

# Εξελίξεις και ιστορία της οπτικής μεταγωγής

Φρανκ Μπλάννινγκ - 6698 [frankgou@auth.gr]  
Ζήσης Μήλης Εμμανουήλ - 8053 [zemmanox@auth.gr]

1 Δεκεμβρίου 2018

## 1 Εισαγωγή

Σε ένα οπτικό δίκτυο για να είναι εφικτή η δυναμική δρομολόγηση υπάρχει η ανάγκη ενός μεταγωγέα (switch) ο οποίος θα ανακατευθύνει την δέσμη φωτός από μία θύρα εισόδου, στην επιθυμητή θύρα εξόδου. Όπως και στα ηλεκτρικά σήματα, και στα οπτικά υπάρχουν διάφορα επίπεδα ιεραρχίας στην μεταγωγής του σήματος, από τη κυρίως στατική μεταγωγή κυκλώματος όπου προσφέρει μια αργά μεταβαλλόμενη ένα προς ένα σύνδεση δύο οπτικών τερματικών, στην μεταγωγή πακέτων όπου ο χρόνος μεταγωγής πρέπει να είναι τάξης μεγέθους μικρότερος από τον χρόνο μετάδοσης του κάθε πακέτου. Υπάρχει και μία ενδιάμεση μεταγωγή ριπών όπου εκ των προτέρων και σε ξεχωριστό κανάλι στέλνεται η πληροφορία δρομολόγησης και τα πακέτα δεδομένων μεταδίδονται σε ριπές. Οι διαφορετικές αυτές μέθοδοι μεταγωγής είναι πολύ διαφορετικές μεταξύ τους και θα μελετηθούν ξεχωριστά.

Στην εργασία του El-Bawab και Shin [1] δόθηκε μία επισκόπηση των τεχνολογιών της εποχής όπου επιτρέπουν ή και μελετάνε την μεταγωγή πακέτων στο οπτικό πεδίο. Τέτοιες τεχνολογίες υπάρχουν πολλές αλλά είναι σε ερευνητικό στάδιο και υπάρχουν κάποια εμπόδια τα οποία πρέπει να ξεπεραστούν ώστε να γίνει εφικτή η εμπορική χρήση των οπτικών μεταγωγών. Τα σημαντικότερα εμπόδια είναι η εκταμίευση και η επεξεργασία οπτικών σημάτων στα μικρά χρονικά διαστήματα των πακέτων. Με την χρήση καθρεπτών, κρυστάλλων διάθλασης και ολικής ανάκλισης, είναι εφικτή με τις σημερινές τεχνολογίες η ανακατευθύνση της δέσμης του φωτεινού σήματος, όπως και η πολυπλεξία δεσμών διαφόρων δεσμών διαφορετικών μηκών κύματος σε μία. Όμως οι τεχνολογίες αποθήκευσης της οπτικής πληροφορίας δεν έχουν την ίδια αποτελεσματικότητα της ηλεκτρικής σε DRAM και είναι αρκετά πειραματικές και πολύπλοκες. Επίσης η εξασθένιση της αποθηκευμένης πληροφορίας είναι πολύ γρήγορη και περιορίζει περαιτέρω την ποσότητα και την διάρκεια για την οποία η πληροφορία μπορεί να εκταμιευθεί. Τέλος ενώ έχει υπάρξει πρόοδος στους τομείς της αναγέννησης του σήματος, του συγχρονισμού, μετατροπής μήκους κύματος κ.α. η περιορισμένη επεκτασιμότητα και το αυξημένο κόστος αυτών των τεχνολογιών δεν επιτρέπουν την ευρεία χρήση τους σε εμπορικές εφαρμογές.

Η οπτική μεταγωγή όπως προαναφέρθηκε μπορεί να χωριστεί στους δύο παρόμοιους τύπους, την οπτική μεταγωγή πακέτων (OPS) όπου η δρομολόγησή γίνεται σε επίπεδο πακέτων, και την οπτική μεταγωγή ριπών (OBS) όπου μεγαλύτερες οντότητες οι οποίες περιέχουν πολλαπλά πακέτα και ονομάζονται "ριπές" δρομολογούνται. Η "ριπή" θυμίζει το frame του ATM πρωτοκόλλου.

Το επίπεδο των πακέτων για την οπτική μεταγωγή φαίνεται να είναι η πιο απλή και φυσική επιλογή για δρομολόγηση. Όμως είναι δύσκολο να εφαρμοστούν οι στατιστικοί κανόνες μεγεθών ενταμιευτών για την ομαλή λειτουργία ελέγχου κίνησης (TCP congestion control). Η οπτική μεταγωγή πακέτων, προσπαθώντας να ξεπεράσει αυτόν τον περιορισμό, μπορεί να χρησιμοποιεί επιπλέον τεχνικές για την διαχείριση πακέτων σε συνθήκες υψηλού φορτίου. Μία μπορεί να είναι η μετατροπή μήκους κύματος, όπου αν εμφανιστεί ένα πακέτο σε έναν μεταγωγέα όπου οι ενταμιευτές του είναι γεμάτοι και η θύρα εξόδου κατειλημμένη, να μετατρέψει το μήκος κύματος αυτού του πακέτου και να το αποστείλει στην ίδια θύρα εξόδου. Μία άλλη είναι αποστολή του πακέτου μέσω μιας δευτερεύουσας διαδρομής από μια θύρα εξόδου όπου δεν έχει συνθήκες υψηλού τηλεπικοινωνιακού φορτίου. Τέτοιες μέθοδοι κατά πρώτων δεν επαρκούν για να καλύψουν ικανοποιητικά την έλλειψή αρκετά μεγάλων ενταμιευτών και κατά δεύτερο μπορεί να δημιουργούν επιπλέον προβλήματα από αυτά όπου μπορούν να λύσουν.

Η οπτική μεταγωγή ριπών είχε προταθεί και είναι ένα υβριδικό της οπτικής μεταγωγής κυκλώματος και της οπτικής μεταγωγής πακέτων. Με την χρήση ηλεκτρικών ενταμιευτών στις άκρες του οπτικού δικτύου, δίνεται η δυνατότητα της ένα προς ένα σύνδεση για την αποστολή ενός συνόλου πακέτων. Σε γενικές γραμμές πριν την αποστολή της ριπής ανταλλάσσονται μηνύματα δρομολόγησης, μέσω άλλου σήματος ή και άλλου μέσου, τα οποία δημιουργούν για ένα κλειστό ή ανοιχτό χρονικό διάστημα την επιθυμητή σύνδεση. Αν η δημιουργία της σύνδεσης είναι επιτυχής, λαμβάνει χώρα η αποστολή της ριπής και έπειτα καταστρέφεται η σύνδεση, ενώ αν είναι ανεπιτυχής, τα δεδομένα παραμένουν στον ενταμιευτή και επιχειρείται εκ νέου μετά από κάποιο χρονικό διάστημα η αποστολή τους. Αυτή η μέθοδος μπορεί να δημιουργεί ανεπιθύμητες επιπτώσεις σε ένα TCP δίκτυο, ειδικά όταν το μέγεθος της ριπής είναι πολύ μεγάλο και υπάρχουν πολλαπλά διαδοχικά TCP πακέτα εντός μίας ριπής. Αυτό συμβαίνει γιατί για το TCP πρωτοκόλλο, τρεις διαδοχικές αποτυχίες αποστολής είναι ένα σημάδι υψηλής τηλεπικοινωνιακής κίνησης και ο ρυθμός αποστολής αυτόματα μειώνεται.

