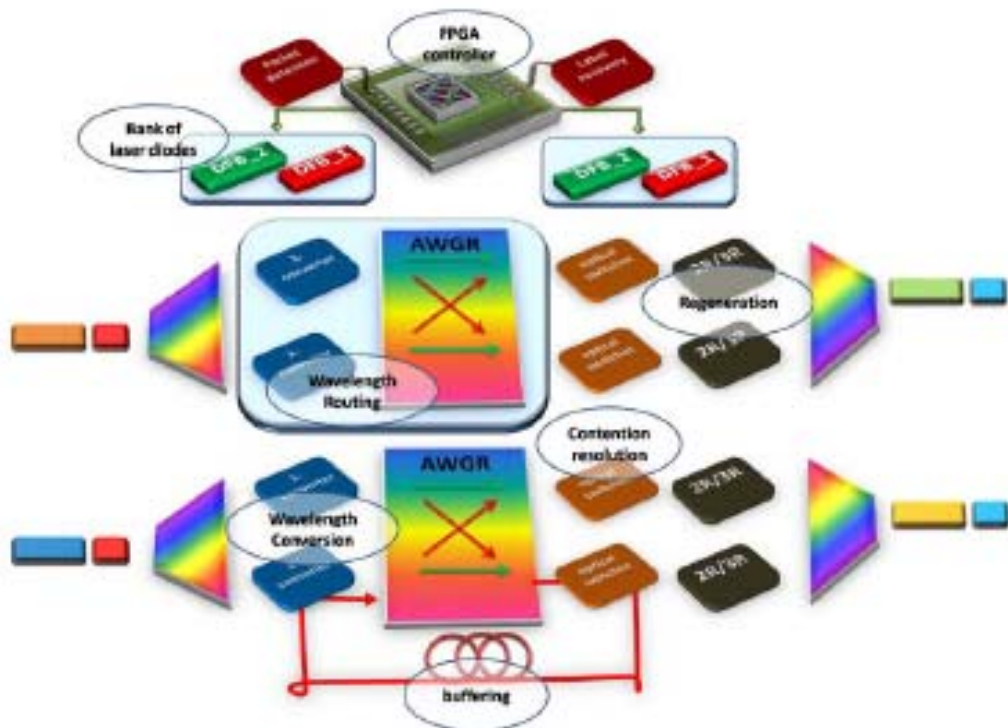
- **Διατήρηση του κόστους σε χαμηλό επίπεδο με ταυτόχρονη μελλοντική αύξηση της συνολικής χωρητικότητας των δρομολογητών σε κλίμακες που να προσεγγίζουν τα Pb/s.**

Προκειμένου να πετύχουμε τους στόχους αυτούς, χρειάζεται να εκμεταλλευτούμε τις δυνατότητες αλλά και να αναπτύξουμε ακόμα περισσότερο τις πιο εξελιγμένες micro/nano φωτονικές τεχνολογίες αλλά και αρχιτεκτονικές ολοκλήρωσης. Οι τεχνικές αυτές χρειάζονται για να παρέχουν τα απαραίτητα υψηλών απαιτήσεων χαρακτηριστικά συνεπτυγμένου μεγέθους (compactness) και αποδοτικότητας κόστους κατασκευής (cost effectiveness) τα οποία θα ενεργοποιήσουν την υλοποίηση φωτονικών αρχιτεκτονικών δρομολόγησης. Στο σχήμα 37 παρατηρούμε την βασική δομή ενός φωτονικού δρομολογητή.

Ένας οπτικός δρομολογητής διαχωρίζεται σε δύο επίπεδα:

1. Το επίπεδο ελέγχου (control plane), όπου απλά ηλεκτρονικά κυκλώματα (π.χ. FPGAs) επεξεργάζονται την πληροφορία των επικεφαλίδων  
και
2. Το επίπεδο της μεταφοράς δεδομένων (data plane), στο οποίο δεν υπάρχουν ηλεκτρονικά παρά μόνο οπτικά κυκλώματα, τα οποία μετάνουν τα δεδομένα με «διαφάνεια» (transparency).

Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.



Σχήμα 38: Βασική αρχιτεκτονική ενός φωτονικού δρομολογητή.

Το επίπεδο μεταφοράς δεδομένων αποτελείται από τα εξής οπτικά στοιχεία:

- Μία μονάδα αποπολυπλεξίας DWDM στην είσοδο του δρομολογητή για την αποπολυπλεξία των «χρωματισμένων» οπτικών πακέτων που εισέρχονται από τις διάφορες εισόδους του συστήματος.
- Τη μονάδα δρομολόγησης μήκους κύματος (wavelength routing stage), η οποία αποτελείται από συστοιχίες μετατροπών μήκους κύματος (Wavelength Converters) και τη μονάδα μεταγωγής μήκους κύματος (Arrayed Waveguide Grating Router).
- Ένα στάδιο ελέγχου/επίλυσης των συγκρούσεων μεταξύ πακέτων (contention resolution), το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει οπτικά στοιχεία μνήμης, οπτικούς διακόπτες και μετατροπείς μήκους κύματος για την επίλυση των συγκρούσεων σε τρεις διαστάσεις: χρόνο (optical buffering), μήκος κύματος (wavelength conversion) και χώρο (deflection routing) [4.4].
- Ένα στάδιο αναγέννησης των δεδομένων, το οποίο περιλαμβάνει το «φρεσκάρισμα» των οπτικών πακέτων και την (μερική ή ολική) αναίρεση των επιδράσεων λόγω της οπτικής μετάδοσης και μεταγωγής (π.χ. jitter, OSNR degradation, amplitude modulation, dispersion, attenuation, etc.).[4.5]

## Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

- Μία μονάδα πολυπλεξίας DWDM στην έξοδο του δρομολογητή για την πολυπλεξία των πακέτων που εξέρχονται από τις διάφορες εξόδους του συστήματος.

Η «καρδιά» του φωτονικού δρομολογητή παρόλα αυτά είναι το στάδιο της μετατροπής μήκους κύματος το οποίο αποτελείται από αμιγώς οπτικούς μετατροπείς μήκους κύματος συνδεδεμένα με ένα Arrayed Waveguide Grating Router (AWGR). Ο συνδυασμός αυτών των στοιχείων δομεί με αρκετά αποδοτικό τρόπο ένα οπτικό υπόβαθρο το οποίο μπορεί να δρομολογήσει τα δεδομένα σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης.

Η επίτευξη κατασκευής πλατφόρμας δρομολόγησης με βάση το μήκος κύματος συμπυκνωμένη σε επίπεδο πλινθίου ώθησε την βιομηχανία ολοκλήρωσης στην κατασκευή παθητικών AWGR, τα οποία και αποτέλεσαν το πρώτο κατασκευαστικό επίτευγμα στην αλυσίδα της τεχνολογίας ολοκλήρωσης. AWGR πολλαπλών πορτών τα οποία υποστηρίζουν ρυθμούς μετάδοσης άνω των 40 καναλιών διαφορετικού μήκους κύματος έχουν ήδη κατασκευαστεί μέσω της μονολιθικής [4.6] και υβριδικής τεχνολογίας ολοκλήρωσης, καταναλώνοντας ενέργεια 17 W [4.7].

Η επιτυχία για την κατασκευή και ανάπτυξη μικρών σε μέγεθος και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας συστημάτων, σύντομα προσανατόλισε το ενδιαφέρον της στην κατασκευή ενεργών στοιχείων για την δομή ενός φωτονικού δρομολογητή και κυρίως στην κατασκευή ενός αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος. Η πραγματοποίηση αυτού του στόχου για αρκετά συμπαγείς και με ικανοποιητική κατανάλωση ενέργειας, για την κατασκευή μετατροπέων μήκους κύματος, ώθησε την R&D τεχνολογία τόσο στην Ευρώπη όσο και στην Αμερική. Μέσα σε αυτά τα πλαίσια, ερευνητικά προγράμματα όπως το IRIS, χρηματοδοτούμενο από την DARPA [4.6], παρουσίασε ένα 2x8 μεταγωγέα με βάση το μήκος κύματος των εισερχόμενων δεδομένων, το οποίο περιελάμβανε ένα διπλό μονολιθικής τεχνολογίας μετατροπέα μήκους κύματος και δυο lasers πολλαπλών μηκών κύματος. Στην ίδια γραμμή και το ευρωπαϊκό πρόγραμμα IST-MUFINS [4.8] υλοποίησε με την υβριδική τεχνολογία ένα φωτονικό πλινθίο το οποίο περιείχε τέσσερις μετατροπείς μήκους κύματος και κατανάλωνε 12 W.

Τελευταίο επίτευγμα αποτέλεσε η κατασκευή ενός οκτακάναλου μονολιθικού InP μετατροπέα μήκους κύματος με συνολικό εύρος 320 Gb/s σε μόλις μερικά mm<sup>2</sup> [4.10]. Σε όλες τις προαναφερθείσες περιπτώσεις η υλοποίηση έγινε με χρήση του MZI, το οποίο αύξανε όμως τον αριθμό των ενεργών στοιχείων, την κατανάλωση ενέργειας αλλά παρουσίαζε κιόλας προβλήματα στον τρόπο διαχείρισης της αυξανόμενης θερμοκρασίας στο όλο σύστημα. Επιπρόσθετα από την σκοπιά της αξιολόγησης του ως σύστημα για την λειτουργία του σε ρυθμούς 40 Gb/s χρειαζόταν την “push-pull” λειτουργία η οποία αύξανε

## **Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.**

τις ενεργειακές απαιτήσεις του όλου συστήματος, λόγω του αναγκαίου υψηλής ακριβείας συγχρονισμό μεταξύ των δύο σημάτων ελέγχου (push & pull αντίστοιχα) καθώς και της κατάλληλης ενεργειακής ρύθμισης των δυο αυτών σημάτων μεταξύ τους.

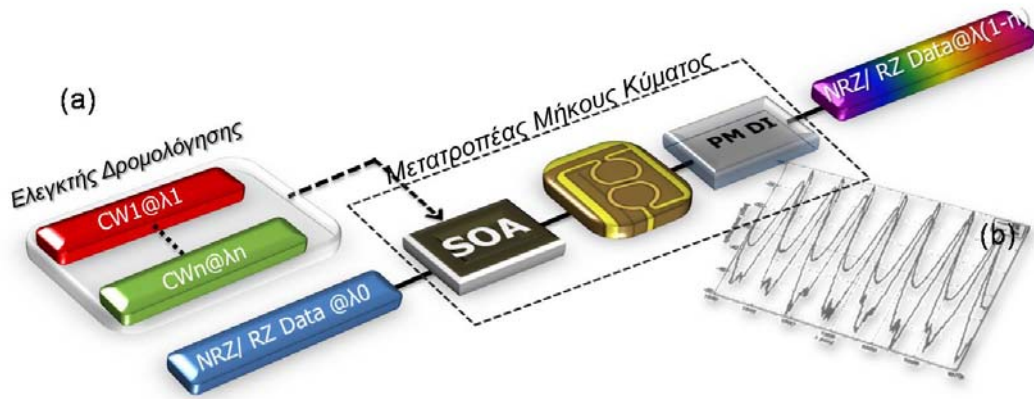
Προκειμένου να κατασκευάσουμε ακόμα μεγαλύτερα και γρηγορότερα φωτονικά συστήματα, στοιχεία όπως η κατανάλωση ενέργειας, η απαγωγή της θερμότητας αλλά και η αλληλεπίδραση της θερμότητας στα γειτονικά στοιχεία του ολοκληρωμένου πλινθίου πρέπει να μελετηθούν σε βάθος. Ένα πρώτο βήμα για την υλοποίηση και αντιμετώπιση των ανωτέρω στόχων είναι καταρχήν η μείωση των ενεργών στοιχείων σε κάθε μετατροπέα μήκους κύματος. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική που παρουσιάζουμε στο κεφάλαιο αυτό προσφέρει αυτήν την δυνατότητα μιας και μειώνει τα ενεργά στοιχεία στην χρήση ενός μόνο. Παρόλα αυτά ο συνδυασμός του ημιαγώγιμου οπτικού ενισχυτή με το ζωνοπερατό φίλτρο περιορίζει την λειτουργία σε ένα μόνο μήκος κύματος [4.10]. Συνεπώς δεν γίνεται να εφαρμοστεί σε WDM δίκτυα και WDM φωτονικούς δρομολογητές. Η πρώτη προσπάθεια για WDM λειτουργία επετεύχθη με την χρήση ενός SOA κβαντικών φρεατίων (quantum-well SOA) και ενός συμπαγούς (bulk) AWG (Array Waveguide Grating) [4.11]. Παρόλο το γεγονός ότι η μέθοδος αυτή αποτελεί μια ενδιαφέρουσα τεχνική, δεν επιτυγχάνεται η απόδοση βέλτιστης λύσης ούτε στην αποδοτικότητα ούτε στην διαχείριση του χώρου.

Δεδομένης λοιπόν της κατάστασης αυτής θα παρουσιάσουμε σε επόμενες παραγράφους μια νέα αρχιτεκτονική που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος ICT-BOOM [4.12] και αφορά την δημιουργία ενός μετατροπέα μήκους κύματος με χρήση ενός SOA και ενός ολοκληρωμένου ROADM (Reconfigurable Add-drop Multiplexer). Η κατασκευή του ROADM επετεύχθη με την χρήση της τεχνολογίας ολοκλήρωσης με βάση το πυρίτιο, και ειδικότερα την χρήση της TripleX™ τεχνολογίας [4.13, 4.14]. Ο ROADM αποτελείται από συστοιχίες φίλτρων μικρο-δακτυλίου, η ανάλυση του οποίου θα γίνει σε μετέπειτα ενότητες. Τέλος η αξιολόγηση της τεχνολογίας αυτής έγινε τόσο για RZ όσο και για NRZ σήματα συμπεριλαμβάνοντας συνεχείς ακολουθίες δεδομένων καθώς και διαμορφωμένα πακέτα δεδομένων. Τόσο η επιτυχής και προηγμένη ολοκλήρωση των SOA [4.15] όσο και η υψηλής κλίμακας δυνατότητα ολοκλήρωσης των φίλτρων μικροδακτυλίου [4.16] καθιστούν την προτεινόμενη αρχιτεκτονική του παρόντος κεφαλαίου μια αρκετά σημαντική πρόταση επίλυσης των προαναφερθέντων προβλημάτων στους φωτονικούς δρομολογητές.

### **4.2 Δομικό διάγραμμα Λειτουργίας του Μετατροπέα Μήκους κύματος.**

Το ακόλουθο σχήμα παρουσιάζει το δομικό διάγραμμα για την αρχή λειτουργίας του προτεινόμενου μετατροπέα μήκους κύματος. Η βασική αρχή λειτουργίας είναι η ακόλουθη:

Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.



Σχήμα 39: α) Διάγραμμα λειτουργίας του αμιγώς οπτικού μεταγωγέα μήκους κύματος, β) φάσμα ROADM

Έστω ότι τα δεδομένα μας (**NRZ/RZ Data @  $\lambda_0$** ) είναι πακέτα πληροφορίας με ονομασίες P1 και P2. Τα πακέτα δεδομένων P1 και P2 εισέρχονται στον SOA σειριακά αποτελώντας το σήμα εισόδου στον μετατροπέα μήκους κύματος. Αφότου ολοκληρωθεί η ανάγνωση της επικεφαλίδας του πρώτου πακέτου, ο ελεγκτής δρομολόγησης ενεργοποιεί το laser που άγει σταθερής ισχύος φώς (CW 1) σε μήκος κύματος  $\lambda_1$ , δημιουργώντας ύστερα από κατάλληλη διαμόρφωση, ένα πακέτο CW στο μήκος κύματος  $\lambda_1$ . Το σήμα αυτό εν συνεχεία αφότου συγχρονιστεί κατάλληλα ώστε να συμπίπτει χρονικά με το εισερχόμενο πακέτο δεδομένων εισέρχεται στον SOA. Αντίστοιχη λειτουργία επιτελείται και για το πακέτο δεδομένων P2 το οποίο συγχρονίζεται με το πακέτο CW 2 προτού εισέλθει στον SOA. Τα πακέτα δεδομένων διαμορφώνουν το κέρδος του οπτικού ενισχυτή μέσω του φαινομένου της έτερο-διαμόρφωσης κέρδους (cross-gain modulation), και η διαμόρφωση αυτή μεταφέρεται στα πακέτα CW. Αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου είναι στην έξοδο του SOA να λαμβάνουμε το σήμα εισόδου σε νέο μήκος κύματος  $\lambda_1$  ή  $\lambda_2$  με αντεστραμμένη όμως πόλωση. Εν συνεχεία το εξερχόμενο σήμα από τον SOA εισέρχεται στον ROADM. Το περιοδικό φάσμα της drop πόρτας του ROADM φαίνεται στο σχήμα 39 β). Τα μήκη κύματος του ελεγκτή δρομολόγησης επιλέγονται κατάλληλα ώστε να συμβαδίζουν με τα μήκη κύματος που επιτρέπει ο ROADM να περάσουν, ενώ ο ROADM ρυθμίζεται κατάλληλα προκειμένου να επιταχύνεται ο χρόνος ανάκαμψης του κέρδους του SOA επιλέγοντας είτε τις «μπλε» είτε τις «κόκκινες» φασματικές συνιστώσες του σήματος [4.17]. Ανάλογα επίσης με την επιλογή των φασματικών συνιστωσών το σήμα στην έξοδο αποκτά και την κατάλληλη πόλωση [4.18]. Στην περίπτωση που το σήμα εξέλθει του ROADM αντεστραμμένο τότε ένα DI (delayed Interferometer) χρειάζεται για την ανάκτηση της σωστής πόλωσης. Το φάσμα του DI ρυθμίζεται κατάλληλα ώστε οι φασματικές συνιστώσες του σήματος να υπερκαλύπτονται από τα φασματικά «βυθίσματα» του τεμνόμενου φίλτρου. Με αυτό τον τρόπο το περίσσιο CW σήμα το οποίο παραμένει μη

## **Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.**

διαμορφωμένο μέσω του φαινομένου ετεροδιαμόρφωσης φάσης στον SOA αποβάλλεται από το μεταδιδόμενο σήμα με αποτέλεσμα η πόλωση του σήματος να επανέρχεται στην σωστή μορφή. Στην περίπτωση του φωτονικού δρομολογητή του σχήματος 38 ο προτεινόμενος μετατροπέας μήκους κύματος τοποθετείται μετά το σημείο όπου γίνεται η αποπολυπλεξία των εισερχομένων δεδομένων με αποτέλεσμα το αποπολυπλεγμένο σήμα να εισέρχεται στον μετατροπέα μήκους κύματος και να μετατρέπεται σε οποιοδήποτε μήκος κύματος συμβαδίζει με το φασματικό περιεχόμενο της drop πόρτας του φίλτρου μικρο-δακτυλίου. Εν συνεχεία τα νέου μήκους κύματος δεδομένα εισέρχονται σε ένα μηδενικής παρεμπόδισης (non-blocking) AWGR προκειμένου να δρομολογηθούν τα νέου μήκους κύματος δεδομένα σε οποιαδήποτε από τις εξόδους του φωτονικού δρομολογητή. Παρόμοια διαδικασία λειτουργίας του προτεινόμενου μετατροπέα μήκους κύματος επιτυγχάνεται και στην περίπτωση που έχουμε συνεχόμενες ακολουθίες διφύων και όχι πακέτα δεδομένων.

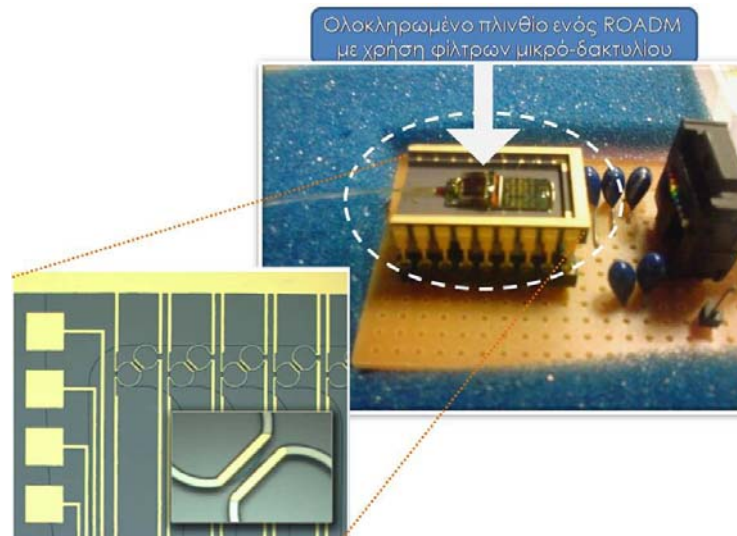
### **4.3 Υλοποίηση Φίλτρων μικρο-δακτυλίου**

Το βασικό δομικό στοιχείο στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική μετατροπής μήκους κύματος είναι ο ROADM ο οποίος αποτελείται από συστοιχίες φίλτρων μικρο-δακτυλίου. Ο ROADM υλοποιήθηκε με την χρήση της τεχνολογίας TripleX™, η οποία βασίζεται στην μίξη  $\text{Si}_3\text{N}_4$  με  $\text{SiO}_2$ . Ο βασικός λόγος πρόσμιξης των δύο υλικών οφείλεται στο γεγονός ότι η χρήση μόνο του  $\text{Si}_3\text{N}_4$  υλικού παρουσιάζει σημαντική εξάρτηση από την πόλωση του σήματος που εισέρχεται, το οποίο περιορίζει την εφαρμογή του σε τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές. Παρόλα αυτά συνδυάζοντας το  $\text{Si}_3\text{N}_4$  με το  $\text{SiO}_2$  το οποίο έχει μεγάλη συμπιεστική ισχύ το φαινόμενο αυτό μειώνεται δραστηνά. Επιπρόσθετα λόγω της διαφοράς στην τιμή του δείκτη διάθλασης η συγκεκριμένη τεχνική υλοποίησης μπορεί να ενεργοποιήσει την ανάπτυξη αρκετά μικρής κλίμακας φωτονικών διατάξεων.

Η όλη διαδικασία κατασκευής του ROADM λόγω της τεχνικής της χρήσης πυριτίου είναι απόλυτα συμβατή με την CMOS τεχνολογία και αρκετά αποδοτική σε θέμα κόστους, μιας και η μόνη διαδικασία που χρειάζεται για τον καθορισμό των κυματοδηγών στο ολοκληρωμένο πλινθίο είναι η φωτο-λιθογραφία. Το σχήμα 40 παρουσιάζει την εικόνα ενός υλοποιημένου ROADM αφότου έχει διέλθει και από την διαδικασία του πακεταρίσματος “packaging”. Το πρόσθετο ένθεμα παρουσιάζει την εσωτερική διάταξη του πλινθίου. Οι επιχρυσωμένες επιφάνειες κοντά στα φίλτρα μικρο-δακτυλίου χρησιμοποιούνται για την τοπική αύξηση της ανθεκτικότητας των φίλτρων, ενώ η μεγέθυνση της εικόνας μας δίνει μια σαφέστερη αντίληψη του τρόπου διασύνδεσης των φίλτρων μικρο-δακτυλίου μεταξύ τους.



Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.



Σχήμα 40: Φωτογραφία ενός ολοκληρωμένου ROADM με χρήση δεύτερης τάξης φίλτρων μικροδακτυλίου. Πρόσθετο ένθεμα: παρουσίαση μητρικής πλατφόρμας με ταυτόχρονη μεγένθυση του σημείου ζεύξης των φίλτρων μικρο-δακτυλίου μεταξύ τους.

#### 4.4 Προκαταρκτική μελέτη μέσω εξομοιώσεων και πειραματικής υλοποίησης της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση ζωνοπερατού φίλτρου έναντι ROADM

##### 4.4.1 Εισαγωγή

Η αμιγώς οπτική μετατροπή μήκους κύματος βασισμένη στην χρήση ενός ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή, έχει λάβει τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερη προσοχή, λόγω της δυνατότητας ολοκλήρωσης του SOA σε πολύ υψηλά επίπεδα ολοκλήρωσης, την κατανάλωση χαμηλής ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και του μικρού χώρου που καταλαμβάνει κατά την διαδικασία ολοκλήρωσης του. Μέχρι σήμερα, μια σειρά από ολοκληρωμένες διατάξεις με χρήση του SOA αξιοποιώντας τόσο την μονολιθική [4.19,4.20] όσο και την υβριδική ολοκλήρωση [4.21] έχουν παρουσιαστεί βασισμένα στην χρήση του συμβολόμετρου MZI [4.22]. Στις συσκευές αυτές, ο αργός χρόνος ανάκαμψης του SOA περιορίζει την μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας των μετατροπέων μήκους κύματος. Για τον λόγο αυτό τα συμβολόμετρα MZI βασισμένα στην ολοκλήρωση SOAs ως ενεργά στοιχεία περιορίζονται σε ρυθμό μετάδοσης που δεν υπερβαίνει τα 40 Gb/s [4.23].

Το οπτικό φιλτράρισμα του chirp του σήματος που εξέρχεται από τον SOA αποτελεί μια αρκετά υποσχόμενη μέθοδο, προκειμένου να είναι εφικτές υπερυψηλές ταχύτητες (>100 Gb/s) ολοκληρωμένων διατάξεων μετατροπής μήκους κύματος [4.10]. Στην ενότητα αυτή

## **Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.**

γίνεται μια εμπειριστατωμένη μελέτη στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική για ταχύτητα μετάδοσης 40 Gb/s, με διατήρηση της πόλωσης στην έξοδο του συστήματος ανάλογα με την ρύθμιση του ζωνοπερατού φίλτρου που διαδέχεται τον SOA [4.24-4.26]. Επίσης η τεχνική αυτή παρουσιάζει μια αρκετά εποικοδομητική λύση για την φωτονική ολοκλήρωση μετατροπών μήκους κύματος μιας και εκμεταλλεύεται μόνο ένα ενεργό στοιχείο καθώς και ένα παθητικό οπτικό φίλτρο. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται ιδιαίτερη μελέτη στην αξιοποίηση της χρήσης πυριτίου σαν τεχνική ολοκλήρωσης προκειμένου αξιοποιώντας τις υψηλές δυνατότητες ολοκλήρωσης των SOAs και των οπτικών φίλτρων να δημιουργήσουμε τις βάσεις για την κατασκευή του πρώτου αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος με ρυθμό μετάδοσης άνω των 160 Gb/s, ολοκληρωμένο εξ ολοκλήρου πάνω στην πλατφόρμα πυριτίου.

Ο πρώτος στόχος μας αφορά τον ποσοτικό προσδιορισμό της απόδοσης της αρχιτεκτονικής αυτής στην κατασκευή μετατροπών μήκους κύματος. Αξιοποιώντας την τεχνική αυτή, είναι φανερό ότι επιλέγοντας το κατάλληλο φίλτρο στην έξοδο του SOA, ο χρόνος ανάκαμψης των ημιαγωγών μπορεί να μειωθεί από 90 ps σε λιγότερο από 3 ps. Η επίτευξη της επιτάχυνσης του χρόνου ανάκαμψης του SOA, επιτυγχάνεται με την χρήση ενός οπτικού ζωνοπερατού φίλτρου με συγκεκριμένη συνάρτηση μεταφοράς στην έξοδο του SOA. Το φίλτρο είναι κατάλληλα μετατοπισμένο προς τις μπλέ φασματικές συνιστώσες του φέροντος ενώ χρησιμοποιείται ένα DI προκειμένου να ανακτηθεί η ορθή πόλωση του εξερχόμενου σήματος από τον μετατροπέα μήκους κύματος. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζουμε μια σειρά από εξομοιώσεις καθώς και πειραματικές διατάξεις που σκοπό έχουν αφενός να επαληθεύσουν την ορθότητα της αρχιτεκτονικής που προτείνουμε αφετέρου να αποτελέσουν την ερευνητική βάση πάνω στην οποία θα στηριχθεί η μετέπειτα προσπάθεια υλοποίησης των ολοκληρωμένων διατάξεων σε ρυθμούς μετάδοσης άνω των 160 Gb/s.

### **4.4.2 Βασική αρχή λειτουργίας του chirp filtering για την επιτάχυνση του SOA**

Προκειμένου να μετρήσουμε το χρόνο ανάκαμψης του ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή χρησιμοποιήσαμε την πειραματική διάταξη που βασίζεται στις μετρήσεις άντλησης-καταγραφής (pump-probe measurements). Τέτοιου είδους μετρήσεις χρησιμοποιούνται ευρύτατα για την καταγραφή όλων των μη γραμμικών μηχανισμών μέσα στο SOA. Για την υλοποίησή τους χρησιμοποιούνται δύο οπτικά σήματα. Το σήμα άντλησης (παλμικό σήμα), στην ουσία, διεγείρει τα φαινόμενα μέσα στον ημιαγωγό, ενώ οι μεταβολές λόγω των φαινομένων αυτών, καταγράφονται από το σήμα καταγραφής (σήμα εισόδου).

Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

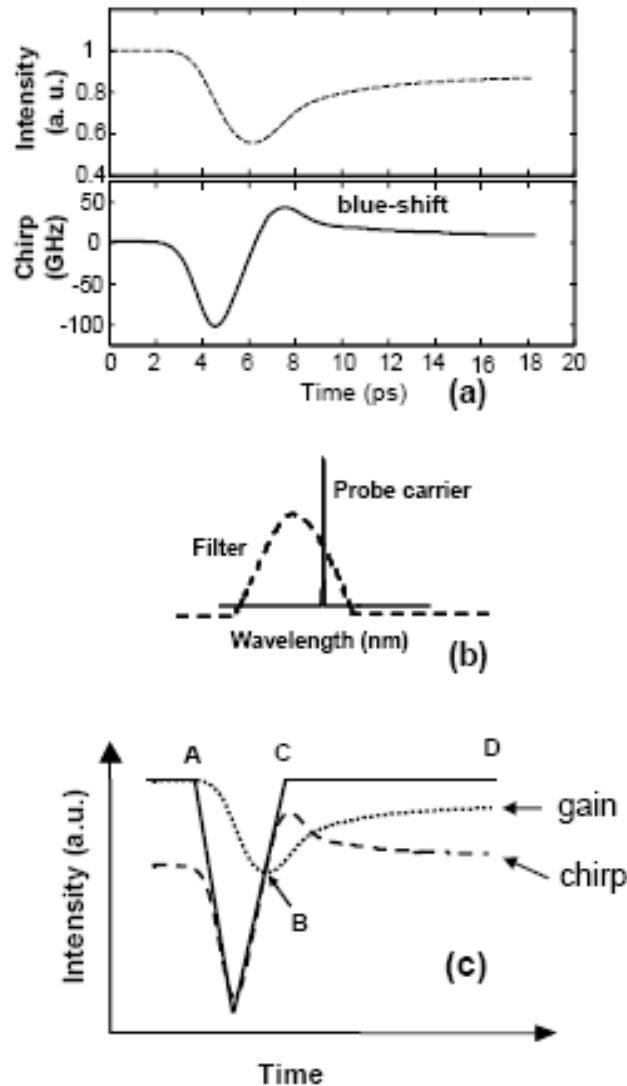


Σχήμα 41: Διάταξη για τον καθορισμό του χρόνου ανάκαμψης του SOA.

Το παλμικό σήμα εισόδου ενώνεται μέσω ενός συζεύκτη 50:50 με ένα συνεχές σήμα CW και εν συνεχεία τα δύο σήματα εισέρχονται στον ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή. Στην έξοδο του SOA, ένα ζωνοπερατό φίλτρο χρησιμοποιείται για να φιλτράρει το παλμικό σήμα, επιτρέποντας την διέλευση μόνο του CW σήματος.

Όταν το φίλτρο είναι μετατοπισμένο προς τις «μπλέ» συνιστώσες συγκριτικά με το φέρον, το σήμα που γράφεται στο νέο μήκος κύματος ανάκαμπτει πολύ γρηγορότερα από την περίπτωση που αυτά συμπίπτουν. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ως «μπλέ» συνιστώσες αναφέρονται οι φασματικές συνιστώσες που προηγούνται του φέροντος ενώ ως «κόκκινες» αυτές που έπονται [4.24-4.26]. Η λειτουργία αυτή φαίνεται στο σχήμα 42.

Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.



Σχήμα 42: Η βασική αρχή λειτουργίας του μετατροπέα μήκους κύματος. α) Κέρδος SOA (άνω εικόνα) και chirp απόκριση (κάτω εικόνα) σαν συνάρτηση του χρόνου, β) σχηματική αναπαράσταση του οπτικού φάσματος του εισερχόμενου σήματος CW και της απόκρισης του φίλτρου, γ) Η πορεία μετάδοσης του σήματος διαμέσω του ζωνοπερατού φίλτρου. Η πυκνά διακεκομμένη γραμμή και η αχνά διακεκομμένη γραμμή δείχνουν το κέρδος και το chirp του SOA αντίστοιχα.

Η πυκνά διακεκομμένη γραμμή και η αχνά διακεκομμένη γραμμή δείχνουν το κέρδος και το chirp του SOA αντίστοιχα. Η γρήγορη ανάκαμψη του SOA μπορεί να εξηγηθεί ακολούθως. Όταν ο παλμός εμφανίζεται στο σημείο A, οι φορείς του SOA μειώνονται και το κέρδος του SOA φθίνει, αγγίζοντας το κατώτερο σημείο του (σημείο B). Το κέρδος του SOA είναι κορεσμένο μεταξύ των σημείων A και B. Επιπρόσθετα, μεταξύ των χρονοσχημάτων A-B, το μήκος κύματος του παλμικού σήματος μετακινείται προς μεγαλύτερης συχνότητας μήκος κύματος με αποτέλεσμα να δέχεται μεγαλύτερη εξασθένιση από το φίλτρο. Ως αποτέλεσμα αυτού, η μετάδοση του παλμικού σήματος μειώνεται. Στο σημείο B, το chirp γίνεται μηδέν, και ο SOA αρχίζει να ανακάμπει. Από το σημείο αυτό και έπειτα, το μήκος κύματος του σήματος εισόδου είναι μετατοπισμένο στις «μπλε»

## **Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.**

φασματικές συνιστώσες, οδηγώντας στην αύξηση της μεταδιδόμενης ισχύος. Αν το ζωνοπερατό φίλτρο είναι κατάλληλο, η ενίσχυση αυτή του μεταδιδόμενου σήματος αντισταθμίζει το κορεσμένο κέρδος του ενισχυτή. Επομένως η μετάδοση του σήματος στο σημείο C είναι ίδια με αυτήν του σημείου A. Από το σημείο C μέχρι το σημείο D, το μήκος κύματος του μεταδιδόμενου σήματος επανέρχεται στο μήκος κύματος του φέροντος μειώνοντας την μεταδιδόμενη ισχύ. Παρόλα αυτά το κέρδος του SOA έχει ήδη αρχίσει να ανακάμπτει, οδηγώντας στην ενίσχυση του σήματος στην έξοδο του SOA. Τα δυο αυτά φαινόμενα λαμβάνουν χώρα την ίδια χρονική στιγμή με αποτέλεσμα να αλληλοαναιρούν το ένα το άλλο. Απόρροια αυτού είναι να κάνει το σύστημα μας να ανακάμπτει γρηγορότερα από ότι το κέρδος του SOA. Επίσης πρέπει να σημειώσουμε ότι η επίτευξη των φαινομένων αυτών μπορεί να υλοποιηθεί με χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις σε οπτική ισχύ.

Ο λόγος που το σήμα αποκτά αντίστροφη πόλωση εξαρτάται από το πόσο απορυθμισμένο είναι το φίλτρο σε σχέση με το φέρον. Όταν το φίλτρο είναι απορυθμισμένο αρκετά μακριά από την συχνότητα του φέροντος, καταπιέζοντας με αυτό τον τρόπο το φέρον, το εξερχόμενο σήμα στο νέο μήκος κύματος διατηρεί την φάση του ίδια με αυτή του εισερχόμενου σήματος επιτυγχάνοντας μη αντεστραμμένης πόλωσης μετατροπή μήκους κύματος. Το εισερχόμενο σήμα στον SOA διαμορφώνει τους φορείς του SOA και επομένως το κέρδος του. Αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου είναι το CW σήμα που εισέρχεται στον SOA να διαμορφώνεται μέσω του φαινομένου της ετεροδιαμόρφωσης κέρδους, προκαλώντας με αυτόν τον τρόπο αντίστροφη της πόλωσης του σήματος που εξέρχεται πλέον του SOA. Επιπρόσθετα το εισερχόμενο σήμα δεδομένων επηρεάζει τον δείκτη διάθλασης του SOA, με αποτέλεσμα την εμφάνιση chirp στο εξερχόμενο σήμα νέου μήκους κύματος. Προκειμένου να ανακτηθεί η ορθή πόλωση του σήματος, το αντεστραμμένο σήμα εισέρχεται σε ένα DI. Το DI λειτουργεί σαν ένα φίλτρο το οποίο «κεντράρεται» στην συχνότητα του φέροντος. Αυτό έχει σαν συνέπεια να εξασθενεί τις dc συνιστώσες που αντιστοιχούν στο «1» επίπεδο του αντεστραμμένου σήματος και να αφήνει να περνά το «0» επίπεδο. Με αυτό τον τρόπο αντιστρέφεται η πόλωση του σήματος παίρνοντας στην έξοδο του μετατροπέα σήμα πόλωσης ίδιο με το εισερχόμενο. Στην περίπτωση που το φίλτρο είναι αρκετά απομακρυσμένο από τον φέρον, στις κόκκινες φασματικές συνιστώσες επομένως το DI δεν χρειάζεται μιας και λόγω της απομάκρυνσης του καταπιέζεται το φέρον του CW εξ' αρχής.

### **4.4.3 Ανάπτυξη της πλατφόρμας εξομοίωσης**

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζουμε τα πρώτα βήματα που ακολουθήσαμε προκειμένου να αναπτύξουμε την πλατφόρμα εξομοίωσης για την διερεύνηση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής. Η μελέτη αυτή περιλαμβάνει την μοντελοποίηση μιας διάταξης η οποία

## Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

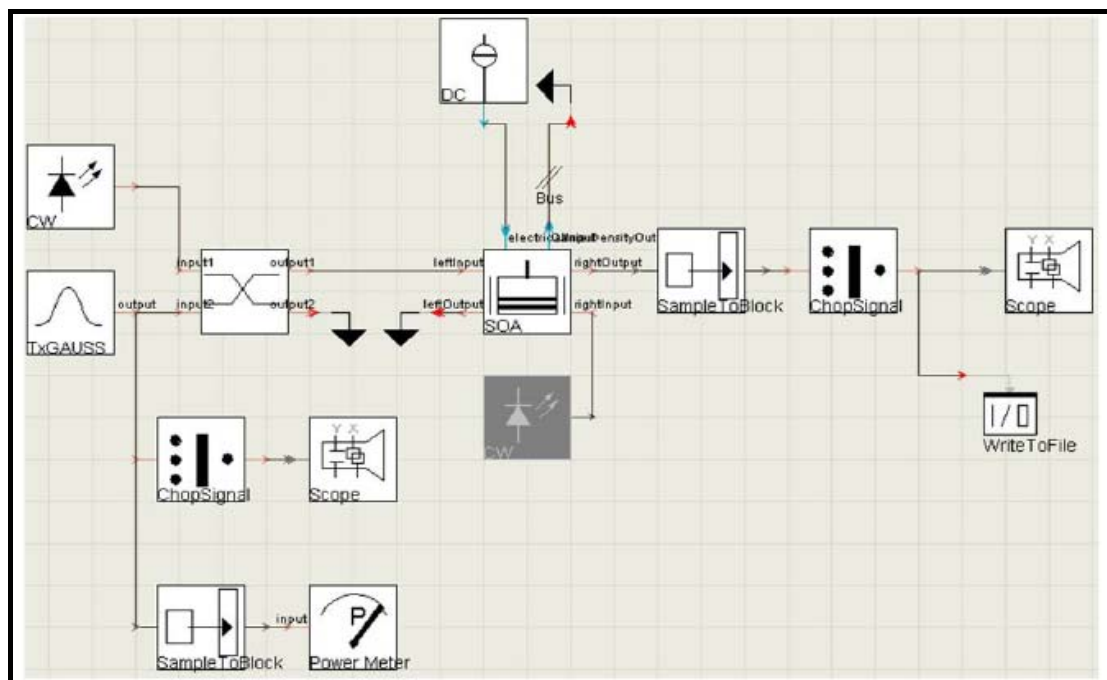
δομείται από την ακολουθία ενός SOA/OBF/DI, με στόχο να βρούμε τις πειραματικές παραμέτρους για την ορθή λειτουργία του προτεινόμενου μετατροπέα μήκους κύματος.

### 4.4.3.1 Μοντελοποίηση

Το σχήμα 42 παρουσιάζει το μοντέλο εξομοίωσης του SOA, το οποίο υλοποιήθηκε με την χρήση του λογισμικού VPI. Ο πομπός μας αποτελείται από :

- Ένα CW laser το οποίο εκπέμπει στα 192.75 THz με οπτική ισχύς εξόδου 5.2 mW (2.6 mW στην είσοδο του SOA)
- Ένα παλμικό laser που εκπέμπει ψευδοτυχαίες ακολουθίες της τάξης  $2^{7-1}$  σε ρυθμό μετάδοσης 160 Gb/s με εύρος παλμού 1.5 ps, μέση οπτική ισχύς 10 mW και συχνότητα φέροντας 194 THz.

Οι βασικές παράμετροι του SOA καθώς και η διάταξη του κυκλώματος φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα 4 και σχήμα 43 αντιστοίχως.



Σχήμα 43: Διάταξη εξομοίωσης του SOA

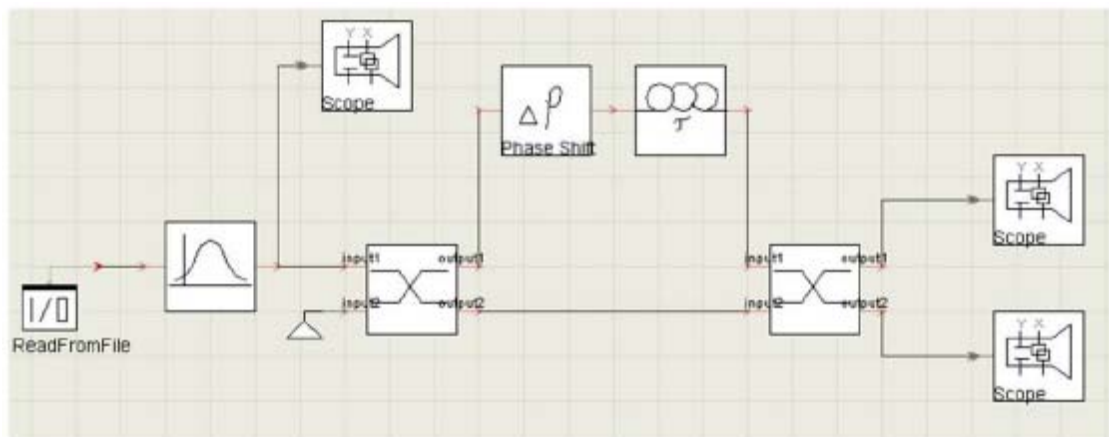
Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

Parameter	Value	Unit	Parameter	Value	Unit
<b>Device Structure</b>			<b>Carrier Dynamics</b>		
Active Region Type	Bulk		Linear Recombination	1e7	1/s
Device Section Length	1600.0e-06	m	Bimolecular Recombination	1.0e-17	m <sup>3</sup> /s
Active Region Width	1.2e-06	m	Auger Recombination	9.4e-41	m <sup>6</sup> /s
Active Region Thickness	0.1e-06	m	Initial Carrier Density	1e24	1/m <sup>3</sup>
Current Injection Efficiency	1		<b>Gain Parameters</b>		
<b>Optical Parameters</b>			Gain Model	Linear	
Nominal Wavelength	1.5525e-6		Gain Coefficient Linear	6.5e-20	m <sup>2</sup>
Group Effective Index	3.5		Carrier Density Transparency	1e+24	1/m <sup>3</sup>
Internal Loss	8800		Gain Shape Model	Flat	
Confinement Factor	0.17		Nonlinear Gain Coefficient	6e-23	m <sup>3</sup>
Internal Loss Carrier Dependency	0		Nonlinear Gain Time constant	300e-15	s
Optical Coupling Efficiency	0.5		Chirp Model	Linewidth Factor	
Facet Reflectivity	1e-6		Linewidth Factor	6	
Facet Reflectivity Phase Left	0		Carrier Density Ref Index	2.0e+24	1/m <sup>3</sup>
Facet Reflectivity Phase Right	0		<b>Spontaneous Emission</b>		
			Noise Model	Inversion Parameter	
			Inversion Parameter	4	

Πίνακας 4: Παράμετροι SOA που χρησιμοποιήθηκαν στις εξομοιώσεις

Το σχήμα 44 παρουσιάζει την κυκλωματική διάταξη του ζωνοπερατού φίλτρου σε συνδιασμό με ένα DI τα οποία είναι τοποθετημένα σε σειρά. Το ζωνοπερατό φίλτρο έχει εύρος 200 GHz (1.6 nm) και είναι μετατοπισμένο σε σχέση με το φέρον κατά 120 GHz (0.96 nm), με την συχνότητα του φέροντος να είναι στα 192.87 THz.