Αν επιλεγθεί η χρήση ηλεκτρικών ενταμιευτών για την μεταγωγή των πακέτων μετά από μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό λύνεται το πρόβλημα την αποθήκευσης των πακέτων ενώ η ρυθμαπόδοση παραμένει υψηλή λόγω της χρήσης των οπτικών ινών ως το μέσο μετάδοσης. Η μετατροπή όμως του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό είναι ενεργοβόρα σε τέτοιο βαθμό όπου λόγω των θερμικών απωλειών η πυκνότητά του εξοπλισμού μεταγωγής δεν μπορεί να ξεπεράσει έναν συγκεκριμένο βαθμό. Η ολοένα αύξηση των ταχυτήτων των δικτύων έχει δημιουργήσει την ανάγκη για συστήματα μεταγωγής με πολλαπλά racks για την ικανοποιητική ψύξη τους. Πέρα από τον εμφανή χωρικό περιορισμό που εισάγει η υλοποίηση αυτή, εισάγει περιορισμούς ταχύτητας και καθυστέρησης λόγω της απαραίτητης εξωτερικής διασύνδεσης των πολλαπλών ντουλαπών.

Η ανάγκη για ένα σύστημα μεταγωγής πακέτων οπτικών δικτύων η οποία θα άρει αυτούς τους περιορισμούς είναι εμφανής και έχει αναγνωριστεί από διάφορα κράτη τα οποία έχουν προσφέρει επιχορηγήσεις σε διάφορα σχετικά ερευνητικά προγράμματα όπως: τα Ευρωπαϊκά KEOPS [2], DAVID [3], BOOM [4] και ECOFRAME [5] και τα Αμερικάνικα LASOR [6] και IRIS [7]. Στην παρούσα εργασία θα παρουσιαστούν κάποια από αυτά.

## 2 Στοιχεία

Πριν παρουσιάσουμε κάποια ερευνητικά προγράμματα θα αναφερθούμε συνοπτικά στους βασικούς τύπους οπτικών διακοπών και στους τρόπους λειτουργίας των τεχνολογιών τους. Η επιστράτευση της Φωτονικής Τεχνολογίας Πυριτίου (Silicon Photonics Technology) για την ενσωμάτωση των διάφορων οπτικών εξαρτημάτων σε κοινό υπόστρωμα υπόσχεται τη μαζική παραγωγή σύνθετων διατάξεων χαμηλού κόστους.

### 2.1 Μηχανικοί Διακόπτες

Στους διακόπτες αυτούς η εναλλαγή πραγματοποιείται από μηχανικά μέσα. Ένα είδος τέτοιου διακόπτη χρησιμοποιεί μια διαρρύθμιση διακοπών όπου η κατάσταση εναλλαγής καθορίζεται από τη μετακίνηση ενός καθρέφτη μέσα και έξω από το οπτικό μονοπάτι. Άλλο είδος διακόπτη μπορεί να χρησιμοποιεί κατευθυνόμενο συζευκτήρα κυκλωμάτων (directional coupler). Τεντώνοντας ή λυγίζοντας την ίνα στην περιοχή αλληλεπίδρασης, αλλάζει ο λόγος σύζευξης του συζευκτήρα και κατά συνέπεια μπορούμε να τον χρησιμοποιήσουμε για να εκτρέψουμε το φως από μία θύρα εισόδου σε διαφορετικές θύρες εξόδου. Οι διακόπτες αυτοί έχουν μικρή απώλεια εισόδου, μικρό PDL, χαμηλό crosstalk και είναι σχετικά φτηνοί. Έχουν όμως ταχύτητες εναλλαγής της τάξης μερικών ms και για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται μόνο στην περίπτωση της διάθεσης των φωτεινών μονοπατιών.

### 2.2 Θερμο-Οπτικοί Διακόπτες

Πρόκειται για 2x2 συνδυασμένους μετρητές παρεμβολών (interferometers), οι οποίοι κατασκευάζονται σε κυματοδηγά υλικά, που κατασκευάζονται από πολυμερή ή σιλικόνη, των οποίων ο δείκτης διάθλασης είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Αλλάζοντας τον δείκτη διάθλασης στον έναν βραχίονα του interferometer, η σχετική διαφορά φάσης μεταξύ των δύο βραχιόνων αλλάζει, έχοντας ως αποτέλεσμα την καθοδήγηση του

σήματος εισόδου από μία θύρα εξόδου σε άλλη. Οι συσκευές αυτές κατασκευάζονται από πυρίτιο όπως και από πολυμερή του, αλλά έχουν πολύ χαμηλό crosstalk. Επίσης, το θερμό-οπτικό φαινόμενο είναι πολύ αργό και οι ταχύτητες εναλλαγής είναι της τάξης των μερικών ms. Η βραδύτητα τους δεν τους περιορίζει στις ήδη υπάρχουσες εφαρμογές.

### 2.3 Ηλεκτρο-Οπτικοί Διακόπτες

Ένας τέτοιος 2x2 διακόπτης επιλέγει τις διαδρομές των φωτεινών κυμάτων μέσα σε ενεργές συσκευές χρησιμοποιώντας πολωμένο ηλεκτρικό ρεύμα. Χρησιμοποιούν έναν κατευθυνόμενο συζευκτήρα (directional coupler), του οποίου η αναλογία σύζευξης τροποποιείται με την αλλαγή του δείκτη διάθλασης του υλικού που βρίσκεται στην περιοχή σύζευξης. Το υλικό που χρησιμοποιείται είναι το Lithium Niobate-LiNbO<sub>3</sub>. Η εναλλαγή πραγματοποιείται με την εφαρμογή κατάλληλης τάσης στα ηλεκτρόδια.

Ένας τέτοιος διακόπτης μπορεί να αλλάζει κατάσταση πολύ γρήγορα συνήθως σε λιγότερο από 1 ns. Ο χρόνος αυτός καθορίζεται από τη δυναμικότητα των ηλεκτροδίων. Λόγω της ιδιότητας αυτής, ένας τέτοιος διακόπτης χρησιμοποιείται συχνά ως εξωτερικός διαμορφωτής [8]. Οι διακόπτες αυτοί έχουν συνήθως μεγάλη απώλεια και PDL και είναι πιο ακριβοί από τους μηχανικούς. Εντούτοις, ούτε τα ηλεκτρο-οπτικά αλλά ούτε και τα θερμό-οπτικά switches δεν μπορούν ακόμα να επιτύχουν την απώλεια εισαγωγής, το back reflection και τη long-term σταθερότητα των οπτό-μηχανικών οπτικών switches.

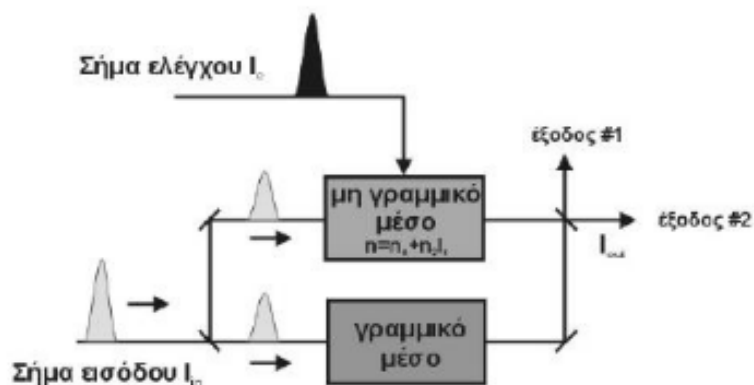
### 2.4 Ημιαγωγικοί Διακόπτες Οπτικών Ενισχυτών

Πρόκειται για on-off διακόπτες που χρησιμοποιούν τον Semiconductor Optical Amplifier (SOA). Λειτουργούν με αλλαγή της διαφοράς δυναμικού, αν η διαφορά δυναμικού μειωθεί, δεν γίνεται αναστροφή πληθυσμού (population inversion) και η συσκευή απορροφά τα εισερχόμενα σήματα. Ο συνδυασμός της ενίσχυσης στην κατάσταση on και της απορρόφησης στην off μεγαλώνει πάρα πολύ το λόγο εξασθένισης του σήματος εντός της συσκευής. Η ταχύτητα εναλλαγής είναι 1 ns. Το υλικό από το οποίο αποτελούνται είναι ακριβό και πολύ δύσκολο να είναι ανεξάρτητο της πόλωσης.

### 2.5 Οπτικός Συμβολομετρικός Διακόπτης

Για πρώτη φορά, η χρήση συμβολόμετρων για την υλοποίηση αμιγώς οπτικών διακοπών προτάθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1980 [9] και είναι ευρέως αποδεκτό πλέον ότι οι οπτικές συμβολομετρικές διατάξεις μπορούν να προσφέρουν πλεονεκτήματα στην ταχύτητα λειτουργίας, στη δυνατότητα υλοποίησης Boolean λογικής, καθώς και σε ένα ευρύτερο φάσμα εφαρμογών [10]. Για την επιτυχή λειτουργία του συμβολόμετρου απαιτείται η ύπαρξη δύο τουλάχιστον οπτικών σημάτων. Το ένα από τα δύο σήματα εισέρχεται στο διακόπτη σαν σήμα εισόδου και το δεύτερο οπτικό σήμα, που απαιτείται, είναι το σήμα ελέγχου (control signal), το οποίο μπορεί να είναι μια τυχαία παλμική ακολουθία, και του οποίου ο ρόλος είναι να καθορίζει-ελέγχει την κατάσταση μεταγωγής του διακόπτη.

Το σήμα εισόδου διαχωρίζεται, καθώς εισέρχεται στη διάταξη, σε δύο συνιστώσες με τη βοήθεια ενός οπτικού συζεύκτη ισχύος. Στη συνέχεια, η κάθε μια συνιστώσα διαδίδεται στον ένα από τους δύο βραχίονες του συμβολόμετρου και τελικά οι δύο συνιστώσες επανενώνονται στην έξοδο, μέσω ενός δεύτερου οπτικού συζεύκτη ισχύος. Το μέγεθος της οπτικής ισχύος σε κάθε έξοδο της πύλης είναι συνάρτηση της συμβολής των δύο συνιστωσών. Αν τα υλικά, που αποτελούν τους δύο βραχίονες ιδίου μήκους, έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά, τότε οι αντίστοιχοι οπτικοί δρόμοι είναι ίδιοι και οι δύο συνιστώσες του σήματος ρολογιού έχουν την ίδια φάση (phase), όταν συμβάλλουν στο δεύτερο συζεύκτη. Αποτέλεσμα αυτού είναι στη μια έξοδο του διακόπτη να υπάρχει πλήρως προσθετική συμβολή, ενώ στην άλλη έξοδο του διακόπτη η συμβολή να είναι πλήρως αναιρετική. Κατά συνέπεια, το σύνολο της οπτικής ισχύος εξέρχεται, σ' αυτήν την περίπτωση, από την πρώτη θύρα εξόδου και ο διακόπτης βρίσκεται στην κατάσταση OFF.

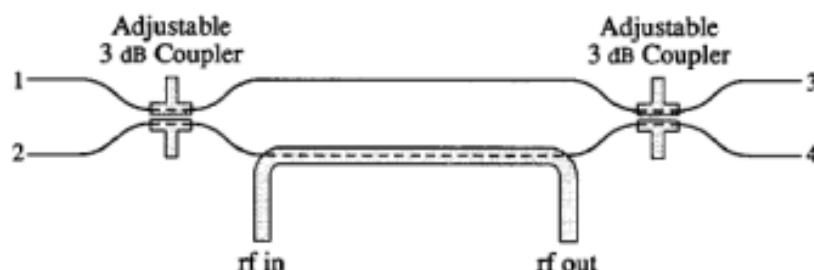


Σχήμα 1: Σχηματική παράσταση συμβολομέτρων Mach-Zehnder

Η διέγερση της μη γραμμικότητας του μέσου επιτυγχάνεται με την εισαγωγή ενός ισχυρού οπτικού σήματος ελέγχου και η προκαλούμενη μεταβολή του δείκτη διάθλασης του μη γραμμικού μέσου γίνεται αντιληπτή από το ασθενούς ισχύος σήμα εισόδου, ως μια αλλαγή στη φάση του. Αποτέλεσμα αυτού, είναι να φτάνουν οι δύο συνιστώσες του σήματος εισόδου στην έξοδο με διαφορετική μεταξύ τους φάση, οπότε η συμβολή τους μετατρέπει τη διαφορά φάσης σε μεταβολή πλάτους, αλλάζοντας το συσχετισμό οπτικής ισχύος στις δύο θύρες εξόδου του διακόπτη. Στην περίπτωση που η μεταβολή στη φάση είναι ίση με  $\pi$ , το σύνολο της οπτικής ισχύος εξέρχεται από τη δεύτερη θύρα του διακόπτη, πλέον, και όχι από την πρώτη, και η πύλη είναι σε κατάσταση μεταγωγής ή ON.

## 2.6 Συμβολόμετρο Mach-Zehnder (MZI)

Τα συμβολόμετρα Mach-Zehnder (Mach-Zehnder Interferometer (MZI)) είναι γενικά οπτικές συσκευές που βασίζονται στο φαινόμενο της συμβολής. Τυπικά ενεργοποιούνται με κάποιο σήμα εισόδου ενώ στη συνέχεια χωρίζουν το σήμα αυτό σε δύο υποσήματα χρησιμοποιώντας κάποιο διαχωριστή (συνήθως κάτοπτρα μερικής εκπομπής), και εν συνεχεία υποβάλλοντας την ακτίνα σε κάποιες εξωτερικές επιδράσεις, (πχ. αλλαγή μήκους κύματος ή χρονική ολίσθηση) και τελικά ενώνοντας τα δύο υποσήματα σε ένα μοναδικό. Λειτουργεί με συμβολή διαίρεσης πλάτους. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2 χρησιμοποιεί δύο διαφορετικούς διαχωριστές σήματος για να διαχωρίσει και να συνδυάσει τα σήματα, και έχει δύο εξόδους που μπορεί να συνδέονται σε φωτοανιχνευτές ή άλλες διατάξεις.



Σχήμα 2: Σχηματική παράσταση συμβολομέτρων Mach-Zehnder

Αν το συμβολόμετρο είναι καλά ευθυγραμμισμένο η διαφορά των μηκών των κλάδων του μπορεί να προσαρμοστεί (πχ. κινώντας ένα από τα κάτοπτρα ή τοποθετώντας διαφορετικού μήκους ίνα) με τέτοιο τρόπο

ώστε για συγκεκριμένη οπτική συχνότητα το σύνολο της ισχύος να εξάγεται σε μία μόνο έξοδο.