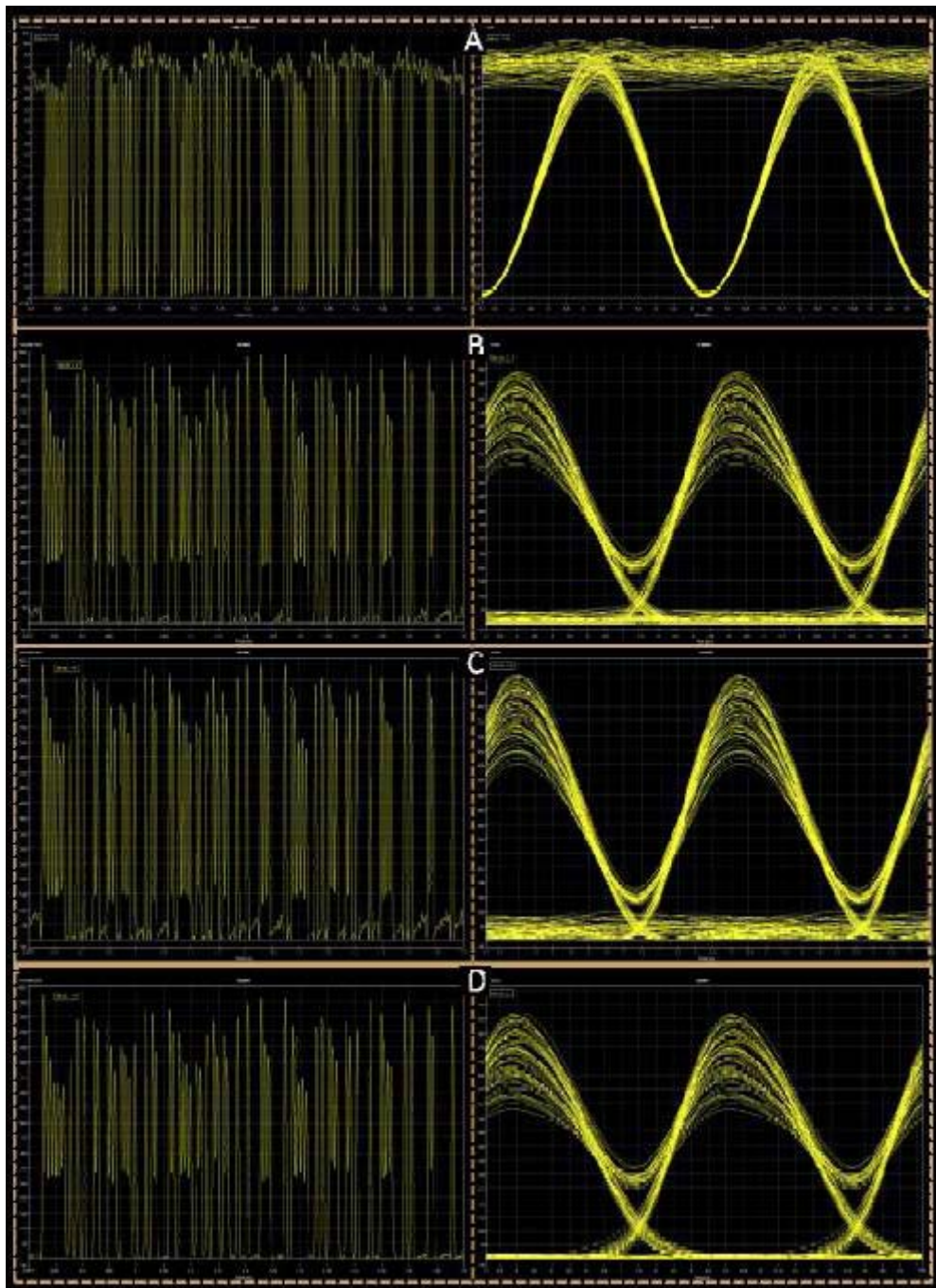
Το DI με την σειρά του είναι σχεδιασμένο χρησιμοποιώντας ένα παθητικό MZI αποτελούμενο από δυο 50:50 συζεύκτες, ενώ ο ένας από τους δύο βραχίονες του έχει μια χρονική καθυστέρηση καθώς και ένα μετατοπιστή φάσης (phase shifter) όπως φαίνεται στο σχήμα 44. Η χρονική καθυστέρηση του DI ήταν εφάμιλλη του εύρους του παλμού που εξέρχεται από τον SOA, ενώ ο phase shifter ανίχνευε συνεχώς διαφορετικές φάσεις του σήματος προκειμένου να βρούμε το βέλτιστο διάγραμμα ματιού στην έξοδο του DI. Τα αποτελέσματα που πήραμε ύστερα από μια σειρά ανιχνεύσεων της φάσης φαίνονται ακολούθως.



Σχήμα 44: Διάταξη εξομοίωσης του ζωνοπερατού φίλτρου σε σειρά με ένα συμβολόμετρο καθορισμένης καθυστέρησης.



Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.



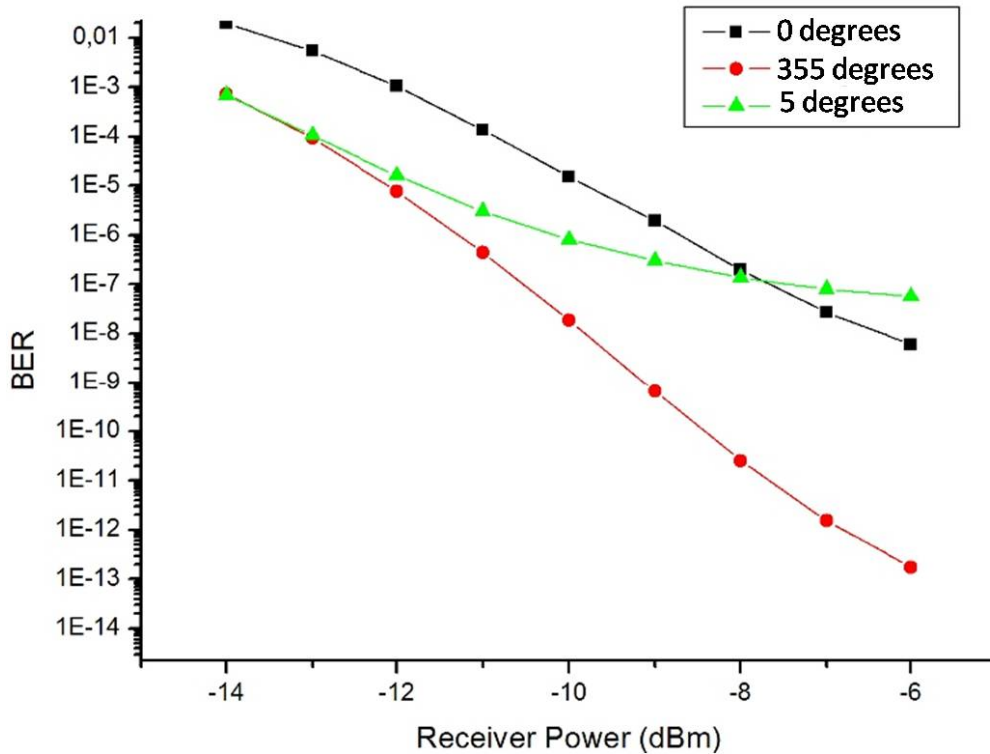
Σχήμα 45: Ακολουθίες παλμών και διαγράμματα ματιού για χρονική καθυστέρηση του DI ίση με 2 ps. A) έξοδος ζωνοπερατού φίλτρου, B) μετατόπιση φάσης κατά 0 μοίρες, C) μετατόπιση φάσης κατά 5 μοίρες και D) μετατόπιση φάσης κατά 355 μοίρες

Το σχήμα 45 παρουσιάζει τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε στην έξοδο του DI με το σήμα να έχει ανακτημένη την πόλωση του. Η ανίχνευση της φάσης του σήματος έγινε από 0 έως 355 μοίρες. Συγκεκριμένα το σχήμα 45 B) δείχνει την περίπτωση που το σήμα έχει μετατόπιση φάσης 0 μοίρες, το 45 C) όταν το σήμα έχει υποστεί μετατόπιση φάσης 5



## Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

μοίρες και το 45 D) όταν το σήμα έχει υποστεί μετατόπιση φάσης 355 μοίρες. Οι μετρήσεις σφαλμάτων που φαίνονται στην ακόλουθη εικόνα δείχνουν ότι το μικρότερο ενεργειακό σφάλμα αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου η φάση του σήματος έχει στραφεί 355 μοίρες. Παρόλη την εμφάνιση διασυμβολικής παρεμβολής στο σήμα εξόδου, το διάγραμμα ματιού είναι ανοικτό ενώ στις άλλες δύο περιπτώσεις λόγω του αρκετού θορύβου στο μηδέν δεν καταφέραμε το σύστημα μας να λειτουργήσει χωρίς λάθη.



Σχήμα 46: Καμπύλες μέτρησης ρυθμού σφαλμάτων

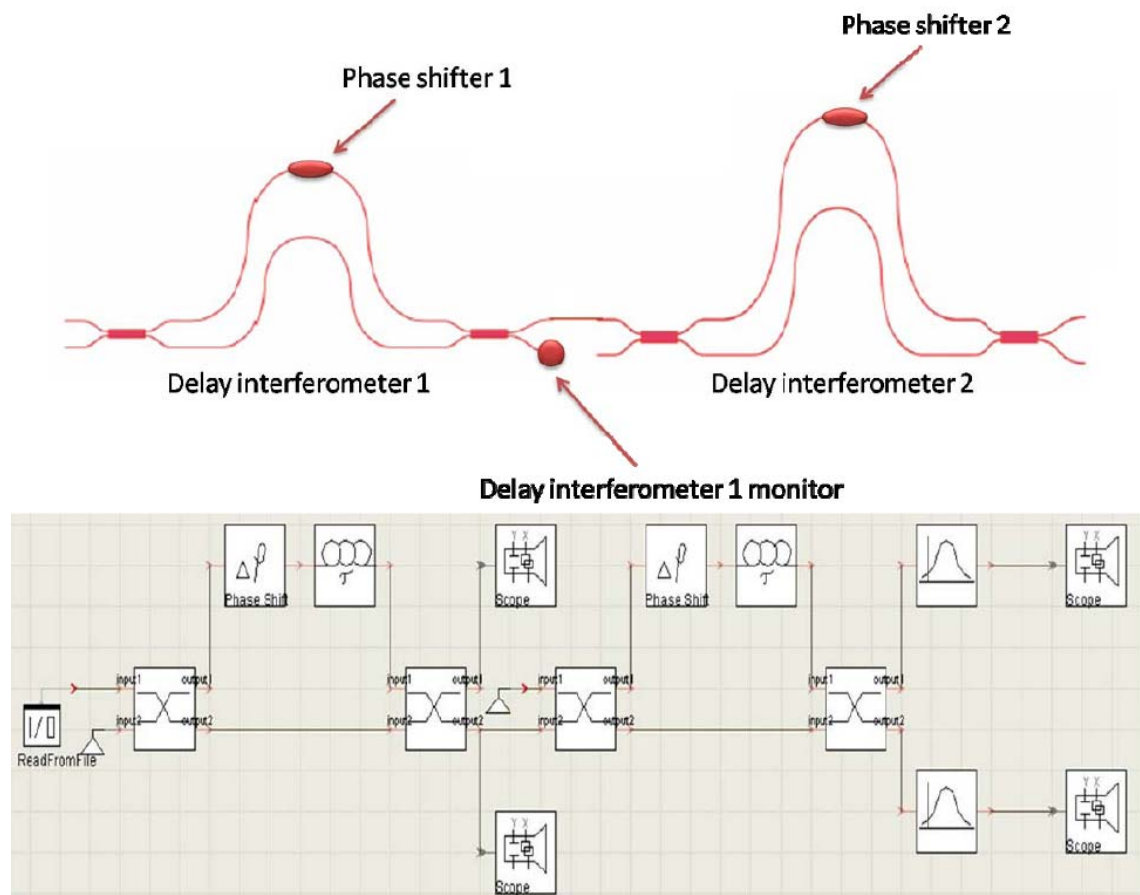
### 4.4.4 Επέκταση της πλατφόρμας εξομοίωσης για WDM μετάδοση

Στην ενότητα αυτή επεκτείνουμε την μελέτη μας πάνω στην αρχιτεκτονική του SOA/OBF/DI –το οποίο αφορά μετάδοση ενός μήκους κύματος- προκειμένου να μελετήσουμε την περίπτωση της WDM μετάδοσης. Πρωταρχικό βήμα στην μελέτη αυτή ήταν η αντικατάσταση του ζωνοπερατού φίλτρου με ένα περιοδικό φίλτρο το οποίο θα μπορεί να λειτουργήσει σε WDM λειτουργία. Το περιοδικό φίλτρο επιλέχθηκε να είναι ένα DI, παρέχοντας έτσι την δυνατότητα για μετέπειτα υψηλής φωτονικής ολοκλήρωσης σε πλατφόρμες SOI.

Η δομή του SOA παραμένει η ίδια με αυτήν του σχήματος 43. Τα διαδοχικά DIs απεικονίζονται στο σχήμα 47. Και τα δυο DIs είναι παθητικά MZIs με συγκεκριμένη χρονική καθυστέρηση καθώς και την χρήση ενός μετατοπιστή φάσης «phase shifter» στον

**Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.**

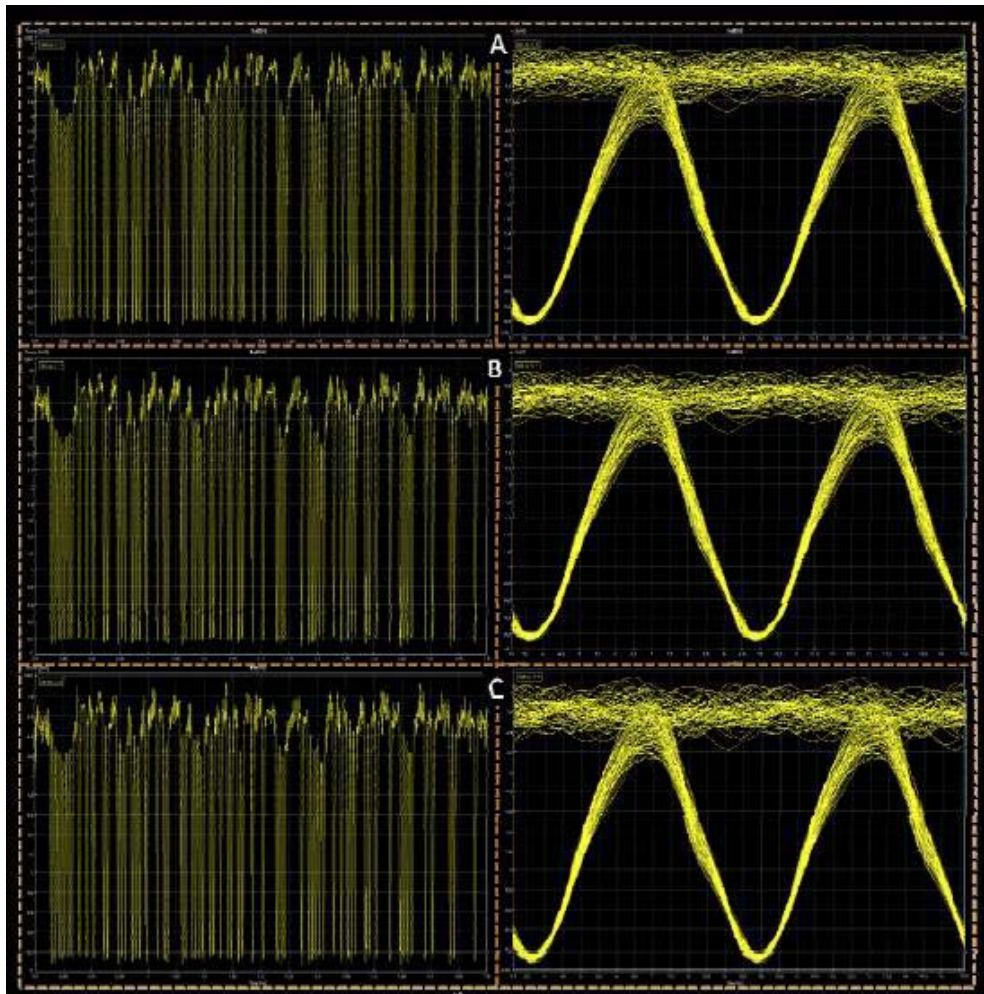
ένα βραχίονα τους. Πρωταρχικά μελετήσαμε την χρονική καθυστέρηση καθώς και την τιμή του phase shifter για το πρώτο DI, με γνώμονα την ποιότητα των διαγραμμάτων ματιού των αντεστραμμένων σημάτων στην έξοδο του. Τα βέλτιστα αποτελέσματα εξομοίωσης που επιτύχαμε στο πρώτο DI είναι  $\Delta\tau=1$  ps για τρεις διαφορετικές τιμές της φάσης του σήματος, 205, 210 και 215 μοίρες.



**Σχήμα 47:** Σχηματική αναπαράσταση των διατεταγμένων σε σειρά DIs (πάνω) καθώς και η διάταξη εξομοίωσης των δυο DIs με χρήση του λογισμικού εξομοίωσης VPI (κάτω).

Τα αποτελέσματα από την εξομοίωση του προαναφερθέντος κυκλώματος φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα.

Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

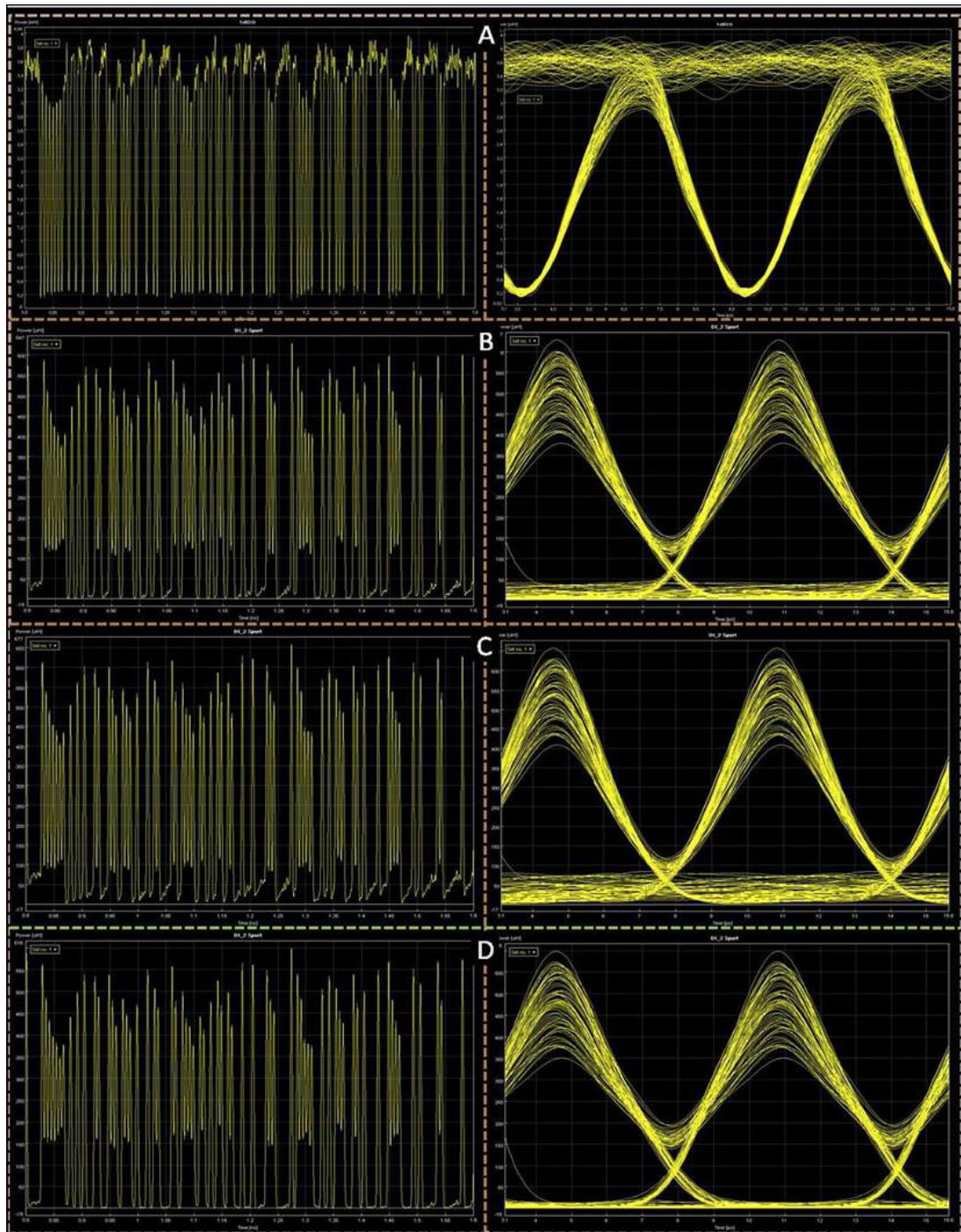


Σχήμα 48: Ακολουθία παλμών και αντίστοιχα διαγράμματα ματιού του σήματος που εξέρχεται του πρώτου DI με  $\Delta\tau=1ps$ . και μετατόπιση φάσης A) 205 μοίρες, B) 210 μοίρες και C) 215 μοίρες αντίστοιχα.

Στο επόμενο βήμα ο στόχος μας ήταν να καθορίσουμε την χρονική καθυστέρηση του δεύτερου DI, προκειμένου να επιτυγχάνεται η βέλτιστη λειτουργία του συνολικού πλέον αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος αποτελούμενο από τον SOA/DI/DI σε σειρά. Προκειμένου να το επιτύχουμε αυτό διατρέξαμε μια ακολουθία εξομοιωτικών διατάξεων με διαφορετικές παραμέτρους τόσο στην στρόφη φάσης που παίρνει το σήμα όσο και στην χρονική καθυστέρηση του δεύτερου DI. Τα αποτελέσματα αυτά συνοψίζονται στα ακόλουθα σχήματα:

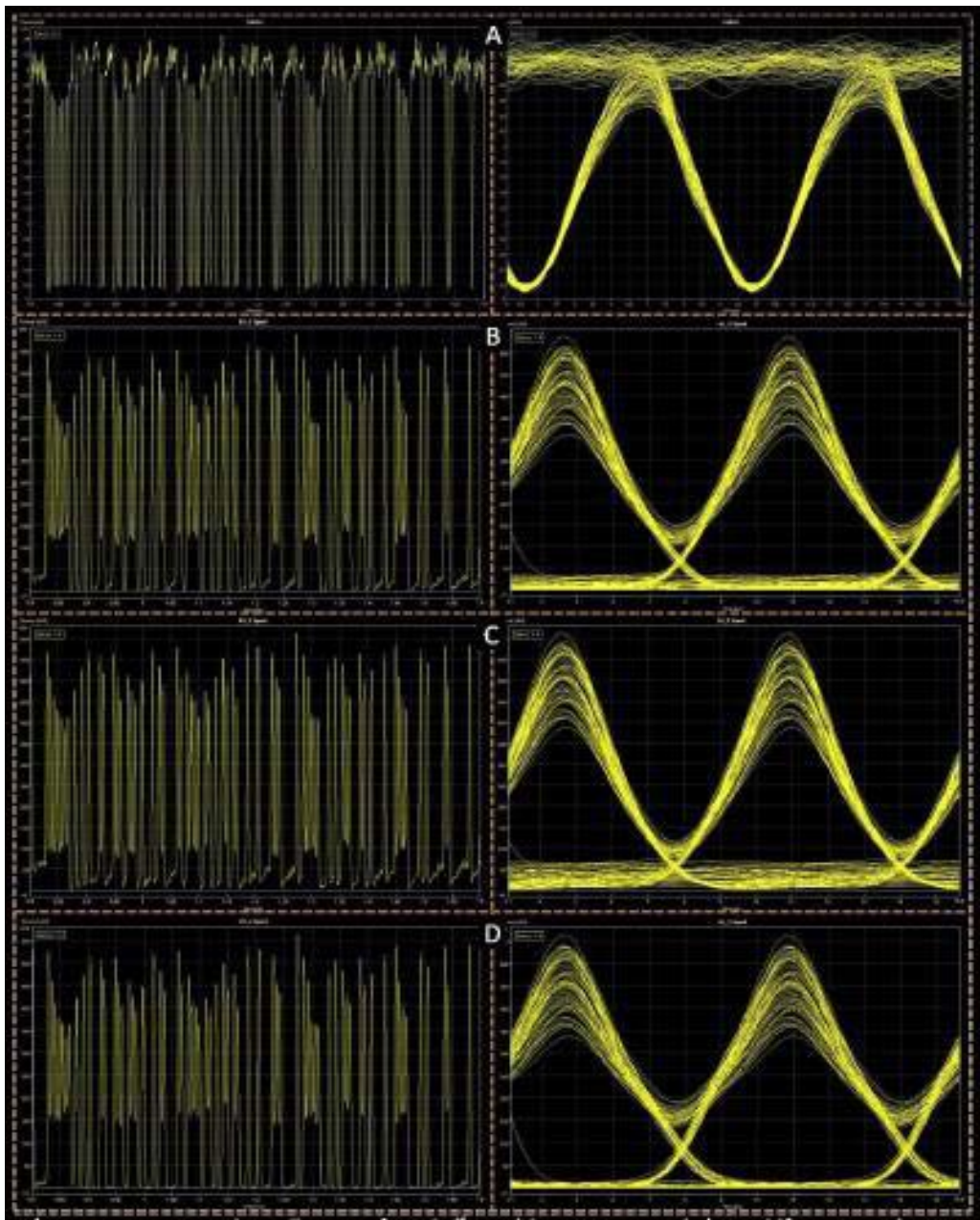


Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.



Σχήμα 49: Ακολουθία παλμών και αντίστοιχα διαγράμματα ματιού για : A) 1<sup>ο</sup> DI με  $\Delta\tau=1\text{ps}$  και μετατόπιση φάσης 205 μοίρες, B) 2<sup>ο</sup> DI με  $\Delta\tau=2\text{ps}$  και μετατόπιση φάσης 0 μοίρες, C) 2<sup>ο</sup> DI με  $\Delta\tau=2\text{ps}$  και μετατόπιση φάσης 5 μοίρες, D) 2<sup>ο</sup> DI με  $\Delta\tau=2\text{ps}$  και μετατόπιση φάσης 355 μοίρες

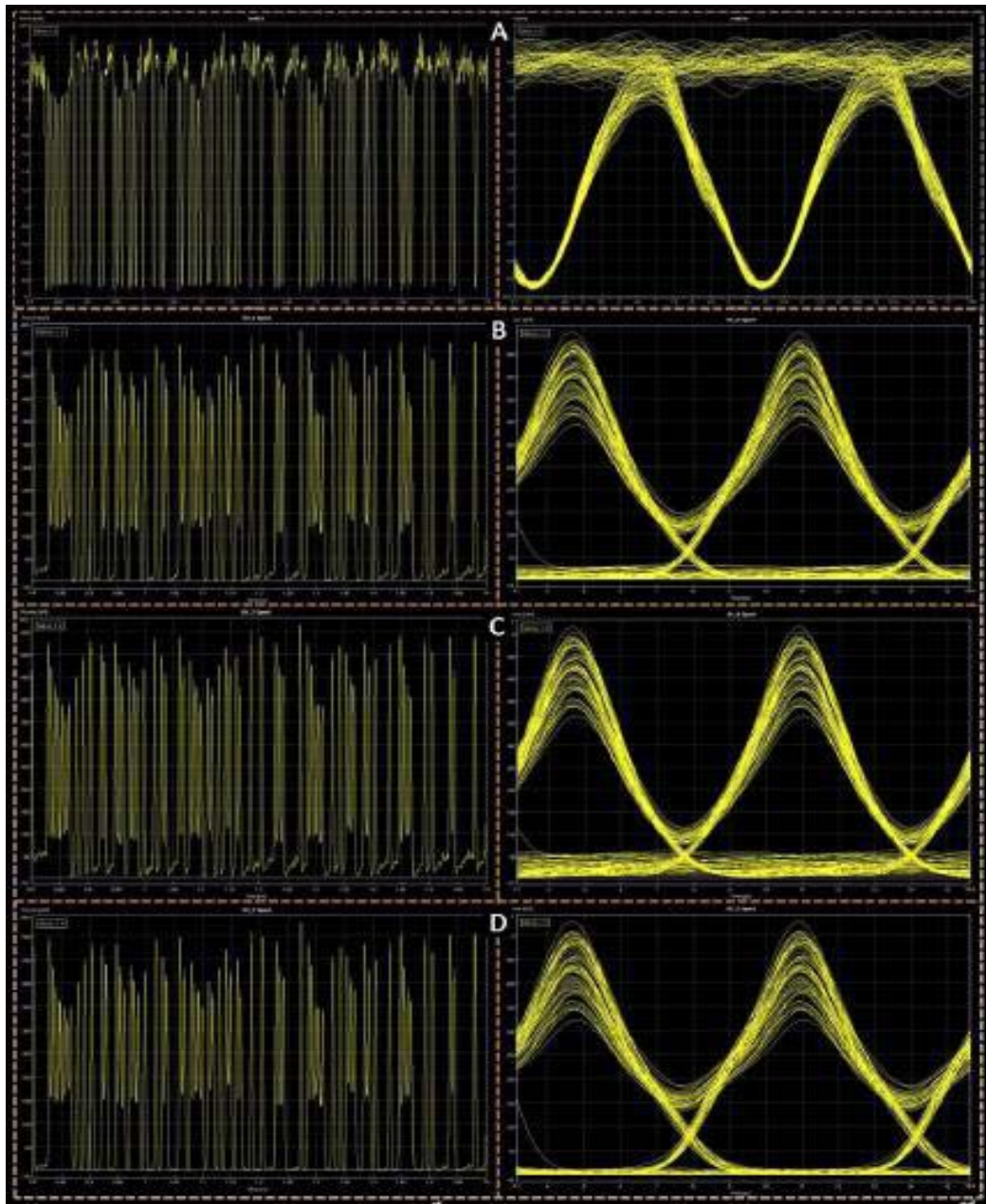
Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.



Σχήμα 50: Ακολουθία παλμών και αντίστοιχα διαγράμματα ματιού για : A) 1<sup>ο</sup> DI με  $\Delta\tau=1\text{ps}$  και μετατόπιση φάσης 210 μοίρες, B) 2<sup>ο</sup> DI με  $\Delta\tau=2\text{ps}$  και μετατόπιση φάσης 0 μοίρες, C) 2<sup>ο</sup> DI με  $\Delta\tau=2\text{ps}$  και μετατόπιση φάσης 5 μοίρες, D) 2<sup>ο</sup> DI με  $\Delta\tau=2\text{ps}$  και μετατόπιση φάσης 355 μοίρες

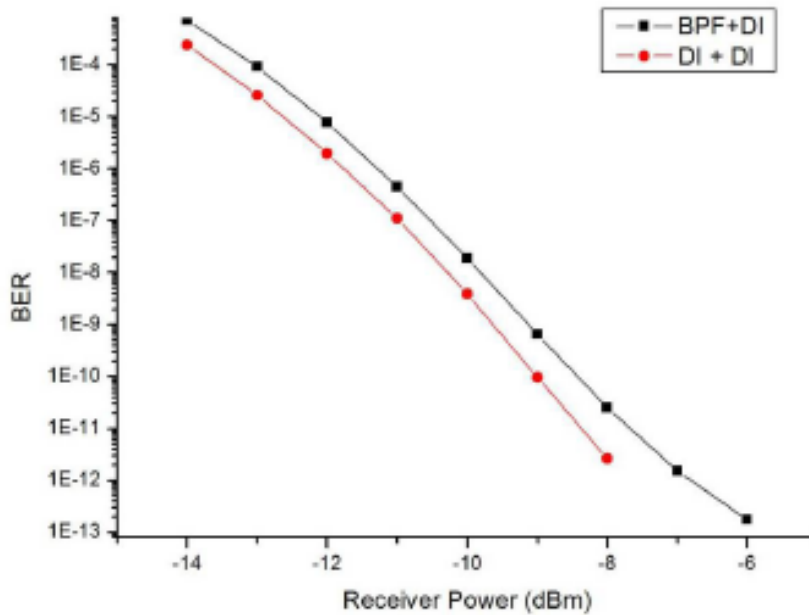


Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.



Σχήμα 51: Ακολουθία παλμών και αντίστοιχα διαγράμματα ματιού για : A) Figure 4-4: 1° DI με  $\Delta\tau=1\text{ps}$  και μετατόπιση φάσης 215 μοίρες, B) 2° DI με  $\Delta\tau=2\text{ps}$  και μετατόπιση φάσης 0 μοίρες, C) 2° DI με  $\Delta\tau=2\text{ps}$  και μετατόπιση φάσης 5 μοίρες, D) 2° DI με  $\Delta\tau=2\text{ps}$  και μετατόπιση φάσης 355 μοίρες

Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.



Σχήμα 52: Καμπύλες μετρήσης ρυθμού σφαλμάτων. Η μαύρη καμπύλη δείχνει την απόδοση του σχήματος SOA/OBF/DI ενώ η κόκκινη καμπύλη δείχνει την βέλτιστη λειτουργία του SOA/DI/DI σχήματος.

Το σχήμα 52 παρουσιάζει τις μετρήσεις σφαλμάτων τόσο για την περίπτωση του σχήματος SOA/OBF/DI όσο και του σχήματος SOA/DI/DI. Οι πειραματικές μετρήσεις παρουσιάζουν αντίστοιχη συμπεριφορά στην έξοδο τους, διατηρώντας μικρή απόκλιση μεταξύ τους, γεγονός που συντελεί στον επιτυχή προσδιορισμό των παραμέτρων τόσο για το SOA όσο και για τα απαιτούμενα φίλτρα προκειμένου να λειτουργήσει αποδοτικά η προτεινόμενη αρχιτεκτονική υλοποίησης ενός αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος. Οι παράμετροι αυτοί συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Διάταξη	Παράμετρος	$\Delta\tau$ (ps)	$\Delta\varphi$ (μοίρες)
	DI 1	1 ps	215
	DI 2	2 ps	355

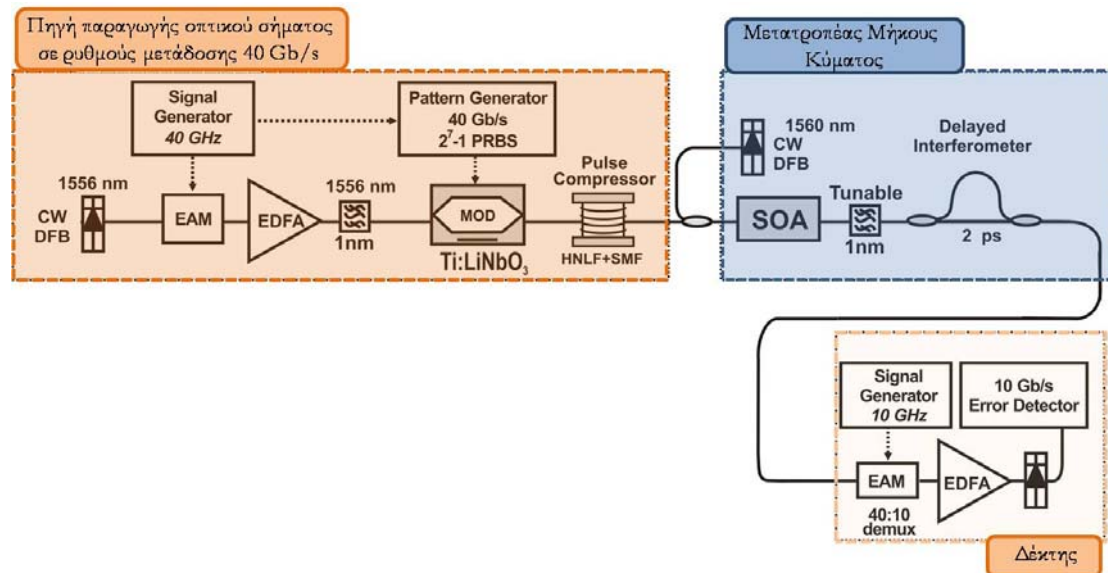
Πίνακας 5: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων με χρήση του λογισμικού εξομίωσης VPI των παραμέτρων για την κατασκευή των δυο συμβολομετρικών διατάξεων σταθερής χρονικής καθυστέρησης.

Στην συνέχεια της προσπάθειας μας για τον ακριβή προσδιορισμό των παραμέτρων εκείνων που συντελούν στον πλήρη χαρακτηρισμό της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος παραθέτουμε πλήν των εξομοιωτικών μετρήσεων και

## Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

την παρουσίαση ενός προκαταρκτικού πειράματος που έγινε στο ΕΦΕ και το οποίο παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα.

### 4.4.5 Πειραματική διάταξη



Σχήμα 53: Πειραματική διάταξη ενός αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος με χρήση ενός SOA σε συνδυασμό με ένα οπτικό ζωνοπερατό φίλτρο.

Η πειραματική διάταξη που ακολουθήθηκε για την κατασκευή ενός αμιγώς οπτικού μετατροπέα με χρήση οπτικού ζωνοπερατού φίλτρου φαίνεται στο σχήμα 53. Αποτελείται από την πηγή παραγωγής του οπτικού σήματος, το υπο μελέτη σύστημα μετατροπής μήκους κύματος βασισμένο στην τεχνική της ετερο-διαμόρφωσης κέρδους καθώς και τον δέκτη. Προκειμένου να παράγουμε το σήμα άντλησης ( pump signal) η οπτική πηγή μας δομείται ως εξής: Ένα διοδικό laser παραγωγής συνεχούς φωτός σε μήκος κύματος 1556 nm, εισέρχεται σε ένα διαμορφωτή ήλεκτρο-απορρόφησης (Electro-Absorption Modulator) για την παραγωγή διαμορφωμένων οπτικών παλμών ρολογιού εύρους 9 psec. Η παραγόμενη παλμοσειρά, αφού ενισχυθεί από ένα οπτικό ενισχυτή ίνας ερβίου, διαμορφώνεται στη συνέχεια, εξωτερικά (external modulation) με τη βοήθεια ενός ηλεκτρο-οπτικού διαμορφωτή πλάτους νιοβικού λιθίου με προσμίξεις τιτανίου (Ti:LiNbO<sub>3</sub> modulator), ο οποίος οδηγείται από μια μικροκυματική γεννήτρια  $2^7-1$  ψευδοτυχαίας ακολουθίας (Pseudo-Random Bit Sequence Generator – PRBS Generator). Στην έξοδο του διαμορφωτή παράγεται, επομένως, μια οπτική  $2^7-1$  ψευδοτυχαία ακολουθία δεδομένων σε συχνότητα 40 Gb/s.

Το διαμορφωμένο σήμα εν συνεχεία εισέρχεται σε ένα συμπιεστή ίνας στην έξοδο του οποίου παρατηρούμε το σήμα της πηγής μετά από την συμπίεση να έχει εύρος 1.7 psec. Το



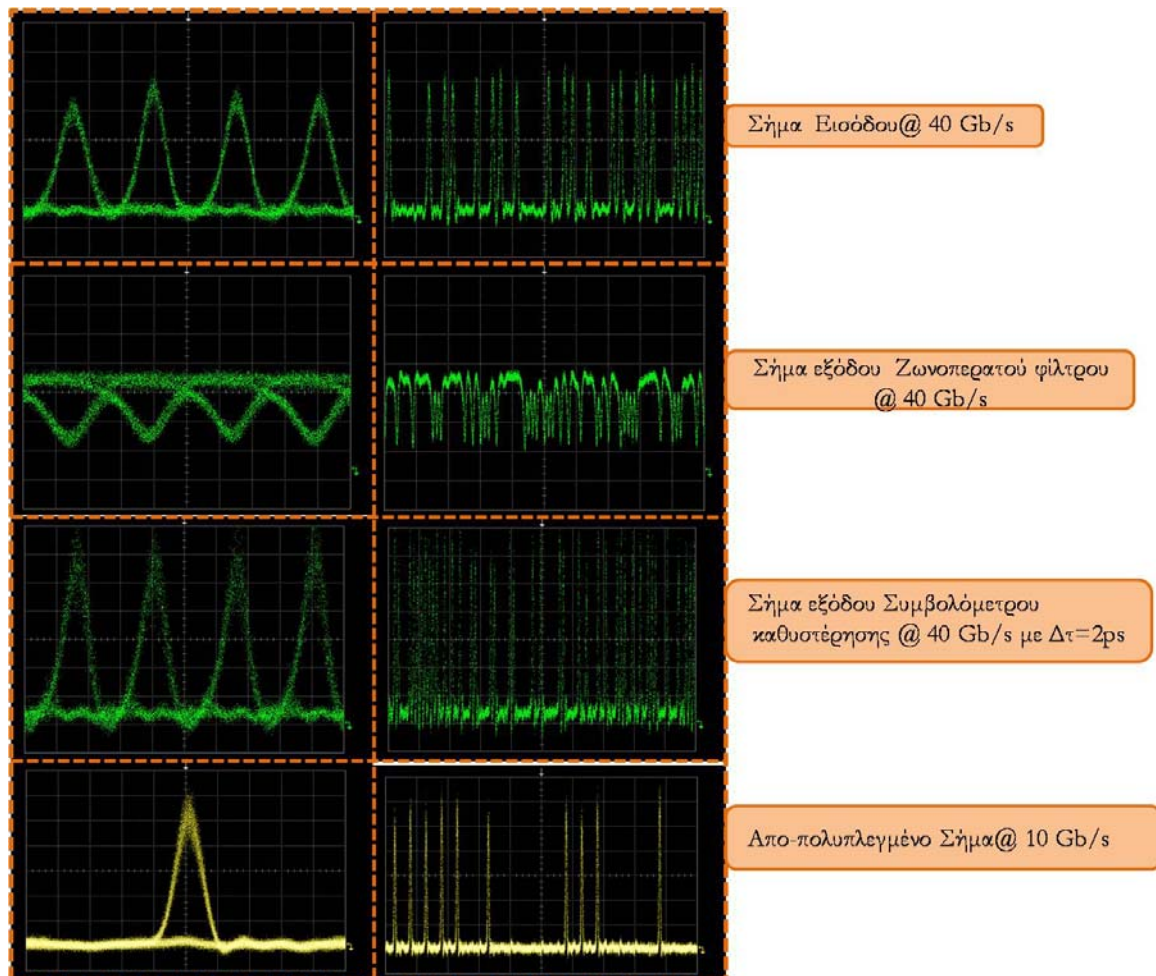
**Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.**

σήμα αυτό αφού πολυπλεχθεί με ένα συνεχές σήμα μήκους κύματος 1560 nm το οποίο παράγεται από τον ελεγκτή δρομολόγησης (τοπικό CW), αποτελεί το σήμα εισόδου στον μετατροπέα μήκους κύματος. Ο ημιαγωγίμος οπτικός ενισχυτής έχει κατασκευαστεί από την αγγλική εταιρία CIP και τροφοδοτείται από ηλεκτρικό ρεύμα 300 mA. Το σήμα εξερχόμενο του SOA έχει εύρος 2 ps ενώ η πόλωση του είναι αντεστραμμένη σε σχέση με το σήμα της πηγής μας και αφότου περάσει από ένα DI με χρονική καθυστέρηση ίση του εύρους του διφύου εξέρχεται του μετατροπέα μήκους κύματος με την πόλωση του ίδια με του αρχικού σήματος και εισέρχεται στον δέκτη όπου και λαμβάνονται οι μετρήσεις σφαλμάτων για την πλήρης αξιολόγηση της επιτυχούς λειτουργίας του συστήματος μας. Στην περίπτωση αυτή το σήμα αποπολυπλέκεται με την χρήση ενός EAM σε τέσσερα κανάλια των 10 Gb/s τα οποία αφότου μετατραπούν από οπτικά σε ηλεκτρικά, τα σήματα αυτά εισέρχονται στον μετρητή σφαλμάτων (BERT), λαμβάνοντας τις καμπύλες του σχήματος 56.

Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

#### 4.4.6 Πειραματικά αποτελέσματα

Τα πειραματικά αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί.



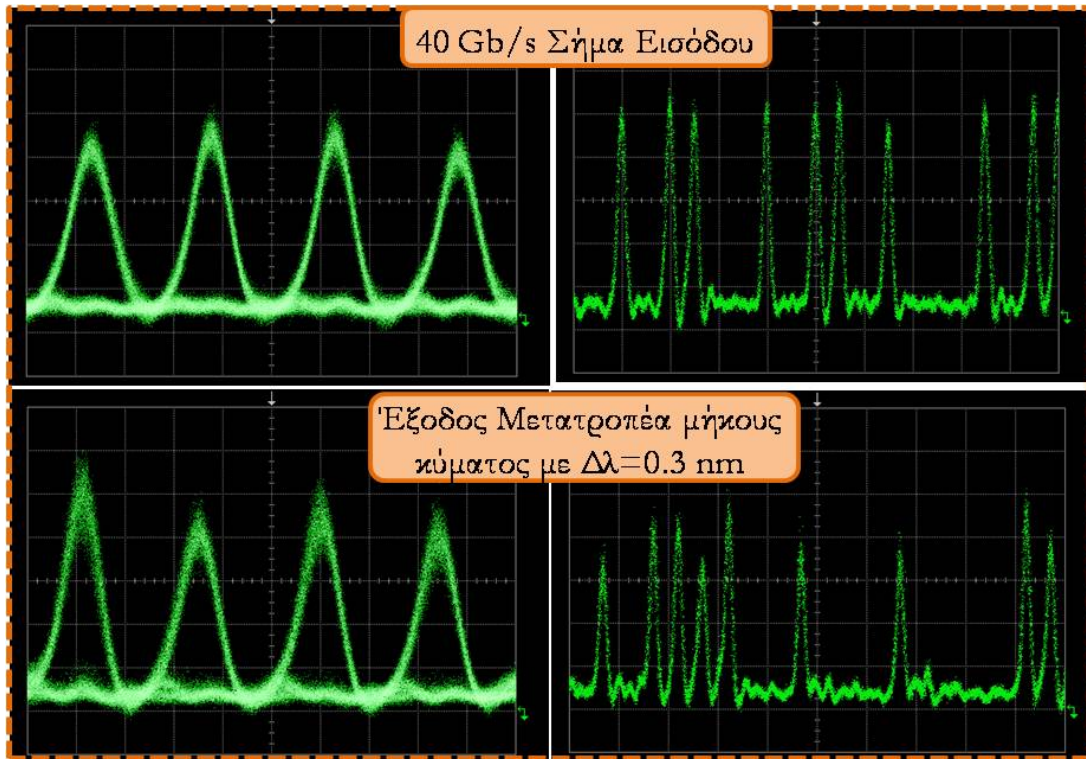
Σχήμα 54: Πειραματικά αποτελέσματα του συστήματος SOA/OBF/DI για την περίπτωση όπου το ζωνοπερατό φίλτρο είναι μετατοπισμένο προς τις «μπλέ» συνιστώσες του φέροντος κατά 0.1 nm .

Στην πρώτη γραμμή παρατηρούμε το διαμορφωμένο σήμα που παράγεται από την οπτική μας πηγή σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s. Στην δεύτερη γραμμή παρατηρούμε την έξοδο του μετατροπέα μήκους κύματος. Στην περίπτωση αυτή το φίλτρο μας είναι απορρυθμισμένο κατά 0.1 nm προς την μπλε περιοχή σε σύγκριση με το φέρον προκειμένου να πάρουμε το σήμα μας γραμμένο στο νέο μήκος κύματος με αντεστραμμένη πόλωση από αυτήν του αρχικού.

Εν συνεχεία και με την χρήση του συμβολόμετρου καθυστέρησης, το σήμα αποκτά την ίδια πόλωση με το αρχικό, το αποτέλεσμα του οποίου φαίνεται στην γραμμή 3 του σχήματος 54. Τέλος το αποπολυπλεγμένο σήμα σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s για την μέτρηση του ρυθμού σφάλματος φαίνεται στην τελευταία γραμμή του σχήματος 54. Παρόμοια διαδικασία ακολουθήθηκε και στην περίπτωση που το ζωνοπερατό φίλτρο ήταν ακόμα

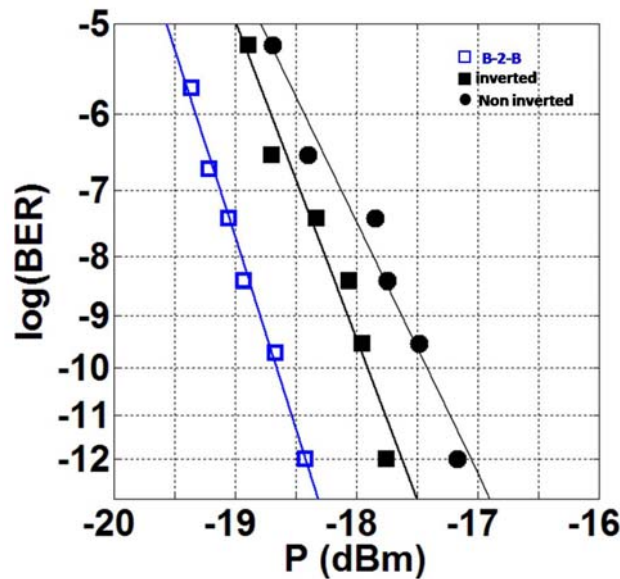
Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

περισσότερο μετατοπισμένο κατά 0.3 nm προς την μπλε περιοχή σε σύγκριση με το φέρον τα αποτελέσματα του οποίου φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 55: Πειραματικά αποτελέσματα του συστήματος SOA/OBF/DI για την περίπτωση όπου το ζωνοπερατό φίλτρο είναι μετατοπισμένο προς τις «μπλέ» συνιστώσες του φέροντος κατά 0.3 nm.

Η καμπύλη του ρυθμού σφάλματος που μετρήθηκε για τις δύο αυτές περιπτώσεις παρουσιάζεται στο σχήμα 56.



Σχήμα 56: Καμπύλες μετρησης ρυθμού σφαλμάτων και για τις δύο διαφορετικές μετατοπίσεις του ζωνοπερατού φίλτρου σε σχέση με την συχνότητα του φέροντος. Inverted= 0.1 nm και non-inverted=0.3 nm

## **Κυκλώμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.**

Το ενεργειακό σφάλμα που διαφαίνεται στις καμπύλες του σχήματος 56, είναι 0.8 dB για την περίπτωση που το φίλτρο είναι απορρυθμισμένο κατά 0.1 nm και 1.3 dB στην περίπτωση που το φίλτρο είναι απορρυθμισμένο κατά 0.3 nm, σε σχέση με την συχνότητα του φέροντος.

Παρατηρώντας επομένως τόσο τα πειραματικά αποτελέσματα όσο και τις καμπύλες σφάλματος μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η προτεινόμενη αρχιτεκτονική παρέχει όχι μόνο απλότητα στην κατασκευή αλλά και σταθερότητα σε ότι αφορά την λειτουργία του όλου συστήματος και για τις δυο περιπτώσεις απορύθμισης του ζωνοπερατού φίλτρου. Απόρροια της μελέτης αυτής επομένως αποτέλεσε η μετάβαση μας εν συνεχεία στην δημιουργία ενός νέου συστήματος βασισμένο στην αρχιτεκτονική αυτή όπου το ζωνοπερατό φίλτρο έχει αντικατασταθεί από μια ολοκληρωμένη οπτική διάταξη με χρήση πυριτίου όπως αυτό φαίνεται στο σχήμα 40 . Βασικό δομικό στοιχείο του είναι η χρήση φίλτρων μικρο δακτυλίου με περιοδικό φάσμα τα οποία και αναλύονται ακολούθως.

Η σημαντικότητα όμως του όλου εγχειρήματος δεν καθίσταται μόνο στην δυνατότητα μετάδοσης περισσότερων του ενός μήκους κύματος, μεταπηδώντας επομένως από την απλή λειτουργία στην WDM λειτουργία, αλλά λόγω της αξιοποίησης της χρήσης πυριτίου σαν πρώτη ύλη, η κατασκευή του αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος με βασικό δομικό στοιχείο το ROADM, θα επιφέρει δραστική μείωση καλύπτοντας βασικούς τομείς αξιολόγησης της αποδοτικότητας ενός τέτοιου συστήματος όπως η κατανάλωση ενέργειας, το μέγεθος, η ταχύτητα λειτουργίας καθώς και το κόστος κατασκευής.

## **Εξομοίωση συστήματος μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο δακτυλίου σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s**

Στην παράγραφο αυτή γίνεται μια εκτενής αναφορά στην διαδικασία εξομοίωσης των κατάλληλων παραμέτρων για την κατασκευή φίλτρων μικρο-δακτυλίου, τα οποία θα δύναται να λειτουργούν σε ρυθμούς μετάδοσης 40 Gb/s και άνω. Συγκεκριμένα παρέχεται μια ομάδα από προκαταρκτικά πειραματικά αποτελέσματα προτού επεκταθεί η εργασία μας στην κατασκευή φίλτρων μικροδακτυλίου για ταχύτητες μετάδοσης 160 Gb/s.

### **Μοντελοποίηση**

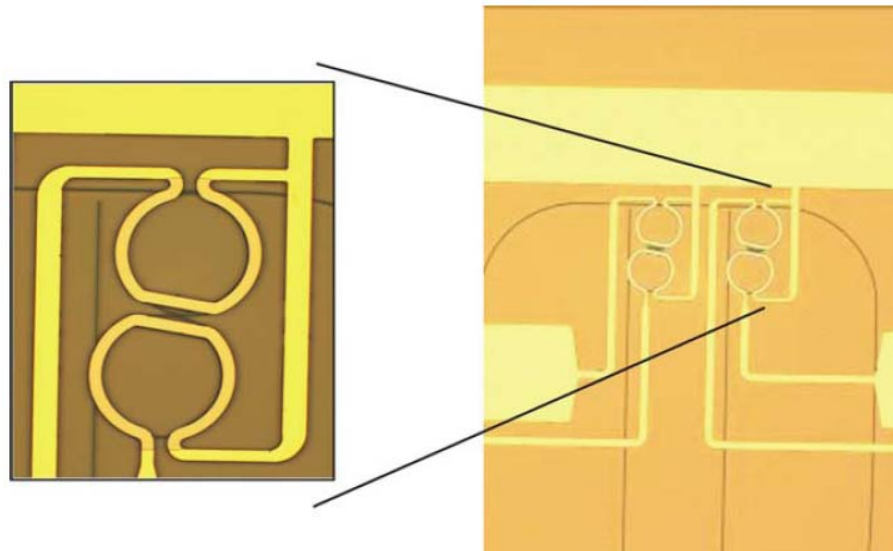
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζουμε τα βασικά βήματα μοντελοποίησης της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής με χρήση ενός οπτικού ημιαγωγίμου ενισχυτή και ενός δεύτερης τάξης φίλτρου μικροδακτυλίου σε σειρά, προτού επεκταθούμε στην μοντελοποίηση και σχεδίαση του νέου κυκλώματος που θα λειτουργεί στα 160 Gb/s αξιοποιώντας τα ίδια στοιχεία. Η διαδικασία μοντελοποίησης αποτελείται από δυο φάσεις:

1. Πειραματικός χαρακτηρισμός του ROADM διαμέσω καταγραφής του φασματικού περιεχομένου του στοιχείου αυτού

**Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.**

2. Ένταξη του ROADM στην πλατφόρμα εξομοίωσης του μετατροπέα μήκους κύματος μέσω του προγράμματος VPI, η οποία μελετήθηκε σε προηγούμενη ενότητα καθώς και μελέτη της απόδοσης του συστήματος κάτω από διαφορετικές καταστάσεις.

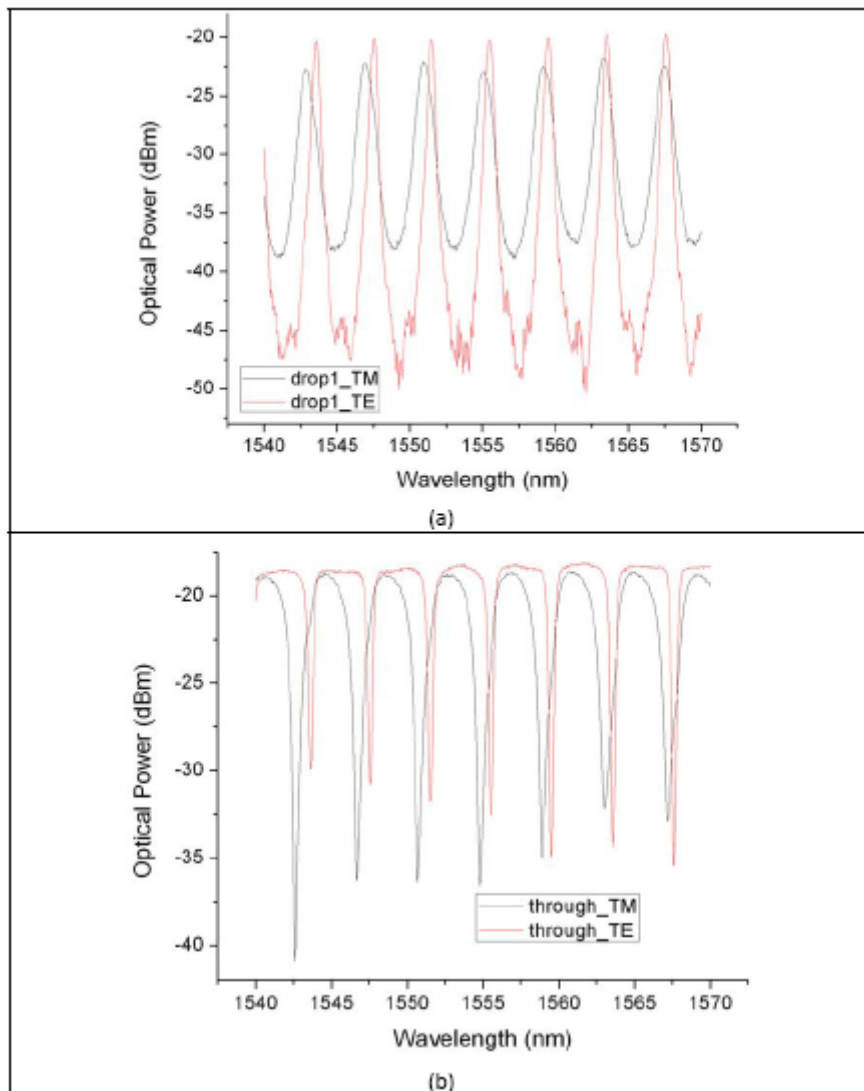
Ο ROADM αποτέλεσε το πρώτο δομικό στοιχείο που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από την LioniX. Αποτελείται από δυο συζευγμένους  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$  TripleX™ φίλτρα μικροδακτυλίου τα οποία μπορούν να ρυθμιστούν ανεξάρτητα μέσω ανεξάρτητων για κάθε φίλτρο «thermal heaters».



**Σχήμα 57: Δεύτερης τάξης ROADM κατασκευασμένο από την ολλανδική εταιρία LioniX**

Το ακόλουθο σχήμα παρουσιάζει τον χαρακτηρισμό της απόκρισης του φάσματος των drop και through εξόδων του ROADM για τις δυο διαφορετικές πολώσεις (TE και TM) του εισερχόμενου σήματος. Η ανάλυση των μετρήσεων ήταν 0.05 nm.

Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.



Σχήμα 58: Φασματική απόκριση των α) Drop έξοδος β) Through έξοδος του δεύτερης τάξης ROADM

Από το σχήμα 58 είναι εύκολα αντιληπτό, ότι ο ROADM έχει φασματική απόκριση πλησίον της Gaussian μορφής, γεγονός που ταιριάζει απόλυτα στην λειτουργία του αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος. Ο πειραματικός χαρακτηρισμός του ROADM δείχνει ότι το 3 dB εύρος ζώνης του φίλτρου, κεντραρισμένο στα 1552 nm για την TM πόλωση είναι 110 GHz (0.88 nm) και 55 GHz (0.44 nm) για την TE πόλωση αντιστοίχως. Το FSR μεταξύ των κορυφών είναι περίπου 500 GHz (4 nm), το οποίο είναι αποδεικτό για την αποπολυπλεξία WDM σημάτων, στα 40 Gb/s.

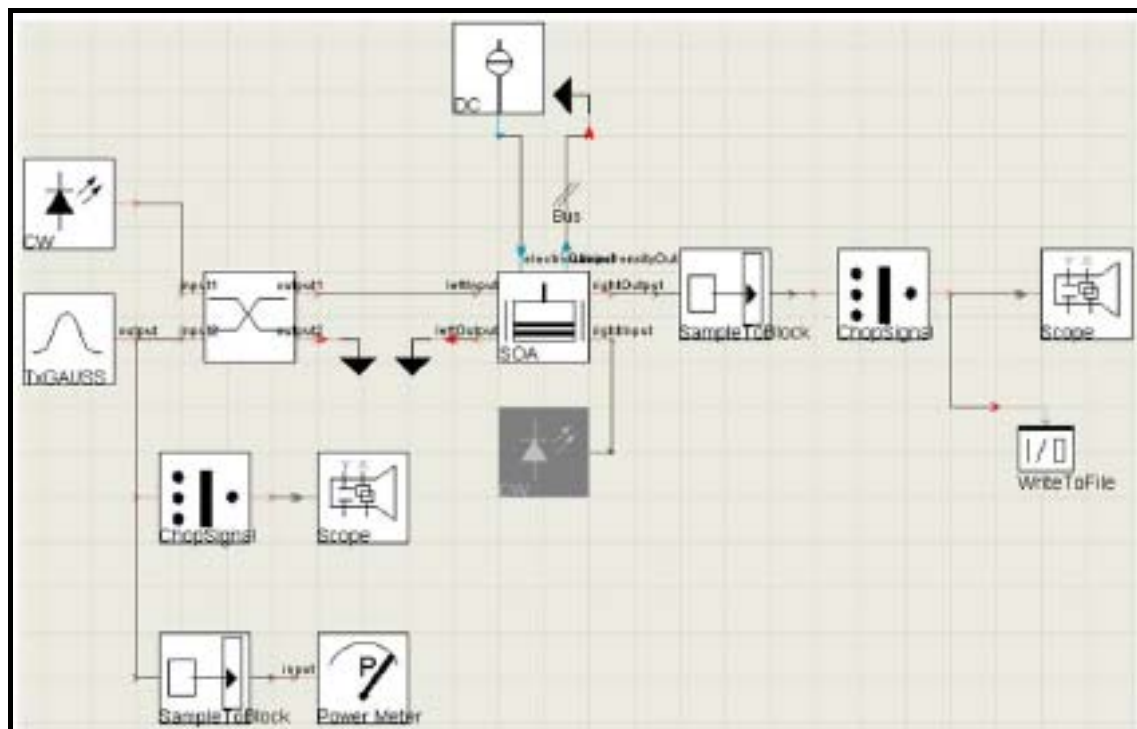
Δεδομένων των άνωθεν χαρακτηριστικών, το εύρος ζώνης και το FSR του φίλτρου δεν είναι κατάλληλα για λειτουργία στα 160 Gb/s, λόγω του μεγάλου εύρους ζώνης που καταλαμβάνουν τα σήματα αυτά. Με βάση τα αποτελέσματα από εξομοιώσεις που έγιναν



## Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

μέσω της χρήσης του λογισμικού VPI, το ελάχιστο αποδεκτό 3 dB εύρος ζώνης ενός Gaussian φίλτρου για αποτελεσματικό φιλτράρισμα του chirp σε ρυθμούς μετάδοσης 160 Gb/s πρέπει να είναι 160 GHz (1.28 nm). Επιπρόσθετα, οι κορυφές της περιοδικής απόκρισης των φίλτρων μικροδακτυλίου πρέπει να είναι τουλάχιστον 600 GHz (4.8 nm) μεταξύ τους, προκειμένου να επιτύχουμε αποδοτική απομόνωση μεταξύ γειτονικών καναλιών.

Από την άλλη μεριά σήματα μεταδιδόμενα σε ρυθμό 40 Gb/s, καταλαμβάνουν μόνο ένα τμήμα του εύρους ζώνης των 160 Gb/s σημάτων. Έτσι η φασματική απόκριση του ROADM είναι αρκετά αποδεκτή για λειτουργία του μετατροπέα μήκους κύματος στα 40 Gb/s. Μετά την καταγραφή των παραμέτρων λειτουργίας των φίλτρων μικρο-δακτυλίου, παρουσιάζουμε κάποια αποτελέσματα από την χρήση της πλατφόρμας εξομοίωσης VPI για την μελέτη της λειτουργίας του μετατροπέα μήκους κύματος. Η φασματική απόκριση που επιλέχθηκε για τις εξομοιώσεις μας είναι η TM πόλωση λόγω του υψηλότερου 3dB εύρους ζώνης κάθε φασματικής κορυφής.



Σχήμα 59: Διάταξη εξομοίωσης SOA

Το σχήμα 59 παρουσιάζει την πειραματική διάταξη του SOA όπως αυτή εξομοιώθηκε με την χρήση του λογισμικού VPI. Ο πομπός μας αποτελείται από :

- Ένα CW laser το οποίο εκπέμπει στα 192.75 THz με οπτική ισχύς εξόδου 5.2 mW (2.6 mW στην είσοδο του SOA)

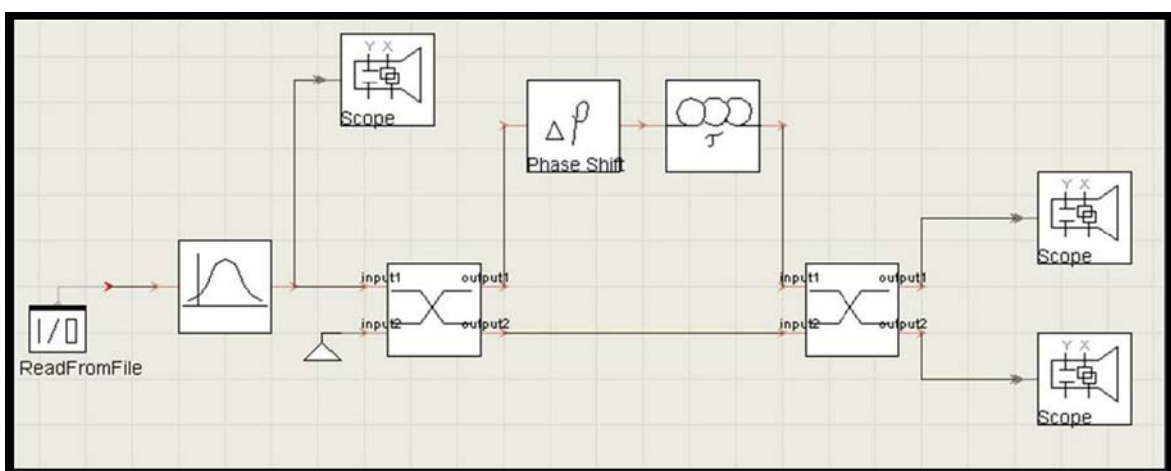
**Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.**

- Μια παλμική πηγή φωτός η οποία εκπέμπει διαμορφωμένο σήμα ψευδοτυχαίας ακολουθίας τάξης  $2^7-1$ , με εύρος παλμού 2 ps, μέση οπτική ισχύς 10 mW (5.2 mW στην είσοδο του SOA) και συχνότητα εκπομπής στα 194 THz.

Και τα δυο σήματα ενώνονται μέσω ενός 50:50 οπτικού συζεύκτη προτού εισέλθουν στον SOA. Η έξοδος του SOA καταγράφεται σε ένα αρχείο ονόματι "WriteToFile". Οι βασικές παράμετροι του ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή που χρησιμοποιήθηκαν στις εξομοιώσεις, περιλαμβάνονται στον πίνακα που ακολουθεί, προσεγγίζοντας σε μεγάλο βαθμό τις παραμέτρους εμπορικά διαθέσιμων SOAs.

Parameter	Value	Unit	Parameter	Value	Unit
<b>Device Structure</b>			<b>Gain Parameters</b>		
Active Region Type	Bulk		Gain Model	Linear	
Device Section Length	1600.0e-06	m	Gain Coefficient Linear	6.5e-20	m <sup>2</sup>
Active Region Width	1.2e-06	m	Carrier Density Transparency	1e+24	1/m <sup>3</sup>
Active Region Thickness	0.1e-06	m	Gain Shape Model	Flat	
Current Injection Efficiency	1		Nonlinear Gain Coefficient	6e-23	m <sup>3</sup>
<b>Optical Parameters</b>			Nonlinear Gain Time constant	300e-15	s
Nominal Wavelength	1.5525e-6		Chirp Model	Linewidth Factor	
Group Effective Index	3.5		Linewidth Factor	6	
Internal Loss	8800		Carrier Density Ref Index	2.0e+24	1/m <sup>3</sup>
Confinement Factor	0.17		<b>Spontaneous Emission</b>		
Internal Loss Carrier Dependency	0		Noise Model	Inversion Parameter	
Optical Coupling Efficiency	0.5		Inversion Parameter	4	
Facet Reflectivity	1e-6				
Facet Reflectivity Phase Left	0				
Facet Reflectivity Phase Right	0				
<b>Carrier Dynamics</b>					
Linear Recombination	1e7	1/s			
Bimolecular Recombination	1.0e-17	m <sup>3</sup> /s			
Auger Recombination	9.4e-41	m <sup>6</sup> /s			
Initial Carrier Density	1e24	1/m <sup>3</sup>			

**Πίνακας 6: Παράμετροι SOA που χρησιμοποιήθηκαν στις εξομοιώσεις**

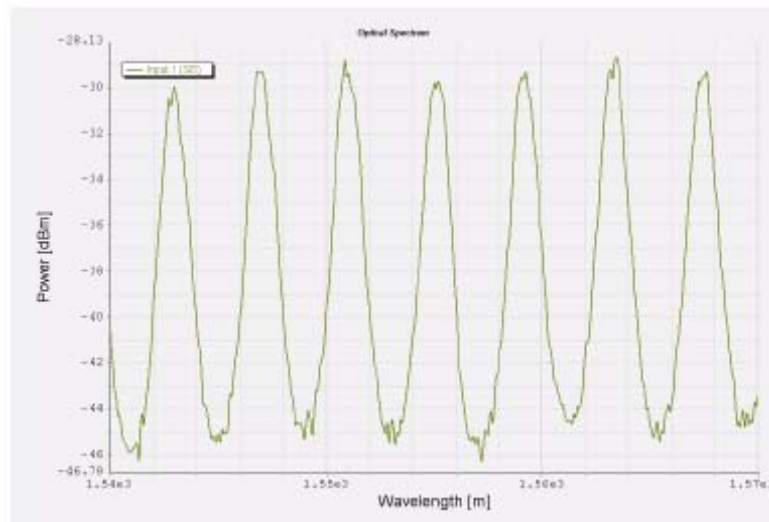


**Σχήμα 60: Διάταξη εξομοίωσης ενός περιοδικού φίλτρου σε σειρά με ένα DI**



## Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

Το σχήμα 60 παρουσιάζει την διάταξη εξομοίωσης ενός περιοδικού φίλτρου σε σειρά με ένα DI. Όταν εισέρχονταν θόρυβος Gaussian μορφής (White Gaussian Noise-WGN), στην είσοδο του φίλτρου, η απόκριση του φίλτρου ήταν η ακόλουθη.



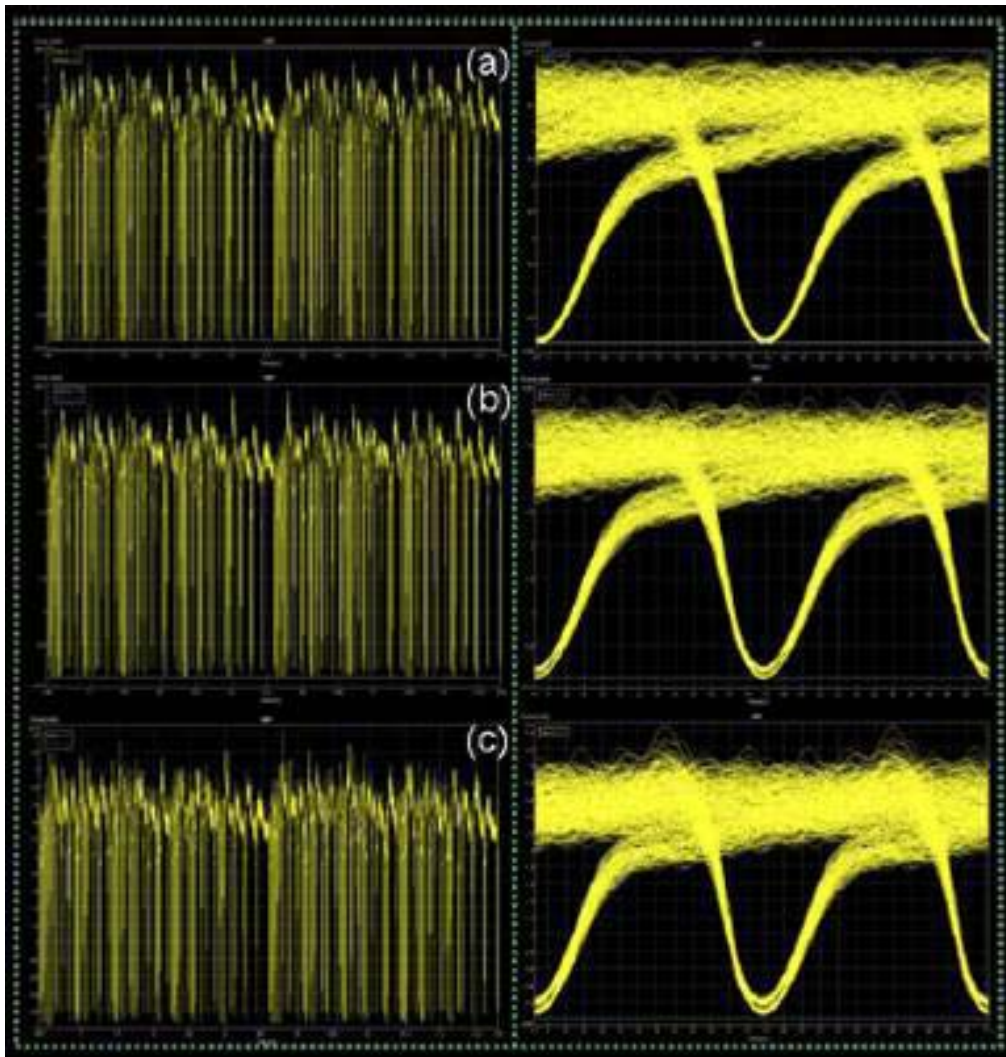
Σχήμα 61: Απόκριση συχνότητας της εξόδου drop του 2<sup>ης</sup> τάξης ROADM, χαρακτηρισμένη για σήμα εισόδου Gaussian θόρυβο. (resolution bandwidth 0.1nm)

Το DI υλοποιήθηκε σαν ένα παθητικό MZI συμβολόμετρο το οποίο χρησιμοποιεί 50:50 συζεύκτες, μια χρονική καθυστέρηση καθώς και ένα phase shifter στον ένα βραχίονα του. Η χρονική καθυστέρηση μεταξύ των δυο βραχιόνων του συμβολόμετρου, είναι ρυθμισμένο σε τιμές παραπλήσιες του εύρους των παλμών ενώ ο phase shifter ανίχνευε συνεχώς διαφορετικές καταστάσεις του φίλτρου με γνώμονα την επίτευξη του βέλτιστου διαγράμματος ματιού στην έξοδο του συστήματος. Υστερά από σειρά μετρήσεων η βέλτιστη τιμή για την επίτευξη των καλύτερων αποτελεσμάτων επετεύχθη για χρονική καθυστέρηση ίση με 3 ps.

### 4.4.7 Αποτελέσματα εξομοίωσης

Το ακόλουθο σχήμα παρουσιάζει τις κυματομορφές στην έξοδο του ROADM για τρεις διαφορετικές συχνοτικές αποκλίσεις του φίλτρου σε σχέση με το φέρον. Συγκεκριμένα το σχήμα 62α) αφορά απόκλιση 40 GHz, το σχήμα 62β) 50 GHz, και το σχήμα 62γ) 60 GHz. Παρατηρούμε ότι αυξάνοντας την συχνοτική απόκλιση του φίλτρου σε σχέση με το φέρον, επιτυγχάνονταν επιτάχυνση του χρόνου ανάκαμψης του κέρδους του SOA με ταυτόχρονη όμως μείωση του σηματοθορυβικού λόγου.

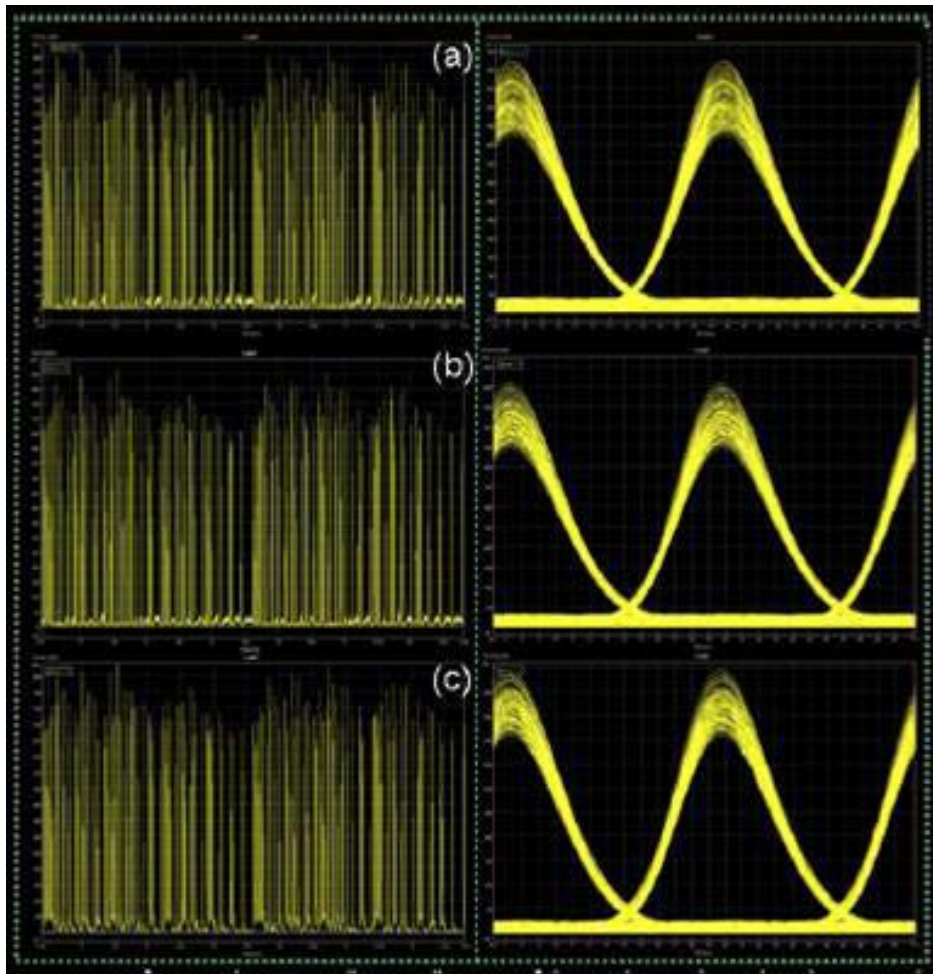
Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.



Σχήμα 62: Ακολουθίες παλμών και αντίστοιχα διαγράμματα ματιού στην έξοδο του ROADM για μετατόπιση του φάσματος σε σχέση με την συχνότητα του φέροντος κατά Α) 40 GHz (0.32 nm), Β) 50 GHz (0.4 nm) και C) 60GHz (0.48 nm).

Το σήμα μετά την διέλευση του από τον μετατροπέα μήκους κύματος και αφότου έχει ανακτήσει την πόλωση του προκειμένου να είναι ίδια με το αρχικό σήμα εισόδου, διερχόμενο μέσω ενός DI, εξέρχεται του DI, με τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα για κάθε μια από τις τρεις καταστάσεις του σχήματος 62.

Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.



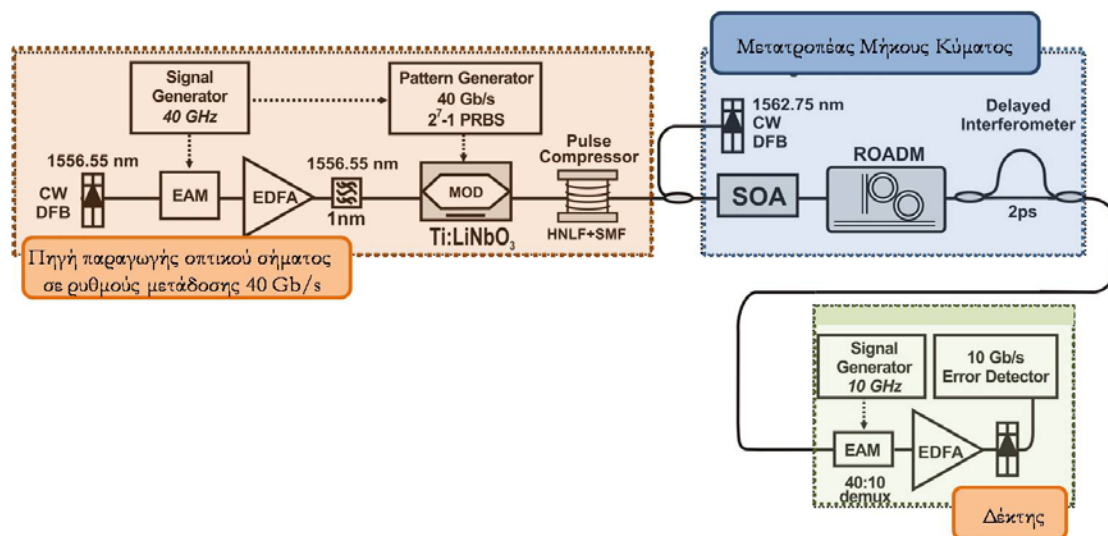
Σχήμα 63: Ακολουθίες παλμών και αντίστοιχα διαγράμματα ματιού στην έξοδο του DI για μετατόπιση του φάσματος σε σχέση με την συχνότητα του φέροντος κατά A) 40 GHz (0.32 nm), B) 50 GHz (0.4 nm) και C) 60GHz (0.48 nm).

Εν συνεχεία ακολουθεί μια σειρά από πειραματικές διατάξεις, οι οποίες βασίστηκαν στην αρχιτεκτονική κατασκευής ενός μετατροπέα μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου, των οποίων τα αποτελέσματα πιστοποιούν πλήρως την ορθότητα των μελετών μας μέσω του λογισμικού εξομοίωσης VPI, αλλά και των προκαταρκτικών πειραμάτων που βασίστηκαν στην αρχιτεκτονική αυτή.

Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

#### 4.5 Πειραματική υλοποίηση συστήματος μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου σε ρυθμούς μετάδοσης 40 Gb/s για RZ ακολουθίες δεδομένων.

Πρωταρχικά η μελέτη μας εστιάστηκε στην αξιολόγηση του συστήματος μετατροπής μήκους κύματος για λειτουργία σε ένα μόνο μήκος κύματος. Η πειραματική υλοποίηση διαφαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί και αναλύεται στις ακόλουθες παραγράφους.



Σχήμα 64: Πειραματική διάταξη της απλής αρχιτεκτονικής ενός αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος, με χρήση 2<sup>ης</sup> τάξης φίλτρων μικρο-δακτυλίου, για ακολουθία παλμοσειρών τάξης 2<sup>7</sup>-1.

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από την πηγή παραγωγής του οπτικού σήματος, το υπό μελέτη προτεινόμενο σύστημα μετατροπής μήκους κύματος καθώς και τον δέκτη. Ξεκινώντας την αναφορά μας από την πηγή, αυτή αποτελείται από ένα CW laser σε μήκος κύματος 1556.55 nm σε συνδυασμό με ένα διαμορφωτή ήλεκτρο- απορρόφησης, ο οποίος οδηγείται από ένα ηλεκτρικό σήμα στα 40 GHz για την διαμόρφωση των παλμών ρολογιού, με εύρος παλμών στο FWHM να είναι 9 ps. Οι διαμορφωμένοι παλμοί ρολογιού εν συνεχεία διαμορφώνονται εξωτερικά με την βοήθεια ενός ηλεκτρο-οπτικού διαμορφωτή πλάτους νιοβικού λιθίου με προσμίξεις τιτανίου (Ti:LiNbO<sub>3</sub> modulator), ο οποίος οδηγείται από μια μικροκυματική γεννήτρια 2<sup>7</sup>-1 ψευδοτυχαίας ακολουθίας (Pseudo-Random Bit Sequence Generator- PRBS Generator) με συχνότητα 40 Gb/s. Στην έξοδο του διαμορφωτή παράγεται, επομένως μια οπτική 2<sup>7</sup>-1 ψευδοτυχαία ακολουθία δεδομένων σε συχνότητα 40 Gb/s. Το διαμορφωμένο πλέον σήμα εξερχόμενο του ηλεκτρο-οπτικού διαμορφωτή εισέρχεται σε ένα συμπιεστή, ο οποίος αποτελείται από ακολουθίες μη γραμμικής ίνας σε συνδυασμό με απλή μονότροπη ίνα, στην έξοδο του οποίου επιτύγχανεται η συμπίεση του εύρους του παλμού στα 3 psec. Το διαμορφωμένο

## Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

και πλέον συμπιεσμένο σήμα αποτελεί το σήμα εισόδου στο υπό μελέτη σύστημα μετατροπής μήκους κύματος. Ακολούθως, ο μετατροπέας μήκους κύματος αποτελείται από ένα ημιαγωγίμο οπτικό ενισχυτή, ένα ROADM αποτελούμενο από μια συστοιχία δυο ζευγών φίλτρων μικρο-δακτυλίου σε σειρά κατασκευασμένα με την τεχνολογία TripleX™, ο οποίος περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα, καθώς και ένα συμβολόμετρο καθυστέρησης (Delayed Interferometer), στην έξοδο του οποίου παράγεται ένα ακριβές αντίγραφο του εισερχόμενου σήματος, σε διαφορετικό μήκος κύματος από αυτό του σήματος εισόδου. Ο ημιαγωγίμος οπτικός ενισχυτής είναι ένα εμπορικά διαθέσιμο προϊόν κατασκευασμένο από υλικό InP με κωδικό προϊόντος (CIP XN-OEC-1550) το οποίο παράγεται και πωλείται από την αγγλική εταιρία *Center for Integrated Photonics*. Τα χαρακτηριστικά στοιχεία του ημιαγωγίμου οπτικού ενισχυτή είναι τα εξής: Ο χρόνος ανάκαμψης του SOA στο FWHM είναι 80 psec το οποίο είναι σχεδόν τρεις φορές περισσότερο από το εύρος του χρόνου που καταλαμβάνει το διφύο. Ο ROADM αποτελείται με την σειρά του από δυο ζεύγη Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub> φίλτρα μικροδακτυλίου τα οποία δύνανται να ρυθμιστούν το καθένα ξεχωριστά μέσω οδηγιών που βρίσκονται ενσωματωμένοι στο πλινθίο του ROADM. Το FSR του ROADM είναι 4 nm ενώ το εύρος ζώνης τους μετρημένο στο FWHM είναι 0.6nm. Το DI είναι κατασκευασμένο χρησιμοποιώντας δυο διαχωριστές πόλωσης της εισερχόμενης δέσμης (polarization beam splitters (PBS)) μαζί με PM ίνα, η οποία δύνανται λόγω της κατασκευής της να διατηρεί την πόλωση του μεταδιδόμενου σήματος σταθερή. Το DI στον ένα από τους δυο βραχίονες του παρέχει μια χρονική καθυστέρηση στο σήμα ίση με 2 psec. Τα 2 ps καθυστέρηση αντιστοιχούν σε 500 GHz FSR και είναι επιλεγμένο έτσι προκειμένου να αντιστοιχεί με το FSR του ROADM, διασφαλίζοντας έτσι ότι τα διάκενα του DI θα απομονώνουν μόνο την οπτική φέρουσα του μετατρεπόμενου σε νέο μήκος κύματος σήματος αφήνοντας ανέπαφο το υπόλοιπο φάσμα του σήματος. Το νέο μήκος κύματος που χρησιμοποιείται για την εγγραφή του σήματος εισόδου παράγεται από ένα laser συνεχούς μήκους κύματος στα 1562.75 nm . Εν τέλει ο δέκτης αποτελείται από ένα αποπολυπλέκτη προκειμένου το σήμα εισόδου με ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s να αποπολυπλέκεται σε τέσσερα κανάλια ρυθμού μετάδοσης 10 Gb/s, γεγονός το οποίο επιτυγχάνεται με χρήση ενός διαμορφωτή ηλεκτρο-απορρόφησης. Επιπρόσθετα ο δέκτης αποτελείται από ένα ανιχνευτή μετρήσεως λαθών στα 10 Gb/s ο οποίος και λαμβάνει τα αποπολυπλεγμένα σήματα των 10 Gb/s προκειμένου να γίνει η αξιολόγηση της ορθής λειτουργίας του όλου συστήματος. Οι ενεργειακές απαιτήσεις του ανωτέρω συστήματος είναι αρκετά χαμηλές και διαφαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:



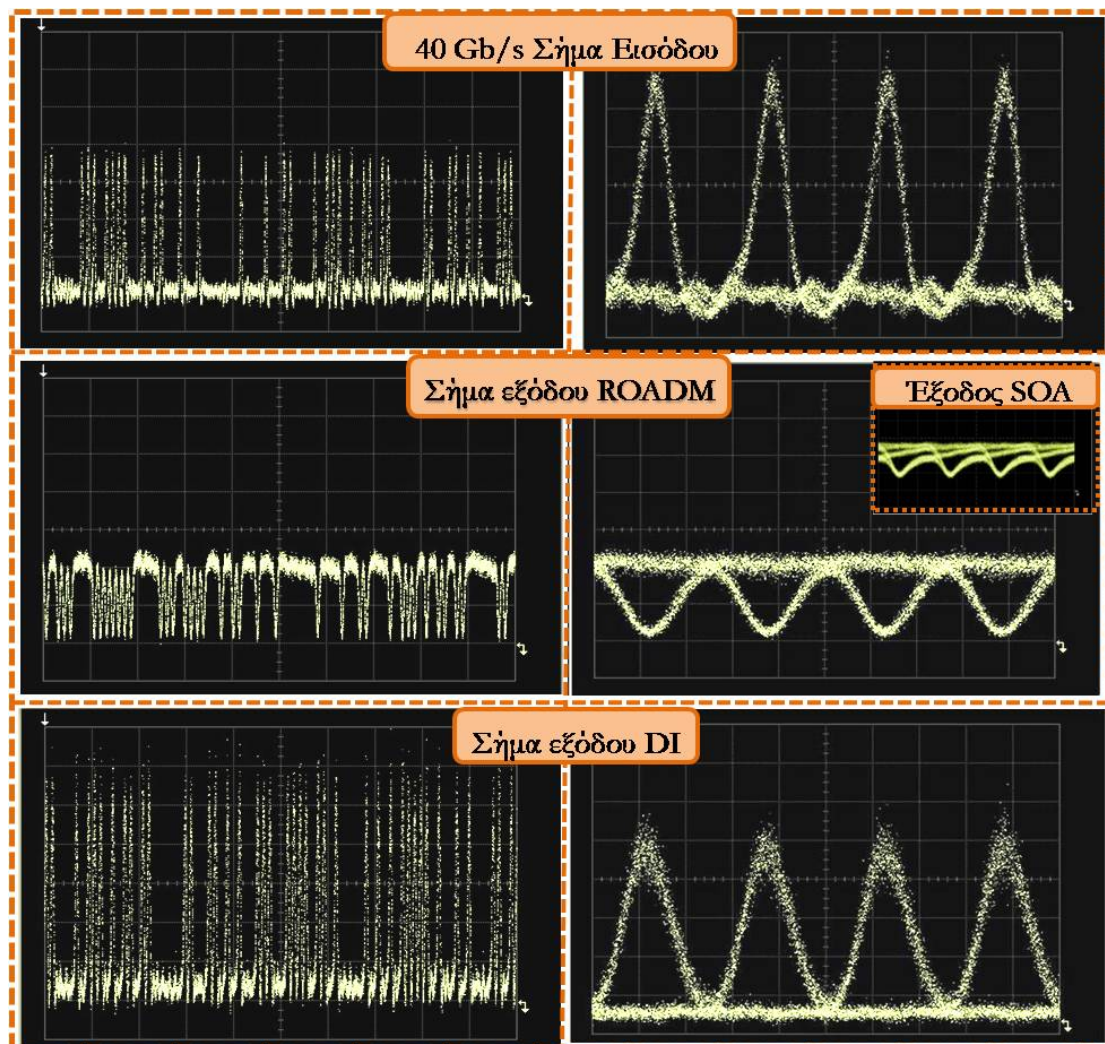
Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

	CW	Σήμα Εισόδου
Μετατροπέας Μήκους Κύματος	3 dBm	7 dBm
Ενεργειακές απαιτήσεις SOA	300 mA	

Πίνακας 7: Ενεργειακές απαιτήσεις αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος για μετατροπή ακολουθίας δεδομένων σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s, σε καινούριο μήκος κύματος.