## 2.7 Σύνοψη

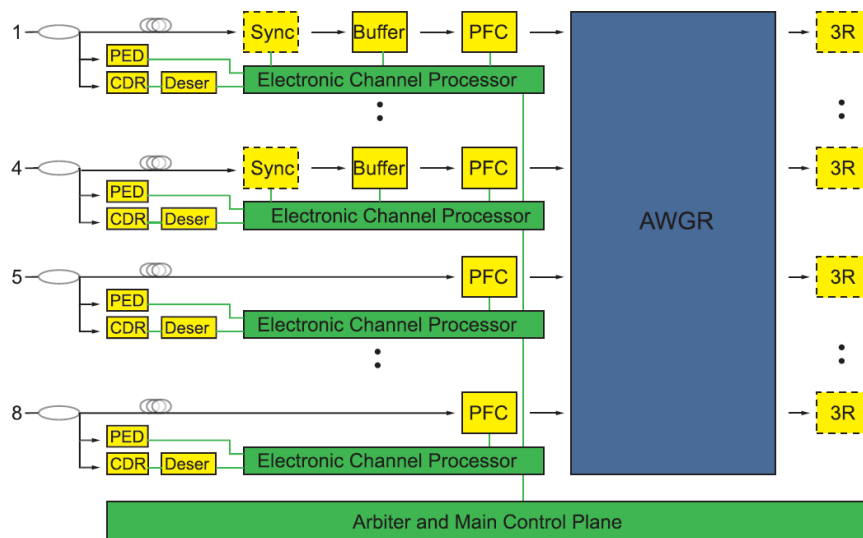
Αυτοί οι τύποι διακοπών είναι απαραίτητα στοιχεία των οπτικών δρομολογητών και αποτελούν δομικούς λίθους στη συναρμογή των αρχιτεκτονικών ερευνητικών προγραμμάτων που θα εξεταστούν στη συνέχεια.

## 3 Το πρόγραμμα LASOR (2005), ΗΠΑ

Στην αρχιτεκτονική LASOR, οπτικά πακέτα των 40 Gbps δρομολογούνται με βάση το μήκος κύματος του πακέτου και τις οπτικές ετικέτες των 10 Gbps. Η ενσωμάτωση της λειτουργίας μεταγωγής και δρομολόγησης σε PIC επιτρέπει την πραγματοποίηση βελτιωμένων λειτουργιών δρομολόγησης στο οπτικό πεδίο, ενώ προσφέρει πλεονεκτήματα της ολοκλήρωσης συμπεριλαμβανομένων των μειωμένων απαιτήσεων ισχύος και μεγέθους.

Τα βασικά συστατικά του οπτικού δρομολογητή LASOR [11] είναι μια δομή εναλλαγής πακέτων (packet switching fabric), ένας οπτικός ενταμιευτής, ένα στοιχείο δρομολόγησης ανίχνευσης μήκους κύματος (wavelength sensitive routing element) και ένα στοιχείο αναγέννησης δεδομένων.

Ο εναλλάκτης πακέτων μετατρέπει τα οπτικά πακέτα σε άλλο μήκος κύματος, βάση των πληροφοριών που βρίσκονται σε έναν lookup table. Ο οπτικός ενταμιευτής χρησιμοποιείται για τη διευθέτηση των συγκρούσεων μεταξύ πακέτων που οδεύουν στην ίδια θύρα εξόδου. Ένα στοιχείο δρομολόγησης ανίχνευσης μήκους κύματος συνδυάζεται με έναν all-optical μετατροπέα μήκους κύματος, με σκοπό την προώθηση πακέτων απ' τους ενταμιευτή των εισόδων στις θύρες εξόδου. Αυτά τα στοιχεία συμπεριλαμβάνουν integrated tunable wavelength converters και ολοκληρωμένα κυκλώματα προώθησης πακέτων υψηλής ταχύτητας και απόδοσης, ενσωματωμένους οπτικούς ενταμιευτές, και integrated mode-locked lasers για 3R regeneration.



Σχήμα 3: Η αρχιτεκτονική του LASOR

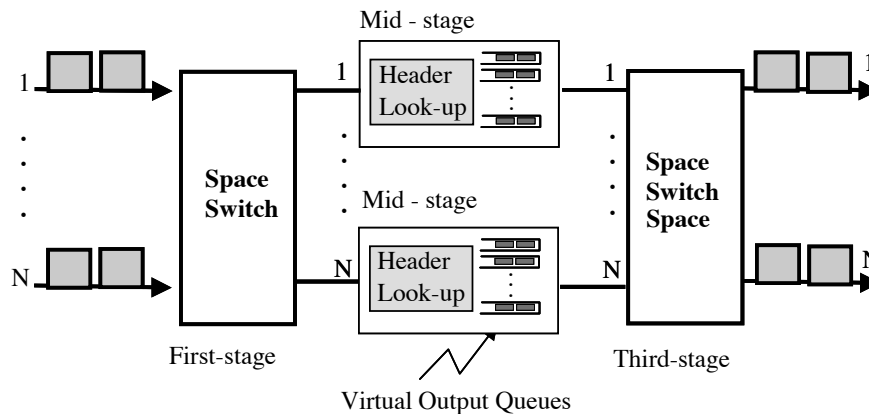
### 3.1 Διερεύνηση και πραγματοποίηση Optical Switch από την ομάδα του U.C. Santa Barbara στο πλαίσιο της αρχιτεκτονικής LASOR

Πραγματοποιήθηκε monolithic integration ενός γρήγορου switch fabric για έναν οπτικό δρομολογητή ενσωματώνοντας 8 MZI-SOA tunable wavelength converters που λειτουργούν στα 40 Gbps και ενός arrayed waveguide grating σε ένα μόνο ολοκληρωμένο κύκλωμα. [12] Το ολοκληρωμένο κύκλωμα MOTOR (Monolithic Tunable Optical Router) περιείχε περισσότερα από 200 ενσωματωμένα λειτουργικά στοιχεία. Η πλατφόρμα ενσωμάτωσης υποστηρίζει τόσο τα ενεργά, όσο και τα χαμηλής απώλειας στοιχεία χρησιμοποιώντας μια

καινοτόμο, single-regrowth, quantum-well intermixing προσέγγιση. Αυτή η πλατφόρμα επιτρέπει τη μείωση των απωλειών απορρόφησης στις περιοχές του AWGR και των delay lines, εκμεταλλευόμενη ένα undoped InP setback layer στα παθητικά τμήματα της συσκευής ενώ βελτιστοποιούνται οι ενεργές λειτουργίες. Το chip έχει τρεις διαφορετικούς τύπους κυματοδηγών: έναν κυματοδηγό surface ridge design στο τμήμα μετατροπής μήκους κύματος, έναν υψηλής αντίθεσης βαθιά χαραγμένο κυματοδηγό στη delay line για σταθερότητα, και έναν buried rib κυματοδηγό στην περιοχή του AWGR για τις απώλειες χαμηλής σκέδασης.

## 4 Αρχιτεκτονική IRIS (2006) ΗΠΑ

Συνδυάζοντας την εξισορρόπηση φορτίου με τη μεταγωγή μήκους κύματος, η αρχιτεκτονική IRIS μπορεί να χρησιμοποιήσει χιλιάδες μήκη κύματος και να παράσχει terabits δυναμικότητας. Η αρχιτεκτονική IRIS χρησιμοποιεί εξισορρόπηση φορτίου για να εξαλείφει την ανάγκη για κεντρικό προγραμματισμό, και μεταγωγή μήκους κύματος επιτρέποντας  $N^2$  διαύλους σε έναν space switch διακόπτη  $N \times N$ . Χρησιμοποιεί τεχνικές εξισορρόπησης φορτίου για την αντιμετώπιση της πολυπλοκότητας του προγραμματισμού συστήματος των διακοπών και της προβληματικής χρήσης δομών τύπου RAM για τη συγκέντρωση των εισερχομένων πακέτων στις εισόδους. Πρακτικά χρησιμοποιούνται τρία επίπεδα συνδέσεων. Τα εισερχόμενα πακέτα των  $N$  εισόδων, διαμοιράζονται μέσω ενός space switch με τυχαίο τρόπο σε  $N$  δομές μνήμης στο μεσαίο επίπεδο. Κάθε μνήμη του μεσαίου επιπέδου διατηρεί  $N$  εικονικές ουρές εξόδου, μια για κάθε θύρα εξόδου, παρόμοια με έναν input-buffered switch. Τα πακέτα τοποθετούνται στις μνήμες με βάση τον τελικό προορισμό τους. Ένας space switch στο τρίτο στάδιο δέχεται τα πακέτα αδειάζοντας τις μνήμες του μεσαίου επιπέδου και τα δρομολογεί στους τελικούς προορισμούς τους.