#### 4.5.1 Πειραματικά αποτελέσματα- Θέματα προς συζήτηση

Στο ακόλουθο σχήμα απεικονίζονται τα πειραματικά αποτελέσματα από την υλοποίηση της ανωτέρω διάταξης μετατροπής μήκους κύματος σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s.

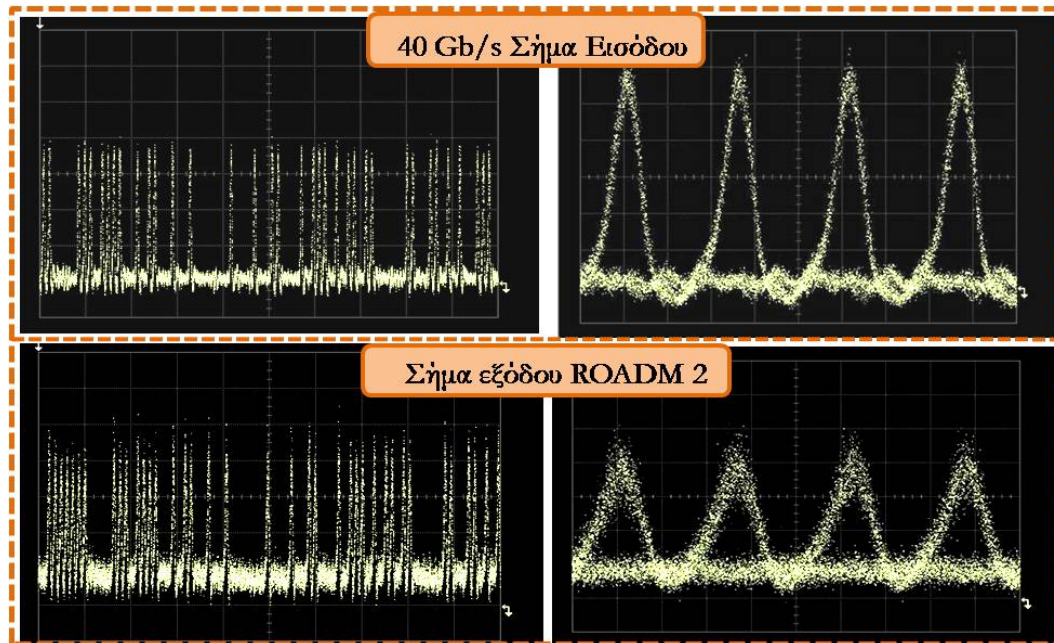


Σχήμα 65: Παλμοσειρές και αντίστοιχα διαγράμματα ματιού για το σήμα εισόδου, το σήμα εξόδου του ROADM, το σήμα εξόδου του DI αλλά και ένθετη απεικόνιση της εξόδου του SOA. (Timescale 100 ps/div για ακολουθίες παλμών και 10ps/div για διαγράμματα ματιού)

## Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

Τα πειραματικά αποτελέσματα καταγράφηκαν με την χρήση ενός ψηφιακού παλμογράφου με εύρος 80 GHz. Στο σχήμα παρουσιάζονται τόσο οι ακολουθίες παλμών όσο και τα αντίστοιχα διαγράμματα ματιού, αποτυπώνοντας την σταδιακή μετάβαση του σήματος εισόδου από το αρχικό μήκος κύματος στο επιλεγόμενο από τον ελεγκτή δρομολόγησης νέο μήκος κύματος. Συγκεκριμένα η εικόνα 65 στην πρώτη γραμμή απεικονίζει την παλμοσειρά και το διάγραμμα ματιού του εισερχόμενου σήματος στον μετατροπέα μήκους κύματος. Η δεύτερη γραμμή απεικονίζει το σήμα αφότου εξέλθει από το ROADM. Ο ROADM είναι κατάλληλα απορρυθμισμένος κατά 0.1 nm προς τις «μπλε» φασματικές συνιστώσες, με αποτέλεσμα στην έξοδο του, το σήμα να έχει αντεστραμμένη πόλωση σε σύγκριση με το σήμα εισόδου που διαφαίνεται στην πρώτη γραμμή. Η αποδοτικότητα της επιτάχυνσης της λειτουργίας του ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή σε ότι αφορά τον χρόνο ανάκαμψης των φορέων του SOA φαίνεται καθαρά στην ένθετη φωτογραφία απεικόνισης της εξόδου του SOA προτού εισέλθει στον ROADM. Συγκρίνοντας το επομένως με το διάγραμμα ματιού της δεύτερης γραμμής μπορούμε να συμπεράνουμε με σιγουριά ότι η λειτουργία του φίλτρου επιταχύνει την ταχύτητα λειτουργίας του SOA μέσα στα χρονικά όρια που καταλαμβάνει ένα διφύο στα 40 Gb/s. Το αντεστραμμένης πόλωσης σήμα εν συνεχεία εισέρχεται στο DI με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται η ανάκτηση της ορθής πόλωσης του σήματος προτού αυτό εξέλθει από τον μετατροπέα μήκους κύματος ( γραμμή 3 σχήματος 65). Στην μελέτη μας για την αξιολόγηση της λειτουργίας του μετατροπέα μήκους κύματος για RZ ακολουθίες δεδομένων, περιελάβαμε και μια δεύτερη περίπτωση κατά την οποία η απορύθμιση του ROADM ήταν 0.3 nm σε σχέση με το φέρον, προκειμένου να πάρουμε στην έξοδο του ROADM απευθείας το νέο μήκος κύματος αντίγραφο του εισερχόμενου σήματος με πόλωση ίδια με του σήματος εισόδου. Τα πειραματικά αποτελέσματα φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα.

Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.



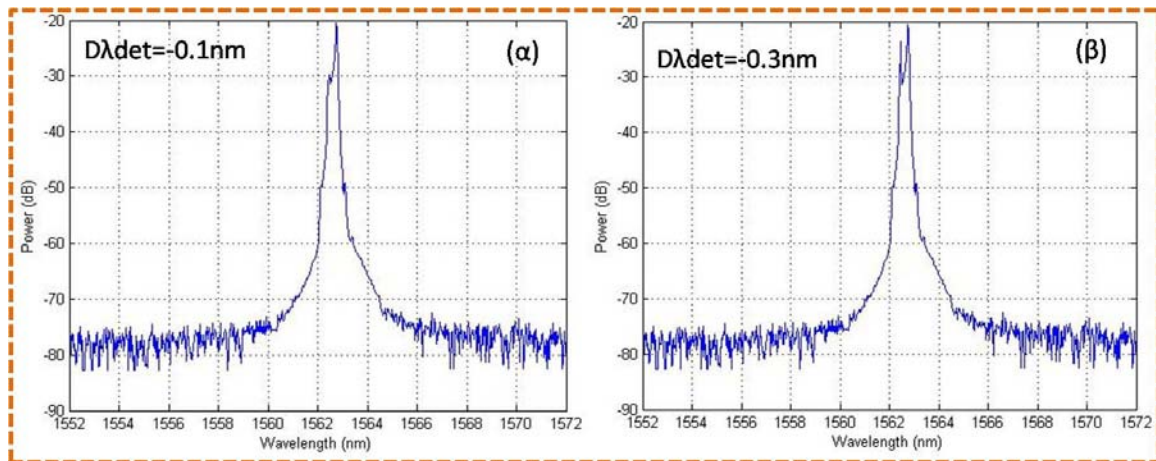
Σχήμα 66: Πειραματικά αποτελέσματα για μετατόπιση ROADM κατά 0.3 nm προς μικρότερες φασματικές συνιστώσες σε σχέση με την συχνότητα του φέροντος. Η πρώτη γραμμή δείχνει το εισερχόμενο σήμα εισόδου ενώ η δεύτερη γραμμή την έξοδο του ROADM. (Timescale για ακολουθία παλμών 200 ps/div, και 10 ps/div για τα διαγράμματα ματιού)

Στην περίπτωση αυτή παρατηρούμε ότι αν και επιτυγχάνεται η μετατροπή σε νέο μήκος κύματος των εισερχόμενων ροών δεδομένων, συγκριτικά με την προηγούμενη περίπτωση της απορύθμισης του ROADM κατά 0.1 nm, το σήμα εξόδου παρουσιάζει μια διακύμανση στο σχήμα των παλμών εξόδου (pattern effect), το οποίο προέρχεται από φαινόμενα συμβολής μεταξύ των μπλέ φασματικών συχνοτήτων και της συχνότητας του φέροντος.

Τα φάσματα όπως αυτά διαμορφώνονται στην περίπτωση της απορύθμισης του ROADM σε σχέση με το φέρον και για τις δυο περιπτώσεις (0.1nm και 0.3 nm) φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα.



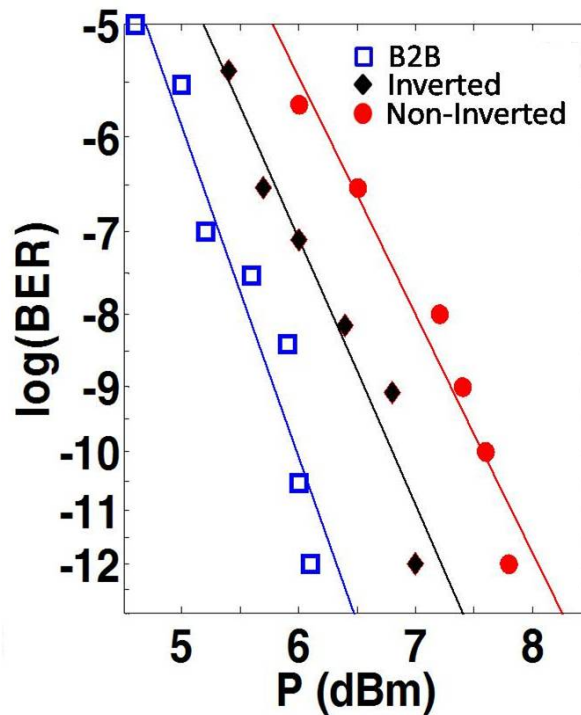
Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.



Σχήμα 67: Αποτύπωση του φάσματος του εξερχόμενου σήματος από τον ROADM για τις δυο διαφορετικές μετατοπίσεις 0.1nm και 0.3 nm.

Προκειμένου εν τέλει να αποκτήσουμε ολοκληρωμένη εικόνα της λειτουργίας του συστήματος μετατροπής μήκους κύματος για ροές δεδομένων στα 40 Gb/s, πήραμε επίσης μετρήσεις ανίχνευσης σφαλμάτων για τα τέσσερα αποπολυπλεγμένα κανάλια σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται οι καμπύλες BER και για τις δυο περιπτώσεις. Συγκεκριμένα στην περίπτωση που η απορύθμιση του ROADM ήταν 0.1 nm, το σύστημα μετατροπής μήκους κύματος λειτουργούσε χωρίς σφάλματα παρουσιάζοντας ενεργειακό σφάλμα της τάξης 0.84 dB σε σύγκριση με το σήμα εισόδου. Στην δεύτερη περίπτωση όπου επιτυγχάνουμε την ίδια πόλωση στο σήμα εξόδου του μετατροπέα μήκους κύματος με το σήμα εισόδου, το ενεργειακό σφάλμα σε σχέση με το σήμα εισόδου είναι 1.5 dB. Το αυξημένο ενεργειακό σφάλμα της δεύτερης περίπτωσης οφείλεται κυρίως στην ανάγκη και μεγαλύτερη απορύθμιση του ROADM σε σχέση με το φέρον, το οποίο και οδηγεί σε μεγαλύτερες απώλειες τόσο στην ενέργεια όσο και στο ύψος του σηματοθρομβικού λόγου.

Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.



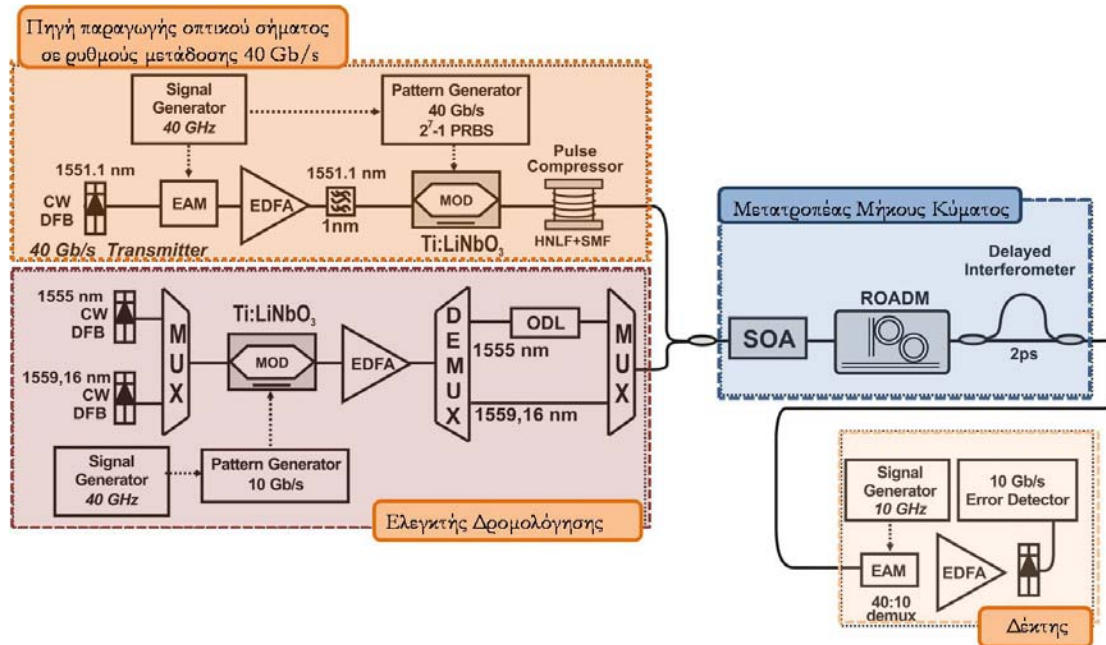
Σχήμα 68: Καμπύλες μέτρησης σφαλμάτων. Η κόκκινη γραμμή αφορά το σήμα εξόδου με τον ROADM μετατοπισμένο κατά 0.3 nm σε σχέση με την συχνότητα του φέροντος. Η μαύρη γραμμή αφορά το σήμα εξόδου με τον ROADM μετατοπισμένο κατά 0.1 nm σε σχέση με την συχνότητα του φέροντος. Η μπλε γραμμή αφορά το σήμα εισόδου στον μετατροπέα μήκους κύματος.

#### 4.6 Πειραματική υλοποίηση συστήματος μετατροπής πολλαπλών μηκών κύματος με χρήση φίλτρων μικρο- δακτυλίου σε ρυθμούς μετάδοσης 40 Gb/s για RZ πακέτα δεδομένων.

Η μελέτη του μετατροπέα μήκους κύματος δεν εστιάστηκε μόνο στην απλοϊκή του μορφή της μετάδοσης συνεχόμενης ροής δεδομένων και αντιγραφής αυτών σε ένα μόνο μήκος κύματος αλλά επεκτάθηκε και στην μελέτη μετατροπής περισσότερων του ενός μήκων κύματος, προκειμένου να αποκτήσουμε μια εμπειριστατωμένη άποψη σε ότι αφορά την μετέπειτα εφαρμογή του σε δίκτυα WDM για την μεταγωγή πακέτων πληροφορίας σε διαφορετικά μήκη κύματος. Συγκεκριμένα το σύστημα μετατροπής μήκους κύματος αξιολογήθηκε για την δυνατότητα μετατροπής δυο συνεχόμενων πακέτων δεδομένων διαφορετικού μήκους με ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s, τα οποία είχαν πολυπλεχθεί στον χρόνο (OTDM μετάδοση). Κάθε πακέτο που εισέρχεται στον μετατροπέα μήκους κύματος αντιγράφεται σε καινούριο μήκος κύματος έτσι ώστε στην έξοδο του συνολικού συστήματος τα δύο πακέτα να είναι μεταξύ τους σε διαφορετικά μήκη κύματος. Το ακόλουθο σχήμα

**Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.**

παρουσιάζει την πειραματική διάταξη προκειμένου να γίνει η αξιολόγηση του συνολικού συστήματος προς μελέτη.



Σχήμα 69: Πειραματική διάταξη της WDM αρχιτεκτονικής ενός αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος, με χρήση 2<sup>ης</sup> τάξης φίλτρων μικρο-δακτυλίου, για ακολουθία RZ παλμοσειρών τάξης 2<sup>7</sup>-1.

Τα δομικά μπλοκ που δομούν το σύστημα μας είναι η πηγή παραγωγής του οπτικού σήματος με ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s, ο ελεγκτής δρομολόγησης, το προτεινόμενο σύστημα μετατροπής μήκους κύματος και ο δέκτης.

*Πηγή παραγωγής του οπτικού σήματος με ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s.*

Η πηγή παραγωγής του οπτικού σήματος αποτελείται από ένα laser εκπομπής συνεχόμενου φωτός (Continuous Wavelength) σε μήκος κύματος 1551.1 nm σε συνδυασμό με ένα διαμορφωτή ήλεκτρο- απορρόφησης, ο οποίος οδηγείται από ένα ηλεκτρικό σήμα στα 40 GHz για την διαμόρφωση των παλμών ρολογιού, με εύρος παλμών στο FWHM να είναι 9 ps. Οι διαμορφωμένοι παλμοί ρολογιού εν συνεχεία διαμορφώνονται εξωτερικά με την βοήθεια ενός ηλεκτρο-οπτικού διαμορφωτή πλάτους νιοβικού λιθίου με προσμίξεις τιτανίου (Ti:LiNbO<sub>3</sub> modulator), ο οποίος οδηγείται από μια μικροκυματική γεννήτρια 2<sup>7</sup>-1 ψευδοτυχαίας ακολουθίας (Pseudo-Random Bit Sequence Generator- PRBS Generator) με συχνότητα 40 Gb/s. Στην έξοδο του διαμορφωτή παράγεται, επομένως μια οπτική 2<sup>7</sup>-1 ψευδοτυχαία ακολουθία δεδομένων σε συχνότητα 40 Gb/s. Το διαμορφωμένο πλέον σήμα εξερχόμενο του οπτικού διαμορφωτή εισέρχεται σε ένα συμπιεστή, ο οποίος αποτελείται από ακολουθίες μη γραμμικής ίνας σε συνδυασμό με απλή μονότροπη ίνα,

## **Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.**

στην έξοδο του οποίου επιτυγχάνεται η συμπίεση του εύρους του παλμού στα 3 psec. Προκειμένου να δημιουργήσουμε τα πακέτα πληροφορίας χρησιμοποιήσαμε ένα επιπρόσθετο ηλεκτρο-οπτικό διαμορφωτή πλάτους νιοβικού λιθίου με προσμίξεις τιτανίου (Ti:LiNbO<sub>3</sub> modulator), ο οποίος οδηγείται από ηλεκτρικούς παλμούς μεταβλητής χρονικής διάρκειας και μεταβλητής περιόδου, που παρέχονται από μια ηλεκτρική παλμογεννήτρια (pulse generator). Κατά αυτόν τον τρόπο, στην έξοδο του διαμορφωτή λαμβάνονται σύγχρονα οπτικά πακέτα, των οποίων το χρονικό εύρος και η περίοδος καθορίζονται από το χρονικό εύρος και την περίοδο των ηλεκτρικών παλμών, που παράγει η παλμογεννήτρια, ενώ το περιεχόμενό τους συνίσταται από χρονικά τμήματα της συνεχούς ροής οπτικής ψευδοτυχαίας ακολουθίας δεδομένων στα 40 Gb/s.

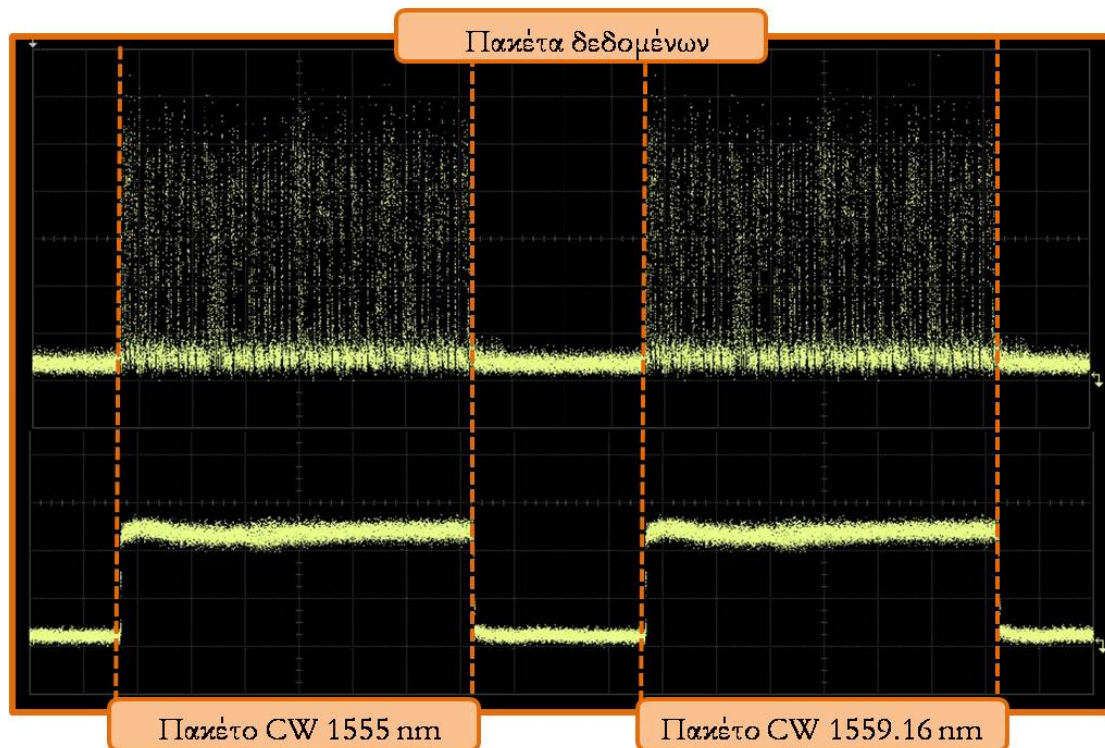
### *Ελεγκτής δρομολόγησης*

Ο ελεγκτής δρομολόγησης είναι υπεύθυνος για την δημιουργία των πακέτων CW τα οποία είναι ισομεγέθη με τα πακέτα δεδομένων. Συγκεκριμένα δυο πομποί εμπομπής συνεχούς φωτός (CW laser) εκπέμπουν δυο σήματα με μήκη κύματος 1555nm και 1559.16 nm αντίστοιχα. Τα σήματα αυτά εν συνεχεία πολυπλέκονται και εισέρχονται σε ένα ηλεκτροδιαμορφωτή νιοβικού λιθίου με προσμίξεις τιτανίου (Ti:LiNbO<sub>3</sub> modulator) ο οποίος οδηγείται από ηλεκτρικούς παλμούς προερχόμενους από μια ηλεκτρική παλμογεννήτρια (pulse generator). Τα διαμορφωμένα πακέτα CW εν συνεχεία διέρχονται από μια ακολουθία πολυπλεκτών και αποπολυπλεκτών οι οποίοι ενδιάμεσα παρεμβάλλονται από διαφορετική καθυστέρηση, προκειμένου να καθυστερήσει το ένα από τα δυο πακέτα CW . Στην έξοδο του ελεγκτή δρομολόγησης επιτυγχάνεται η απολαβή δυο συνεχόμενων CW πακέτων με μέγεθος ίσο με αυτό των διαμορφωμένων πακέτων δεδομένων που εξέρχονται της πηγής παραγωγής της μεταδιδόμενης πληροφορίας.

### *Μετατροπέας Μήκους κύματος*

Μέσω κατάλληλου συγχρονισμού στο πεδίο του χρόνου τα δυο πακέτα πληροφορίας συγχρονίζονται κατάλληλα με τα δυο πακέτα CW διαφορετικού μήκους κύματος, με το πρώτο πακέτο πληροφορίας να συγχρονίζεται με το πακέτο CW μήκους κύματος 1555nm και το δεύτερο πακέτο πληροφορίας που ακολουθεί να συγχρονίζεται με το δεύτερο πακέτο CW μήκους κύματος 1559.1 nm, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.

Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.



Σχήμα 70: Αναπαράσταση του πολυπλεγμένου σήματος εισόδου στον SOA, στο πεδίο του χρόνου. Κάθε πακέτο πληροφορίας είναι κατάλληλα συγχρονισμένο με το αντίστοιχο του πακέτο CW διαφορετικού μήκους κύματος.

Προκειμένου να λειτουργήσει ο μετατροπέας μήκους κύματος αποδοτικά ταυτόχρονα και για τα δύο μήκη κύματος αξιοποιούμε την περιοδικότητα στην μορφή του φάσματος του ROADM (βλέπε σχήμα 58).

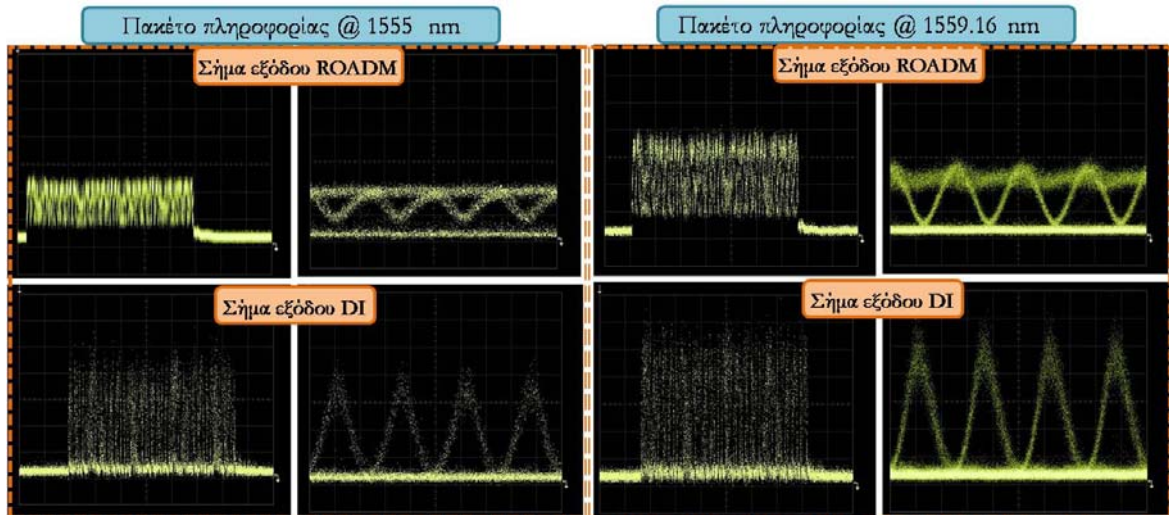
#### Δέκτης

Ο δέκτης αποτελεί το τελευταίο δομικό μπλοκ της πειραματικής μας διάταξης. Η λειτουργία που επιτελεί ο δέκτης αφορά την αποπολυπλεξία του σήματος από 40 Gb/s σε 10 Gb/s και η ανίχνευση τυχόν σφαλμάτων προερχόμενα από το σύστημα μετατροπής μήκους κύματος. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιούμε ένα EAM ο οποίος οδηγείται από ένα ηλεκτρικό σήμα στα 10 Gb/s ο οποίος αποπολυπλέκει το σήμα σε τέσσερα κανάλια ρυθμού μετάδοσης 10 Gb/s και αφού ενισχυθεί με την χρήση ενός οπτικού ενισχυτή ίνας ερβίου μετατρέπεται σε ηλεκτρικό διαμέσω μιας φωτοδιόδου και εισέρχεται στον ανιχνευτή σφαλμάτων ο οποίος και αυτός λειτουργεί στα 10 Gb/s.



#### 4.6.1 Πειραματικά αποτελέσματα – Θέματα προς συζήτηση

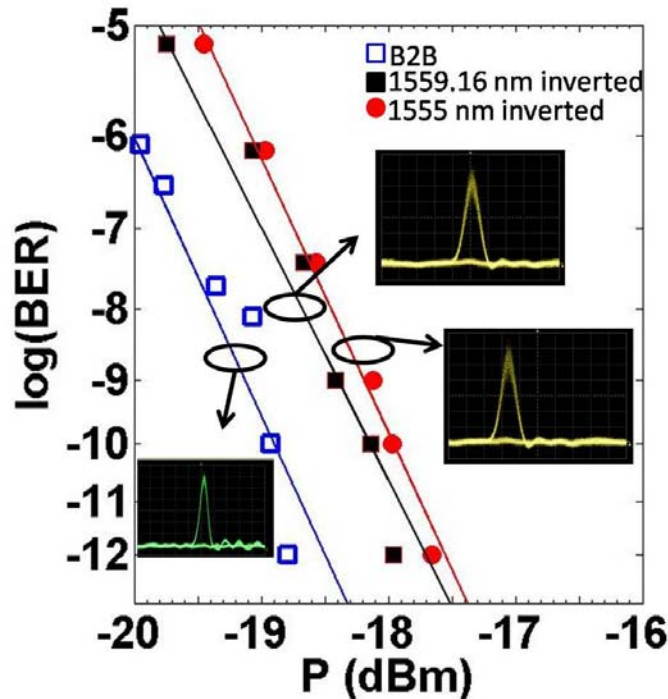
Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα, τα οποία προήλθαν από την WDM λειτουργία του μετατροπέα μήκους κύματος.



Σχήμα 71: Πειραματικά αποτελέσματα από την χρήση του αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος σε WDM λειτουργία. Αριστερά: Παλμοσειρές και διάγραμμα ματιού για το σήμα εξόδου του ROADM και του σήματος εξόδου του DI, για το πακέτο πληροφορίας γραμμένο στο 1555nm. Δεξιά: Παλμοσειρές και διάγραμμα ματιού για το σήμα εξόδου του ROADM και του σήματος εξόδου του DI, για το πακέτο πληροφορίας γραμμένο στο 1559.16nm. (Timescale 200 ps/div για παλμοσειρές και 10 ps/div για διαγράμματα ματιού)

Συγκεκριμένα στο σχήμα 71 παρουσιάζονται οι δυο καταστάσεις από τις οποίες περνάει το σήμα προτού εξέλθει από τον μετατροπέα μήκους κύματος. Στα αριστερά παρατηρούμε την έξοδο του μετατροπέα μήκους κύματος αμέσως μετά το πέρας του σήματος από το ROADM, όπου και εξέρχεται με αντεστραμμένη πόλωση λόγω της απορύθμισης του ROADM κατά 0.1nm σε σχέση με το φέρον. Το εξερχόμενο σήμα από το ROADM εν συνεχεία αφότου διέλθει από το DI ανακτά την ορθή πόλωση και το σήμα παίρνει την μορφή που φαίνεται στο σχήμα 70 στην δεύτερη γραμμή αριστερά. Στην περίπτωση του δεύτερου πακέτου, ο μετατροπέας μήκους κύματος παραμένει ρυθμισμένος όπως και στην περίπτωση του πρώτου πακέτου, δηλαδή συνεχίζει να αποκλίνει κατά 0.1 nm [βλέπε σχήμα 66]σε σχέση με το φέρον με αποτέλεσμα να παίρνουμε πάλι ένα αντίγραφο του σήματος εισόδου με αντεστραμμένη πόλωση στην έξοδο του ROADM και το πιστό αντίγραφο σε διαφορετικό μήκος κύματος (1559.16 nm) αφότου το σήμα διέλθει του DI. Τα διαφορετικού μήκους κύματος πακέτα εν συνεχεία εισέρχονται σε στον δέκτη όπου και γίνεται η μέτρηση λαθών, με την καμπύλη που προκύπτει να παρουσιάζεται και για τα δυο μήκη κύματος στο ακόλουθο σχήμα.

Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.



Σχήμα 72: Καμπύλες μέτρησης σφαλμάτων. Η κόκκινη γραμμή αφορά το πακέτο που εξέρχεται του μετατροπέα μήκους κύματος με μήκος κύματος 1555nm. Η μαύρη γραμμή αφορά το πακέτο που εξέρχεται του μετατροπέα μήκους κύματος με μήκος κύματος 1559.16nm. Ο ROADM είναι μετατοπισμένος κατά 0.1 nm σε σχέση με την συχνότητα του φέροντος και για τις δυο περιπτώσεις. Η μπλέ γραμμή αφορά το σήμα εισόδου στον μετατροπέα μήκους κύματος.

Από την καμπύλη του σχήματος 72 παρατηρούμε ότι επετεύχθη ορθή λειτουργία και για τα δύο μήκη κύματος. Συγκεκριμένα η ενεργειακή επιβάρυνση στην περίπτωση του πρώτου πακέτου δεδομένων στα 1559.16 nm είναι 0.8 dB ενώ στην περίπτωση του δεύτερου πακέτου δεδομένων στα 1555 nm είναι 1 dB. Η μικρή αυτή απόκλιση των δύο πακέτων της τάξης των 0.2 dB πιστοποιεί και την σταθερή λειτουργία του συστήματος μας για διαφορετικά μήκη κύματος. Οι ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος μας παρέμειναν σταθερές με αυτές του πίνακα 7, πιστοποιώντας επίσης και την αποδοτική λειτουργία του συστήματος μας σε πιο απαιτητικές λειτουργίες όπως αυτή της μετατροπής περισσοτέρων του ενός πακέτων σε διαφορετικά μήκη κύματος. Θα πρέπει να σημειωθεί στην περίπτωση αυτή ότι το υπό μελέτη σύστημα μας καταναλώνει συνολικά 1.5 W ηλεκτρικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένου της τροφοδοσίας του SOA, του ρυθμιστή θερμοκρασίας (Temperature Controller-TEC) και των thermal heaters των φίλτρων μικρό δακτυλίου. Παρακάτω παρατίθεται επίσης και ένας συγκριτικός πίνακας αντίστοιχων άλλων αρχιτεκτονικών που υποδεικνύει το βασικό πλεονέκτημα της οικονομίας ενεργειακών πόρων



**Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.**

που χρειάζεται η προτεινόμενη αρχιτεκτονική σε σχέση με τις ήδη υπάρχουσες [4.27-4.30].

Παράμετρος	Mitsubishi	UCSB	CIP (μόνο MZI)	CIP (τετραπλό MZI)
Ρυθμός μετάδοσης	40 Gb/s	40 Gb/s	40 Gb/s	4x40 Gb/s
# SOAs	2	2 non linear 4 linear	2	8
Μήκος SOA	2.4 mm	1mm non linear 600um linear	1.1 mm	>1.1 mm
# IN/OUT	3	4	8	24
Συνολική κατανάλωση ενέργειας	---	---	5W	>12W
Ενεργειακές απαιτήσεις λειτουργίας	CW:3dBm Data:5dBm	5dBm input power channel. CW:~5dBm	CW:3.6dBm Push:8.3dBm Pull:-0.2dBm	CW: 2dBm Push:3.5dBm Pull:0.5dBm

Πίνακας 8: Σύγκριση ήδη υπάρχοντων αμιγώς οπτικών μετατροπέων μήκους κύματος, κατασκευασμένων με την τεχνική της μονολιθικής και υβριδικής ολοκλήρωσης.

**4.7 Πειραματική υλοποίηση συστήματος μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο- δακτυλίου σε ρυθμούς μετάδοσης 40 Gb/s για NRZ ακολουθίες δεδομένων.**

Όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους , η χρήση ενός αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος αποτελεί ένα από τα βασικότερα δομικά στοιχεία ενός WDM δικτύου προκειμένου να αποφευχθούν φαινόμενα συγκρούσεων πακέτων αλλά και για την πλήρη αξιοποίηση των πόρων ενός τέτοιου δικτύου. Βασικό χαρακτηριστικό των δικτύων αυτών αποτελεί και η δυνατότητα διαφάνειας στο είδος της πληροφορίας, με την RZ (Return to Zero) και NRZ (Non Return to Zero) να αποτελούν τις πιο κοινές διαμορφώσεις στην μετάδοση σήματος με χρήση της τεχνικής διαμόρφωσης πλάτους. Παρόλα αυτά η χρήση της NRZ πληροφορίας είναι πιο αποδοτική στο φάσμα και επομένως χρησιμοποιείται ευρέως σε DWDM δίκτυα πρόσβασης αλλά και μητροπολιτικά δίκτυα. Επιπρόσθετα πολλά συστήματα λόγω της ευαισθησίας τους σε φαινόμενα διασποράς, η μετάδοση ενός σήματος σε μορφή NRZ είναι προτιμότερη λύση για την μετάδοση των δεδομένων.

Απόρροια των ανωτέρω είναι στα μελλοντικά οπτικά δίκτυα, να αναπτύσσονται συστήματα μετατροπής μήκους κύματος με δυνατότητα επεκτασιμότητας τους σε πολυπλοκότερες διατάξεις και αποδοτικής κατανάλωσης ενέργειας που θα υποστηρίζουν διαφορετικά

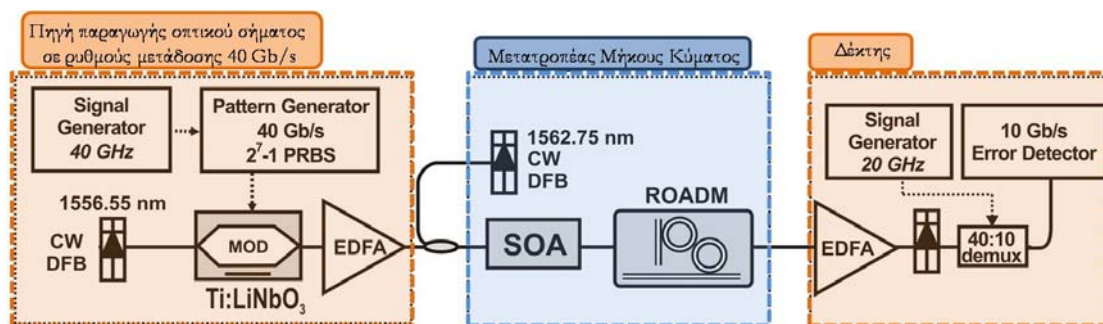
## Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

διαμορφωμένα δεδομένα. Ακολουθώντας την λογική αυτή διάφορα σχήματα έχουν προταθεί για την δημιουργία NRZ μετατροπών μήκους κύματος όπως τα ακόλουθα: Μια διάταξη που εκμεταλλεύεται το φαινόμενο της ετερο-διαμόρφωσης κέρδους με μετατροπή από WDM σε OTDM μετάδοση [4.31], η χρήση ενός μη γραμμικού οπτικού ανατροφοδοτούμενου καθρέπτη βασισμένο στην χρήση SOA [4.32], συστήματα που βασίζονται στην τεχνική του οπτικού φιλτραρίσματος [4.17], συστήματα που βασίζονται σε μη γραμμικά φαινόμενα όπως την μίξη τεσσάρων φωτονίων [4.33] καθώς και συστήματα που βασίζονται στην χρήση αντίρροπης φοράς σημάτων ελέγχου [4.34]. Παρόλα τα πλεονεκτήματα που έχει παρουσιάσει η κάθε αρχιτεκτονική, οι περισσότερες αρχιτεκτονικές περιορίζονται σε χρήση ενός μήκους κύματος με αποτέλεσμα να μην είναι αποδοτικές για υψηλής μετάδοσης φωτονικούς δρομολογητές [4.35].

Στις προηγούμενες ενότητες παρουσιάσαμε την πειραματική υλοποίηση του μετατροπέα μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για RZ δεδομένα [4.36-4.39]. Στην ενότητα αυτή επεκτείνουμε την εργασία μας με την μετατροπή NRZ δεδομένων, παρουσιάζοντας επιτυχώς την λειτουργία του υπό μελέτη συστήματος, με ενεργειακό σφάλμα παρόμοιο με αυτό που παρουσιάσαμε στην περίπτωση της μετάδοσης RZ δεδομένων. Παρουσιάζουμε τόσο αντεστραμμένη όσο και μη αντεστραμμένη πόλωσης μετατροπή μήκους κύματος, χρησιμοποιώντας εν αρχή συνεχής ροής δεδομένα και εν συνεχεία πακέτα δεδομένων για WDM μετάδοση σε περισσότερα του ενός μήκη κύματος.

### 4.7.1 Πειραματική Διάταξη

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη η οποία χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του μετατροπέα μήκους κύματος με χρήση NRZ διαμορφωμένων ακολουθιών.



Σχήμα 73: Πειραματική διάταξη της αρχιτεκτονικής ενός αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος, με χρήση 2<sup>ης</sup> τάξης φίλτρων μικρο-δακτυλίου, για ακολουθία NRZ παλμοσειρών, τάξης 2<sup>7</sup>-1.

Η πειραματική μας διάταξη αποτελείται από τρία βασικά δομικά τμήματα. Την πηγή παραγωγής οπτικού σήματος σε ρυθμούς μετάδοσης 40 Gb/s, τον προτεινόμενο μετατροπέα μήκους κύματος και τον δέκτη. Η πηγή παραγωγής του οπτικού σήματος

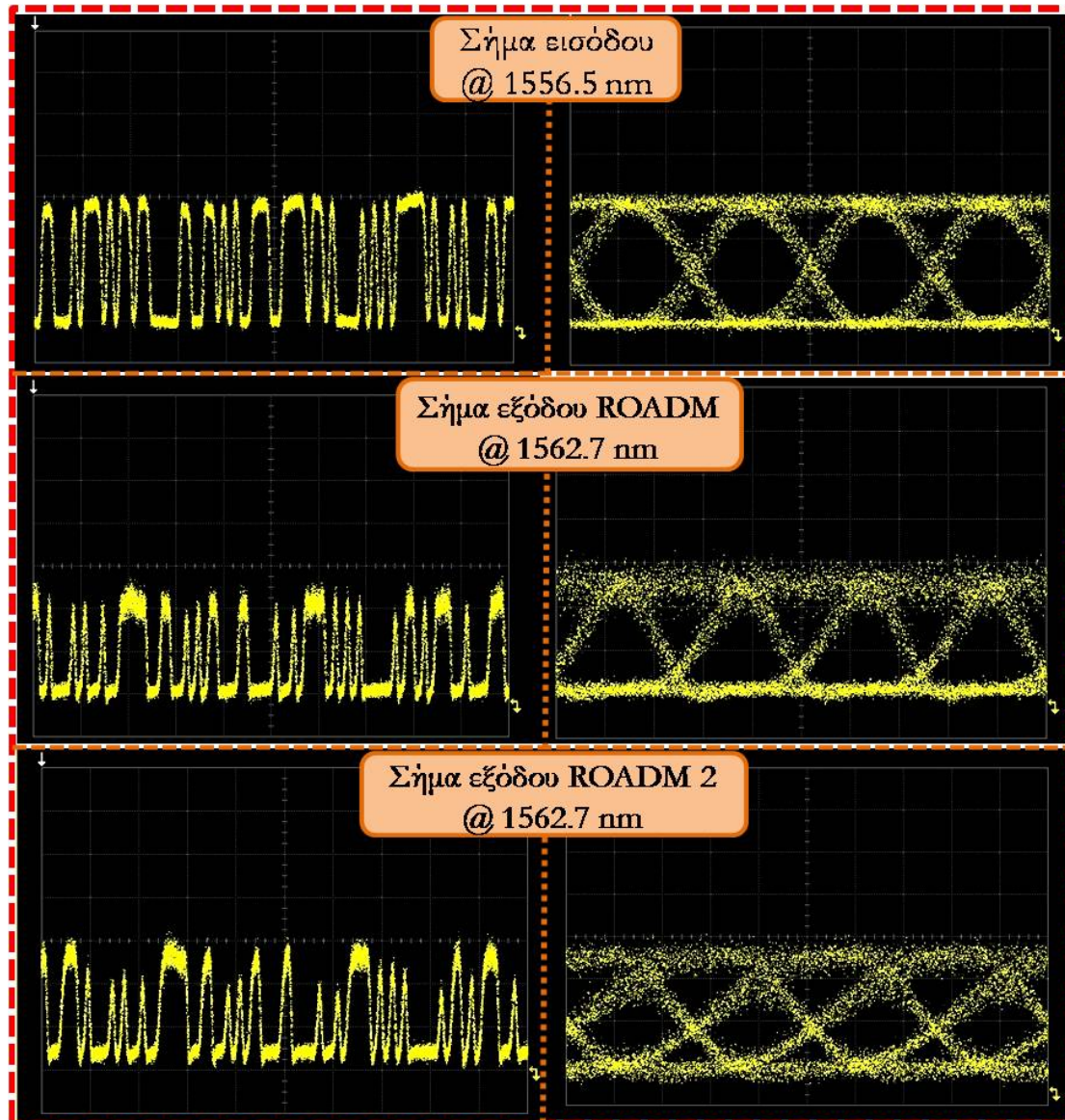
**Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.**

αποτελείται από ένα CW DFB laser το οποίο εκπέμπει συνεχές φως σε μήκος κύματος 1556.55nm το οποίο και εισέρχεται σε ένα ηλεκτρο-οπτικό διαμορφωτή νιοβικού λιθίου με προσμίξεις τιτανίου (Ti:LiNbO<sub>3</sub>). Ο ηλεκτρο-οπτικός διαμορφωτής οδηγείται από ηλεκτρικούς παλμούς μεταβλητής χρονικής διάρκειας και μεταβλητής περιόδου, που παρέχονται από μια ηλεκτρική παλμογεννήτρια (pulse generator) προκειμένου να δημιουργήσει στην έξοδο μια NRZ ακολουθία  $2^7-1$ . Το διαμορφωμένο πλέον NRZ σήμα αφότου ενισχυθεί από ένα οπτικό ενισχυτή ίνας ερβίου εξέρχεται της πηγής και εισέρχεται στον μετατροπέα μήκους κύματος. Ο ελεγκτής δρομολόγησης παράγει μέσω ενός DFB laser ένα συνεχές σήμα μήκους κύματος 1562.75 nm το οποίο εισέρχεται μαζί με το σήμα που παράγει η πηγή στον ημιαγώγιμο οπτικό ενισχυτή. Η έξοδος του μετατροπέα μήκους κύματος εν συνεχεία εισέρχεται στον δέκτη. Ο δέκτης αποτελείται από μια 40 GHz φωτοδίοδο προκειμένου να μετατραπεί το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό και ακολούθως το ηλεκτρικό σήμα εισέρχεται σε ένα ηλεκτρονικό αποπολυπλέκτη ο οποίος αποπολυπλέκει το ηλεκτρικό σήμα πλέον από 40 Gb/s σε τέσσερα κανάλια των 10 Gb/s. Τα τέσσερα αυτά κανάλια σε ρυθμούς μετάδοσης 10 Gb/s εν συνεχεία εισέρχονται στον ανιχνευτή λαθών όπου και μετράται η αξιοπιστία και η συνολική αποδοτικότητα του μετατροπέα μήκους κύματος.

Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

#### 4.7.2 Πειραματικά αποτελέσματα- θέματα προς συζήτηση

Στο ακόλουθο σχήμα απεικονίζονται τα πειραματικά αποτελέσματα από την υλοποίηση της ανωτέρω διάταξης μετατροπής μήκους κύματος σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s.



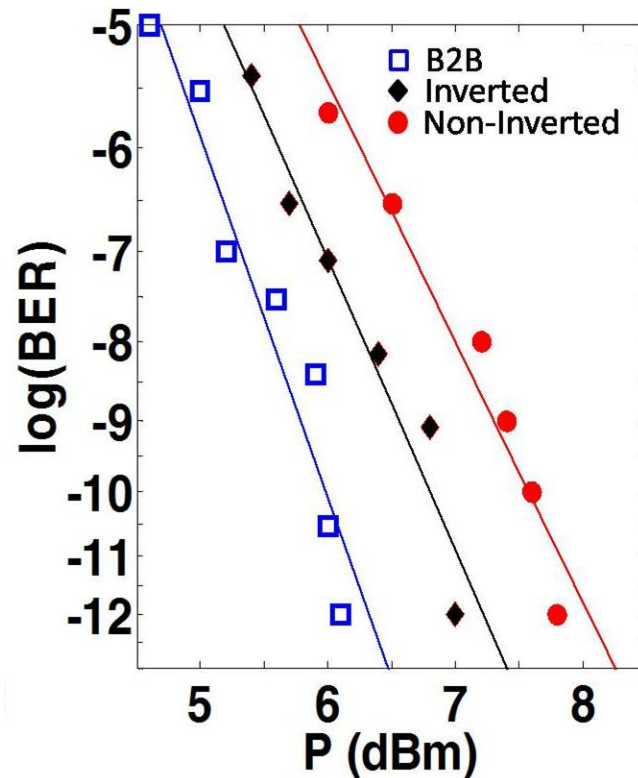
Σχήμα 74: Πειραματικά αποτελέσματα. Η πρώτη γραμμή δείχνει το εισερχόμενο σήμα εισόδου σε μήκος κύματος 1556.5 nm, η δεύτερη γραμμή την έξοδο του ROADM για μετατόπιση του φίλτρου κατά 0.1 nm προς την μπλε περιοχή σε σχέση με την συχνότητα του φέροντος, ενώ η τρίτη γραμμή δείχνει την έξοδο του ROADM για μετατόπιση του φίλτρου κατά 0.3nm προς την μπλε περιοχή σε σχέση με την συχνότητα του φέροντος,. (Timescale για ακολουθία παλμών 200 ps/div, και 10 ps/div για τα διαγράμματα ματιού)

Στην πρώτη γραμμή του σχήματος απεικονίζεται το σήμα εισόδου όπως αυτό διαμορφώνεται από την πηγή παραγωγής του οπτικού σήματος σε ρυθμό μετάδοσης 40

**Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.**

Gb/s. Ακολουθώντας την ίδια λογική ακολουθία με αυτήν του πειράματος με τα RZ σήματα, απορρυθμίζουμε το φίλτρο μικρο δακτυλίου κατά 0.1 nm προκειμένου να πάρουμε τις χαμηλές φασματικές συνιστώσες, με αποτέλεσμα στην έξοδο του μετατροπέα μήκους κύματος να λαμβάνουμε ένα αντίγραφο του σήματος εισόδου, σε διαφορετικό μήκος κύματος με αντεστραμμένη πόλωση σε σχέση με αυτήν του αρχικού. Η έξοδος του μετατροπέα μήκους κύματος για την περίπτωση αυτή φαίνεται στην γραμμή 2 του σχήματος. Στην περίπτωση που το φίλτρο μικρο-δακτυλίου απορρυθμιστεί κατά 0.3 nm τότε τα πειραματικά αποτελέσματα φαίνονται στην γραμμή 3 του σχήματος 74 με το σήμα εξόδου να είναι ακριβές αντίγραφο του σήματος εισόδου σε διαφορετικό μήκος κύματος.

Επιπρόσθετα με τα πειραματικά αποτελέσματα επιτύχαμε και την μέτρηση των σφαλμάτων της προτεινόμενης διάταξης η καμπύλη των οποίων φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 75: Καμπύλες μέτρησης σφαλμάτων. Η κόκκινη γραμμή αφορά το σήμα εξόδου με τον ROADM μετατοπισμένο κατά 0.3 nm σε σχέση με την συχνότητα του φέροντος. Η μαύρη γραμμή αφορά το σήμα εξόδου με τον ROADM μετατοπισμένο κατά 0.1 nm σε σχέση με την συχνότητα του φέροντος. Η μπλε γραμμή αφορά το σήμα εισόδου στον μετατροπέα μήκους κύματος.

Το ενεργειακό σφάλμα που μετρήθηκε σε σχέση με το σήμα εισόδου για μετατροπή ενός μήκους κύματος με χρήση του ROADM για συνεχόμενης ροής δεδομένα ήταν 1 dB για το σήμα αντεστραμμένης πόλωσης και 1.5 dB για το σήμα μη αντεστραμμένης πόλωσης στην



## Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

έξοδο του μετατροπέα μήκους κύματος. Παρατηρώντας τις τιμές και συγκρίνοντας τις με αυτές της μετατροπής μήκους κύματος για RZ δεδομένα βλέπουμε ότι οι τιμές συγκλίνουν με διαφορά σφάλματος της τάξης του 0.2 dB για τις αντίστοιχες περιπτώσεις, το οποίο και υποδεικνύει την σταθερή και αποδοτική λειτουργία της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής για διαφορετικής διαμόρφωσης σήματα εισόδου.

Τέλος στον ακόλουθο πίνακα αναγράφονται οι ενεργειακές απαιτήσεις έτσι όπως αυτές μετρήθηκαν μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων των ρυθμών σφαλμάτων στην διάταξη μας.

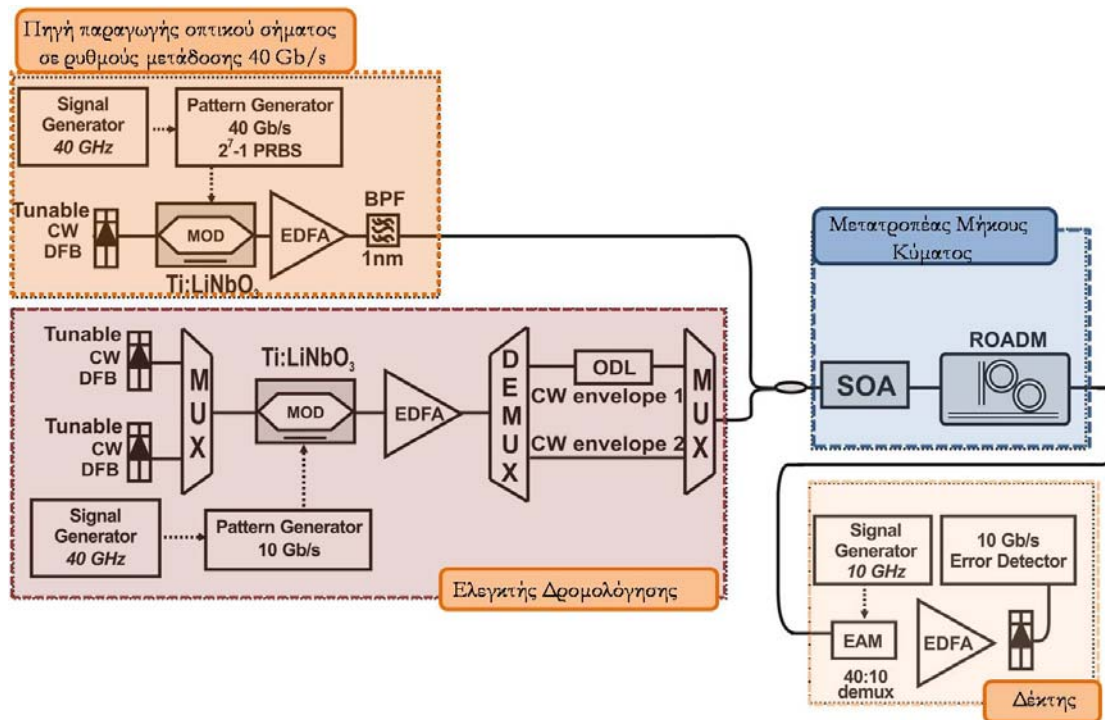
	CW	Σήμα Εισόδου
Μετατροπέας Μήκους Κύματος	9 dBm	6 dBm
Ενεργειακές απαιτήσεις SOA	300 mA	

Πίνακας 9: Πίνακας σύνοψης των ενεργειακών απαιτήσεων της πειραματικής διάταξης

### 4.8 Πειραματική υλοποίηση συστήματος μετατροπής πολλαπλών μηκών κύματος με χρήση φίλτρων μικρο- δακτυλίου σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s για NRZ πακέτα δεδομένων

Η μελέτη του μετατροπέα μήκους κύματος δεν εστιάστηκε μόνο στην μορφή της μετάδοσης συνεχόμενης ροής δεδομένων και αντιγραφής αυτών σε ένα μόνο μήκος κύματος αλλά επεκτάθηκε και στην μελέτη μετατροπής περισσότερων του ενός μήκων κύματος, όπως έγινε και στην περίπτωση των RZ σημάτων, προκειμένου να αποκτήσουμε μια εμπειριστατωμένη άποψη σε ότι αφορά την μετέπειτα εφαρμογή του σε δίκτυα WDM για την μεταγωγή πακέτων πληροφορίας σε διαφορετικά μήκη κύματος. Ακολουθώντας την ίδια λογική με το RZ σύστημα, το προτεινόμενο σύστημα μετατροπής μήκους κύματος ομοίως και στην περίπτωση αυτή αξιολογήθηκε για την δυνατότητα μετατροπής δυο συνεχόμενων πακέτων δεδομένων διαφορετικού μήκους με ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s, τα οποία είχαν πολυπλεχθεί στον χρόνο (OTDM μετάδοση). Κάθε πακέτο που εισέρχεται στον μετατροπέα μήκους κύματος αντιγράφεται σε καινούριο μήκος κύματος έτσι ώστε στην έξοδο του συνολικού συστήματος τα δύο πακέτα να είναι μεταξύ τους σε διαφορετικά μήκη κύματος γραμμένα. Το ακόλουθο σχήμα παρουσιάζει την πειραματική διάταξη προκειμένου να γίνει η αξιολόγηση του συνολικού συστήματος προς μελέτη

Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.



Σχήμα 76: Πειραματική διάταξη της WDM αρχιτεκτονικής ενός αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος, με χρήση 2<sup>ης</sup> τάξης φίλτρων μικρο-δακτυλίου, για ακολουθία NRZ παλμοσειρών τάξης 2<sup>7</sup>-1.

Η πειραματική διάταξη είναι παρόμοια με αυτήν που αναλύθηκε στην περίπτωση της μετατροπής πολλαπλών μηκών κύματος, και η οποία αφορούσε διαμορφωμένα σήματα RZ, με μερικές διαφοροποιήσεις κυρίως σε ότι αφορά την πηγή παραγωγής οπτικού σήματος. Προκειμένου να διαμορφώσουμε το σήμα της πηγής χρησιμοποιούμε ένα CW DFB laser το οποίο άγει στα 1551nm. Το σήμα αυτό εισέρχεται εν συνεχεία σε ένα ηλεκτρο-οπτικό διαμορφωτή νιοβικού λιθίου με προσμίξεις τιτανίου (Ti:LiNbO<sub>3</sub>) (ο οποίος οδηγείται από ηλεκτρικούς παλμούς μεταβλητής χρονικής διάρκειας και μεταβλητής περιόδου, που παρέχονται από μια ηλεκτρική παλμογεννήτρια (pulse generator) στα 40 Gb/s, προκειμένου να δημιουργήσει στην έξοδο μια NRZ ακολουθία 2<sup>7</sup>-1. Το διαμορφωμένο πλέον NRZ σήμα αφότου ενισχυθεί από ένα οπτικό ενισχυτή ίνας ερβίου εξέρχεται της πηγής και εισέρχεται στον μετατροπέα μήκους κύματος. Μέσω κατάλληλου συγχρονισμού στο πεδίο του χρόνου τα δυο πακέτα πληροφορίας συγχρονίζονται κατάλληλα με τα δυο πακέτα CW διαφορετικού μήκους κύματος, με το πρώτο πακέτο πληροφορίας να συγχρονίζεται με το πακέτο CW μήκους κύματος 1554.7 nm και το δεύτερο πακέτο πληροφορίας που ακολουθεί να συγχρονίζεται με το δεύτερο πακέτο CW μήκους κύματος 1558.6 nm, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.

Προκειμένου να λειτουργήσει ο μετατροπέας μήκους κύματος αποδοτικά ταυτόχρονα και για τα δύο μήκη κύματος αξιοποιούμε την περιοδικότητα του φάσματος του ROADM (βλέπε σχήμα 58). Εν κατακλείδι ο δέκτης αποτελεί το τελευταίο δομικό μπλοκ της πειραματικής μας διάταξης. Η λειτουργία που επιτελεί ο δέκτης αφορά την αποπολυπλέξια

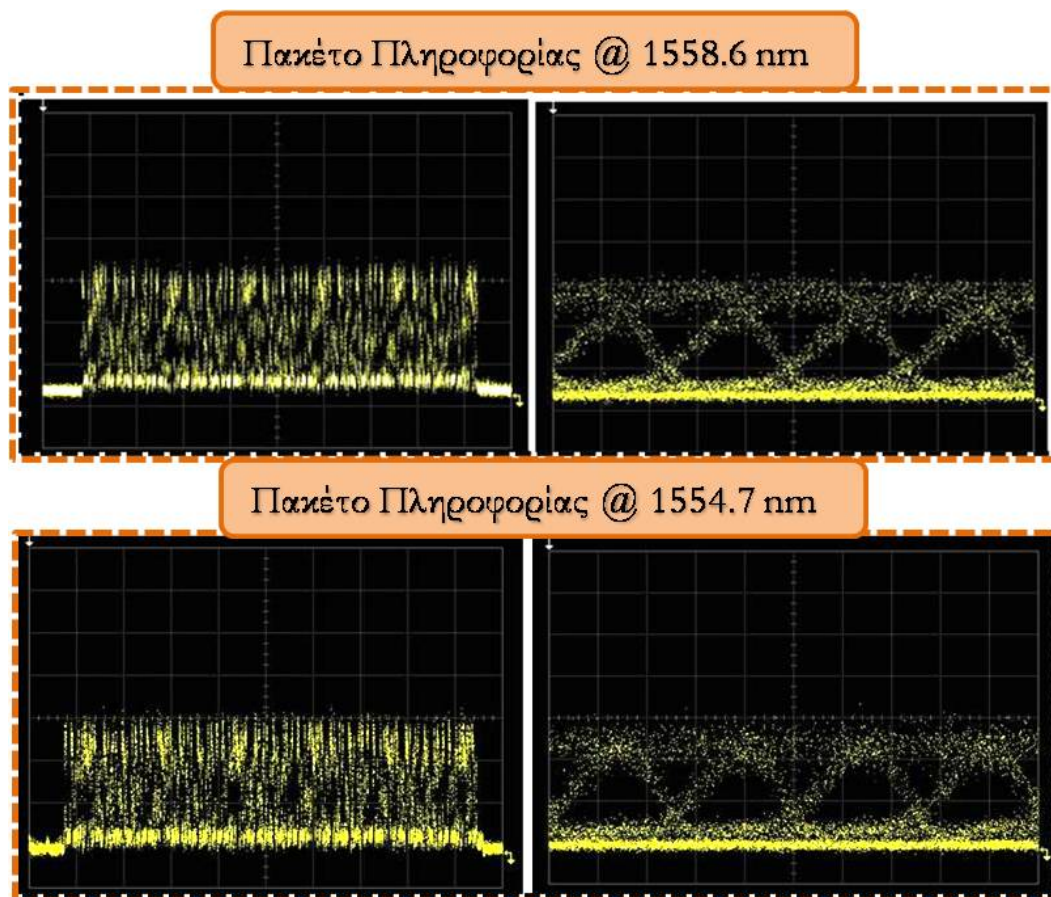


## Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

του σήματος από 40 Gb/s σε 10 Gb/s και η ανίχνευση τυχόν σφαλμάτων προερχόμενα από το σύστημα μετατροπής μήκους κύματος. Ο δέκτης αποτελείται από μια φωτοδίοδο εύρους 40 GHz προκειμένου να μετατραπεί το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό και ακολούθως το ηλεκτρικό σήμα εισέρχεται σε ένα ηλεκτρονικό απόπολυπλέκτη ο οποίος αποπολυπλέκει το ηλεκτρικό σήμα πλέον από 40 Gb/s σε τέσσερα κανάλια των 10 Gb/s. Τα τέσσερα αυτά κανάλια σε ρυθμούς μετάδοσης 10 Gb/s εν συνεχεία εισέρχονται στον ανιχνευτή λαθών όπου και μετράται η αξιοπιστία και η συνολική αποδοτικότητα του μετατροπέα μήκους κύματος.

### 4.8.1 Πειραματικά αποτελέσματα

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζουμε τα πειραματικά αποτελέσματα από την χρήση του μετατροπέα μήκους κύματος ως πολύ-κυματικού μετατροπέα, υπεύθυνο για την μεταγωγή των σημάτων στις επιμέρους εξόδους του συστήματος.

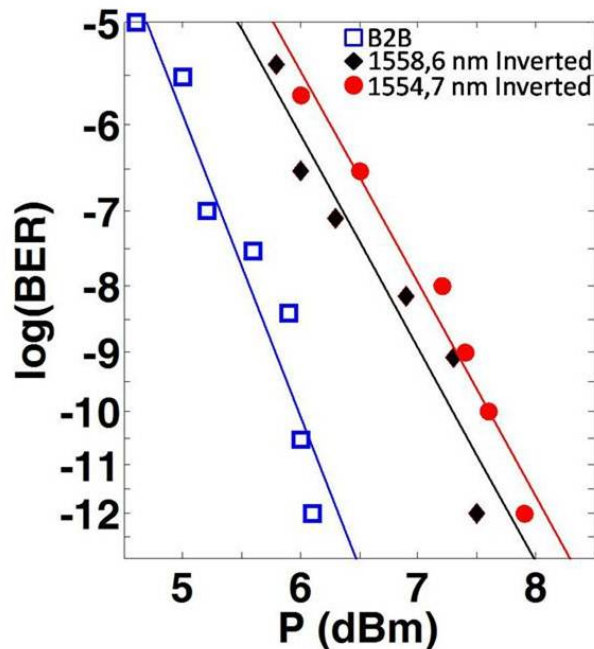


Σχήμα 77: Πειραματικά αποτελέσματα του αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος για WDM λειτουργία. Στην πάνω γραμμή φαίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα για το πακέτο πληροφορίας στο μήκος κύματος 1558.6nm ενώ η κάτω γραμμή παρουσιάζει το εξερχόμενο πακέτο σε μήκος κύματος 1554.7nm. Timescale για ακολουθία παλμών 200 ps/div, και 10 ps/div για τα διαγράμματα ματιού.

**Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.**

Στο σχήμα 77 παρατηρούμε τα δυο πακέτα πληροφορίας όπως αυτά προήλθαν κατά την έξοδο τους από τον μετατροπέα μήκους κύματος. Προκειμένου να λειτουργήσει ο μετατροπέας μήκους κύματος σωστά, δυο πακέτα πληροφορίας σε μήκος κύματος 1551 nm, πολυπλεγμένα στον χρόνο, είχαν συγχρονιστεί με δυο διαφορετικού μήκους κύματος (1558.6 nm & 1554.7 nm) πακέτα, όμοια με αυτά που φαίνονται στο σχήμα 69. Το αποτέλεσμα του φαινομένου της ετεροδιαμόρφωσης φάσης μέσα στον SOA σε συνδυασμό με την απορύθμιση του φίλτρου μικρο-δακτυλίου κατά 0.1 nm απέφεραν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται και στο σχήμα 76 στην έξοδο του μετατροπέα. Συγκεκριμένα η πρώτη γραμμή παρουσιάζει το ακριβές αντίγραφο του πακέτου εισόδου το οποίο έχει αντιγραφεί σε μήκος κύματος 1558.6 nm και η δεύτερη γραμμή παρουσιάζει την παλμοσειρά και το διάγραμμα ματιού από το δεύτερο πακέτο που εξέρχεται του μετατροπέα μήκους κύματος και είναι γραμμένο στο 1554.7 nm.

Προκειμένου να ολοκληρωθεί η μελέτη της αξιολόγησης του πολύ-κυματικού μετατροπέα μήκους κύματος επιτύχαμε και μετρήσεις σφαλμάτων οι οποίες και παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα. Επιτυχής λειτουργία του μετατροπέα μήκους κύματος για περισσότερα του ενός μήκη κύματος επετεύχθη και στις δυο περιπτώσεις του πειράματός μας.



Σχήμα 78: Καμπύλες μέτρησης σφαλμάτων. Η κόκκινη γραμμή αφορά το πακέτο που εξέρχεται του μετατροπέα μήκους κύματος με μήκος κύματος 1554.7nm. Η μαύρη γραμμή αφορά το πακέτο που εξέρχεται του μετατροπέα μήκους κύματος με μήκος κύματος 1558.6nm. Ο ROADM είναι μετατοπισμένος κατά 0.1 nm σε σχέση με την συχνότητα του φέροντος και για τις δυο περιπτώσεις. Η μπλέ γραμμή αφορά το σήμα εισόδου στον μετατροπέα μήκους κύματος.

## **Κυκλώμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.**

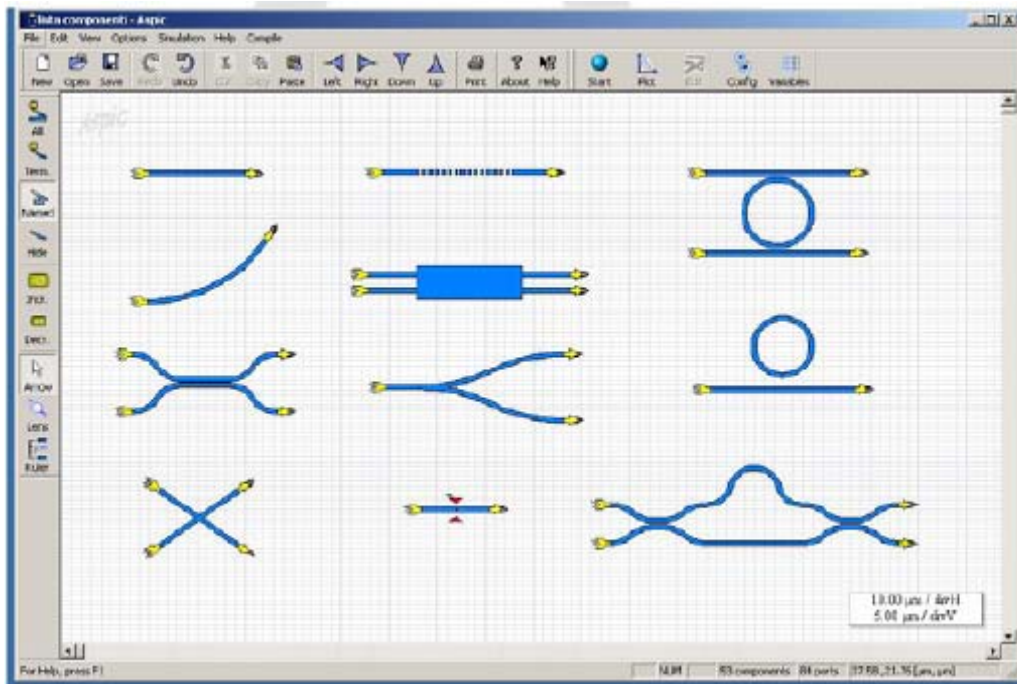
Συγκεκριμένα το πειραματικό σφάλμα που επιτύχαμε σε σύγκριση με το σήμα εισόδου στον μετατροπέα μήκους κύματος ήταν 1.5 dB για το πακέτο δεδομένων σε μήκος κύματος 1558.6 nm και 1.8 dB για το πακέτο δεδομένων στα 1554.7 nm.

Οι ενεργειακές απαιτήσεις και στην περίπτωση αυτή είναι αντίστοιχες της χρήσης ενός μόνου μήκους κύματος για την λειτουργία του μετατροπέα μήκους κύματος υποδεικνύοντας για άλλη μια φορά ότι οι ενεργειακές απαιτήσεις του εν λόγω συστήματος δεν διαφοροποιούνται και πολύ, διατηρώντας τόσο την αποδοτικότητα όσο και την ενεργειακή κατανάλωση σε χαμηλά επίπεδα είτε αφορά συνεχείς ακολουθίες είτε πακέτα δεδομένων ως σήματα εισόδου.

### **4.9 Εξομοίωση τεχνικής ολοκλήρωσης φίλτρων μικρο-δακτυλίου για χρησιμοποίηση τους σε συστήματα μετατροπής μηκών κύματος σε ταχύτητες μετάδοσης 160 Gb/s.**

Προκειμένου να υπερβούμε τον ρυθμό μετάδοσης των 40 Gb/s και να υλοποιήσουμε συστήματα σε ρυθμό μετάδοσης 160 Gb/s και άνω, χρειάζεται η επανασχεδίαση και μοντελοποίηση του εύρους ζώνης των φίλτρων μικρο-δακτυλίου, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Συγκρίνοντας τα δεύτερης τάξης φίλτρα μικροδακτυλίου, τα οποία και χρησιμοποιήσαμε για την υλοποίηση του μετατροπέα μήκους κύματος, παρατηρούμε ότι η κλίση των φίλτρων (filter slope) δεν είναι αρκετή για δεδομένα μετάδοσης στα 160 Gb/s. Όσο αυξάνεται ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων, τόσο θα πρέπει να αυξάνεται και η τάξη των φίλτρων μικροδακτυλίου προκειμένου όπως παρατηρούμε από το σχήμα 95 να προσεγγίζει την απόδοση του οπτικού ζωνοπερατού φίλτρου, διατηρώντας αποδοτικό το chirp filtering. Χρησιμοποιώντας ένα εμπορικά διαθέσιμο πρόγραμμα εξομοίωσης, το ASPIC (Advanced Simulator for Photonic Integrated Circuits) [4.40] καθορίσαμε τις παραμέτρους για την κατασκευή υψηλότερης τάξης φίλτρων μικρο δακτυλίου, τα οποία θα δύναται να λειτουργούν αποδοτικά όπως το ζωνοπερατό φίλτρο. Οι εξομοιώσεις του κυκλώματος έγιναν στο φασματικό πεδίο. Οι φασματικές εισοδοί / έξοδοι του κυκλώματος μετατρέπονται σε πλάτος, φάση, καθυστέρηση ομάδας, διασπορά καθώς και κατάσταση πόλωσης. Το σχήμα 78 παρουσιάζει όλα τα μοντέλα κατασκευής των κυκλωμάτων που διατίθενται από το ASPIC.

## Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.



Σχήμα 79: Διαθέσιμα στοιχεία / διατάξεις από το ASPIC

Κάθε στοιχείο είναι ένα δομικό στοιχείο, το οποίο εξομοιώνεται σαν ένα μαύρο κουτί που περιέχει εισόδους και εξόδους. Οι εισοδοί και οι εξοδοί είναι τα μόνα σημεία που μπορούμε να παρατηρήσουμε το μεταδιδόμενο σήμα μας, καθώς και τα μόνα σημεία όπου καθορίζονται με ακρίβεια τα πλάτη των εισερχόμενων και εξερχόμενων σημάτων. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η αύξηση της επεξεργαστικής ισχύος του προγράμματος εξομοίωσης καθώς και η μείωση της καταναλισκόμενης μνήμης από αυτό. Επιπρόσθετα η δομή του ASPIC εξυπηρετεί στην μελέτη πολύπλοκων κυκλωμάτων, επικεντρώνοντας την προσοχή μας σε υψηλότερου επιπέδου χαρακτηριστικά σχεδίασης των στοιχείων, χωρίς να μας επηρεάζουν προβλήματα όπως η τεχνολογία της πλατφόρμας, μετάδοσης ενός μήκους κύματος μέσα στους κυματοδηγούς και άλλα πολλά.

### 4.9.1 Μοντελοποίηση

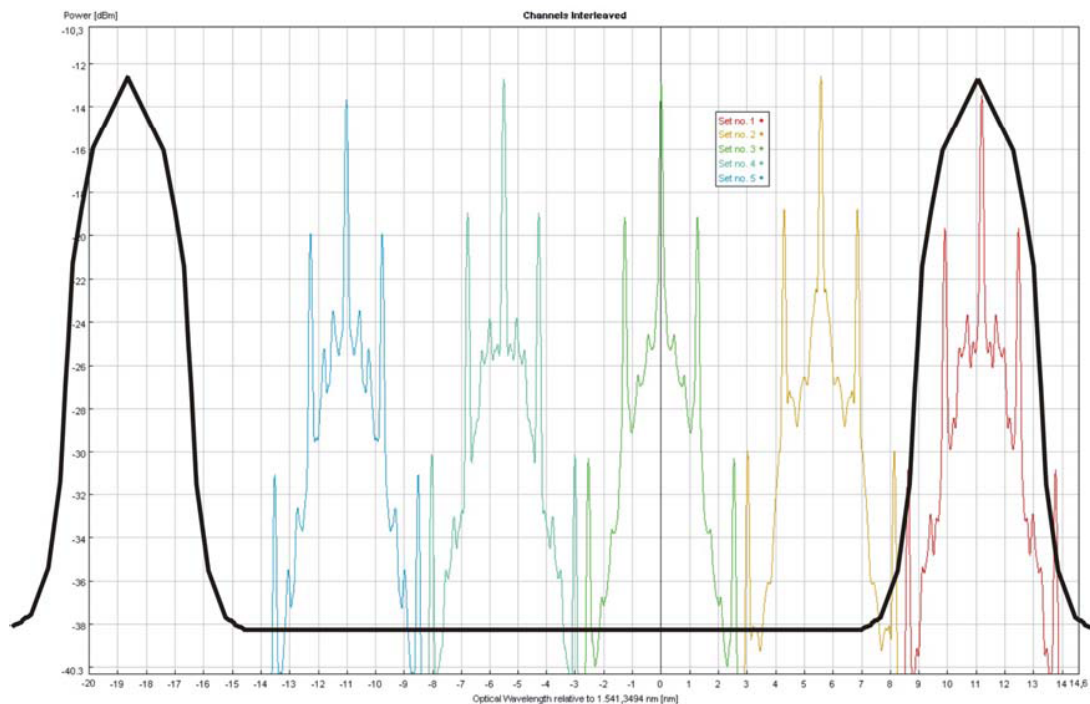
Στην ενότητα αυτή ασχολούμαστε με την μοντελοποίηση ενός αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος με ρυθμό μετάδοσης 160 Gb/s. Συγκεκριμένα παρατίθεται μια εμπεριστατωμένη μελέτη σχεδίασης ενός φίλτρου μικροδακτυλίου το οποίο θα παρέχει το βέλτιστο “chirp filtering” καθώς και την χρήση του σε ένα σύστημα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκων κύματος με χρήση σε σειρά ενός SOA και του φίλτρου μικροδακτυλίου. Οι βασικές παράμετροι που χρειάζεται να πληρεί το φίλτρο μικροδακτυλίου είναι :

- Υψηλό FSR (>27 nm)
- Σχεδόν πρώτης τάξης Gaussian μορφή του φάσματος

## Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

- 3 dB εύρος ζώνης 180-200 GHz
- Απομόνωση σημάτων εκτός εύρους ζώνης >20 dB

Το ακόλουθο σχήμα παρουσιάζει το οπτικό φάσμα τεσσάρων 160 Gb/s καναλιών με 650 GHz φασματική απόσταση μεταξύ γειτονικών καναλιών. Η μαύρη γραμμή υποδηλώνει την επιθυμητή απόκριση του φίλτρου μικροδακτυλίου με υψηλό FSR προκειμένου να επιτύχουμε αποδοτικό chirp filtering σε ρυθμό μετάδοσης 160 Gb/s.



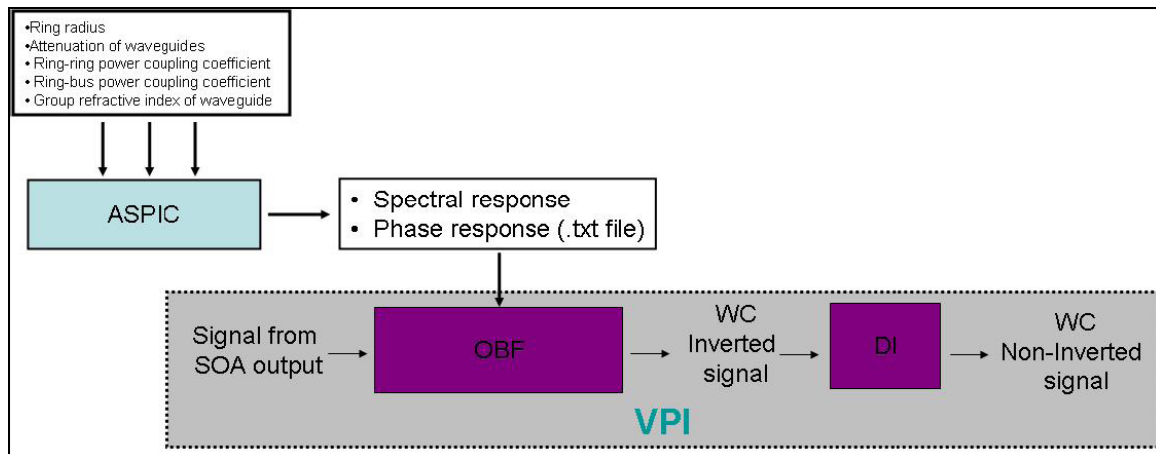
Σχήμα 80: Απόκριση του φίλτρου μικροδακτυλίου ύστερα από κατάλληλο chirp filtering ενός 160 Gb/s διαμορφωμένου καναλιού.

Η απαίτηση για σχεδόν Gaussian μορφή του φάσματος καθώς και το εύρος ζώνης των 180-200 GHz οφείλονται στα μετρήσεις εξομοίωσης που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.4.3. Προκειμένου να επιτύχουμε υψηλό FSR, η ακτίνα δακτυλίου των φίλτρων θα πρέπει να είναι της τάξης των μερικών μικρόμετρων ( 2.5-3  $\mu\text{m}$ ). Επιπρόσθετα η απαίτηση για υψηλή απομόνωση των γειτονικών σημάτων άνω των 20 dB , επιτυγχάνεται με την σχεδίαση μεγαλύτερης τάξης φίλτρων μικροδακτυλίων, ενώ η μορφή της κορυφής συντονισμού μπορεί να διαμορφωθεί επιλέγοντας κατάλληλα τις παραμέτρους οπτικής ζεύξης μεταξύ των δακτυλίων με τους κυματοδηγούς καθώς και των δακτυλίων μεταξύ τους.

Λαμβάνοντας όλα αυτές τις παραμέτρους σχεδίασης υπόψιν μας, και συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα του λογισμικού VPI με αυτά του ASPIC, επιτύχαμε να καθορίσουμε την δομή των φίλτρων μικρο-δακτυλίων που θα λειτουργούν στα 160 Gb/s. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



## Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.



Σχήμα 81: Διαδικασία μοντελοποίησης η οποία ακολούθηθηκε για τον σχεδιασμό των 160 Gb/s φίλτρων μικρο-δακτυλίου.

Αρχικά καθορίστηκαν τα φυσικά χαρακτηριστικά των φίλτρων μικρο-δακτυλίου όπως, ακτίνα δακτυλίου, λόγος ζεύξης μεταξύ δακτυλίων και μεταξύ δακτυλίου κυματοδηγού, δείκτης διάθλασης ομάδας και απώλειες κυματοδηγών. Για κάθε συνδυασμό των άνωθεν παραμέτρων το πρόγραμμα ASPIC δημιουργούσε ένα .txt αρχείο το οποίο εν συνεχεία φορτώνονταν σαν σήμα εισόδου στο στοιχείο που είχε σχεδιαστεί να λειτουργεί σαν φίλτρο στο VPI. Ρυθμίζοντας το φίλτρο στις κόκκινες φασματικές συνιστώσες του φέροντος, παίρναμε στην έξοδο το αντεστραμμένης πόλωσης σήμα στο νέο μήκος κύματος, με χαμηλή διακύμανση πλάτους. Το DI εν συνεχεία βοηθούσε στην ανάκτηση της σωστής πόλωσης του εξερχόμενου σήματος. Η ρύθμιση του VPI είναι ίδια με αυτήν του σχήματος 60 με την διαφορά την αλλαγή τοπολογίας του εισερχόμενου αρχείου που καθορίζει την συμπεριφορά του φίλτρου. Με αυτό επομένως τον τρόπο επιτύχαμε να ολοκληρώσουμε την κατασκευή όλης της αλυσίδας υλοποίησης του συνολικού συστήματος μας, διαμέσω της οποίας αλλάζοντας τα φυσικά χαρακτηριστικά της σχεδίασης των φίλτρων μικροδακτυλίου επιτυγχάναμε να παρατηρούμε την συνολική συμπεριφορά του προτεινόμενου μετατροπέα μήκους κύματος.

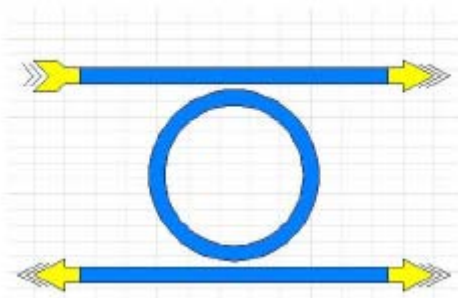
### 1<sup>ης</sup> Τάξης φίλτρα μικρο-δακτυλίων

Αρχικά μελετήσαμε την συμπεριφορά του συστήματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου πρώτης τάξης. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήσαμε είναι οι ακόλουθοι που φαίνονται στον πίνακα 10:

Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

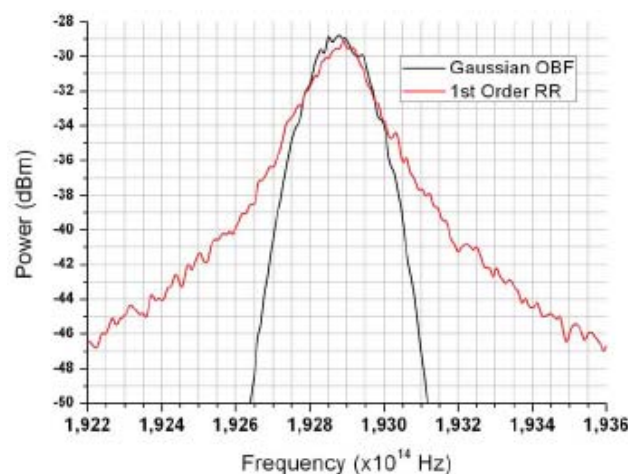
Παράμετρος	Τιμή
Power Coupling coefficient Bus-Ring	0.12
Group Refractive Index	1.5
Ring Attenuation	45 dB/cm
Ring radius	2.5 $\mu\text{m}$

Πίνακας 10: Παράμετροι 1<sup>ης</sup> τάξης φίλτρων μικρο-δακτυλίου



Σχήμα 82: Θεωρητικό μοντέλο απεικόνισης του φίλτρου μικροδακτυλίου 1<sup>ης</sup> τάξης στο ASPIC

Η φασματική απόκριση του σήματος μετά την διέλευση του από το πρώτης τάξης φίλτρο μικρο-δακτυλίου φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα με την κόκκινη γραμμή. Η μαύρη γραμμή είναι η απόκριση ενός ζωνοπερατού φίλτρου με 3 dB εύρος ζώνης 180 GHz (1.44 nm). Το ζωνοπερατό φίλτρο αποτέλεσε το σημείο αναφοράς για όλες τις μετρήσεις μας, μιας και η χρήση ενός τέτοιου φίλτρου θα παρείχε τα βέλτιστα αποτελέσματα στην λειτουργία του μετατροπέα μήκους κύματος στα 160 Gb/s. Βασικό σημείο για την λειτουργία του MMK είναι η «τρύπα» της συνάρτησης μεταφοράς του φίλτρου μικροδακτυλίου στα 192.75 THz ( συχνότητα φέροντος). Στην προκειμένη περίπτωση παρατηρούμε ότι η απόκριση του φίλτρου μικροδακτυλίου είναι αποδεκτή μόνο για **4 dB** του συνολικού φάσματος στα 192.75 THz.

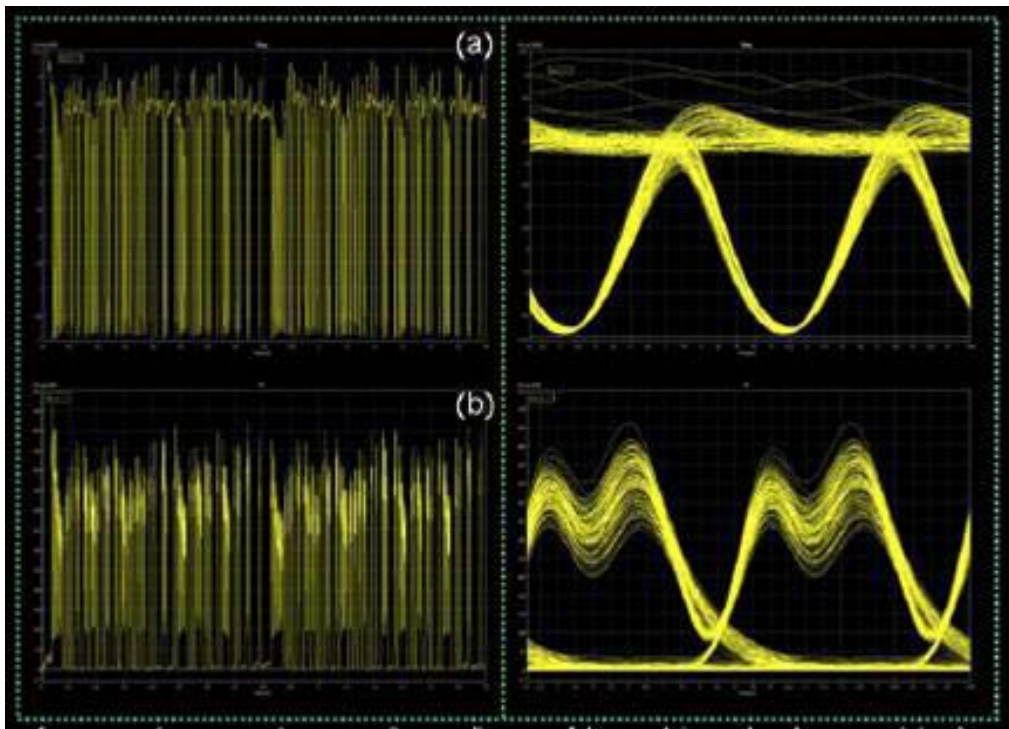


Σχήμα 83: Φασματική απόκριση του 1<sup>ης</sup> τάξης φίλτρου μικρο-δακτυλίου συγκριτικά με αυτήν του βέλτιστου ζωνοπερατού φίλτρου



## Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

Δοθείσας της χαρακτηριστικής αυτής καμπύλης της απόκρισης του φίλτρου μικροδακτυλίου πρώτης τάξης και απορρυθμίζοντας το φίλτρο κατά 130 GHz σε σχέση με το φέρον, τα αποτελέσματα που πήραμε στην έξοδο του φίλτρου ακολουθούμενο από το DI φαίνονται παρακάτω. Θα πρέπει να επισημάνουμε στην περίπτωση αυτή ότι η χρονική καθυστέρηση στο DI είναι 2 ps και η βέλτιστη κατάσταση του phase shifter 355 μοίρες.