Σχήμα 4: Η αρχιτεκτονική IRIS

Η έννοια της εξισορρόπησης φορτίου προσφέρει τρία βασικά πλεονεκτήματα που είναι ιδιαίτερα σημαντικά για τον οπτικό δρομολογητή. Κατ'αρχάς, εξαλείφει τον προγραμματισμό και ακόμη μπορεί να εγγυηθεί 100% ρυθμαπόδοση, παρέχοντας μια στρατηγική ώστε η κατανομή της κυκλοφορίας να γίνει ομοιόμορφη και γνωστή, ανεξάρτητα από την πρότερη κατανομή της κυκλοφορίας. Έτσι οι αλγόριθμοι δυναμικού προγραμματισμού αντικαθιστούνται από στατικούς, μειώνοντας την πολυπλοκότητα. Δεύτερον, επιτρέπει τον σχεδιασμό απλών δομών ενταμιευτών βασισμένων σε delay lines. Τρίτον, ορίζει μια non-blocking αρχιτεκτονική που θα μπορούσε να βασίζεται σε blocking space switches, επιτρέποντας έτσι τη δυνατότητα κλιμάκωσης.

Η δυνατότητα επεκτασιμότητας της αρχιτεκτονικής IRIS στηρίζεται σημαντικά στο γεγονός ότι οι διασυνδέσεις του πρώτου και του τρίτου επιπέδου δεν πρέπει να είναι απαραίτητα non-blocking. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί επιλέγοντας μόνο  $N$  permutations συνδέσεων, όπου σε κάθε μία από αυτές τις μεταθέσεις μια δεδομένη θύρα εισόδου μπορεί να μεταδώσει ένα πακέτο σε μια διαφορετική θύρα εξόδου. Ακόμη και αν ένας διακόπτης επιτρέπει μόνο αυτές τις  $N$  μεταθέσεις και εμποδίζει άλλες μεταθέσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα σύστημα ισορρόπησης φορτίου. Αυτή η ιδιότητα μας επιτρέπει να χρησιμοποιούμε scalable blocking wavelength cross-connects, για να χτίσουμε ένα non-blocking σύστημα. Οπότε, χρησιμοποιώντας πακέτα δεδομένων  $40 \text{ Gb/s}$  και  $80 \times 80$  AWGs (Arrayed Waveguide Gratings), η αρχιτεκτονική αυτή μπορεί να κλιμακωθεί σε  $802 \times 40 \text{ Gbps} = 256 \text{ Tbps}$ .

## 5 Η αρχιτεκτονική BOOM (2011) ΕΕ

Το ευρωπαϊκό έργο BOOM επιχειρεί την ανάπτυξη μιας πλατφόρμας φωτονικής δρομολόγησης, βασισμένης σε υβριδικά silicon-on-insulator (SOI) integrated PICs, για την υλοποίηση όλων των λειτουργιών δρομολόγησης, όπως είναι η ανίχνευση ετικετών, η παραγωγή σήματος ελέγχου, η μετατροπή μήκους κύματος (WC: wavelength conversion) και η εναλλαγή μήκους κύματος (WS: wavelength switching).

Ο συγχρονισμός πακέτων μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας οπτικούς ενταμιευτές βασισμένους σε delay lines [13], ή στοιχεία βοηθούμενα από micro-resonators. Τα υβριδικά στοιχεία υλοποιούνται με τεχνικές flip-chip bonding και heterogenous wafer scale integration. Αυτές επιτρέπουν τη δημιουργία στοιχείων όπως είναι οι ultra-fast all-optical wavelength converters, λέιζερ ηλεκτροαπορρόφησης (EML: electroabsorption-modulated lasers), WDM φωτοανιχνευτές και microring resonator (MPP) based διασυνδέσεις σε επιστρώματα πυριτίου.

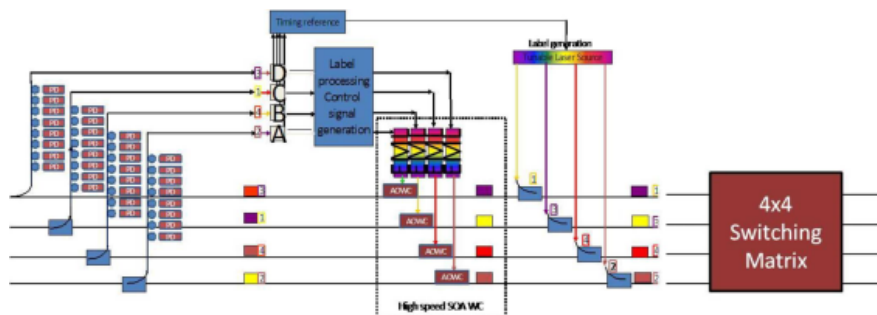
Η αρχιτεκτονική BOOM έχει σύγχρονισμένη εισαγωγή labeled πακέτων σε διαφορετικά μήκη κύματος. Η διαδικασία μεταγωγής αρχίζει με πακέτα που φθάνουν στον κόμβο σε προκαθορισμένες χρονικές θυρίδες και χρησιμοποιούνται τρία υποσυστήματα για τη δρομολόγηση των πακέτων. Το πρώτο εκτελεί ανίχνευση ετικετών μέσω ultra-dense wavelength division (UDWDM) αποδιαμορφωτών που φιλτράρουν τις οπτικές ετικέτες. Ο αποδιαμορφωτής UDWDM περιλαμβάνει συμπαγείς MRRs και συστοιχίες ενσωματωμένων ανιχνευτών κατασκευασμένων σε SOI μέσω τεχνικών die-to wafer bonding.

Τα παραγόμενα ηλεκτρικά σήματα στη συνέχεια παρέχονται για περαιτέρω ηλεκτρονική επεξεργασία. Ο ηλεκτρονικός επεξεργαστής -που μπορεί να είναι τυπικά ένα FPGA- παράγει το σήμα ελέγχου που οδηγεί το all-optical wavelength converter υποσύστημα. Το τελευταίο περιλαμβάνει EMLs και high-speed AOWCs flip-chip integrated στην ίδια SOI πλατφόρμα. Τα EMLs έπτελούν τη μετατροπή από ηλεκτρικό σε οπτικό σήμα (E/O conversion).

Τα οπτικά σήματα οδηγούνται σε ενσωματωμένους υβριδικούς WCs, αλλάζοντας τα μήκη κύματος των εισερχομένων πακέτων δεδομένων και βοηθώντας τη διαδικασία δρομολόγησης.

Οι ultra-fast AOWCs αποτελούνται από InP semiconductor optical amplifiers (SOAs) και από ένα ζεύγος κασκοδικών SOI DIs. Οι SOAs εκτελούν cross gain και phase modulation, ενώ τα κασκοδικά συμβολόμετρα χρησιμοποιούνται για chirp filtering και αναστροφή πολικότητας. Αυτός ο τύπος μετατροπής μήκους κύματος έχει επιδειχθεί με εξαρτήματα διακριτών στοιχείων για datarates πέραν των 160 Gb/s [14]

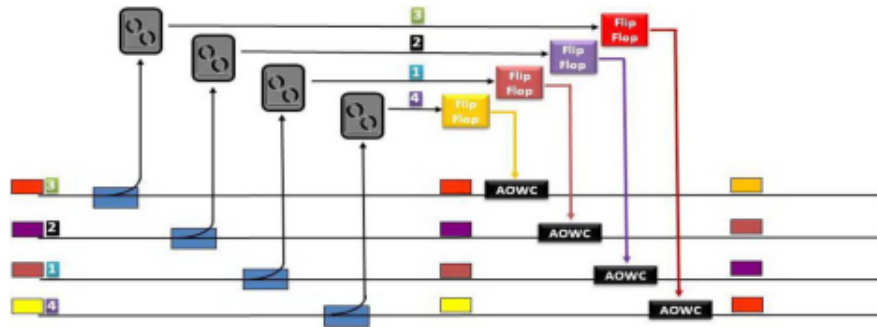
Στην εικόνα 5, φαίνεται η αρχιτεκτονική δρομολόγησης BOOM, χρησιμοποιώντας ένα 4x4 wavelength-based cross-connect με 2-D grids από SOI MRRs. Σύμφωνα με το μήκος κύματος των ετικετών, ενεργοποιείται ένα διαφορετικό σύμπλεγμα από φωτοανιχνευτών, EML και μετατροπών μήκους κύματος, αλλάζοντας το χρώμα των αρχικών ροών πακέτων. Τα πακέτα αλλαγμένου μήκους κύματος εισέρχονται στο 4x4 switching matrix και δρομολογούνται σε συγκεκριμένες εξόδους ανάλογα με το νέο χρώμα του μήκους κύματός τους. Ολόκληρο το σύστημα δρομολόγησης μπορεί να υποστηρίξει ταχύτητες γραμμών 160 Gb / s, με κατανάλωση ισχύος καθοριζόμενη κυρίως από τα στάδια μετατροπής των μηκών κύματος.



Σχήμα 5: Αρχιτεκτονική δρομολόγησης του BOOM

Η πλατφόρμα που χρησιμοποιεί η αρχιτεκτονική BOOM απαιτεί τη συγκέντρωση υβριδικών εξαρτημάτων για τη συναρμολόγηση και την αξιολόγησή της. Δεδομένης όμως της διαθεσιμότητας μιας ποικιλίας παθητικών δομών που μπορούν εύκολα να διασυνδεθούν με εμπορικά ενεργά στοιχεία, θα ήταν δυνατόν να σχεδιαστεί μια ελαφρώς τροποποιημένη αρχιτεκτονική δρομολόγησης, βασισμένη σε all-optical επεξεργασία

σήματος των ετικετών και των πακέτων δεδομένων. Η εικόνα 6 δείχνει το all-optical κύκλωμα που εκτελεί packet switching με MRRs, all-optical flip/flops και ultra-fast wavelength converters.

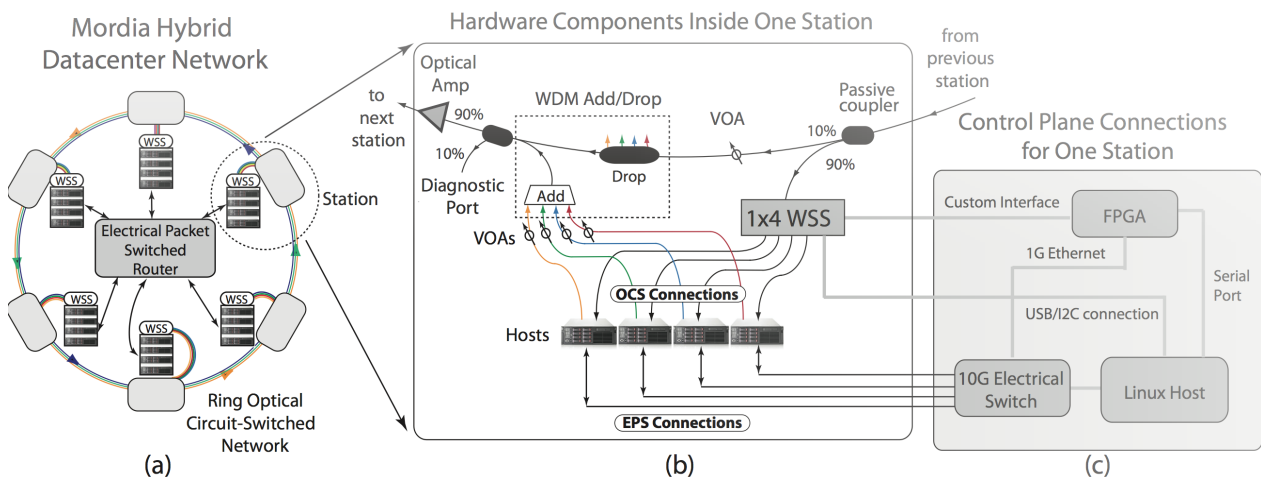


Σχήμα 6: Σχεδιάγραμμα οπτικής μεταγωγής του BOOM

## 6 Δίκτυα των Data centers

Με την αύξηση χρήσης υπηρεσιών cloud, υπηρεσιών πολυμέσων και γενικών web εφαρμογών τα τελευταία έτη, έχει υπάρξει αντίστοιχη εκθετική άνοδος στην κίνηση δεδομένων των data centers. Αυτή η άνοδος στην κίνηση δημιουργεί προκλήσεις διότι για την εξυπηρέτησή της, πρέπει να αυξηθεί η χωρητικότητα του δικτύου, χωρίς να αυξηθεί η καθυστέρηση όπως και, λόγω θερμικών περιορισμών, πρέπει η συνολική κατανάλωση τις υποδομής του δικτύου να παραμείνει στα ίδια επίπεδα. Αυτό είναι ολοένα και πιο δύσκολο με την χρήση ηλεκτρονικών μεταγωγών και γι' αυτόν τον λόγο πληθώρα βιβλιογραφίας υπάρχει για την χρήση οπτικών μεταγωγών εντός των data centers [15].

Λόγο της πολύ δύσκολης μεταγωγής πακέτων στο οπτικό πεδίο, συνδυαστικές λύσεις μπορούν να υλοποιηθούν με οπτική μεταγωγή κυκλώματος για επικοινωνίες μεταξύ σταθμών και συμβατική μεταγωγή πακέτων μετά από μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό [16] [17]. Τέτοιες υλοποιήσεις υπάρχουν και έχουν αποδειχθεί πειραματικά πως δεν υστερούν ούτε σε ταχύτητα ούτε σε απόδοση [16].

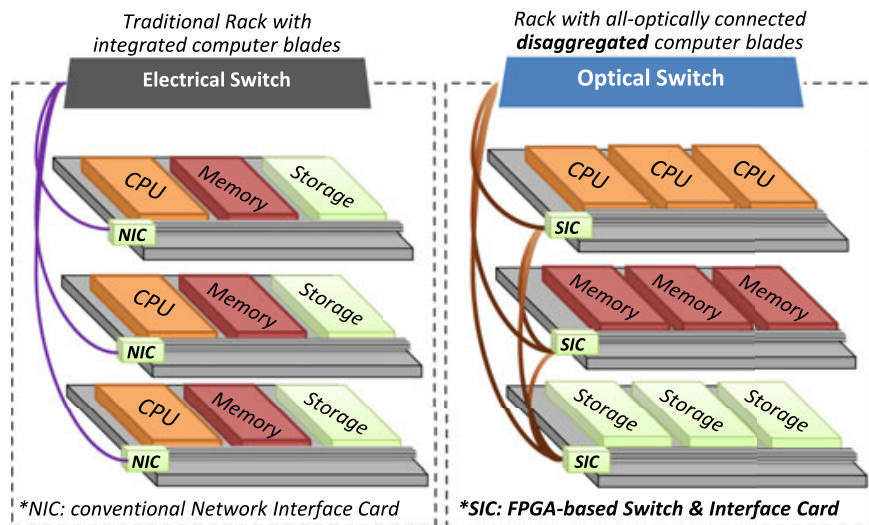


Σχήμα 7: Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος Mordia

Μία ειδική σχεδίαση data centers η οποία παρουσιάζει αύξηση χρήσης είναι με disaggregated computer blades όπου αντί για κάθε υπολογιστική φέτα να είναι ένας αυτόνομος υπολογιστής, κάθε φέτα έχει συγκεκριμένο ρόλο (επεξεργασία/ μνήμη/ αποθήκευση) και λειτουργεί συνδυαστικά με όλο το rack. Ένα τέτοιο σύστημα χρειάζεται πολύ γρήγορη επικοινωνία εντός του rack και ένα οπτικό δίκτυο πλέγματος ενδεικνύεται. Όμως λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων εντός του rack, η χρήση ενός κοινού μεταγωγέα δεν είναι ιδανική και προτείνεται η μεταφορά της μεταγωγής εντός της κάθε φέτας. Αυτό γίνεται με την σχεδίαση ει-