Σχήμα 84: Ακολουθία παλμών και διαγράμματα ματιού ενός 160 Gb/s αντεγγραμμένου σε νέο μήκος κύματος σήματος στην έξοδο του α) 1<sup>ης</sup> τάξης φίλτρου μικροδακτυλίου και β) DI

Παρατηρώντας τα πειραματικά αποτελέσματα διαφαίνεται καθαρά ότι το φίλτρο μικροδακτυλίου πρώτης τάξης δεν ενδείκνυται για υλοποίηση του μετατροπέα μήκους κύματος προκειμένου να λειτουργεί στα 160 Gb/s.

### 2<sup>ης</sup> τάξης φίλτρα μικρο-δακτυλίων

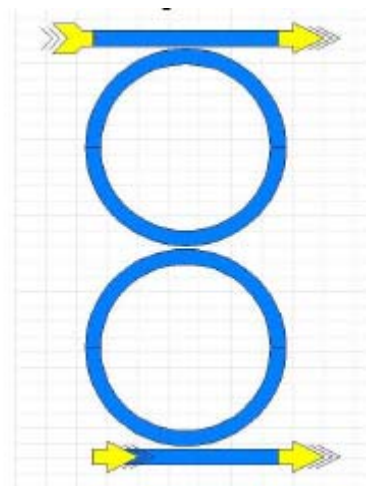
Στην δεύτερη φάση της μελέτης μας, μελετήσαμε την περίπτωση χρήσης δεύτερης τάξης φίλτρων μικρο-δακτυλίου. Οι παράμετροι κατασκευής τους φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

Παράμετρος	Τιμή
Power Coupling coefficient Bus-Ring	0.2
Power Coupling coefficient Ring-Ring	0.01
Refractive Index	1.5
Ring Attenuation	45 dB/cm (=0.07 dB/roundtrip)
Ring radius	2.5 μm

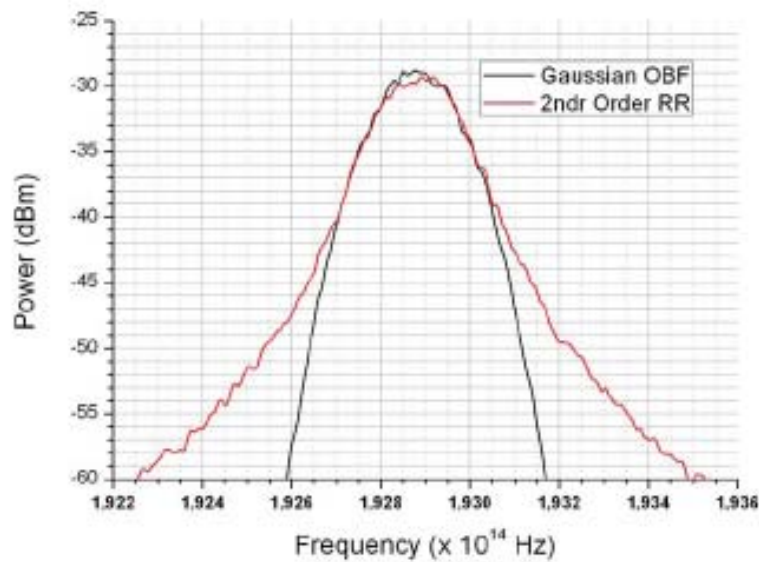
Πίνακας 11: Παράμετροι για το 2<sup>ης</sup> τάξης φίλτρο μικροδακτυλίου

Ακολουθώντας την ίδια λογική αξιολόγησης του φάσματος του 2<sup>ης</sup> τάξης φίλτρου μικροδακτυλίου, με αυτή του 1<sup>ης</sup> τάξης, στο ακόλουθο σχήμα διαφαιίνεται η φασματική απόκριση του (κόκκινη γραμμή) σε σχέση αυτήν του ζωνοπερατού φίλτρου (μαύρη γραμμή). Παρατηρούμε ότι στην προκειμένη περίπτωση το φίλτρο δεύτερης τάξης ακολουθεί την μορφή του ζωνοπερατού για **10 dB** του συνολικού φάσματος του ζωνοπερατού έναντι των 4 dB που παρουσίαζε το 1<sup>ης</sup> τάξης, υποδεικνύοντας σαφή βελτίωση στην απόδοση του αλλά όχι ακόμα αποδεκτή για λειτουργία στα 160 Gb/s.



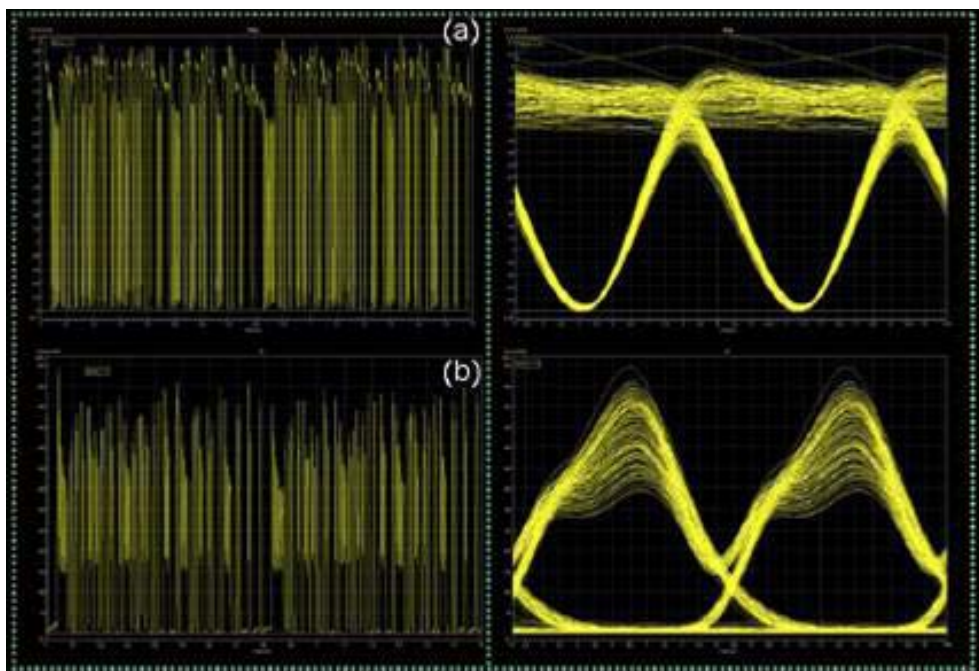
Σχήμα 85: Θεωρητικό μοντέλο απεικόνισης ενός 2<sup>ης</sup> τάξης φίλτρου μικρο-δακτυλίου μέσω του προγράμματος ASPIC

Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.



Σχήμα 86: Φασματική απόκριση του 2<sup>ης</sup> τάξης φίλτρου μικρο-δακτυλίου (κόκκινη γραμμή) συγκριτικά με αυτήν του βέλτιστου ζωνοπερατού φίλτρου (μαύρη γραμμή)

Στην περίπτωση αυτή το φίλτρο είναι απορρυθμισμένο κατά 140 GHz σε σχέση με την συχνότητα του φέροντος. Χρησιμοποιώντας το ίδιο DI με αυτό της περίπτωσης της 1<sup>ης</sup> τάξης φίλτρου μικροδακτυλίου, τα πειραματικά αποτελέσματα που λαμβάνουμε κατά την έξοδο του σήματος από το DI φαίνονται ακολούθως:



Σχήμα 87: Ακολουθία παλμών και αντίστοιχα διαγράμματα ματιού της λειτουργίας του μετατροπέα μήκους κύματος σε ρυθμό μετάδοσης 160 Gb/s, στην έξοδο α) της 2<sup>ης</sup> τάξης φίλτρων μικροδακτυλίου και β) DI

## Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

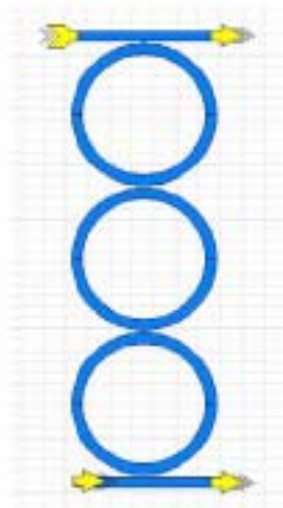
Στην προκειμένη περίπτωση συγκριτικά με τα αποτελέσματα του σχήματος 84 (1<sup>ης</sup> τάξης), παρατηρούμε σαφή βελτίωση στο διάγραμμα ματιού. Παρόλα αυτά λόγω της παραμόρφωσης των παλμών στην έξοδο του κυκλώματος, φαινόμενο το οποίο δεν φαίνεται στην περίπτωση του BPF-DI, συμπεραίνουμε ότι ούτε αυτή η περίπτωση είναι επαρκής για την βέλτιστη λειτουργία του WC σε ρυθμό μετάδοσης 160 Gb/s.

### 3<sup>ης</sup> τάξης φίλτρα μικρο-δακτυλίων

Στον τρίτο και τελευταίο κύκλο των εξομοιώσεων που διενεργήθηκαν για τον χαρακτηρισμό των κατασκευαστικών παραμέτρων των φίλτρων μικροδακτυλίου, προκειμένου να λειτουργούν σε ταχύτητες 160 Gb/s, μελετήσαμε τα 3<sup>ης</sup> τάξης φίλτρα μικροδακτυλίου. Η σχεδίαση των στοιχείων αυτών φαίνεται στο σχήμα 88 ενώ οι σχεδιαστικοί παράμετροι στον πίνακα 12. Στην περίπτωση αυτή η απόκριση του φάσματος των 3<sup>ης</sup> τάξης φίλτρων είναι συνακόλουθη του ζωνοπερατού φίλτρου για 20 dB του συνολικού του φάσματος, αραιετά υψηλότερη από τα 4 dB των φίλτρων 1<sup>ης</sup> τάξης και 10 dB των φίλτρων 2<sup>ης</sup> τάξης.

Παράμετρος	Τιμή
Power Coupling coefficient Bus-Ring	0.3
Power Coupling coefficient Ring-Ring	0.0125
Refractive Index	1.5
Ring Attenuation	45 dB/cm (=0.07 dB/roundtrip)
Ring radius	2.5 μm

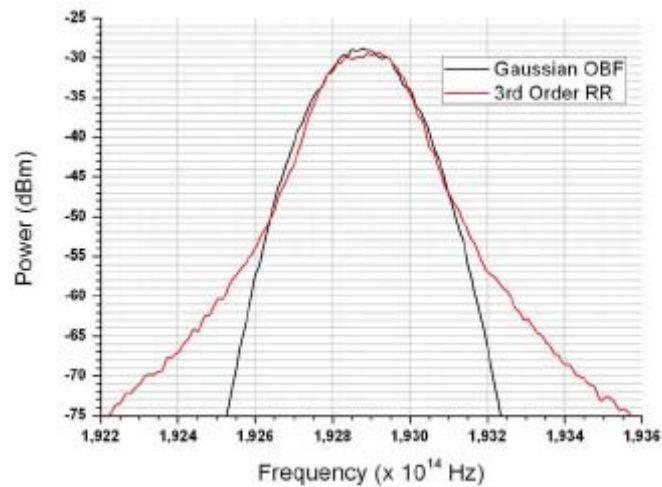
Πίνακας 12: Παράμετροι για το 3<sup>ης</sup> τάξης φίλτρο μικροδακτυλίου



Σχήμα 88: Θεωρητικό μοντέλο απεικόνισης ενός 3<sup>ης</sup> τάξης φίλτρου μικρο-δακτυλίου μέσω του προγράμματος ASPIC

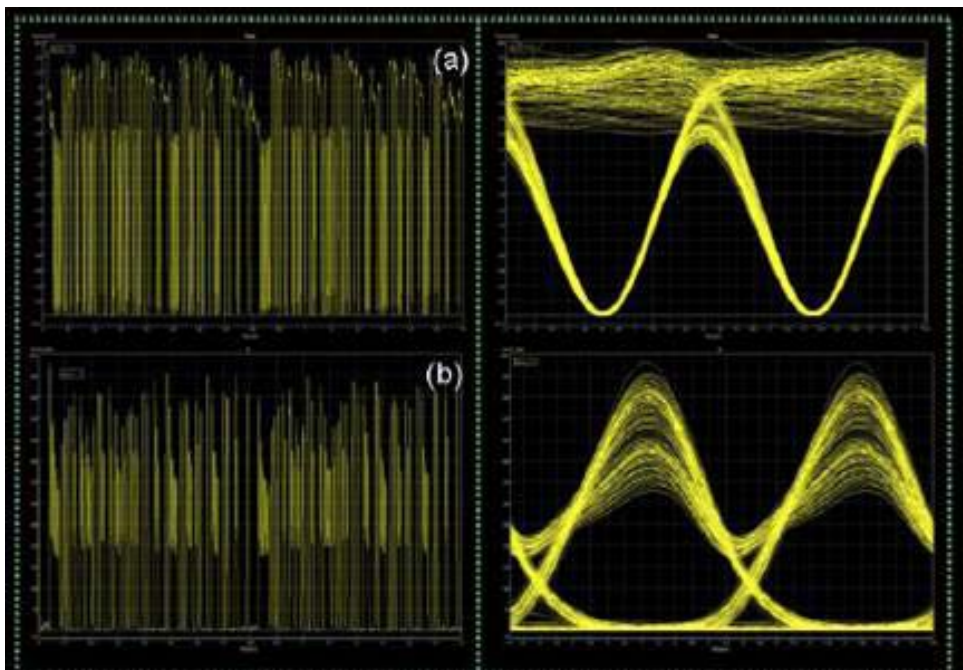


Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.



Σχήμα 89: Φασματική απόκριση του 3<sup>ης</sup> τάξης φίλτρου μικρο-δακτυλίου (κόκκινη γραμμή) συγκριτικά με αυτήν του βέλτιστου ζωνοπερατού φίλτρου (μαύρη γραμμή)

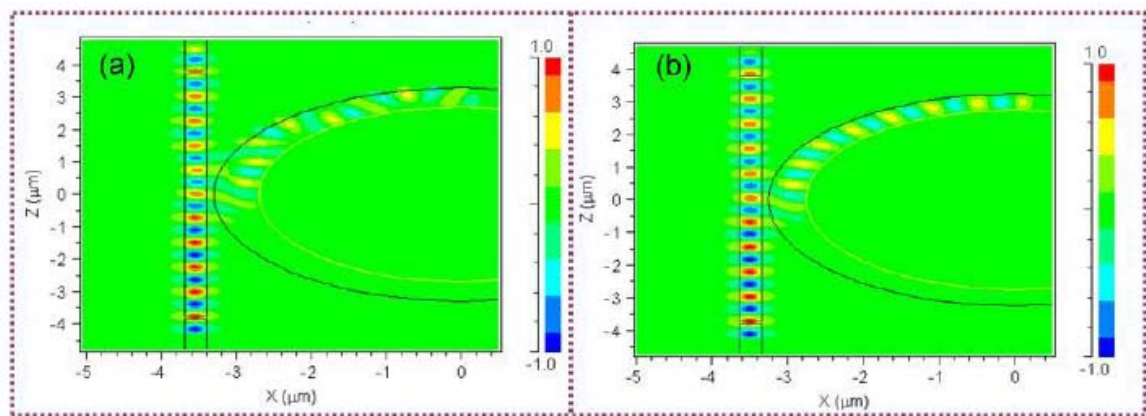
Η μετατόπιση του φίλτρου 3<sup>ης</sup> τάξης είναι 140 GHz σε σχέση με την συχνότητα του φέροντος, ενώ το ίδιο DI χρησιμοποιήθηκε και στην περίπτωση αυτή. Τα πειραματικά αποτελέσματα φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα, πιστοποιώντας ότι η αρχιτεκτονική της 3<sup>ης</sup> τάξης φίλτρων μικρο-δακτυλίου είναι ικανά να παράγουν ένα σήμα στην έξοδο του μετατροπέα μήκους κύματος, με ποιότητα αντίστοιχη αυτής που επιτυγχάνεται με την χρήση του ζωνοπερατού φίλτρου σε ακολουθία με ένα DI.



Σχήμα 90: Ακολουθία παλμών και αντίστοιχα διαγράμματα ματιού της λειτουργίας του μετατροπέα μήκους κύματος σε ρυθμό μετάδοσης 160 Gb/s, στην έξοδο α) της 3<sup>ης</sup> τάξης φίλτρων μικροδακτυλίου και β) DI

## Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

Σε ότι αφορά τις κατασκευαστικές παραμέτρους των φίλτρων μικροδακτυλίου, το επιθυμητό διάκενο μεταξύ κυματοδηγού και δακτυλίου καθώς και των δακτυλίων μεταξύ τους, προκειμένου να επιτύχουμε βέλτιστη μείωση των εσωτερικών απωλειών ισχύος είναι 0.3 και 0.0125 αντίστοιχα. Για την επίτευξη της τιμής 0.3 μεταξύ κυματοδηγού και δακτυλίου όμως το διάκενο θα έπρεπε να είναι <math>< 50\text{ nm}</math> γεγονός που κατασκευαστικά ήταν ανέφικτο. Από την άλλη μεριά υψηλές τιμές PCC (power coupling coefficients) είναι δύσκολο να υλοποιηθούν για υψηλής τάξης φίλτρων μικροδακτυλίου με ακρίβεια και ικανότητα επαναληπτικότητας της κατασκευής τους. Επιπρόσθετα παρατηρώντας και το σχήμα 91, βλέπουμε ότι τα φίλτρα μικροδακτυλίου με διάμετρο κυματοδηγού 600nm δεν είναι αποδοτικά σε σχέση με τα αντίστοιχα των 500 nm διαμέτρου. Ο λόγος είναι ότι στα 600 nm φίλτρα μικροδακτυλίου η μετάδοση του φωτός οδηγείται σε χρήση υψηλότερης τάξης φίλτρα μικροδακτυλίου γεγονός που αποφεύγεται στην δεύτερη περίπτωση, παρουσιάζοντας όμως απώλειες ισχύος 30 dB/cm ενώ ο Q παράγοντας της κοιλότητας είναι  $\sim 7000$ .



Σχήμα 91: Σύγκριση σε επίπεδο ζεύξης μεταξύ α) 600 nm x 220 nm κυματοδηγό δακτυλίου, β) 500nm x 220 nm κυματοδηγό δακτυλίου

Λαμβάνοντας υπόψιν τους κατασκευαστικούς αυτούς περιορισμούς, οι παράμετροι για τον σχεδιασμό τρίτης τάξης φίλτρων μικροδακτυλίου αναπροσδιορίστηκαν όπως φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

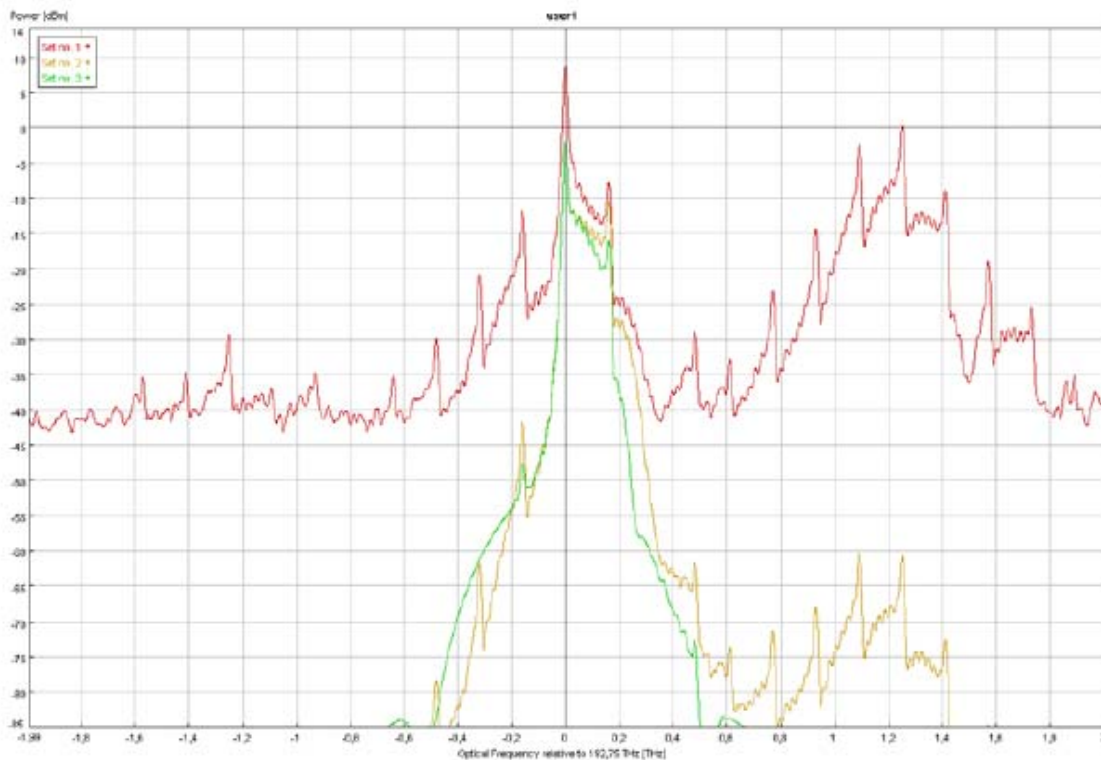
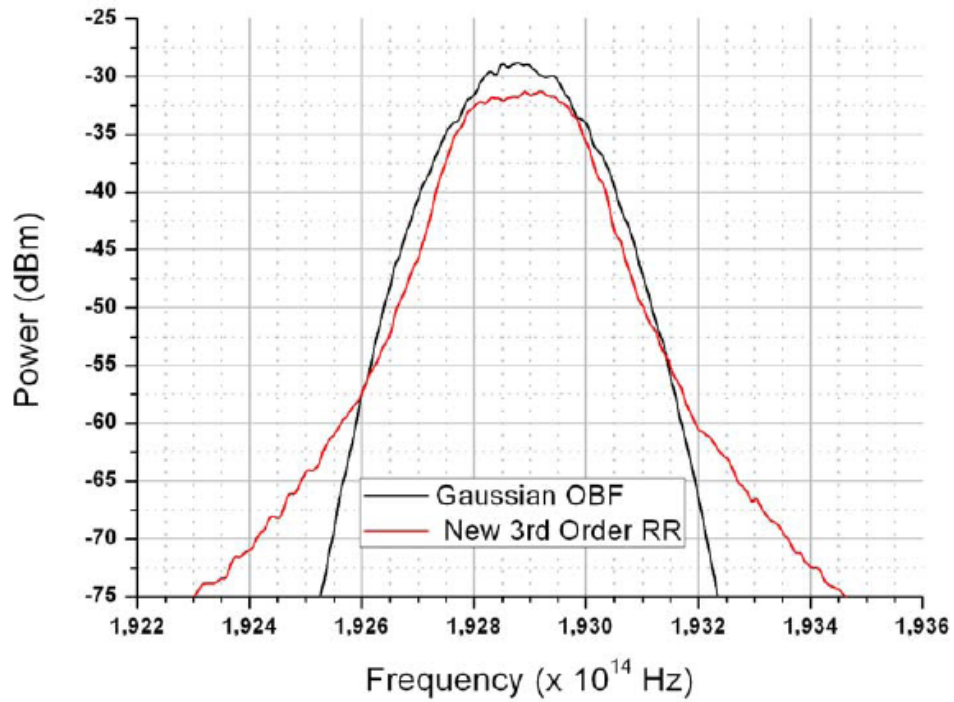
Παράμετρος	Τιμή
Power Coupling coefficient Bus-Ring	0.2
Power Coupling coefficient Ring-Ring	0.0125
Refractive Index	1.5
Ring Attenuation	130 dB/cm (=0.21 dB/roundtrip)
Ring radius	3 $\mu\text{m}$
Bus waveguide width	500 $\mu\text{m}$
Ring waveguide width	500 $\mu\text{m}$
Waveguide height	220 nm
Gap bus-ring	90 nm
Gap ring-ring	220 nm

Πίνακας 13: Σχεδιαστικοί παράμετροι αναπροσδιορισμένων 3<sup>ης</sup> τάξης φίλτρων μικροδακτυλίου

Η φασματική απόκριση των ανασχεδιασμένων φίλτρων μικρο-δακτυλίου φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα. Η μορφή των φίλτρων (κόκκινη γραμμή) είναι εφάμιλλη της απόκρισης του ζωνοπερατού φίλτρου για περισσότερο από 20 dB. Επιπρόσθετα το σχήμα 92 παρουσιάζει το φάσμα του σήματος εξόδου του φίλτρου μικροδακτυλίου αφότου έχει υποστεί το chirp filtering. Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στην έξοδο του SOA ενώ η κίτρινη γραμμή δείχνει την καταπίεση των υψίσυχων συστατικών του σήματος λόγω της κατάλληλης απορύθμισης του φίλτρου μικροδακτυλίου. Τέλος η πράσινη γραμμή παρουσιάζει το φάσμα στην έξοδο του DI.

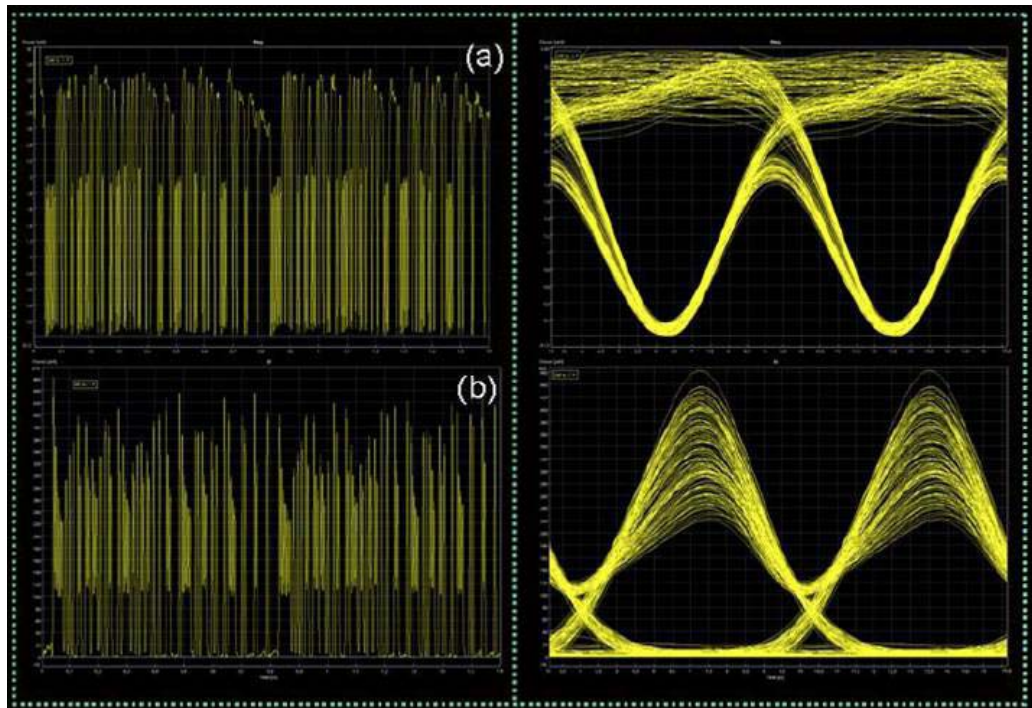


Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.



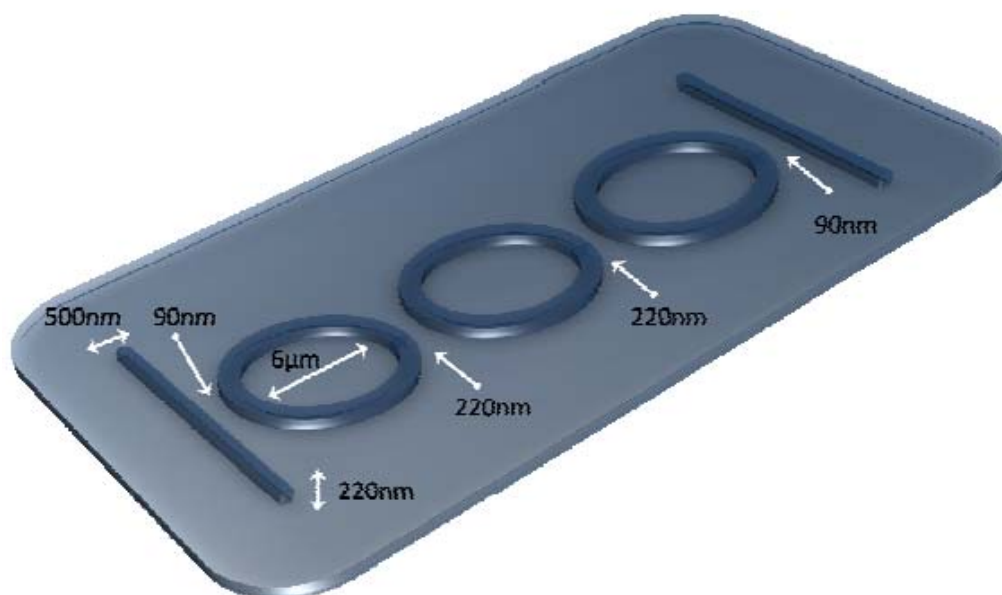
Σχήμα 92: Φασματική απόκριση 3<sup>ης</sup> τάξης φίλτρων μικρο-δακτυλίου με 500 nm διάμετρο κυματοδηγού και οπτικό φάσμα: 160 Gb/s σήμα στην έξοδο του SOA (κόκκινη γραμμή), φιλτραρισμένο σήμα στην έξοδο των φίλτρων μικρο-δακτυλίου (κίτρινη γραμμή), ανακτημένης πόλωσης σήμα στην έξοδο του DI (πράσινη γραμμή).

Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.



Σχήμα 93: Ακολουθία παλμών και αντίστοιχα διαγράμματα ματιού της λειτουργίας του μετατροπέα μήκους κύματος σε ρυθμό μετάδοσης 160 Gb/s, στην έξοδο α) των ανασχεδιασμένων 3<sup>ης</sup> τάξης φίλτρων μικροδακτυλίου και β) DI

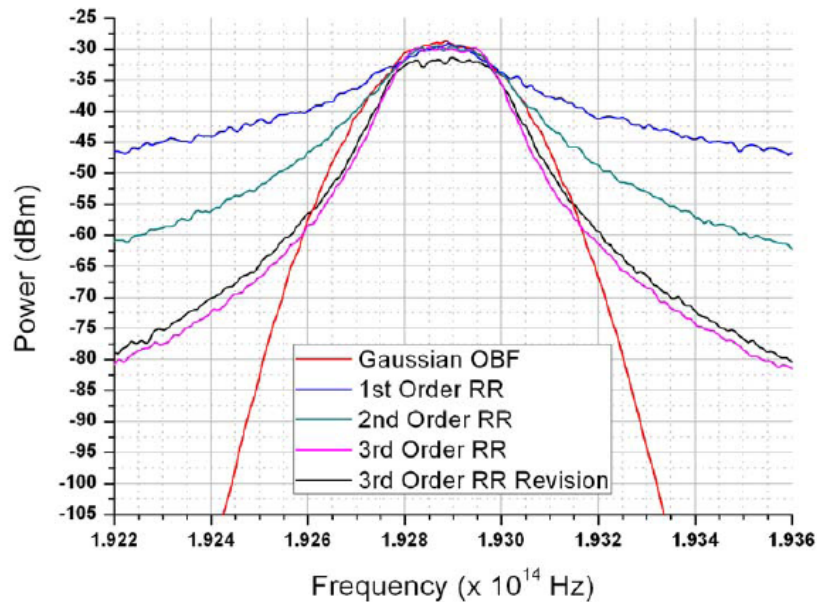
Το σχήμα 93 (a) and (b) παρουσιάζουν τα αποτελέσματα τόσο του αντεστραμμένης πόλωσης σήματος όσο και του εξερχόμενου από το DI με ανακτιμένη πόλωση σήματος αντίστοιχα. Συγκριτικά με τα αποτελέσματα του σχήματος 90 το διάγραμμα ματιού παραμένει ανοικτό με ελάχιστη διαμόρφωση πλάτους.



Σχήμα 94: Σχεδιαστική απεικόνιση και εμφάνιση παραμέτρων των 3<sup>ης</sup> τάξης φίλτρων μικρο-δακτυλίου

## Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

Εν κατακλείδι παραθέτουμε όλα τα αποτελέσματα από μια σειρά εξομοιώσεων που διενεργήθηκαν με σκοπό την εύρεση της βέλτιστης αρχιτεκτονικής / τοπολογίας των φίλτρων μικροδακτυλίου για λειτουργία τους σε ρυθμούς μετάδοσης 160 Gb/s.



Σχήμα 95: Συγκριτική απεικόνιση των φασματικών αποκρίσεων των προτεινόμενων αρχιτεκτονικών κατασκευής των φίλτρων μικρο-δακτυλίου για λειτουργία τους σε ρυθμό μετάδοσης 160 Gb/s

Από την εναπόθεση όλων των αποτελεσμάτων συγκεντρωτικά σε ένα διάγραμμα είναι επομένως φανερό ότι η αρχιτεκτονική της τρίτης τάξης φίλτρων μικρο-δακτυλίου λόγω της μεγαλύτερης καταπίεσης του εξωτερικού θορύβου είναι η βέλτιστη λύση για την κατασκευή ενός αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος.

### Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκε μια καινοτόμο αρχιτεκτονική μετατροπής μήκους κύματος, η οποία βασίστηκε στην τεχνική “chirp filtering”, με σκοπό την εφαρμογή της και μετέπειτα αντικατάσταση των ήδη υπαρχόντων μετατροπέων μήκους κύματος στους φωτονικούς δρομολογητές επόμενης γενιάς. Για την υλοποίηση του μετατροπέα μήκους κύματος χρησιμοποιήθηκε ένας ολοκληρωμένος αναδιατάξιμος οπτικός add-drop πολυπλέκτης, ο οποίος κατασκευάστηκε με την τεχνολογία ολοκλήρωσης με χρήση πυριτίου, και αποτελείται από συστοιχίες φίλτρων μικροδακτυλίου δεύτερης τάξης. Προκειμένου να αξιολογηθεί η ορθότητα της αρχιτεκτονικής αυτής σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s, διεξήγαμε τόσο την θεωρητική μοντελοποίηση της αρχιτεκτονικής αυτής με χρήση εργαλείων εξομοίωσης (VPI, ASPIC), όσο και πειραματική υλοποίηση της αρχιτεκτονικής με άμεση εφαρμογή των εξαχθέντων από τις εξομοιώσεις αποτελέσματα. Τόσο η θεωρητική όσο και η πειραματική μελέτη παρουσίασαν εφάμιλλα αποτελέσματα σε ότι αφορά την

**Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.**

αποδοτικότητα του προτεινόμενου συστήματος, παρουσιάζοντας την ανωτερότητα της αρχιτεκτονικής μετατροπής μήκους κύματος έναντι ήδη υπάρχοντων αρχιτεκτονικών. Βασικό πλεονέκτημα του προτεινόμενου μετατροπέα μήκους κύματος αποτέλεσε η υψηλής κλίμακας δυνατότητα ολοκλήρωσης των στοιχείων που την απαρτίζουν, καθώς και η αισθητή μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας και της εκλυόμενης θερμότητας απόρροια της απλής δομής της αρχιτεκτονικής αυτής, μιας και χρησιμοποιεί μόνο ένα ενεργό στοιχείο. Επιπρόσθετα βασικό χαρακτηριστικό της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής αποτέλεσε η διαφάνεια στο είδος της πληροφορίας, αλλά και η πολυκυματική δυνατότητα μεταγωγής γεγονός που αποδεικνύεται από την ακολουθία των πειραματικών διατάξεων που υλοποιήσαμε τόσο για πακέτα δεδομένων όσο και για συνεχόμενες ακολουθίες διφύων σε ένα ή περισσότερα μήκη κύματος. Τέλος με την ολοκλήρωση της μελέτης μας σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s για τις άνωθι δομές δεδομένων, επεκτείναμε την έρευνα μας στην θεωρητική μελέτη κατασκευής ολοκληρωμένων πλινθίων αποτελούμενα από συστοιχίες φίλτρων μικροδακτυλίου για λειτουργία τους σε ταχύτητες μετάδοσης άνω των 160 Gb/s.

Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

## Αναφορές

- [4.1] <http://www.cisco.com/en/US/products/ps5763/index.html>
- [4.2] [http://sysdoc.doors.ch/ALCATEL/7670\\_gSHDSL\\_A4\\_ds.pdf](http://sysdoc.doors.ch/ALCATEL/7670_gSHDSL_A4_ds.pdf)
- [4.3] <http://www.juniper.net/us/en/products-services/routing/t-tx-series/>
- [4.4] P. Bakopoulos, P. Zakynthinos, E. Kehayas, L. Stampoulidis, F. Fresi, C. Porzi, N. Calabretta, Ch. Kouloumentas, D. Petrantonakis, A. Maziotis, C. Stamatiadis, D. Apostolopoulos, M. Guina, D. Klonidis, L. Potì, E. Tangdiongga, A. Poustie, G. Maxwell, I. Tomkos, A. Bogoni, H.J.S. Dorren and H. Avramopoulos, "160 Gb/s All-Optical Contention Resolution with Prioritization using Integrated Photonic Components" ECOC 2009, 20-24 September, 2009, Vienna, Austria Paper 6.3.5
- [4.5] P. Zakynthinos, D. Petrantonakis, D. Apostolopoulos, A. Poustie, G. Maxwell and H. Avramopoulos "Four-Wavelength 3R Burst Mode Regenerator Using Three Integrated Quad MZI Arrays" OFC 2008, Tech. Dig. OWK5, San Diego, USA, 2008
- [4.6] Jürgen Gripp, "The IRIS Optical Packet Router: A DARPA / MTO Project", International Workshop on the Future of Optical Networking (FON), Optical Fiber Communications Conference (OFC 2006), Anaheim, USA.
- [4.7] T. Goh, et al., "Low Loss and High Extinction Ratio Strictly Nonblocking 16x16 Thermo-optic Matrix Switch on 6-in Wafer Using Silica-Based Planar Lightwave Circuit Technology", *J. Lightw. Technol.*, Vol. 19, No. 3, pp. 371-379, March 2001.
- [4.8] <http://mufins.cti.gr/>
- [4.9] S. C. Nicholes, et al., "The World's First InP 8x8 Monolithic Tunable Optical Router (MOTOR) Operating at 40 Gbps Line Rate per Port", presented at the OFC/NFOEC 2009, San Diego, USA, paper PDPB1.
- [4.10] Y. Liu, et al.: "Error-free 320 Gbit/s SOA-based wavelength conversion using optical filtering" presented at the OFC/NFOEC 2006, Anaheim, CA, USA, paper PDP28.
- [4.11] O. Raz, et al.: "Non-inverted multiple wavelength converter at 40 Gbit/s using 1550 nm quantum dot SOA", *Electron. Lett.*, 44(16), pp. 988-989, (2008).
- [4.12] [www.ict-boom.eu](http://www.ict-boom.eu)
- [4.13] R. Heideman, et al., "Large-scale integrated optics using TriPleX™ waveguide technology: from UV to IR" (Invited), SPIE Photonics West, San Jose, California, 24–29 January 2009, p. 7221-26.
- [4.14] F. Morichettiet al., "Box-Shaped Dielectric Waveguides: A New Concept in Integrated Optics?", *J. Lightw. Technol.*, vol. 25, Sep. 2007, pp 2579-2589.
- [4.15] T. Aalto, et al.: "Integration of InP-based optoelectronics with silicon waveguides (Invited)", in SPIE Photonics West 2009, San Jose (2009).



Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

- [4.16] E. J. Klein, et al., “*Densely integrated microring resonator based photonic devices for use in access networks*”, Opt. exp., 15 (16). pp. 10346-10355.
- [4.17] Y. Liu, et al., “*Error-Free All-Optical Wavelength Conversion at 160 Gb/s Using a Semiconductor Optical Amplifier and an Optical Bandpass Filter*”, J. Lightw. Technol., Vol. 24, No. 1, pp. 230-236, Jan. 2006.
- [4.18] J. Dong, X. Zhang, S. Fu, J. Xu, P. Sum 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, No3, May/June 2008, pp. 770-778.
- [4.19] 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*,” IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 23, pp. 1350-1362, 2005.
- [4.20] Y. Miyazaki et. al, “*Polarization-Insensitive SOA-MZI Monolithic All-Optical Wavelength Converter for Full C-band 40Gbps-NRZ Operation*,” in Proc. ECOC’06, Th3.4.2.
- [4.21] G. Maxwell et al., “*Very low coupling loss, hybrid-integrated all-optical regenerator with passive assembly*,” post-deadline paper PD3.5 ECOC 2002
- [4.22] [www.ciphotonics.com](http://www.ciphotonics.com)
- [4.23] 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, All-Optical Packet Switching*,” IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Volume 14, Issue 3, May-june 2008 Page(s):849 - 860
- [4.24] H. Chayett, S. Ben Ezra, N. Shachar, S. Tzadok, S. Tsadka and J. Leuthold: “*Regenerative all-optical wavelength converter based on semiconductor optical amplifier and sharp frequency response*,” in Proceedings of OFC2004, Ths2, USA, Feb. 2004.
- [4.25] M.L. Nielsen, B. Lavigne and B. Dagens: “*Polarity-preserving SOA-based wavelength conversion at 40 Gbit/s using bandpass filtering*”, Electron. Lett., Vol.39, 1334-1335, Sept., 2003.
- [4.26] 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*”, J. of Lightwave Tech., Vol. 22, 186-192, Jan., 2004.
- [4.27] Tatsuo Hatta, et al, “*Polarization-Insensitive Monolithic 40-Gbps SOA-MZI Wavelength Converter With Narrow Active Waveguides*”, IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, VOL.13, NO.1, JANUARY/FEBRUARY 2007, pp. 32

Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

- [4.28] Vikrant Lal, et al, “*Monolithic Wavelength Converters for High-Speed Packet-Switched Optical Networks*”, IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 13, NO. 1, JANUARY/FEBRUARY 2007 pp. 49
- [4.29] H. J. S. Dorren, J. Herrera, O. Raz, E. Tangdiongga, Y. Liu, J. Marti, F. Ramos, G. Maxwell, A. Poustie, H.C.H. Mulvad, M. T. Hill, H. de Waardt, A. M. J. Koonen, G. D. Khoe, “*All-optical devices for ultrafast packet switching*”, invited paper ThE5, *IEEE LEOS Annual Meeting*, Orlando, U.S.A. (2007).
- [4.30] P. Zakyntinos, D. Apostolopoulos, O. Zouraraki, D. Petrantonakis, G. Theophilopoulos, A. Poustie, G. Maxwell and H. Avramopoulos, “*Single Chip Quad MZI array in a 40 Gb/s AOLS Front-end*”, OFC 2007, Tech. Dig. OWH7, Anaheim, USA, 2007
- [4.31] L. Rau, S. Rangarajan, W. Wang, H. Chou, H. Poulsen, J. Bowers, and D. Blumenthal, “*High-speed optical time-division-multiplexed/WDM networks and their network elements based on regenerative all-optical ultrafast wavelength converters*,” J. Opt. Netw. **3**, 100-118 (2004)
- [4.32] C. Lee, Y. Kim, C. Park, H. Lee, and C. Park, “*Experimental demonstration of 10 Gb/s data format conversions between NRZ and RZ using SOA-loop-mirror*,” J. Lightw. Technol., vol. 23, no. 2, pp. 834–841, Feb. 2005.
- [4.33] A. Reale, P. Lugli, and S. Betti, “*Format conversion of optical data using four-wave mixing in semiconductor optical amplifiers*,” IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., vol. 7, no. 4, pp. 703–709, Jul./Sep.01
- [4.34] **D. Petrantonakis**, D. Apostolopoulos, M. Spyropoulou, N. Pleros, K. Vyrsoinos, and H. Avramopoulos “*40 Gb/s NRZ Wavelength Conversion with Enhanced 2R Regeneration Characteristics using a Differentially-biased SOA-MZI switch*”, LEOS Annual Meeting Conference Proceedings, 2009. LEOS '09. IEEE 4-8 Oct. 2009 Page(s):781 - 782
- [4.35] 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, All-Optical Packet Switching*”, Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of, Volume 14, Issue 3, May-june 2008 Page(s):849 – 860
- [4.36] 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 Microring Resonator ROADM*”, OFC 2009, Tech. Dig. PDPA8, San Diego, USA, 2009
- [4.37] 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 and H. Avramopoulos “*High-order micro-ring resonator assisted wavelength converters for scalable and power efficient photonic routers*”, ECOC 2009, Paper P2.08, 20-24 September, 2009, Vienna, Austria



Κύκλωμα αμιγώς οπτικής μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρο-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων στα 40 Gb/s.