δικών switch and interface cards (SIC) οι οποίες βασίζονται σε FPGAs και δίνουν την δυνατότητα επιλογής χρήσης οπτικής μεταγωγής πακέτων, οπτική μεταγωγή κυκλώματος και TDM/WDM. Έτσι, σε συνδυασμό με ένα κεντρικό οπτικό μεταγωγέα κυκλώματος για την επικοινωνία εκτός του rack μπορεί να επιτευχθεί μια εξολοκλήρου οπτική μεταγωγή σε ένα ολόκληρο data center [18].



Σχήμα 8: Disaggregated blades optical communication

## 7 Δίκτυα εντός ολοκληρωμένων και πλακετών

Μία απρόσμενη χρήση των οπτικών δικτύων και κατ' επέκταση ανάγκη για οπτική μεταγωγή είναι στις εσωτερικές διασυνδέσεις των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Η απόδοση πολυπύρηνων επεξεργαστών εξαρτάται πέρα από την απόδοση του κάθε πυρήνα ξεχωριστά, και από την απόδοση τις επικοινωνίας των πυρήνων αυτών. Με την συμπίκνωση πολλών πυρήνων πάνω σε ένα ολοκληρωμένο, ο τύπος διασύνδεσης έχει αλλάξει από μέσω δίαυλου, σε δίκτυα [19], [20]. Γι' αυτόν τον λόγο ο καθοριστικός παράγοντας ποια για την ολική απόδοση ενός ολοκληρωμένου είναι τα χαρακτηριστικά της διασύνδεσης του, η οποία όταν ακολουθεί μία συμβατική, ηλεκτρική σχεδίαση εισάγει μεγάλη κατανάλωση, άρα και θερμική έξοδο, περιορισμένη ταχύτητα και υψηλή καθυστέρησή. Οπότε η χρήση οπτικών δικτύων για την διασύνδεση πάνω στα ολοκληρωμένα, θεωρείται μια πιθανή λύση *circuit-optical-requirements*.

Πολλαπλές τοπολογίες δικτύου και μεθόδους μεταγωγής δοκιμάζονται στην βιβλιογραφία αναλόγως με τις ανάγκες τις κάθε υλοποίησης. Η ερευνητική κοινότητα φαίνεται να επικεντρώνεται στην τοπολογία πλέγματος λόγω της συμμετρίας του και του απλού αλγορίθμου δρομολόγησης. Στοιχεία τέτοιων δικτύων μπορούν να είναι 5-θυρών οπτικοί δρομολογητές χτισμένοι πάνω στο πυρίτιο οι οποίοι χρησιμοποιούν συμβατικές τεχνολογίες μεταγωγών κυκλωμάτων [21]

Πολυπλοκότερες διατάξεις είναι απαραίτητες όταν η διασύνδεση πρέπει να ακολουθεί κάποιο ποιο πολύπλοκο πρωτόκολλο όπως το Ethernet, άρα και υπάρχει η ανάγκη για μεταγωγή πακέτων. Στην περίπτωση των διασυνδέσεων εντός ενός ολοκληρωμένου, ή εντός μιας πλακέτας, η ανάγκη ενταμιευτών μπορεί να αποφευχθεί και η χρήση ενός αποκλειστικά οπτικού μεταγωγέα πολύ υψηλής ρυθμαπόδοσης έχει πολύ καλή συμπεριφορά. [22]

## 8 Μη οπτική μεταγωγή

Όπως αναφέρθηκε, η ηλεκτρική μεταγωγή κυριαρχεί το μεγαλύτερο μέρος των οπτικών επικοινωνιών. Αν και αυτό απαιτεί την μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό και μετά ξανά πίσω στο οπτικό, οι ταχύτητες όπου είναι δυνατόν να επιτευχθούν είναι της τάξης των 400Gbps [23]. Επίσης πολλαπλά τέτοια

σήματα μπορούν να πολυπλεχτούν και να περάσουν από μία μοναδική ίνα προσφέροντας πολλαπλάσια ταχύτητα όπου φτάνει στα 1.6Tbps.

Κάποιες λύσεις βασίζονται αποκλειστικά στην στην πολυπλεξία μήκους κύματος (WDM) πολλαπλών ποιο αργών σημάτων ταχύτητας 50, 25 ή 10Gbps [24] [25] [26], όπου η χρήση συμβατικών switches είναι εφικτή. Ο τρόπος με τον οποίος μπορεί να επιτευχθεί αυτό είναι απλός, διότι η προτυποποιημένη υποδοχή SFP όπου έχουν τα περισσότερα επαγγελματικά switches επιτρέπει την μετατροπή ηλεκτρικού ethernet σήματος σε διάφορα άλλα (όπως οπτικό). Η μετατροπή του ηλεκτρικού σήματος σε οπτικό και αντίστοιχα του οπτικού σε ηλεκτρικό γίνεται πάνω στον SFP αντάπτορα οπότε η χρήση διαφορετικών μηκών κύματος γίνεται με την εισαγωγή του κατάλληλου αντάπτορα. Τα πολλαπλά αυτά οπτικά σήματα τα οποία μεταδίδονται σε ξεχωριστές ίνες, πολυπλέκονται σε έναν WDM πολυπλέκτη ο οποίος συνενώνει τα διάφορα σήματα και τα μεταδίδει μέσω μίας οπτικής ίνας. Εκεί που καταλήγει η οπτική ίνα, αντιστρέφεται η διαδικασία με την χρήση αντιστοιχου εξοπλισμού.



(α) DCMD-18



(β) SFP modules

Σχήμα 9: (9α) 18 Channels Double Fiber Passive CWDM Mux/Demux by edge optical solutions (9β) SFP modules for different wave lengths by Accent Optics

## Αναφορές

- [1] T. S. El-Bawab and J.-D. Shin, “Optical packet switching in core networks: between vision and reality,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, pp. 60–65, Sept 2002.
- [2] C. Guillemot, M. Renaud, P. Gambini, C. Janz, I. Andonovic, R. Bauknecht, B. Bostica, M. Burzio, F. Callegati, M. Casoni, D. Chiaroni, F. Clerot, S. L. Danielsen, F. Dorgeuille, A. Dupas, A. Franzen, P. B. Hansen, D. K. Hunter, A. Kloch, R. Krahenbuhl, B. Lavigne, A. L. Corre, C. Raffaelli, M. Schilling, J. . Simon, and L. Zucchelli, “Transparent optical packet switching: the european acts keops project approach,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 16, pp. 2117–2134, Dec 1998.
- [3] L. Dittmann, C. Develder, D. Chiaroni, F. Neri, F. Callegati, W. Koerber, A. Stavdas, M. Renaud, A. Rafel, J. Sole-Pareta, W. Cerroni, N. Leligou, L. Dembeck, B. Mortensen, M. Pickavet, N. L. Sauze, M. Mahony, B. Berde, and G. Eilenberger, “The european ist project david: a viable approach toward optical packet switching,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, pp. 1026–1040, Sept 2003.
- [4] L. Stampoulidis, K. Vysokinos, K. Voigt, L. Zimmermann, F. Gomez-Agis, H. J. S. Dorren, Z. Sheng, D. V. Thourhout, L. Moerl, J. Kreissl, B. Sedighi, J. Scheytt, A. Pagano, and E. Riccardi, “The european boom project: Silicon photonics for high-capacity optical packet routers,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 16, pp. 1422–1433, Sept 2010.

- [5] D. Chiaroni, G. Buform, C. Simonneau, S. Etienne, and J. Antona, "Optical packet add/drop systems," in *2010 Conference on Optical Fiber Communication (OFC/NFOEC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference*, pp. 1–3, March 2010.
- [6] J. S. Barton, M. L. Masanovic, M. M. Dummer, A. Tauke-Pedretti, E. F. Burmeister, B. R. Koch, J. A. Summers, L. A. Coldren, J. E. Bowers, and D. J. Blumenthal, "Recent progress on laser optical router and related integrated technologies," in *2008 International Conference on Photonics in Switching*, pp. 1–2, Aug 2008.
- [7] J. Gripp, D. Stiliadis, J. E. Simsarian, P. Bernasconi, J. D. L. Grange, L. Zhang, L. Buhl, and D. T. Neilson, "Iris optical packet router [invited]," *J. Opt. Netw.* 5, 589–597, 2006.
- [8] U. unknown CONTA lab, "Σεμινάριο τηλεκπέδευσης conta,"
- [9] A. Lattes, H. Haus, F. Leonberger, and E. Ippen, "An ultrafast all-optical gate," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 19, pp. 1718–1723, November 1983.
- [10] N. S. Patel, K. L. Hall, and K. A. Rauschenbach, "Interferometric all-optical switches for ultrafast signal processing," *Appl. Opt.*, vol. 37, pp. 2831–2842, May 1998.
- [11] D. Wolfson, V. Lal, M. Masanovic, H. N. Poulsen, C. Coldren, G. Epps, D. Civallo, P. Donner, and D. J. Blumenthal, "All-optical asynchronous variable-length optically labelled 40 gbps packet switch," in *2005 31st European Conference on Optical Communication, ECOC 2005*, vol. 6, pp. 49–50 vol.6, Sept 2005.
- [12] S. C. Nicholes, M. L. Mašanovic, B. Jevremovic, E. Lively, L. A. Coldren, and D. J. Blumenthal, "Integration technologies for an 8×8 inp-based monolithic tunable optical router with 40gb/s line rate per port," in *2010 22nd International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM)*, pp. 1–4, May 2010.
- [13] D. J. Blumenthal, J. Barton, N. Beheshti, J. E. Bowers, E. Burmeister, L. A. Coldren, M. Dummer, G. Epps, A. Fang, Y. Ganjali, J. Garcia, B. Koch, V. Lal, E. Lively, J. Mack, M. Masanović, N. McKeown, K. Nguyen, S. C. Nicholes, H. Park, B. Stamenic, A. Tauke-Pedretti, H. Poulsen, and M. Sysak, "Integrated photonics for low-power packet networking," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 17, pp. 458–471, March 2011.
- [14] F. Gomez-Agis, O. Raz, S. J. Zhang, E. Tangdiongga, L. Zimmermann, K. Voigt, C. Vysokinos, L. Stampoulidis, and H. J. S. Dorren, "All-optical wavelength conversion at 160 gbit/s using soa and silicon-on-insulator photonic circuit," *Electronics Letters*, vol. 45, pp. 1132–1133, October 2009.
- [15] C. Kachris and I. Tomkos, "A survey on optical interconnects for data centers," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 14, pp. 1021–1036, Fourth 2012.
- [16] N. Farrington, A. Forencich, P. Sun, S. Fainman, J. Ford, A. Vahdat, G. Porter, and G. Papen, "A 10 μs hybrid optical-circuit/electrical-packet network for datacenters," in *2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, pp. 1–3, March 2013.
- [17] N. Farrington, G. Porter, S. Radhakrishnan, H. H. Bazzaz, V. Subramanya, Y. Fainman, G. Papen, and A. Vahdat, "Helios: A hybrid electrical/optical switch architecture for modular data centers," in *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2010 Conference, SIGCOMM '10*, (New York, NY, USA), pp. 339–350, ACM, 2010.
- [18] Y. Yan, G. M. Saridis, Y. Shu, B. R. Rofoee, S. Yan, M. Arslan, T. Bradley, N. V. Wheeler, N. H. Wong, F. Poletti, M. N. Petrovich, D. J. Richardson, S. Poole, G. Zervas, and D. Simeonidou, "All-optical programmable disaggregated data centre network realized by fpga-based switch and interface card," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, pp. 1925–1932, April 2016.

- [19] R. G. Beausoleil, P. J. Kuekes, G. S. Snider, S.-Y. Wang, and R. S. Williams, “Nanoelectronic and nanophotonic interconnect,” *Proc. IEEE*, vol. 96, no. 2, pp. 230–247, Feb 2008.
- [20] B. G. Lee, A. Biberman, J. Chan, and K. Bergman, “High-performance modulators and switches for silicon photonic networks-on-chip,” *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 16, no. 1, pp. 6–22, Jan/Feb 2010.
- [21] H. Jia, Y. Zhao, L. Zhang, Q. Chen, J. Ding, X. Fu, and L. Yang, “Five-port optical router based on silicon microring optical switches for photonic networks-on-chip,” *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, VOL. 28, NO. 9, May 2016.
- [22] H. Hu, H. Ji, M. Galili, M. Pu, K. Yvind, P. Jeppesen, and L. K. Oxenløwe, “160 gbit/s optical packet switching using a silicon chip,” in *IEEE Photonics Conference 2012*, pp. 915–916, Sept 2012.
- [23] “Ieee standard for ethernet - amendment 10: Media access control parameters, physical layers, and management parameters for 200 gb/s and 400 gb/s operation,” *IEEE Std 802.3bs-2017 (Amendment to IEEE 802.3-2015 as amended by IEEE’s 802.3bw-2015, 802.3by-2016, 802.3bq-2016, 802.3bp-2016, 802.3br-2016, 802.3bn-2016, 802.3bz-2016, 802.3bu-2016, 802.3bv-2017, and IEEE 802.3-2015/Cor1-2017)*, pp. 1–372, Dec 2017.
- [24] “Ieee draft standard for ethernet amendment: Media access control parameters for 50 gb/s and physical layers and management parameters for 50 gb/s, 100 gb/s, and 200 gb/s operation,” *IEEE P802.3cd/D3.4, July 2018 (Amendment of IEEE Std 802.3-201x as amended by IEEE Std 802.3cb-201x and IEEE Std 802.3bt-201x)*, pp. 1–417, Jan 2018.
- [25] “Ieee standard for ethernet - amendment 2: Media access control parameters, physical layers, and management parameters for 25 gb/s operation,” *IEEE Std 802.3by-2016 (Amendment to IEEE Std 802.3-2015 as amended by IEEE Std 802.3bw-2015)*, pp. 1–244, July 2016.
- [26] “Standard for information technology - telecommunications and information exchange between systems – lan/man - specific requirements part 3: Csma/cd access method and physical layer specifications - amendment: Physical layer and management parameters for 10 gb/s operation, type 10gbase-t,” *IEEE Std 802.3an-2006 (Amendment to IEEE Std 802.3-2005)*, pp. 1–181, Sept 2006.