- [4.38] **D. Petrantonakis**, C. Stamatiadis, L. Stampoulidis, P. Zakyntinos, P. Bakopoulos, E. Kehayas, Ch. Kouloumentas, R. Dekker , E. J. Klein and H. Avramopoulos, “*A novel All-Optical Wavelength Conversion scheme using a SOA and a 2nd Order Micro-ring Resonator ROADM*”, ICO Photonics, Delphi, 2009
- [4.39] L. Stampoulidis, **D. Petrantonakis**, C. Stamatiadis, E. Kehayas, P. Bakopoulos, Ch. Kouloumentas, P. Zakyntinos, K. Vyrsoinos, R. Dekker and E. J. Klein, “*Micro-ring resonator assisted, all-optical wavelength conversion using a single SOA and a 2nd order Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub> ROADM*”, accepted for publication in Lightwave Technology, Journal of, 2009
- [4.40] <http://www.phoenixbv.com/>

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## Σύνοψη αποτελεσμάτων και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

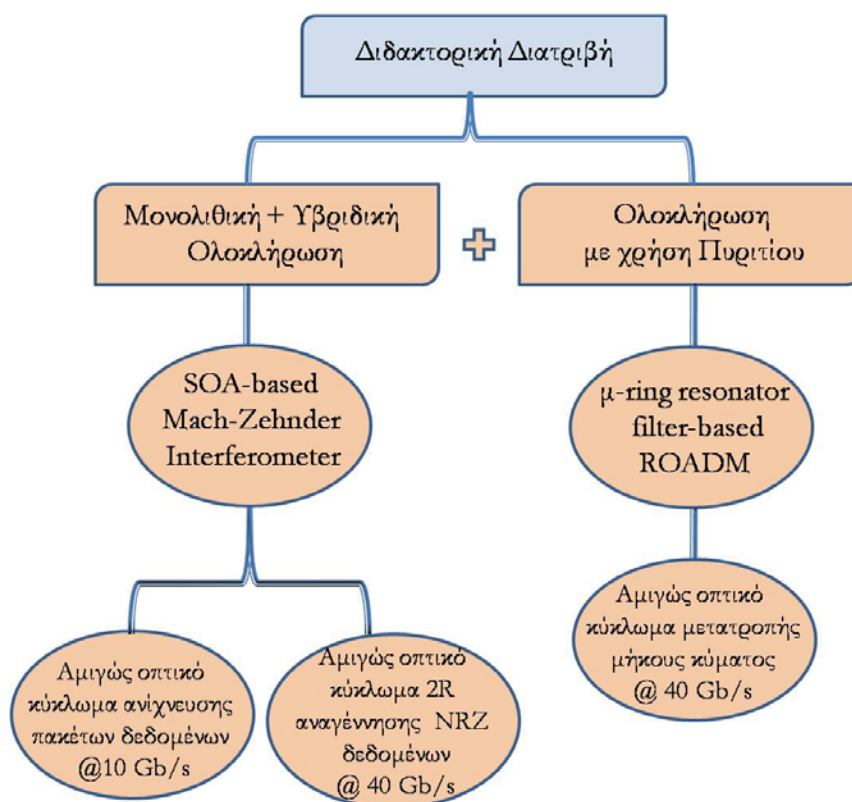
### 5.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Η παρούσα διδακτορική διατριβή επικεντρώθηκε στην διεξοδική μελέτη ολοκληρωμένων διατάξεων, που αποτελούν την ναυαρχίδα των πιο εξελιγμένων τεχνολογιών ολοκλήρωσης, όπως είναι η μονολιθική, η υβριδική και η χρήση πυριτίου. Συγκεκριμένα παρουσιάστηκαν αμιγώς οπτικά συστήματα μετάδοσης δεδομένων και δρομολόγησης που βασίστηκαν στην χρήση ολοκληρωμένων συμβολομετρικών διατάξεων Mach-Zehnder τα οποία κατασκευάστηκαν συνδυάζοντας την μονολιθική με την υβριδική τεχνολογία, καθώς και στην χρήση φίλτρων μικρό –δακτυλίου τα οποία κατασκευάστηκαν με την τεχνολογία TripleX™.

Βασικός άξονας της μελέτης μας σε συστήματα που εκμεταλλεύονται την χρήση ολοκληρωμένων οπτικών διατάξεων, αποτέλεσε η τάση της επιστημονικής κοινότητας για

μεταστροφή του ενδιαφέροντος της στην φωτονική τεχνολογία. Είναι ευρέως αποδεκτό ότι η επένδυση σε αξιόπιστες φωτονικές μεθόδους ολοκλήρωσης και η ανάπτυξη ολοκληρωμένων και αποδοτικών οπτικών συστημάτων είναι πλέον γεγονός. Δεν είναι τυχαίο άλλωστε ότι μεγάλοι κολοσσοί όπως η Infinera [5.1], η Luxtera [5.2], η Kotura [5.3], κ.α επιδεικνύουν σημαντική εμπορική επιτυχία στον τομέα αυτό.

Ακολουθώντας επομένως την λογική αυτή, η παρούσα διδακτορική διατριβή επικεντρώθηκε σε 2 βασικούς άξονες, οι οποίοι διαχωρίζονται σε επιμέρους υπο-τμήματα, όπως διαφαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 96: Δομικό διάγραμμα που συνοψίζει το περιεχόμενο της μελέτης μας στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής

Συγκεκριμένα παρατηρώντας το σχήμα 96, διαπιστώνουμε ότι το βασικό πλαίσιο πάνω στο οποίο στηρίχθηκε η παρούσα διδακτορική διατριβή αφορά την μελέτη των καινοτόμων τεχνολογιών ολοκλήρωσης και την μετέπειτα αξιολόγηση τους μέσω εξελιγμένων αμιγώς οπτικών εφαρμογών, οι οποίες προτάθηκαν στα πλαίσια της ερευνητικής μας μελέτης στο ΕΦΕ, που βασίζονται στην χρήση ολοκληρωμένων πλινθίων της κάθε τεχνολογίας αντίστοιχα. Ερμηνεύοντας επομένως το διάγραμμα ροής του σχήματος 96, τα βήματα που ακολουθήθηκαν στην παρούσα διατριβή μπορούν να συνοψιστούν στα κάτωθι βασικά σημεία:

1. Μελέτη των πιο σύγχρονων και αποτελεσματικότερων μεθόδων φωτονικής ολοκλήρωσης για κατασκευή ολοκληρωμένων διατάξεων υψηλής αποδοτικότητας,

### **1.1 Μονολιθική και υβριδική ολοκλήρωση**

Χρήση οπτικών πυλών MZI:

1. Μελέτη συστημάτων αμιγώς οπτικής επεξεργασίας δεδομένων και ανίχνευσης εισερχόμενων πακέτων πληροφορίας, τόσο για σύγχρονες όσο και για ασύγχρονες ροές δεδομένων σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s.
2. Μελέτη συστημάτων μετατροπής μήκους κύματος και αναγέννησης δεδομένων για διαμορφωμένα σήμα NRZ σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s.

### **1.2 Ολοκλήρωση με χρήση πυριτίου**

Χρήση φίλτρων μικρό-δακτυλίου:

1. Μελέτη συστημάτων μετατροπής μήκους κύματος για διαμορφωμένα σήματα RZ/NRZ σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s

Η ανασκόπηση των παραπάνω πειραμάτων και των αποτελεσμάτων τους, παράλληλα με τη ευρύτερη εξέλιξη της διατριβής παρουσιάζονται παρακάτω στην πρώτη ενότητα του κεφαλαίου. Έπειτα, η ενότητα 5.2 αναφέρεται στα επόμενα βήματα προς την εξέλιξη σύνθετων ολοκληρωμένων οπτικών κυκλωμάτων, όπως αυτά προκύπτουν με το πέρας της παρούσας διατριβής επιχειρώντας ταυτόχρονα και μία εκτίμηση για την εξέλιξη και την περαιτέρω ανάπτυξη των οπτικών κυκλωμάτων και συστημάτων για μελλοντική χρήση ή αντικατάσταση στους ήδη υπάρχοντες φωτονικούς δρομολογητές.

## **5.1.2 Μελέτη των πιο σύγχρονων και αποτελεσματικότερων μεθόδων φωτονικής ολοκλήρωσης για κατασκευή ολοκληρωμένων διατάξεων υψηλής αποδοτικότητας**

Όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 1 της παρούσας διατριβής, οι βασικότερες αρχιτεκτονικές ολοκλήρωσης φωτονικών διατάξεων, είναι η μονολιθική, η υβριδική και η χρήση του πυριτίου. Ο ρόλος των οπτικών για υψηλής ταχύτητας δρομολογητές μελετήθηκε εκτενώς από την επιστημονική κοινότητα, καταλήγοντας στο συμπέρασμα, ότι οι τεχνολογίες ολοκλήρωσης παρέχουν μια εξαιρετική λύση στην κατασκευή των τελευταίας τεχνολογίας δρομολογητών υψηλής χωρητικότητας. Το ενδιαφέρον της φωτονικής ολοκλήρωσης έχει επικεντρωθεί πλέον στην ανάπτυξη και υλοποίηση ολοκληρωμένων συστημάτων, με υψηλό επίπεδο ολοκληρωσιμότητας, ευφυίας και χωρητικότητας προκειμένου να επιτελούν λειτουργίες σε ένα οπτικό κόμβο, καταναλώνοντας χαμηλές ποσότητες ενέργειας και

σχεδιαστικού χώρου. Η συναρμολόγηση του puzzle δρομολογήθηκε με την σχεδίαση φωτονικών συστημάτων on chip: Η χρήση του InP ως πρώτη ύλη για την κατασκευή ολοκληρωμένων διατάξεων σε ένα πλινθίο (μονολιθική) συνετέλεσε στην κατασκευή των πρώτων συστημάτων προώθησης πακέτων σε συνεχόμενους κόμβους (packet forwarding), ανίχνευσης συγκρούσεων (packet envelope detection), μεταγωγής δεδομένων σε WDM δίκτυα (wavelength switching), καθώς και ολοκληρωμένους buffers αλλά και AWGs. Το επόμενο στάδιο ήταν η δημιουργία όλο και πιο εξελιγμένων ολοκληρωμένων συστημάτων σχεδιασμένα σε ένα πλινθίο, προκειμένου να μειώσουμε το κόστος κατασκευής, το οποίο ήταν αρχικά αυξημένο με την χρήση μεμονωμένων στοιχείων. Φωτονικές πλατφόρμες ολοκλήρωσης, οι οποίες θα επέτρεπαν υψηλού επιπέδου ευελιξία στην σχεδίαση, μείωση κόστους κατασκευής και αύξηση των λειτουργικών εφαρμογών τους σε ένα δίκτυο, θα επέτρεπαν την δημιουργία «έξυπνων οπτικών δικτυακών καρτών» προκειμένου να μεταβούμε σε ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των Tb/s. Η υβριδική τεχνολογία με κύριο αντιπρόσωπο της, την Centre for Integrated Photonics (CIP UK) [5.4], κατάφερε αξιοποιώντας τα προκατασκευασμένα με InP ολοκληρωμένα στοιχεία (SOAs, διαμορφωτές κλπ) να τα ενσωματώσει σε μια κοινή πλατφόρμα ολοκλήρωσης μέσω της τεχνικής flip-chip bonding προκειμένου να αναβαθμίσει τις λειτουργικές δυνατότητες των ολοκληρωμένων στοιχείων και διατάξεων, προϊόντα κυρίως της μονολιθικής τεχνολογίας. Βασικά προϊόντα της αποτέλεσαν μετατροπείς μήκους κύματος, οι οποίοι λόγω της παθητικής μεθόδου ολοκλήρωσης επιτύγχαναν μικρές απώλειες στην κατασκευή τους. Ο τετραπλός SOA-MZI ολοκληρωμένος οπτικός διακόπτης αποτελεί ένα ουσιαστικό παράδειγμα της επιτυχίας ολοκλήρωσης τεσσάρων SOA-MZI διακοπών σε ένα πλινθίο, μειώνοντας το κόστος του πακεταρίσματος (packaging και pig tailing), επιδεικνύοντας παράλληλα πληθώρα εφαρμογών (μετατροπή μήκους κύματος, 3R αναγέννηση σήματος, ανάκτηση ρολογιού, διαχωρισμό επικεφαλίδας/φορτίου κλπ). Το επόμενο βήμα στην μείωση τόσο του κόστους κατασκευής όσο και του καταλαμβανόμενου χώρου των ολοκληρωμένων διατάξεων ήρθε με την χρήση της τεχνολογίας πυριτίου. Η συμβατότητα της με την CMOS τεχνολογία μείωσε δραματικά το κόστος κατασκευής, ενώ η χρήση νάνο στοιχείων όπως τα φίλτρα μικρο δακτυλίου επέφεραν δραστική μείωση και στο μέγεθος των πλινθίων. Αξιόλογα αποτελέσματα τόσο σε θέματα απαγωγής της θερμότητας όσο και σε καταναλισκόμενη ενέργεια αποτέλεσαν τον αρωγό για την ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας σε πληθώρα εφαρμογών καλύπτοντας ευρύ φάσμα πεδίων, από τηλεπικοινωνίες μέχρι βιο-ιατρική και βιο-πληροφορική.

### 5.1.3 Κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων δεδομένων με χρήση οπτικών πυλών Mach-Zehnder τόσο για σύγχρονες όσο και για ασύγχρονες ροές δεδομένων σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s.

Στο Κεφάλαιο 2 αναπτύσσεται και υλοποιείται πειραματικά σε οπτικό επίπεδο ένα κύκλωμα συγχρονισμού των κόμβων του δικτύου που επιτελεί ταυτόχρονα ανάκτηση ρολογιού και ανίχνευση πακέτων δεδομένων στα 10Gb/s. Το κύκλωμα αυτό αναγνωρίζει την έναρξη ενός εισερχόμενου πακέτου και την ίδια χρονική στιγμή παράγει έναν οπτικό παλμό στην έξοδο του. Η πειραματική του υλοποίηση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας σε σειρά ένα κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού με φίλτρο Fabry-Perot και κορεσμένο οπτικό διακόπτη τύπου MZI και ένα κύκλωμα εξαγωγής προπορευόμενου παλμού εικμεταλλευόμενο το φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης κέρδους (Cross Gain Modulation - XGM) σε ένα οπτικό ενισχυτή ημιαγωγού για την παραγωγή ενός οπτικού παλμού για κάθε εισερχόμενο πακέτο δεδομένων. Στο πρώτο στάδιο του κυκλώματος ανίχνευσης πακέτου, πραγματοποιείται η ανάκτηση του πακέτου ρολογιού που αντιστοιχεί στο κάθε εισερχόμενο πακέτο δεδομένων. κατόπιν το ανακτημένο πακέτο ρολογιού εισέρχεται στο κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων δεδομένων με το οποίο επιλέγεται μόνο ο πρώτος παλμός από κάθε πακέτο ρολογιού. Για την υλοποίηση του συστήματος ανίχνευσης πακέτων χρησιμοποιήθηκαν δυο οπτικοί διακόπτες MZI συνδεδεμένοι σε σειρά, με την πρώτη πύλη να επιτελεί την λειτουργία της ανάκτησης των πακέτων ρολογιού και την δεύτερη πύλη να επιτελεί την λογική πράξη ΚΑΙ μεταξύ του ισχυρού σήματος ρολογιού από την πρώτη πύλη και του ασθενούς σήματος δεδομένων. Προκειμένου να επιτευχθεί η εξαγωγή του πρώτου παλμού εισάγεται καθυστέρηση στο ισχυρό πακέτο ρολογιού, έτσι ώστε αυτό να υπολείπεται χρονικά του ασθενούς πακέτου δεδομένων κατά ένα bit. Το ασθενές σήμα δρα ως σήμα εισόδου έτσι ώστε να λειτουργεί το SOA στην περιοχή χαμηλού σήματος (small-signal gain regime). Στην περιοχή αυτή ο ενισχυτής λειτουργεί γραμμικά, παρέχοντας μεγάλες τιμές κέρδους (τυπικά ~ 25-30 dB). Αντίθετα το ισχυρό σήμα ρολογιού λειτουργεί ως σήμα ελέγχου έτσι ώστε να προκαλεί τον έντονο κορεσμό στο κέρδος του ενισχυτή. Όμοια λειτουργία επιτελέστηκε και για την ασύγχρονη ροή δεδομένων με το σήμα εξαγωγής προπορευόμενου παλμού να παρέχει και το ρυθμό αφίξεως των εισερχόμενων πακέτων. Συνεπώς, το κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων αποτελεί μία ολοκληρωμένη λύση για τον απαραίτητο συγχρονισμό των δικτυακών κόμβων, στη ρυθμοδότηση τόσο των εισερχόμενων πακέτων όσο και των δεδομένων που εμπεριέχονται σε αυτά. Συγκεκριμένα, στην έξοδο του υπό-κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού παρέχεται ο συγχρονισμός του δικτύου στο επίπεδο των δεδομένων (συγχρονισμός δεδομένων-κόμβου), ενώ στην έξοδο του υπό-κυκλώματος εξαγωγής προπορευόμενου παλμού παρέχεται ο συγχρονισμός του δικτύου στο επίπεδο πακέτων (συγχρονισμός πακέτων-κόμβου). Το τελευταίο, μπορεί να χαρακτηριστεί και ως σήμα σκανδαλισμού το οποίο θα ενεργοποιήσει περαιτέρω λειτουργίες επεξεργασίας και δρομολόγησης του αντίστοιχου πακέτου δεδομένων μέσα στον κόμβο.

#### 5.1.4 Κύκλωμα αμιγώς οπτικής 2R αναγέννησης NRZ σημάτων με χρήση Mach-Zehnder σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s

Η μελέτη μας στις αμιγώς οπτικές 2R αναγεννητικές διατάξεις εστιάστηκαν σε NRZ δεδομένα, τα οποία αποτελούν και την πιο διαδεδομένη μορφή δεδομένων για τη μετάδοση οπτικής πληροφορίας αυτή την στιγμή. Οι διατάξεις που μελετήθηκαν βασίστηκαν στο συμβολόμετρο SOA-MZI. Η μελέτη που πραγματοποιήσαμε εστιάστηκε καταρχήν στην υλοποίηση των δύο πιο γνωστών σχημάτων 2R αναγέννησης με χρήση διακοπών SOA-MZI και εν συνεχεία σε ένα καινούργιο σχήμα, το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Και τα τρία σχήματα υλοποιήθηκαν σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s για μετάδοση NRZ ακολουθιών δεδομένων. Στόχος μας μέσω της σταδιακής υλοποίησης της πειραματικής αυτής διάταξης, ήταν να εκτιμήσουμε και να συγκρίνουμε την απόδοση των διαφόρων αναγεννητικών διατάξεων, καθορίζοντας ταυτόχρονα και τα οφέλη αυτά που προκύπτουν από την χρήση αμιγώς οπτικής διατάξεων αναγέννησης και μετατροπής μήκους κύματος στη συνολική επίδοση του δικτύου. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική διαφοροποιόταν από τις υπάρχουσες έως και σήμερα στην χρησιμοποίηση ενός επιπλέον σήματος σταθερής ισχύος το οποίο διαχωρίζονταν σε δυο μέρη και εισέρχονταν σαν σήμα ελέγχου στην οπτική πύλη MZI με αντίρροπη φορά από αυτήν του εισερχόμενου σήματος. Από την μελέτη αυτή προέκυψε ότι η χρήση του σχήματος αντίρροπων σημάτων ελέγχου σε συνδυασμό με το επιπλέον CW σήμα στο διαφορικά πολωμένο σχήμα, αντισταθμίζουν τα ανεπιθύμητα φαινόμενα της αργής ανάκαμψης επιτυγχάνοντας ένα σημαντικά καλύτερο σε μορφή παλμού εξόδου συγκριτικά με τις άλλες δύο υλοποιήσεις. Διατηρώντας την πολυπλοκότητα επομένως του συνολικού συστήματος σταθερή, επιτύχαμε με αυτόν τον τρόπο να επιδείξουμε στην έξοδο του υπό μελέτη συστήματος, αισθητή βελτίωση στην ποιότητα του σήματος, της τάξης των 1.7 dB.

#### 5.1.5 Κύκλωμα μετατροπής μήκους κύματος με χρήση φίλτρων μικρό-δακτυλίου για μετάδοση RZ/NRZ δεδομένων σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s.

Στο κεφάλαιο 4 της παρούσας διατριβής, η μελέτη μας επικεντρώθηκε στην αξιολόγηση μιας σειράς πειραματικών υλοποιήσεων από συστήματα τα οποία υλοποιήθηκαν με την χρήση της τεχνολογίας πυριτίου. Βασικός άξονας στην μελέτη μας, αποτέλεσε η δημιουργία ολοκληρωμένων διατάξεων οι οποίες αξιοποιώντας πλήρως τα πλεονεκτήματα της χρήσης πυριτίου θα ωθούσαν την ερευνητική / επιστημονική κοινότητα στην περαιτέρω ανάπτυξη ακόμα πιο εξελιγμένων συστημάτων δρομολόγησης. Μέσα από τα πειράματα αυτά μελετήσαμε την συμπεριφορά ενός αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος, ο οποίος χαρακτηρίζεται από: α) διαφάνεια στο είδος της εισερχόμενης πληροφορίας, (NRZ/ RZ σε συνδυασμό με ακολουθίες δεδομένων/ πακέτα δεδομένων), β) υψηλές ταχύτητες μετάδοσης 40 Gb/s, γ) ικανότητα WDM μετάδοσης, δ) χαμηλές απαιτήσεις σε επίπεδο ενέργειας για



την ορθή λειτουργία του συστήματος. Η επιτυχία των πειραματικών αυτών αποτελεσμάτων αποτελεί τον θεμέλιο λίθο για την μετέπειτα εξέλιξη της ερευνητικής μας δραστηριότητας, η οποία και αναλύεται στην ενότητα 5.2 προκειμένου να δημιουργήσουμε μεγαλύτερης κλίμακας ολοκληρωσης αμιγώς οπτικές ολοκληρωμένες διατάξεις με χρήση πυριτίου και σε ρυθμό μετάδοσης που θα υπερβαίνει τα 160 Gb/s. Προκειμένου να διασφαλιστεί η ορθότητα των αποτελεσμάτων μας, διατρέξαμε μια σειρά από εξομοιώσεις παράλληλα με τις πειραματικές διατάξεις, μέσω των οποίων προσδιορίστηκαν οι κατάλληλες σχεδιαστικές παράμετροι τόσο για τα υπο μελέτη συστήματα σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s όσο και για την μετάβαση μας σε ακόμα πιο εξελιγμένα συστήματα δρομολόγησης και μετάδοσης δεδομένων πάνω σε ένα πλινθίο συνολικής χωρητικότητας άνω των 640 Gb/s.

### 5.2 Περαιτέρω έρευνα

Η αποδοτικότητα της διαχείρισης της ισχύος στα δίκτυα τηλεπικοινωνιών αποτελεί ένα βασικό θέμα για την υλοποίηση επόμενης γενιάς τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Η λίστα εξοικονόμησης ενέργειας περιλαμβάνει συστήματα που αφορούν το δίκτυο κορμού, μιας και οι υπάρχοντες ηλεκτρονικοί δρομολογητές καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας ενώ εκλύουν και μεγάλα ποσά θερμότητας.

Η μεταστροφή επομένως στην φωτονική τεχνολογία, ώθησε την R&D κοινότητα στην υλοποίηση ολοκληρωμένων φωτονικών διατάξεων, τα οποία θα δύναται να λειτουργούν αποδοτικά και θα μπορούν να ενσωματωθούν σε ένα οπτικό δρομολογητή καταλαμβάνοντας μικρό χώρο. Η μελέτη αυτή εστιάζει κυρίως στην κατασκευή μικρής τάξης μεγέθους δρομολογητές οι οποίοι θα έχουν συνολικό ρυθμό μετάδοσης Tb/s, μέσω της αξιοποίησης μεγέθους mm φωτονικών πλινθίων, διατηρώντας ταυτόχρονα το κόστος κατασκευής σε χαμηλά επίπεδα.

Δεδομένης αυτής της κατάστασης τόσο η μονολιθική όσο και η υβριδική τεχνολογία έστρεψαν την προσοχή τους στην μετάβαση από απλά ολοκληρωμένα συστήματα σε συστοιχίες ολοκληρωμένων οπτικών διατάξεων κατασκευασμένες σε μια κοινή πλατφόρμα. Οι πιο αναγνωρισμένες επιτυχίες των τεχνολογιών αυτών περιλαμβάνουν :

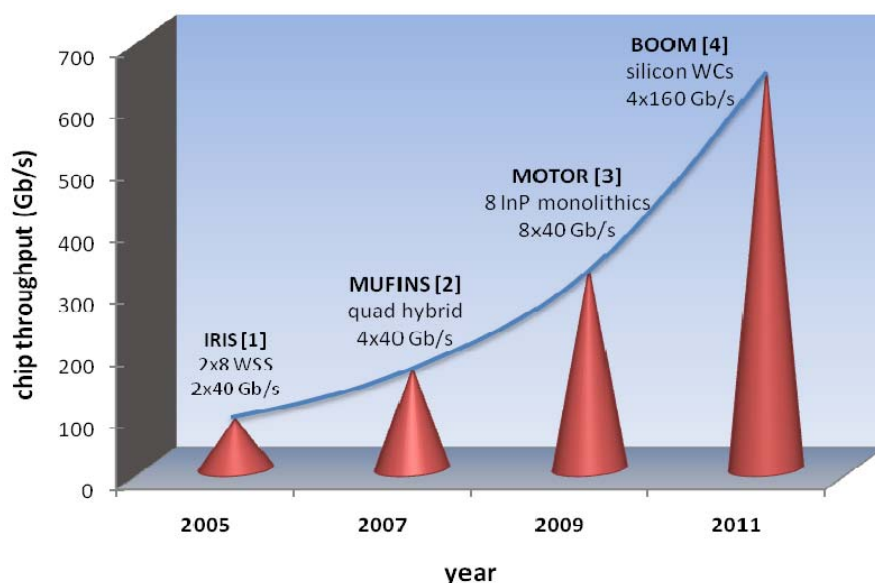
- Τον 2x8 οπτικό διακόπτη ο οποίος κατασκευάστηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος IRIS χρηματοδοτούμενο από την DARPA
- Τον τετραπλό συμβολόμετρο τύπου Mach-Zehnder, το οποίο περιλαμβάνει τέσσερις οπτικές πύλες MZI ολοκληρωμένες σε ένα πλινθίο, και κατασκευάστηκε στα πλαίσια του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος MUFINS
- Τον αμιγώς οπτικό μετατροπέα μήκους κύματος ολοκληρωμένο με χρήση InP, ο οποίος αποτελείται από 8 παράλληλα κανάλια μετάδοσης, το οποίο

κατασκευάστηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος LASOR, χρηματοδοτούμενο από την DARPA επίσης.

Το σχήμα 97 παρουσιάζει το πώς τα επιτεύγματα αυτά αποτελούν την νέα τάση στην δημιουργία νέων φωτονικών ολοκληρωμένων διατάξεων. Σύμφωνα με το διάγραμμα που ακολουθεί, από το 2004 και έπειτα, παρατηρείται ένας διπλασιασμός της χωρητικότητας των οπτικών συστημάτων δρομολόγησης κάθε δύο χρόνια με το τωρινό state-of-the-art chip<sup>i</sup> να παρέχει 320 Gb/s σε ένα chip area ίσο με 4.25 x 14.5 mm<sup>2</sup>.

Προκειμένου να διατηρήσουμε την τάση αυτή, επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα μείωση του μεγέθους των ολοκληρωμένων, του κόστους κατασκευής τους, καθώς και αύξηση της φιλικότητας τους προς το περιβάλλον, χρειάζεται να επενδύσουμε σε πλατφόρμες ολοκλήρωσης οι οποίες θα δύναται να υποστηρίζουν χαρακτηριστικά όπως επεκτασιμότητα, αυξημένη αποδοτικότητα και μειωμένο κόστος κατασκευής. Τα βασικά προβλήματα που χρειάζεται να αντιμετωπιστούν πλέον είναι η περαιτέρω μείωση της εκλυόμενης θερμότητας, και η κατασκευή ολοκληρωμένων συστημάτων με συμβατότητα σε CMOS τεχνολογίες.

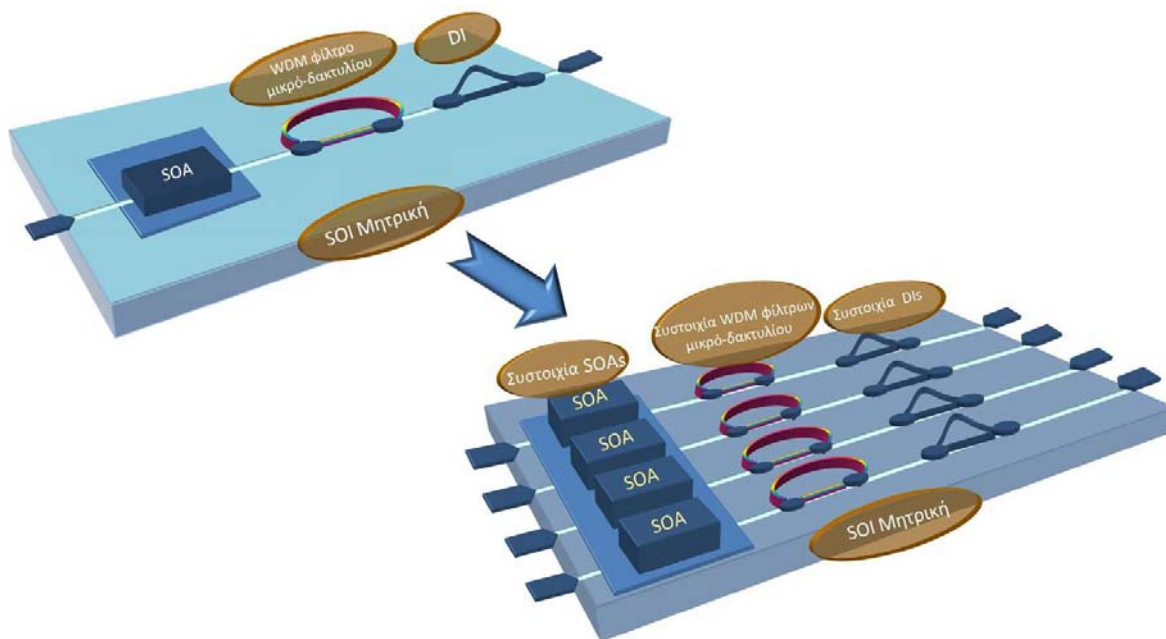
Δοθέντων των άνωθεν απαιτήσεων, το ευρωπαϊκό πρόγραμμα BOOM [5.5,5.6] καλείται να δώσει λύσεις στα προβλήματα αυτά, αξιοποιώντας την SOI (Silicon on Insulator) τεχνολογία [5.7], παρέχοντας υψηλής ολοκλήρωσης δομικά στοιχεία ενός φωτονικού δρομολογητή. Η χρήση του InP υλικού σε συνδυασμό με καινοτόμες τεχνικές εναπόθεσης των ενεργών στοιχείων πάνω στο πυρίτιο, αλλά και η συμβατότητα των διατάξεων αυτών με την CMOS τεχνολογία θα αποτελέσουν το κλειδί για την μετάβαση μας σε νέες γενιές ολοκληρωμένα συστήματα.



Σχήμα 97: Εξέλιξη των ολοκληρωμένων συστημάτων οπτικής επεξεργασίας σήματος

Τα φίλτρα μικρό-δακτυλίου τα οποία μελετήσαμε εκτενώς στο κεφάλαιο 4 της παρούσας διατριβής, αποτελούν τον προ-πομπό της μετεξέλιξης των συστημάτων αυτών σε συστήματα

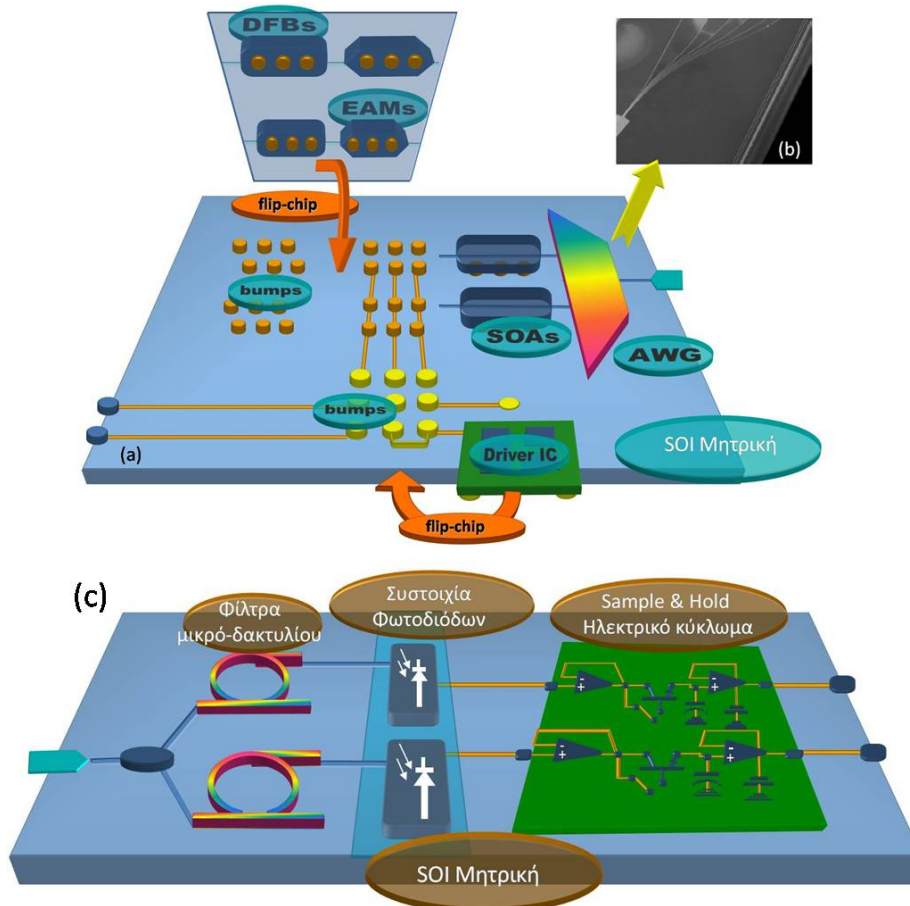
μεγαλύτερης ρυθμαπόδοσης και μικρότερου μεγέθους. Το επόμενο βήμα μέσω του προγράμματος BOOM για το εργαστήριο Φωτονικών επικοινωνιών είναι η ολοκλήρωση οπτικών κυκλωμάτων σε SOI υποστρώματα με την ανάπτυξη CMOS-compatible τεχνικών και την υβριδική ολοκλήρωση ενεργών στοιχείων (SOAs, lasers, detectors) πάνω σε silicon [5.5]. Ένας από τους βασικούς στόχους είναι η ανάπτυξη μίας νέας γενιάς από συστοιχίες μετατροπών μήκους κύματος, οι οποίοι καταναλώνοντας λιγότερο από το ένα τέταρτο της ισχύος την οποία καταναλώνουν οι συστοιχίες SOA-MZIs, θα είναι σε θέση να μεταγούν τετραπλάσια χωρητικότητα (640 Gb/s). Ο απώτερος στόχος του προγράμματος είναι η τελική ανάπτυξη ενός 640 Gb/s δρομολογητή ο οποίος θα καταναλώνει μόλις μερικές δεκάδες Watt και θα καταλαμβάνει χώρο ίσο με ένα 4U rack mount case (βλέπε σχήμα 100). Ο φωτονικός δρομολογητής θα αποτελείται από μετατροπείς μήκους κύματος, μια UDWDM μονάδα φωτοανίχνευσης και μια συστοιχία ενός ολοκληρωμένου laser για διαμόρφωση δεδομένων μέσω ήλεκτρο-απορρόφησης. Μια θεωρητική απεικόνιση των επόμενων σταδίων ολοκλήρωσης των προαναφερθέντων διατάξεων διαφαίνεται στα ακόλουθα σχήματα, όπου και περιγράφονται.



Σχήμα 98: Θεωρητική απεικόνιση των ολοκληρωμένων μετατροπών μήκους κύματος, για WDM μετάδοση σε ρυθμό 160 Gb/s. (πάνω) Η απλή οπτική πύλη για μονοκυματική λειτουργία αποτελούμενη από ένα SOA σε σειρά με ένα WDM φίλτρο μικρο-δακτυλίου και ένα DI. (κάτω) Μεταγενέστερο βήμα αύξησης του επιπέδου ολοκλήρωσης με την δημιουργία του τετραπλού μετατροπέα μήκους κύματος, αποτελούμενο από συστοιχίες SOAs συνδεδεμένους αντίστοιχα με συστοιχίες WDM φίλτρων μικρο-δακτυλίου και DIs, με απότερο στόχο την αύξηση και του ρυθμού μετάδοσης συνολικά του ολοκληρωμένου πλινθίου στα 640 Gb/s.

Το σχήμα 98 παρουσιάζει την θεωρητική απεικόνιση των ολοκληρωμένων μετατροπών μήκους κύματος, οι οποίοι επίκειται να κατασκευαστούν στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος BOOM. Συγκεκριμένα πρωταρχικός στόχος είναι η κατασκευή ενός μονού

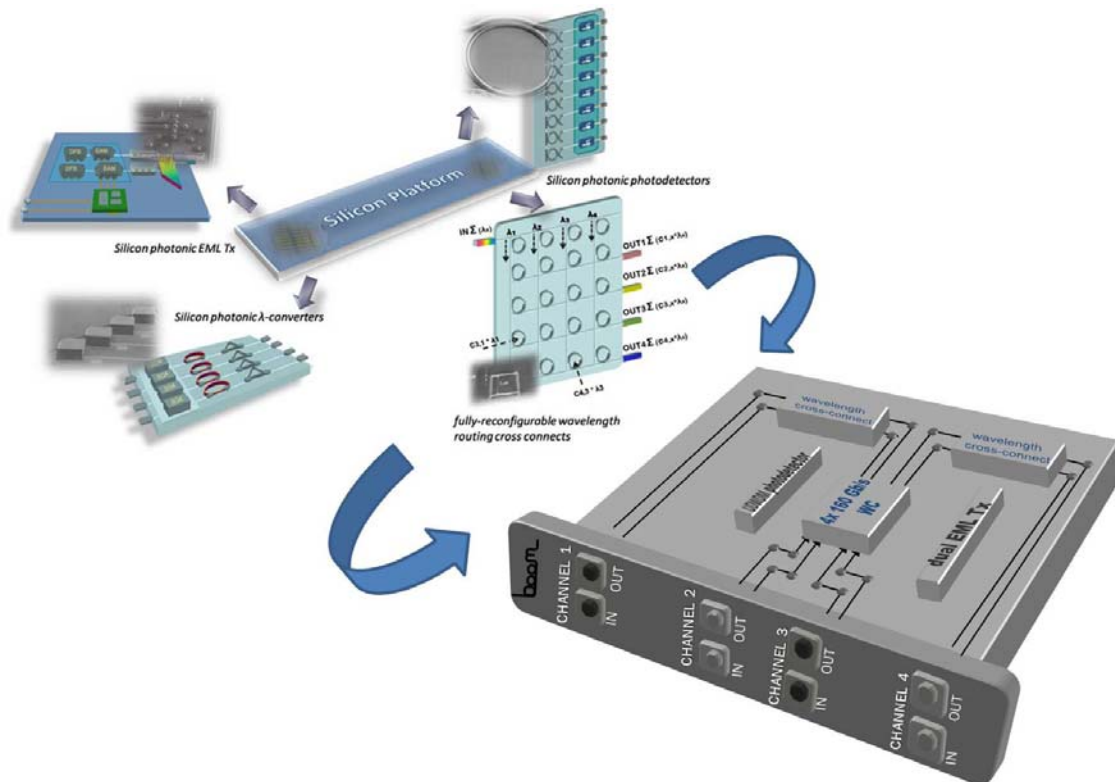
μετατροπέα μήκους κύματος με ρυθμό μετάδοσης 160 Gb/s. Τόσο ο ημιαγωγικός οπτικός ενισχυτής όσο και η ακολουθία του φίλτρου μικρό-δακτυλίου με το DI θα είναι ολοκληρωμένα σε μια κοινή πλατφόρμα πυριτίου, αξιοποιώντας την αρχιτεκτονική μετατροπής μήκους κύματος με χρήση των φίλτρων μικρό-δακτυλίου, η οποία παρουσιάστηκε εκτενώς στο κεφάλαιο 4 της διατριβής. Μετέπειτα στάδιο θα αποτελέσει η επεκτασιμότητα του ολοκληρωμένου μετατροπέα μήκους κύματος σε έναν τετραπλό με συνολικό ρυθμό μετάδοσης 640 Gb/s (σχήμα 98 κάτω).



Σχήμα 99: α) θεωρητική απεικόνιση μιας ολοκληρωμένης διάταξης με χρήση τεχνολογίας πυριτίου ενός ηλεκτρο-διαμορφωτής εκπομπής φωτός για την παραγωγή πακέτων σταθερής ισχύος οπτικού σήματος (CW envelopes), β) φωτογραφία λιθογραφικής απεικόνισης ενός AWG πάνω σε πυρίτιο, γ) θεωρητική απεικόνιση μιας ολοκληρωμένης διάταξης ενός δέκτη για την μετατροπή του οπτικού σήματος εισόδου σε ηλεκτρικό προκειμένου να οδηγήσει τους διαμορφωτές ηλεκτρο-απορρόφησης που εμπεριέχονται στο πλινθίο του σήματος α.

Σε ότι αφορά το EML και την UDWDM μονάδα φωτοανίχνευσης αυτές απεικονίζονται στο σχήμα 99. Ο συνδυασμός αυτών των δύο ολοκληρωμένων θα αποτελεί τον αντίστοιχο ελεγκτή δρομολόγησης τον οποίο παρουσιάσαμε στο κεφάλαιο 4. Ειδικότερα το σχήμα 99 α) παρουσιάζεται μια πιθανή διάταξη ενός laser εκπομπής φωτός με χρήση EAM για την παραγωγή πακέτων σταθερής ισχύος τα οποία θα αποτελούν το σήμα εισόδου στους μετατροπείς μήκους κύματος για την ορθή δρομολόγηση των εισερχόμενων πακέτων. Οι

ΕΑΜ προκειμένου να διαμορφώσουν τα πακέτα CW, οδηγούνται από την UDWDM μονάδα φωτοανίχνευσης η οποία επεξεργάζεται την επικεφαλίδα του εισερχόμενου πακέτου πληροφορίας και μετατρέποντας την σε ηλεκτρική οδηγεί τον κατάλληλου μήκους κύματος EML προκειμένου να άγει το πακέτο CW προς την είσοδο του αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος. Τόσο το EML όσο και η UDWDM μονάδα φωτοανίχνευσης, εκμεταλλεύονται την δυνατότητα της μίξης οπτικών και ηλεκτρονικών διατάξεων σε μια κοινή πλατφόρμα πυριτίου.



Σχήμα 100: Τελικό βήμα ολοκλήρωσης των αναπτυχθέντων φωτονικών ολοκληρωμένων διατάξεων σε μια υψηλής χωρητικότητας πλατφόρμα δρομολόγησης των δεδομένων (4U rack mount module).

## Αναφορές

- [5.1] [www.infinera.com](http://www.infinera.com)
- [5.2] [www.luxtera.com](http://www.luxtera.com)
- [5.3] [www.kotura.com](http://www.kotura.com)
- [5.4] [www.ciphotonics.com](http://www.ciphotonics.com)
- [5.5] [www.ict-boom.eu](http://www.ict-boom.eu)
- [5.6] Leontios Stampoulidis “*The European ICT-BOOM project: Photonic Tb/s routers made of silicon*” Photonics in Switching, 2009. PS '09. International Conference on, 15-19 Sept. 2009 Page(s):1 - 4
- [5.7] Voigt, K., Zimmermann, L., Winzer, G., Mitze, T., Petermann, K., Kreissl, J., Tangdiongga, E., Vyrsoinos, K., Stampoulidis, L., “*SOI platform for high speed all optical wavelength conversion*”, Group IV Photonics, 2009. GFP '09. 6th IEEE International Conference on, 9-11 Sept. 2009 Page(s):101 - 103

## Παράρτημα : Δημοσιεύσεις σε έγκριτα επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια

1. **D. Petrantonakis**, D. Apostolopoulos, M. Spyropoulou, N. Pleros, K. Vyrsokinos and H. Avramopoulos, “40 Gb/s NRZ Wavelength Conversion with Enhanced 2R Regeneration Characteristics using a Differentially-biased SOA-MZI switch”, presented at the 22nd Annual Meeting of the IEEE Photonics Society, Belek-Antalya, Turkey, 2009.
2. N. Pleros, D. Apostolopoulos, **D. Petrantonakis**, C. Stamatiadis and H. Avramopoulos, “All-Optical Static RAM Cell with Read/Write functionality at 5 Gb/s”, paper We.2.C.5, European Conference on Optical Communications 2008 (ECOC), 21-25 September 2008, Brussels, Belgium.
3. Teimoori Hassan, Apostolopoulos Dimitrios, Vlachos Kyriakos, Ware Cedric, **Petrantonakis Dimitrios**, Yiannopoulos Kostas, Stampoulidis Leontios, Avramopoulos Hercules, Erasme Didier, “Physical architectures for packet-switching network nodes based on nonlinear logic gates”, Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, 2008. CNSDSP 2008. 6th International Symposium on, 25-25 July 2008 Page(s):676 – 679.
4. Leontios Stampoulidis, Efstratios Kehayas, Panagiotis Zakynthinos, Dimitrios Apostolopoulos, **Dimitrios Petrantonakis**, Paraskevas Bakopoulos, Olga Zouraraki and Hercules Avramopoulos, “New generation integrated photonic systems-on-chip enabling Tb/s-capacity Photonic Routers”, 13th European Conference on Networks and Optical Communications & 3rd Conference on Optical Cabling & Infrastructure June 30th – July 3rd, 2008, Invited paper.
5. Stampoulidis Leontios, Kehayas Efstratios, Bakopoulos Paraskevas, Zakynthinos Panagiotis, **Petrantonakis Dimitrios**, Apostolopoulos Dimitrios, Zouraraki Olga, Avramopoulos Hercules, “Enabling Tb/s photonic routing: Development of advanced hybrid integrated photonic devices to realize high-speed, all-optical networking”, Transparent Optical Networks, 2008. ICTON 2008. 10th Anniversary International Conference on Volume 4, 22-26 June 2008 Page(s):110 – 113.
6. P. Zakynthinos, **D.Petrantonakis**, D. Apostolopoulos, A. Poustie, G. Maxwell and H. Avramopoulos, “Four-Wavelength 3R Burst Mode Regenerator Using Three Integrated Quad MZI Arrays”, OFC 2008, Tech. Dig. OWK5, San Diego, USA, 2008.
7. P. Zakynthinos, D.Apostolopoulos, O. Zouraraki, **D. Petrantonakis**, G. Theophilopoulos, A. Poustie, G. Maxwell and H. Avramopoulos, “Single Chip Quad MZI array in a 40 Gb/s AOLS Front-end”, OFC 2007, Tech. Dig. OWH7, Anaheim, USA, 2007.
8. Ch. Kouloumentas, N. Pleros, P. Zakynthinos, **D. Petrantonakis**, D. Apostolopoulos, O. Zouraraki, A. Tzanakaki, H. Avramopoulos, I. Tomkos, “Packet clock recovery at 40 Gb/s and beyond, using a Fabry-Perot filter and an optical power



- limiter based on a bismuth oxide fibre*”, Lasers and Electro-Optics, 2007 and the International Quantum Electronics Conference CLEOE-IQEC 2007
9. D. Apostolopoulos, O. Zouraraki, **D. Petrantonakis**, P. Bakopoulos, D. Tsiokos, E. Kehayas and H. Avramopoulos, “*Bit- and Packet-Level Self-Synchronization for All-Optical Label-Switched Network Nodes with Transparency to Network-Traffic*”, OFC 2006, Tech. Dig. OThS2, Anaheim, USA, 2006.
  10. **D. Petrantonakis**, G. T. Kanellos, P. Zakyntinos, N. Pleros, D. Apostolopoulos, and H. Avramopoulos, “*A 40 Gb/s 3R Burst Mode Receiver with 4 integrated MZI switches*”, OFC 2006, **Post Deadline** Session PDP25, Anaheim, USA, 2006.
  11. O. Zouraraki, **D. Petrantonakis**, D. Apostolopoulos, E. Kehayas, N. Pleros and H. Avramopoulos, “*A 40 Gbps All-Optical Label/Payload Separation Circuit Using Hybrid Integrated MZI Switches*”, paper Th 1.4.1., European Conference on Optical Communications 2006, Cannes, France.
  12. D. Tsiokos, E. Kehayas, P. Bakopoulos, D. Apostolopoulos, **D. Petrantonakis**, N. Pleros and H. Avramopoulos, “*All-Optical Signal Processing Using Integrated Mach Zehnder Interferometric Switches for 40 Gb/s All-Optical Label-Swapped Networks*”, Broadnets 06.
  13. P. Bakopoulos, D. Tsiokos, D. Apostolopoulos, **D. Petrantonakis**, E. Kehayas and H. Avramopoulos, “*All-Optical SOA-based Packet Detection for Packet-Rate Synchronization*”, presented at ECOC 2005, Tech. Dig. We. 2.4.5, Glasgow, Scotland, 2005.
  14. Kanellos G.T., **Petrantonakis D.**, Tsiokos D., Bakopoulos P., Zakyntinos P., Pleros N., Apostolopoulos D., Maxwell, G., Poustie A., Avramopoulos H.,”*All-Optical 3R Burst-Mode Reception at 40 Gb/s Using Four Integrated MZI Switches*” Lightwave Technology, Journal of Volume 25, Issue 1, Jan. 2007 Page(s):184 – 192
  15. D. Apostolopoulos, **D. Petrantonakis**, O. Zouraraki, E. Kehayas, N. Pleros and H. Avramopoulos, “*All-Optical Label/Payload Separation at 40 Gb/s*” IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.18, No. 19, pp. 2023-2026 Oct. 2006
  16. G. T. Kanellos, N. Pleros, **D. Petrantonakis**, P. Zakyntinos, H. Avramopoulos, G. Maxwell, and A. Poustie “*40 Gb/s 2R Burst Mode Receiver with a single integrated SOA-MZI switch*”, Optics Express, Vol. 15, Issue 8, pp. 5043-5049, April 2007
  17. **D. Petrantonakis**, G. T Kanellos, P. Zakyntinos, D. Apostolopoulos, N. Pleros and H. Avramopoulos,”*40-Gb/s 3R Burst Mode Regenerator Using Four Integrated MZI Switches*”, IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 19, No. 5, pp. 288-290 March 2007
  18. Pleros N., Zakyntinos P., Poustie, A., Tsiokos, D., Bakopoulos, P.,**Petrantonakis, D.**, Kanellos G.T., Maxwell G., Avramopoulos H. “*Optical signal processing using integrated multi-element SOA-MZI switch arrays for packet switching*”, 2007 IET Optoelectronics 1 (3), pp. 120-126

19. 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 and H. Avramopoulos, “*High-order micro-ring resonator assisted wavelength converters for scalable and power efficient photonic routers*”, 35<sup>h</sup> European Conf. On Optical Communication (ECOC) 2009, Vienna, Austria.
20. 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. Tangdiongga, A. Poustie, G. Maxwell, I. Tomkos, A. Bogoni, H.J.S. Dorren and H. Avramopoulos, “*160 Gb/s All-Optical Contention Resolution with Prioritization using Integrated Photonic Components*”, 35<sup>h</sup> European Conf. On Optical Communication (ECOC) 2009, Vienna, Austria.
21. 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 Microring Resonator ROADM*”, (**post-deadline paper**) presented at Optical Fiber Communication (OFC) Conference 2009, PDPA8, San Diego, USA.
22. Leontios Stampoulidis, Efstratios Kehayas, Paraskevas Bakopoulos, Dimitrios Apostolopoulos, Panagiotis Zakyntinos, **Dimitrios Petrantonakis**, A. Poustie, G. Maxwell and Hercules Avramopoulos, “*Photonic Routing Systems Using All-optical, Hybrid Integrated Wavelength Converter Arrays*”, (invited), to appear in Journal of Networks, (special issue on Transparent Optical Networking).
23. O. Zouraraki, K. Yiannopoulos, P. Zakyntinos, **D. Petrantonakis**, E. Varvarigos, A. Poustie, G. Maxwell and H. Avramopoulos, “*Implementation of an All-Optical Time-Slot-Interchanger Architecture*”, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 19, issue 17, pp. 1307-1309, Sept., 2007.
24. O. Zouraraki, **D. Petrantonakis**, K. Yiannopoulos, R. Meleiro, L. M. Sadeghioon, A. Poustie, G. Maxwell, E. Varvarigos, K. Vlachos, P. Monteiro, D. Simeonidou and H. Avramopoulos, “*Optically-Addressable Packet Timeslot Interchanger Using a Quadruple Switch Array*”, presented in Optical Fiber Communication Conference - OFC, Session No. OTuB3, Anaheim -California, USA 2007.
25. **D. Petrantonakis**, D. Apostolopoulos, O. Zouraraki, D. Tsiokos, P. Bakopoulos, and H. Avramopoulos, “*Packet-Level Synchronization Scheme for Optical Packet Switched Network Nodes*”, OSA Optics Express, Vol. 14, No. 26, p. 12665-12669, December 2006.
26. Ch. Kouloumentas, A. Tzanakaki, I. Tomkos, N. Pleros, P. Zakyntinos, **D. Petrantonakis**, D. Apostolopoulos, O. Zouraraki and H. Avramopoulos, “*Packet clock recovery using a bismuth oxide fiber-based optical power limiter*”, OSA Optics Express, Vol. 15, No. 16, p. 9948, July 2007

27. **D. Petrantonakis**, C. Stamatiadis, L. Stampoulidis, P. Zakyntinos, P. Bakopoulos, E. Kehayas, Ch. Kouloumenta, R. Dekker, E. J. Klein and H. Avramopoulos, “*A novel All-Optical Wavelength Conversion scheme using a SOA and a 2<sup>nd</sup> Order Micro-ring Resonator ROADM*”, ICO-Photonics-delphoi 2009.org
28. **Petrantonakis D.**, Zakyntinos P., Apostolopoulos D, Poustie A., Maxwell G. and Avramopoulos H., “*All-optical four-wavelength burst mode regeneration using integrated quad SOA-MZI arrays*” IEEE Photonics Technology Letters 20 (23), pp. 1953-1955, 2008
29. Teimoori H, Apostolopoulos D., Vlachos K.G., Ware C., **Petrantonakis D.**, Stampoulidis L., Avramopoulos H., Erasme D., “*Optical-logic-gate aided packet-switching in transparent optical networks*”, Journal of Lightwave Technology 26 (16), pp. 2848-2856, 2008
30. Stampoulidis L., Apostolopoulos D., **Petrantonakis D.**, Zakyntinos P., Bakopoulos P., Zouraraki O., Kehayas E., Avramopoulos H., “*Enabling Tb/s photonic routing: Development of advanced hybrid integrated photonic devices to realize high-speed, all-optical packet switching*”, IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics 14 (3), art. no. 4538064, pp. 849-860, 2008
31. Kehayas E., Tsiokos D., Bakopoulos P., Apostolopoulos D., **Petrantonakis D.**, Stampoulidis L., Poustie A., Avramopoulos H., “*40-Gb/s all-optical processing systems using hybrid photonic integration technology*” Journal of Lightwave Technology 24 (12), pp. 4903-4911, 2006
32. Nikos Pleros, Dimitrios Apostolopoulos, **Dimitrios Petrantonakis**, Christos Stamatiadis and Hercules Avramopoulos, “*Optical Static RAM Cell*”, Photonics Technology Letters, IEEE Volume 21, Issue 2, Jan.15, 2009 Page(s):73 – 75
33. Stampoulidis L., **Petrantonakis D.**, Stamatiadis C., Kehayas E., Bakopoulos P., Kouloumentas C., Zakyntinos P., Vyrsoinos K., Dekker R., Klein E.J., “*Micro-Ring Resonator Assisted, All-Optical Wavelength Conversion Using a Single SOA and a 2<sup>nd</sup> Order Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub>ROADM.*”, Lightwave Technology, Journal of : Accepted for future publication, volume PP, Issue 99, 2009
34. D. Apostolopoulos, H. Simos, **D. Petrantonakis**, A. Bogris, M. Spyropoulou, M. Bougioukos, K. Vyrsoinos, N. Pleros, D. Syvridis and H. Avramopoulos, “*A New Scheme for Regenerative 40 Gb/s NRZ Wavelength Conversion using a Hybrid Integrated SOA-MZI*”, will be published in OFC/NFOEC 2010

## Συγκεντρωτικός Πίνακας Σχημάτων

<b>Σχήμα 1:</b> Χρήστες Διαδικτύου ανά 100 κατοίκους για α) αναπτυγμένες χώρες, β) αναπτυσσόμενες χώρες και γ) παγκόσμια.....	17
<b>Σχήμα 2:</b> Διαγράμματα δεικτοδότησης της ευρείας ανάπτυξης των ψηφιακών ευρυζωνικών γραμμών α) Αύξηση ζήτησης ADSL στην Ελλάδα, β) Κατανομή ευρυζωνικών γραμμών ανά τεχνολογία, γ) Καταμερισμός ζήτησης τεχνολογιών με γνώμονα την ταχύτητα μετάδοσης, δ) εγκατάσταση ADSL γραμμών από διάφορους παρόχους στον ελλαδικό χώρο.....	18
<b>Σχήμα 3:</b> Μελέτη πρόβλεψης της αύξησης της κίνησης του διαδικτύου για α) Αισιόδοξο σενάριο με 50% των ευρυζωνικών συνδέσεων μέχρι το 2020 θα είναι τύπου FTTH β) μεσαίο σενάριο με ποσοστό 25% γ) απαισιόδοξο σενάριο με αντίστοιχο ποσοστό 10%.....	19
<b>Σχήμα 4:</b> Αρχιτεκτονική ενός WDM Δικτύου δεύτερης γενιάς.....	21
<b>Σχήμα 5:</b> Τοπολογία οπτικών δικτύων μεταγωγής ετικέτας. Η ετικέτα προσκολλάται στο πακέτο στον κόμβο εισόδου, αλλάζει από κόμβο σε κόμβο ανάλογα με τον πίνακα δρομολόγησης και αφαιρείται στον κόμβο εξόδου.....	25
<b>Σχήμα 6:</b> Σχηματική αναπαράσταση τοπολογιών δικτύων με χρήση ίνας.....	27
<b>Σχήμα 7 :</b> Διαγράμματα αυξητικής πορείας της τεχνολογίας FTTx παγκοσμίως αλλά και στην Η.Π.Α ειδικότερα.....	29
<b>Σχήμα 8:</b> Ενδεικτικό διάγραμμα υπόδειξης της αυξητικής τάσης ολοκλήρωσης σε ένα σύστημα σε σχέση με την εκρηκτική ροή της αύξησης των δεδομένων μετάδοσης.....	30
<b>Σχήμα 9:</b> Ο νόμος του Moore προβλέπει τον διπλασιασμό του αριθμού της πυκνότητας των τρανζίστορ κάθε 18 μήνες. Η έμπρακτη απόδειξη του κανόνα αυτού οδήγησε και στην μείωση του κόστους μονάδας των τρανζίστορ.....	31
<b>Σχήμα 10:</b> Εφαρμογές ηλεκτρονικών ολοκληρωμένων συστημάτων με χαμηλό κόστος κατασκευής.....	32
<b>Σχήμα 11:</b> Ολοκληρωμένο προϊόν με χρήση μονολιθικής ολοκλήρωσης. Αριστερά παρουσιάζεται η δομή ενός ολοκληρωμένου Ηλεκτρο-διαμορφωμένου πομπού εκπομπής φωτός (EML), δεξιά παρουσιάζεται το EML αφότου έχει υποστεί και το τελευταίο στάδιο της συναρμολόγησης (packaging), προτού γίνει εμπορικά διαθέσιμο.....	34
<b>Σχήμα 12:</b> Φωτογραφίες υβριδικής ολοκλήρωσης: (από αριστερά προς τα δεξιά): υψηλής ακρίβειας διασχισμένοι ημιαγωγάμοι οπτικοί ενισχυτές, ολοκληρωμένη δευτερεύουσα πλατφόρμα (daughterboard), εικόνα SEM daughterboard, τερματισμοί από πολυμερή για παθητική ευθυγράμμιση, μητρική, διασχίσεις μητρικής για εναπόθεση της daughterboard, μετατροπείς για την ένωση των προεκτάσεων ίνας με τους κυματοδηγούς.....	36
<b>Σχήμα 13:</b> Υβριδική Πλατφόρμα Ολοκλήρωσης.....	37
<b>Σχήμα 14:</b> Μετάβαση από ένα μεμονωμένο στοιχείο σε ένα φωτονικό πλινθίο πολλαπλών στοιχείων. (Αριστερά) Μονός οπτικός διακόπτης SOA–MZI: (a) ζεύγος SOAs με δυνατότητα ανάστροφης εναπόθεσης στην δευτερεύουσα πλακέτα πυριτίου (b) Τοποθέτηση στην δευτερεύουσα πλακέτα πυριτίου (daughterboard) (c) Λεπτομερής αναπαράσταση της διάσχισης της μητρικής για την τοποθέτηση της daughterboard (d) Μητρική πλακέτα χωρητικότητας ζεύγους SOAs και (e) Συσκευασία εναπόθεσης ολοκληρωμένου κυλώματος του οπτικού διακόπτη (Δεξιά) Τετραπλός οπτικός διακόπτης (a) Τετράδα SOAs με δυνατότητα ανάστροφης εναπόθεσης στην δευτερεύουσα πλακέτα πυριτίου; (b) αναβαθμισμένης μορφής δευτερεύουσα πλακέτα	

## Συγκεντρωτικός Πίνακας Εύρεσης Σχημάτων

εναπόθεσης των τεσσάρων SOAs (c) λεπτομερής αναπαράσταση δυο διασχίσεων για την τοποθέτηση δυο δευτερευόντων πλακετών που περιλαμβάνουν τετράδα από SOAs d) αναβαθμισμένη μητρική πλακέτα χωρητικότητας 8 SOAs (2 ζεύγη των τεσσάρων) και (e) συσκευασία εναπόθεσης του τετραπλού SOA-MZI οπτικού διακόπτη.....38

**Σχήμα 15:** α) 3R αναγεννητής, β) 2R αναγεννητής & μετατροπέας μήκων κύματος, γ) οπτικός μανδαλωτής.39

**Σχήμα 16:** Γενικό πλαίσιο ολοκλήρωσης με χρήση πυριτίου: Μέσω της χρήσης πυριτίου επιτυγχάνεται η ολοκλήρωση μεγάλου εύρους οπτικών και ηλεκτρονικών κυκλωμάτων στην ίδια μητρική πλατφόρμα.....40

**Σχήμα 17:** Διαθέσιμα στοιχεία ολοκληρωμένα με χρήση πυριτίου: α) Αναδιατάξιμος οπτικός πολυπλέκτης (Reconfigurable Add-drop Multiplexer), β) Συστοιχία φίλτρων μικροδακτυλίου, γ) οκτακάναλος οπτικός εξασθενητής μεταβλητής εξασθένησης, δ) ολοκληρωμένος οπτικός πομποδέκτης, ε) οπτικά φίλτρα μικροδακτυλίου 2<sup>ns</sup> τάξης.....41

**Σχήμα 18:** Αρχιτεκτονική ανώτερου επιπέδου ενός αμιγώς οπτικού κόμβου μεταγωγής πακέτων.....57

**Σχήμα 19:** Λεπτομερής διάταξη του κυκλώματος ανίχνευσης πακέτων. ....58

**Σχήμα 20:** Δομή και αρχή λειτουργίας του οπτικού κυκλώματος ανίχνευσης πακέτων.....59

**Σχήμα 21:** Ισχύς στη θύρα S και U, συναρτήσει του  $\Delta\varphi$ .....60

**Σχήμα 22:** Διαμορφωμένα πακέτα πληροφορίας δεδομένων.....62

**Σχήμα 23:** Πειραματική διάταξη για το αμιγώς οπτικό κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων στα 10 Gb/s.....64

**Σχήμα 24:** Πειραματικά αποτελέσματα για το αμιγώς οπτικό κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων στα 10 Gb/s τόσο για σύγχρονη όσο και για ασύγχρονη ροή δεδομένων. 5α) Σήμα εισόδου, 5β) ανακτημένα πακέτα ρολογιού, 5γ)εξερχόμενοι παλμοί συγχρονισμού σε επίπεδο πακέτου, 5δ) διαγράμματα ματιού παλμών συγχρονισμού πακέτων. Χρονική κλίμακα 10 ps/div για τα διαγράμματα ματιού, 2.5 ns/div για την παλμοσειρές στην ασύγχρονη λειτουργία και 500 ps/div για τις παλμοσειρές της σύγχρονης λειτουργίας. 67

**Σχήμα 25:** Απεικόνιση του Φίλτρου Fabry-Perot.....70

**Σχήμα 26:** Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου των διαδοχικών ανακλάσεων.....72

**Σχήμα 27:** Η συνάρτηση μεταφοράς ισχύος (ή συνάρτηση του Airy) για απλά 'πρότυπα' συμβολόμετρα (etalon) με διαφορετική λεπτότητα.....73

**Σχήμα 28:** Έξοδος του Fabry-Perot στο πεδίο του χρόνου για είσοδο ενός παλμού.....75

**Σχήμα 29:** Έξοδος του Fabry-Perot στο πεδίο του χρόνου για είσοδο τριών διαδοχικών παλμών.....75

**Σχήμα 30:** Συνάρτηση μεταφοράς ενός κυκλώματος ψαλιδισμού και η έξοδος του κυκλώματος.....76

**Σχήμα 31:** Το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού.....77

**Σχήμα 32:** Μορφές αναγέννησης του υποβαθμισμένου οπτικού σήματος.....85

**Σχήμα 33:** Διάγραμμα λειτουργίας αρχιτεκτονικών μετατροπής μήκους κύματος.....89

**Σχήμα 34:** Αρχή λειτουργίας των σχημάτων: (a) κλασσικό σχήμα (standard scheme), (b) σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου (bidirectional scheme) και (c) διαφορικά πολωμένο σχήμα αντίρροπων σημάτων ελέγχου. Η αριστερή και η μεσαία στήλη δείχνουν το πλάτος και την φάση αντίστοιχα των CW συνιστωσών στην έξοδο των δύο SOAs. Η δεξιά στήλη δείχνει το αντίστοιχο πλάτος του σήματος εξόδου στην θύρα μεταγωγής του MZI. 91

## Συγκεντρωτικός Πίνακας Εύρεσης Σχημάτων

<b>Σχήμα 35:</b> Πειραματική διάταξη.....	94
<b>Σχήμα 36:</b> Πειραματικά αποτελέσματα του σήματος εισόδου καθώς και των τριών αρχιτεκτονικών μετατροπής μήκους κύματος. α) υποβαθμισμένης ποιότητας σήμα εισόδου, β) έξοδος απλής αρχιτεκτονικής, γ) έξοδος αρχιτεκτονικής με λήψη δύο σημάτων ελέγχου αντίρροπης κατεύθυνσης, δ) έξοδος αρχιτεκτονικής με λήψη δύο σημάτων αντίρροπης κατεύθυνσης διαφορετικά πολωμένα.....	97
<b>Σχήμα 37:</b> Καμπύλες μέτρησης ρυθμών σφαλμάτων (BER measurements) για τις τρεις αρχιτεκτονικές μετατροπής μήκους κύματος .....	98
<b>Σχήμα 38:</b> Βασική αρχιτεκτονική ενός φωτονικού δρομολογητή.....	104
<b>Σχήμα 39:</b> α) Διάγραμμα λειτουργίας του αμιγώς οπτικού μεταγωγέα μήκους κύματος, β) φάσμα drop εξόδου .....	107
<b>Σχήμα 40:</b> Φωτογραφία ενός ολοκληρωμένου ROADM με χρήση δεύτερης τάξης φίλτρων μικροδακτυλίου. Πρόσθετο ένθεμα: παρουσίαση μητρικής πλάτφορμας με ταυτόχρονη μεγένθυση του σημείου ζεύξης των φίλτρων μικρο-δακτυλίου μεταξύ τους .....	109
<b>Σχήμα 41:</b> Διάταξη για τον καθορισμό του χρόνου ανάκαμψης του SOA. ....	111
<b>Σχήμα 42:</b> Η βασική αρχή λειτουργίας του μετατροπέα μήκους κύματος. α) Κέρδος SOA (άνω εικόνα) και chirp απόκριση (κάτω εικόνα) σαν συνάρτηση του χρόνου, β) σχηματική αναπαράσταση του οπτικού φάσματος του εισερχόμενου σήματος CW και της απόκρισης του φίλτρου, γ) Η πορεία μετάδοσης του σήματος διαμέσω του ζωνοπερατού φίλτρου. Η πυκνά διακεκομμένη γραμμή και η αχνά διακεκομμένη γραμμή δείχνουν το κέρδος και το chirp του SOA αντίστοιχα. 112	112
<b>Σχήμα 43:</b> Διάταξη εξομοίωσης του SOA.....	114
<b>Σχήμα 44:</b> Διάταξη εξομοίωσης του ζωνοπερατού φίλτρου σε σειρά με ένα συμβολόμετρο καθορισμένης καθυστέρησης.....	115
<b>Σχήμα 45:</b> Ακολουθίες παλμών και διαγράμματα ματιού για χρονική καθυστέρηση του DI ίση με 2 ps. A) έξοδος ζωνοπερατού φίλτρου, B) μετατόπιση φάσης κατά 0 μοίρες, C) μετατόπιση φάσης κατά 5 μοίρες και D) μετατόπιση φάσης κατά 355 μοίρες .....	116
<b>Σχήμα 46:</b> Καμπύλες μέτρησης ρυθμού σφαλμάτων.....	117
<b>Σχήμα 47:</b> Σχηματική αναπαράσταση των διατεταγμένων σε σειρά DIs (πάνω) καθώς και η διάταξη εξομοίωσης των δυο DIs με χρήση του λογισμικού εξομοίωσης VPI (κάτω). ....	118
<b>Σχήμα 48:</b> Ακολουθία παλμών και αντίστοιχα διαγράμματα ματιού του σήματος που εξέρχεται του πρώτου DI με $\Delta\tau=1ps$ . και μετατόπιση φάσης A) 205 μοίρες, B) 210 μοίρες και C) 215 μοίρες αντίστοιχα. ....	119
<b>Σχήμα 49:</b> Ακολουθία παλμών και αντίστοιχα διαγράμματα ματιού για : A) 1 <sup>ο</sup> DI με $\Delta\tau=1ps$ και μετατόπιση φάσης 205 μοίρες, B) 2 <sup>ο</sup> DI με $\Delta\tau=2ps$ και μετατόπιση φάσης 0 μοίρες, C) 2 <sup>ο</sup> DI με $\Delta\tau=2ps$ και μετατόπιση φάσης 5 μοίρες, D) 2 <sup>ο</sup> DI με $\Delta\tau=2ps$ και μετατόπιση φάσης 355 μοίρες .....	120
<b>Σχήμα 50:</b> Ακολουθία παλμών και αντίστοιχα διαγράμματα ματιού για : A) 1 <sup>ο</sup> DI με $\Delta\tau=1ps$ και μετατόπιση φάσης 210 μοίρες, B) 2 <sup>ο</sup> DI με $\Delta\tau=2ps$ και μετατόπιση φάσης 0 μοίρες, C) 2 <sup>ο</sup> DI με $\Delta\tau=2ps$ και μετατόπιση φάσης 5 μοίρες, D) 2 <sup>ο</sup> DI με $\Delta\tau=2ps$ και μετατόπιση φάσης 355 μοίρες.....	121
<b>Σχήμα 51:</b> Ακολουθία παλμών και αντίστοιχα διαγράμματα ματιού για : A) Figure 4-4: 1 <sup>ο</sup> DI με $\Delta\tau=1ps$ και μετατόπιση φάσης 215 μοίρες, B) 2 <sup>ο</sup> DI με $\Delta\tau=2ps$ και μετατόπιση φάσης 0 μοίρες, C) 2 <sup>ο</sup> DI με $\Delta\tau=2ps$ και μετατόπιση φάσης 5 μοίρες, D) 2 <sup>ο</sup> DI με $\Delta\tau=2ps$ και μετατόπιση φάσης 355 μοίρες.....	122

## Συγκεντρωτικός Πίνακας Εύρεσης Σχημάτων

- Σχήμα 52:** Καμπύλες μετρήσης ρυθμού σφαλμάτων. Η μαύρη καμπύλη δείχνει την απόδοση του σχήματος SOA/OBF/DI ενώ η κόκκινη καμπύλη δείχνει την βέλτιστη λειτουργία του SOA/DI/DI σχήματος. 123
- Σχήμα 53:** Πειραματική διάταξη ενός αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος με χρήση ενός SOA σε συνδυασμό με ένα οπτικό ζωνοπερατό φίλτρο. ....124
- Σχήμα 54:** Πειραματικά αποτελέσματα του συστήματος SOA/OBF/DI για την περίπτωση όπου το ζωνοπερατό φίλτρο είναι μετατοπισμένο προς τις «μπλέ» συνιστώσες του φέροντος κατά 0.1 nm .....126
- Σχήμα 55:** Πειραματικά αποτελέσματα του συστήματος SOA/OBF/DI για την περίπτωση όπου το ζωνοπερατό φίλτρο είναι μετατοπισμένο προς τις «μπλέ» συνιστώσες του φέροντος κατά 0.3 nm. ....127
- Σχήμα 56:** Καμπύλες μετρήσης ρυθμού σφαλμάτων και για τις δύο διαφορετικές μετατοπίσεις του ζωνοπερατού φίλτρου σε σχέση με την συχνότητα του φέροντος, inverted= 0.1 nm και non-inverted=0.3 nm .....127
- Σχήμα 57:** Δεύτερης τάξης ROADM κατασκευασμένο από την ολλανδική εταιρία Lionix .....129
- Σχήμα 58:** Φασματική απόκριση των α) Drop έξοδος β) Through έξοδος του δεύτερης τάξης ROADM.130
- Σχήμα 59:** Διάταξη εξομοίωσης SOA.....131
- Σχήμα 60:** Διάταξη εξομοίωσης ενός περιοδικού φίλτρου σε σειρά με ένα DI.....132
- Σχήμα 61:** Απόκριση συχνότητας της εξόδου drop του 2<sup>ης</sup> τάξης ROADM, χαρακτηρισμένη για σήμα εισόδου Gaussian θόρυβο. (resolution bandwidth 0.1nm).....133
- Σχήμα 62:** Ακολουθίες παλμών και αντίστοιχα διαγράμματα ματιού στην έξοδο του ROADM για μετατόπιση του φάσματος σε σχέση με την συχνότητα του φέροντος κατά A) 40 GHz (0.32 nm), B) 50 GHz (0.4 nm) και C) 60GHz (0.48 nm). ....134
- Σχήμα 63:** Ακολουθίες παλμών και αντίστοιχα διαγράμματα ματιού στην έξοδο του DI για μετατόπιση του φάσματος σε σχέση με την συχνότητα του φέροντος κατά A) 40 GHz (0.32 nm), B) 50 GHz (0.4 nm) και C) 60GHz (0.48 nm).135
- Σχήμα 64:** Πειραματική διάταξη της απλής αρχιτεκτονικής ενός αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος, με χρήση 2<sup>ης</sup> τάξης φίλτρων μικρο-δακτυλίου, για ακολουθία παλμοσειρών τάξης 2<sup>7</sup>-1.....136
- Σχήμα 65:** Παλμοσειρές και αντίστοιχα διαγράμματα ματιού για το σήμα εισόδου, το σήμα εξόδου του ROADM, το σήμα εξόδου του DI αλλά και ένθετη απεικόνιση της εξόδου του SOA. (Timescale 100 ps/div για ακολουθίες παλμών και 10ps/div για διαγράμματα ματιού) .....138
- Σχήμα 66:** Πειραματικά αποτελέσματα για μετατόπιση ROADM κατά 0.3 nm προς μικρότερες φασματικές συνιστώσες σε σχέση με την συχνότητα του φέροντος. Η πρώτη γραμμή δείχνει το εισερχόμενο σήμα εισόδου ενώ η δεύτερη γραμμή την έξοδο του ROADM. (Timescale για ακολουθία παλμών 200 ps/div, και 10 ps/div για τα διαγράμματα ματιού).....140
- Σχήμα 67:** Αποτύπωση του φάσματος του εξερχόμενου σήματος από τον ROADM για τις δυο διαφορετικές μετατοπίσεις 0.1nm και 0.3 nm. ....141
- Σχήμα 68:** Καμπύλες μέτρησης σφαλμάτων. Η κόκκινη γραμμή αφορά το σήμα εξόδου με τον ROADM μετατοπισμένο κατά 0.3 nm σε σχέση με την συχνότητα του φέροντος. Η μαύρη γραμμή αφορά το σήμα εξόδου με τον ROADM μετατοπισμένο κατά 0.1 nm σε σχέση με την συχνότητα του φέροντος. Η μπλέ γραμμή αφορά το σήμα εισόδου στον μετατροπέα μήκους κύματος. ....142



## Συγκεντρωτικός Πίνακας Εύρεσης Σχημάτων

- Σχήμα 69:** Πειραματική διάταξη της WDM αρχιτεκτονικής ενός αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος, με χρήση 2<sup>ης</sup> τάξης φίλτρων μικρο-δακτυλίου, για ακολουθία RZ παλμοσειρών τάξης 2<sup>^</sup>7-1.....143
- Σχήμα 70:** Αναπαράσταση του πολυπλεγμένου σήματος εισόδου στον SOA, στο πεδίο του χρόνου. Κάθε πακέτο πληροφορίας είναι κατάλληλα συγχρονισμένο με το αντίστοιχο του πακέτο CW διαφορετικού μήκους κύματος.....145
- Σχήμα 71:** Πειραματικά αποτελέσματα από την χρήση του αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος σε WDM λειτουργία. Αριστερά: Παλμοσειρές και διάγραμμα ματιού για το σήμα εξόδου του ROADM και του σήματος εξόδου του DI, για το πακέτο πληροφορίας γραμμένο στο 1555nm. Δεξιά: Παλμοσειρές και διάγραμμα ματιού για το σήμα εξόδου του ROADM και του σήματος εξόδου του DI, για το πακέτο πληροφορίας γραμμένο στο 1559.16nm. (Timescale 200 ps/div για παλμοσειρές και 10 ps/div για διαγράμματα ματιού)..... 146
- Σχήμα 72:** Καμπύλες μέτρησης σφαλμάτων. Η κόκκινη γραμμή αφορά το πακέτο που εξέρχεται του μετατροπέα μήκους κύματος με μήκος κύματος 1555nm. Η μαύρη γραμμή αφορά το πακέτο που εξέρχεται του μετατροπέα μήκους κύματος με μήκος κύματος 1559.16nm. Ο ROADM είναι μετατοπισμένος κατά 0.1 nm σε σχέση με την συχνότητα του φέροντος και για τις δυο περιπτώσεις. Η μπλέ γραμμή αφορά το σήμα εισόδου στον μετατροπέα μήκους κύματος .....147
- Σχήμα 73:** Πειραματική διάταξη της αρχιτεκτονικής ενός αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος, με χρήση 2<sup>ης</sup> τάξης φίλτρων μικρο-δακτυλίου, για ακολουθία NRZ παλμοσειρών, τάξης 2<sup>^</sup>7-1.....149
- Σχήμα 74:** Πειραματικά αποτελέσματα. Η πρώτη γραμμή δείχνει το εισερχόμενο σήμα εισόδου σε μήκος κύματος 1556.5 nm, η δεύτερη γραμμή την έξοδο του ROADM για μετατόπιση του φίλτρου κατά 0.1 nm προς την μπλε περιοχή σε σχέση με την συχνότητα του φέροντος, ενώ η τρίτη γραμμή δείχνει την έξοδο του ROADM για μετατόπιση του φίλτρου κατά 0.3nm προς την μπλε περιοχή σε σχέση με την συχνότητα του φέροντος,. (Timescale για ακολουθία παλμών 200 ps/div, και 10 ps/div για τα διαγράμματα ματιού) .....151
- Σχήμα 75:** Καμπύλες μέτρησης σφαλμάτων. Η κόκκινη γραμμή αφορά το σήμα εξόδου με τον ROADM μετατοπισμένο κατά 0.3 nm σε σχέση με την συχνότητα του φέροντος. Η μαύρη γραμμή αφορά το σήμα εξόδου με τον ROADM μετατοπισμένο κατά 0.1 nm σε σχέση με την συχνότητα του φέροντος. Η μπλέ γραμμή αφορά το σήμα εισόδου στον μετατροπέα μήκους κύματος. ....152
- Σχήμα 76:** Πειραματική διάταξη της WDM αρχιτεκτονικής ενός αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος, με χρήση 2<sup>ης</sup> τάξης φίλτρων μικρο-δακτυλίου, για ακολουθία NRZ παλμοσειρών τάξης 2<sup>^</sup>7-1. 154
- Σχήμα 77:** Πειραματικά αποτελέσματα του αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος για WDM λειτουργία. Στην πάνω γραμμή φαίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα για το πακέτο πληροφορίας στο μήκος κύματος 1558.6nm ενώ η κάτω γραμμή παρουσιάζει το εξερχόμενο πακέτο σε μήκος κύματος 1554.7nm. Timescale για ακολουθία παλμών 200 ps/div, και 10 ps/div για τα διαγράμματα ματιού. ....155
- Σχήμα 78:** Καμπύλες μέτρησης σφαλμάτων. Η κόκκινη γραμμή αφορά το πακέτο που εξέρχεται του μετατροπέα μήκους κύματος με μήκος κύματος 1554.7nm. Η μαύρη γραμμή αφορά το πακέτο που εξέρχεται του μετατροπέα μήκους κύματος με μήκος κύματος 1558.6nm. Ο ROADM είναι μετατοπισμένος κατά 0.1 nm σε σχέση με την συχνότητα του φέροντος και για τις δυο περιπτώσεις. Η μπλέ γραμμή αφορά το σήμα εισόδου στον μετατροπέα μήκους κύματος .....156
- Σχήμα 79:** Διαθέσιμα στοιχεία / διατάξεις από το ASPIC.....158
- Σχήμα 80:** Απόκριση του φίλτρου μικροδακτυλίου ύστερα από κατάλληλο chirp filtering ενός 160 Gb/s διαμορφωμένου καναλιού.....159
- Σχήμα 81:** Διαδικασία μοντελοποίησης η οποία ακολουθήθηκε για τον σχεδιασμό των 160 Gb/s φίλτρων μικρο-δακτυλίου.....160

## Συγκεντρωτικός Πίνακας Εύρεσης Σχημάτων

<b>Σχήμα 82:</b> Θεωρητικό μοντέλο απεικόνισης του φίλτρου μικροδακτυλίου 1 <sup>ης</sup> τάξης στο ASPIC .....	161
<b>Σχήμα 83:</b> Φασματική απόκριση του 1 <sup>ης</sup> τάξης φίλτρου μικρο-δακτυλίου συγκριτικά με αυτήν του βέλτιστου ζωνοπερατού φίλτρου .....	161
<b>Σχήμα 84:</b> Ακολουθία παλμών και διαγράμματα ματιού ενός 160 Gb/s αντεγγραμμένου σε νέο μήκος κύματος σήματος στην έξοδο του α) 1 <sup>ης</sup> τάξης φίλτρου μικροδακτυλίου και β) DI	162
<b>Σχήμα 85:</b> Θεωρητικό μοντέλο απεικόνισης ενός 2 <sup>ης</sup> τάξης φίλτρου μικρο-δακτυλίου μέσω του προγράμματος ASPIC .....	163
<b>Σχήμα 86:</b> Φασματική απόκριση του 2 <sup>ης</sup> τάξης φίλτρου μικρο-δακτυλίου (κόκκινη γραμμή) συγκριτικά με αυτήν του βέλτιστου ζωνοπερατού φίλτρου (μαύρη γραμμή) .....	164
<b>Σχήμα 87:</b> Ακολουθία παλμών και αντίστοιχα διαγράμματα ματιού της λειτουργίας του μετατροπέα μήκους κύματος σε ρυθμό μετάδοσης 160 Gb/s, στην έξοδο α) της 2 <sup>ης</sup> τάξης φίλτρων μικροδακτυλίου και β) DI .	164
<b>Σχήμα 88:</b> Θεωρητικό μοντέλο απεικόνισης ενός 3 <sup>ης</sup> τάξης φίλτρου μικρο-δακτυλίου μέσω του προγράμματος ASPIC .....	165
<b>Σχήμα 89:</b> Φασματική απόκριση του 3 <sup>ης</sup> τάξης φίλτρου μικρο-δακτυλίου (κόκκινη γραμμή) συγκριτικά με αυτήν του βέλτιστου ζωνοπερατού φίλτρου (μαύρη γραμμή) .....	166
<b>Σχήμα 90:</b> Ακολουθία παλμών και αντίστοιχα διαγράμματα ματιού της λειτουργίας του μετατροπέα μήκους κύματος σε ρυθμό μετάδοσης 160 Gb/s, στην έξοδο α) της 3 <sup>ης</sup> τάξης φίλτρων μικροδακτυλίου και β) DI .	166
<b>Σχήμα 91:</b> Σύγκριση σε επίπεδο ζεύξης μεταξύ α) 600 nm x 220 nm κυματοδηγό δακτυλίου, β) 500nm x 220 nm κυματοδηγό δακτυλίου.....	167
<b>Σχήμα 92:</b> Φασματική απόκριση 3 <sup>ης</sup> τάξης φίλτρων μικρο-δακτυλίου με 500 nm διάμετρο κυματοδηγού και οπτικό φάσμα: 160 Gb/s σήμα στην έξοδο του SOA (κόκκινη γραμμή), φιλτραρισμένο σήμα στην έξοδο των φίλτρων μικρο-δακτυλίου (κίτρινη γραμμή) , ανακτημένης πόλωσης σήμα στην έξοδο του DI (πράσινη γραμμή). 169	
<b>Σχήμα 93:</b> Ακολουθία παλμών και αντίστοιχα διαγράμματα ματιού της λειτουργίας του μετατροπέα μήκους κύματος σε ρυθμό μετάδοσης 160 Gb/s, στην έξοδο α) των ανασχεδιασμένων 3 <sup>ης</sup> τάξης φίλτρων μικροδακτυλίου και β) DI.....	170
<b>Σχήμα 94:</b> Σχεδιαστική απεικόνιση και εμφάνιση παραμέτρων των 3 <sup>ης</sup> τάξης φίλτρων μικρο-δακτυλίου .....	170
<b>Σχήμα 95:</b> Συγκριτική απεικόνιση των φασματικών αποκρίσεων των προτεινόμενων αρχιτεκτονικών κατασκευής των φίλτρων μικρο-δακτυλίου για λειτουργία τους σε ρυθμό μετάδοσης 160 Gb/s .....	171
<b>Σχήμα 96:</b> Δομικό διάγραμμα που συνοψίζει το περιεχόμενο της μελέτης μας στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής.....	178
<b>Σχήμα 97:</b> Εξέλιξη των ολοκληρωμένων συστημάτων οπτικής επεξεργασίας σήματος.....	184
<b>Σχήμα 98:</b> Θεωρητική απεικόνιση των ολοκληρωμένων μετατροπέων μήκους κύματος, για WDM μετάδοση σε ρυθμό 160 Gb/s. (πάνω) Η απλή οπτική πύλη για μονοκυματική λειτουργία αποτελούμενη από ένα SOA σε σειρά με ένα WDM φίλτρο μικρο-δακτυλίου και ένα DI. (κάτω) Μεταγενέστερο βήμα αύξησης του επιπέδου ολοκλήρωσης με την δημιουργία του τετραπλού μετατροπέα μήκους κύματος, αποτελούμενο από συστοιχίες SOAs συνδεδεμένους αντίστοιχα με συστοιχίες WDM φίλτρων μικρο-δακτυλίου και DI, με απότερο στόχο την αύξηση και του ρυθμού μετάδοσης συνολικά του ολοκληρωμένου πλινθίου στα 640 Gb/s. ....	185

## Συγκεντρωτικός Πίνακας Εύρεσης Σχημάτων

**Σχήμα 99:** α) θεωρητική απεικόνιση μιας ολοκληρωμένης διάταξης με χρήση τεχνολογίας πυριτίου ενός ηλεκτρο-διαμορφωτής εκπομπής φωτός για την παραγωγή πακέτων σταθερής ισχύος οπτικού σήματος (CW envelopes) , b) φωτογραφία λιθογραφικής απεικόνισης ενός AWG πάνω σε πυρίτιο, c) θεωρητική απεικόνιση μιας ολοκληρωμένης διάταξης ενός δέκτη για την μετατροπή του οπτικού σήματος εισόδου σε ηλεκτρικό προκειμένου να οδηγήσει τους διαμορφωτές ηλεκτρο-απορρόφησης που εμπεριέχονται στο πλινθίο του σχήματος α.....186

**Σχήμα 100:** Τελικό βήμα ολοκλήρωσης των αναπτυχθέντων φωτονικών ολοκληρωμένων διατάξεων σε μια υψηλής χωρητικότητας πλατφόρμα δρομολόγησης των δεδομένων (4U rack mount module).....187

## Συγκεντρωτικός πίνακας εύρεσης Πινάκων

<b>Πίνακας 1:</b> Βασικά πλεονεκτήματα των τριών τεχνολογιών ολοκλήρωσης.....	44
<b>Πίνακας 2:</b> Ισχύς μεταγωγής για το αμιγώς οπτικό κύκλωμα ανίχνευσης πακέτων στα 40 Gb/s. Οι ισχύεις εξόδου μετρήθηκαν μετά από οπτικό φιλτράρισμα. ....	68
<b>Πίνακας 3:</b> Σύνοψη ενεργειακών απαιτήσεων των τριών υπό μελέτη αρχιτεκτονικών προκειμένου να επιτυγχάνεται ορθή λειτουργία.....	96
<b>Πίνακας 4:</b> Παράμετροι SOA που χρησιμοποιήθηκαν στις εξομοιώσεις .....	115
<b>Πίνακας 5:</b> Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων με χρήση του λογισμικού εξομοίωσης VPI των παραμέτρων για την κατασκευή των δυο συμβολομετρικών διατάξεων σταθερής χρονικής καθυστέρησης.....	123
<b>Πίνακας 6:</b> Παράμετροι SOA που χρησιμοποιήθηκαν στις εξομοιώσεις.....	132
<b>Πίνακας 7:</b> Ενεργειακές απαιτήσεις αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος για μετατροπή ακολουθίας δεδομένων σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s, σε καινούριο μήκος κύματος. ....	138
<b>Πίνακας 8:</b> Σύγκριση ήδη υπαρχόντων αμιγώς οπτικών μετατροπέων μήκους κύματος, κατασκευασμένων με την τεχνική της μονολιθικής και υβριδικής ολοκλήρωσης. ....	148
<b>Πίνακας 9:</b> Πίνακας σύνοψης των ενεργειακών απαιτήσεων της πειραματικής διάταξης.....	153
<b>Πίνακας 10:</b> Παράμετροι για το 1 <sup>ης</sup> τάξης φίλτρων μικρο-δακτυλίου .....	161
<b>Πίνακας 11:</b> Παράμετροι για το 2 <sup>ης</sup> τάξης φίλτρο μικροδακτυλίου .....	163
<b>Πίνακας 12:</b> Παράμετροι για το 3 <sup>ης</sup> τάξης φίλτρο μικροδακτυλίου.....	165
<b>Πίνακας 13:</b> Σχεδιαστικοί παράμετροι αναπροσδιορισμένων 3 <sup>ης</sup> τάξης φίλτρων μικροδακτυλίου.....	168

---