



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

## **Αμιγώς Οπτικός 2×2 Διακόπτης Μεταγωγής με Χρήση Ισχυρά μη Γραμμικής Ίνας Οξειδίου του Βισμούθιου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Ε. Μαρινάκης

**Επιβλέπων :** Ηρακλής Αβραμόπουλος  
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2006





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

## Αμιγώς Οπτικός 2×2 Διακόπτης Μεταγωγής με Χρήση Ισχυρά μη Γραμμικής Ίνας Οξειδίου του Βισμούθιου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Ε. Μαρινάκης

**Επιβλέπων :** Ηρακλής Αβραμόπουλος  
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 13<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου 2006.

.....  
Ηρακλής Αβραμόπουλος  
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Νικόλαος Ουζούνουλου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Κωνσταντίνος Δέρβος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2006

.....  
Νικόλαος Ε. Μαρινάκης

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

Copyright © Νικόλαος Ε. Μαρινάκης, 2006.

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 σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση, η θεωρητική ανάλυση, η πειραματική υλοποίηση και η προσομοίωση μιας διάταξης αμιγώς οπτικού 2×2 διακόπτη μεταγωγής. Τέτοιου είδους πειράματα έχουν ως τελικό σκοπό την ανάπτυξη των αμιγώς οπτικών δικτύων μεταγωγής πακέτου, τα οποία επιτυγχάνουν αποδοτικότερη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, απαλλάσσοντας τους κόμβους από το ηλεκτρονικό “μποτιλιάρισμα”. Ο 2×2 διακόπτης είναι ένα στοιχείο δύο εισόδων και δύο εξόδων. Ανάλογα με την απουσία ή την παρουσία ενός κατάλληλου σήματος ελέγχου, τα δύο σήματα εισόδου εξέρχονται είτε από τις αντίστοιχες θύρες εξόδου (κατάσταση μη μεταγωγής) είτε εναλλάσσονται σε αυτές (κατάσταση μεταγωγής).

Ο 2×2 διακόπτης βασίζεται τη λειτουργία του στο Μη Γραμμικό Συμβολόμετρο Υπερυψηλής Ταχύτητας, το βασικό δομικό στοιχείο του οποίου συνιστά μια ισχυρά μη γραμμική ίνα Οξειδίου του Βισμούθιου. Το μη γραμμικό φαινόμενο το οποίο εκμεταλλευόμαστε είναι η ετεροδιαμόρφωση φάσης στο εσωτερικό της εν λόγω ίνας. Τα αποτελέσματα του πειράματος κατέδειξαν πολύ ικανοποιητική λειτουργία του 2×2 διακόπτη, τόσο στην κατάσταση μη μεταγωγής όσο και στην κατάσταση μεταγωγής. Επιπρόσθετα, η λειτουργία της διάταξης προσομοιώθηκε με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού πακέτου. Η χρησιμοποίηση της ισχυρά μη γραμμικής ίνας και ιδιαίτερα το πολύ μικρό μήκος της προσδίδουν στην διάταξη του 2×2 διακόπτη πολλά και σημαντικά πλεονεκτήματα. Έτσι, η διάταξη αυτή μπορεί να αποτελέσει τη βασική μονάδα υλοποίησης συνθετότερων διατάξεων με επιθυμητά λειτουργικά χαρακτηριστικά.

# ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

---

Αμιγώς οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτου, 2×2 αμιγώς οπτικός διακόπτης μεταγωγής, Μη Γραμμικό Συμβολόμετρο Υπερυψηλής Ταχύτητας, ισχυρά μη γραμμική ίνα Οξειδίου του Βισμούθιου, ετεροδιαμόρφωση φάσης.

# ABSTRACT

---

The goal of the present diploma thesis is the design, the theoretical analysis, the experimental implementation and the simulation of a  $2 \times 2$  all – optical exchange – bypass switch. The final goal of such experiments is the development of all – optical packet switching networks, which obtain more efficient utilization of the available bandwidth, releasing the nodes from electronic “bottleneck”. The device of  $2 \times 2$  exchange – bypass switch consists of two input and two output ports. Given the absence or the presence of an appropriate control signal, the two input signals either pass through to the corresponding output ports (bar state) or they are interchanged at the output ports of the switch (cross state).

Operation of this  $2 \times 2$  all – optical exchange – bypass switch is based on the Ultrafast Nonlinear Interferometer (UNI), whose basic structural element is a highly nonlinear Bismuth Oxide fiber. The nonlinear phenomenon which is being exploited is Cross Phase Modulation (XPM) inside this fiber. The experimental results showed very satisfactory operation of the  $2 \times 2$  switch, both in bar state and in cross state. Besides, operation of the device was also simulated using appropriate software. Use of highly nonlinear fiber and especially its very short length offer the device of  $2 \times 2$  switch many and important benefits. Thus, this device can become the basic structural unit of more complex devices with desirable operational characteristics.

# KEY WORDS

---

All – optical packet switching networks,  $2 \times 2$  all – optical exchange – bypass switch, Ultrafast Nonlinear Interferometer (UNI), highly nonlinear Bismuth Oxide fiber, Cross Phase Modulation (XPM).

# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

---

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του αναπληρωτή καθηγητή και διευθυντή του εργαστηρίου κ. Ηρακλή Αβραμόπουλου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Αβραμόπουλο που με εμπιστεύτηκε για τη διπλωματική εργασία, μου έδωσε τις βασικές κατευθύνσεις και με βοήθησε με τις γνώσεις του σε οποιαδήποτε δυσκολία μου παρουσιάστηκε. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους υποψηφίους διδάκτορες του εργαστηρίου Όλγα Ζουραράκη και Παρασκευά Μπακόπουλο για την άποψη συνεργασία που είχαμε και την αμέριστη βοήθεια που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Ακόμη, ευχαριστώ και όλους τους υπόλοιπους ερευνητές του εργαστηρίου (διδάκτορες και υποψηφίους διδάκτορες) για την προθυμία τους να επιλύσουν οποιοδήποτε πρόβλημα αντιμετώπισα και για τη δημιουργία ευχάριστου κλίματος στο εργαστήριο.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλα εκείνα τα πρόσωπα εντός κι εκτός σχολής, τα οποία με στήριξαν και με βοήθησαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, καθώς και όσα είχαν την ικανότητα να ομορφαίνουν την καθημερινότητά μου όλα αυτά τα χρόνια. Ιδιαίτερος ευχαριστώ τον συμφοιτητή και επιστήθιο φίλο μου Χρήστο Μπεργελέ και του εύχομαι ολόψυχα καλή συνέχεια στις σπουδές του και καλή μετέπειτα σταδιοδρομία, την οποία είμαι σίγουρος ότι θα έχει. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου, τον αδελφό μου Αχιλλέα και του γονείς μου Βαγγέλη και Θέκλα, οι οποίοι μου παρέχουν την αμέριστη συμπαράσταση και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Νίκος Μαρινάκης





# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ: ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΤΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ .....</b>	<b>11</b>
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ .....	11
1.2 ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ – ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΙΚΤΥΩΝ .....	13
1.3 ΜΕΤΑΓΩΓΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ – ΜΕΤΑΓΩΓΗ ΠΑΚΕΤΟΥ .....	15
1.4 ΤΑ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΠΡΩΤΗΣ ΚΑΙ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΓΕΝΕΑΣ .....	18
1.5 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑΣ .....	25
1.6 ΤΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΑ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΤΡΙΤΗΣ ΓΕΝΕΑΣ .....	28
1.7 ΑΜΙΓΩΣ ΟΠΤΙΚΟΣ 2×2 ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ .....	31

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

<b>ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΟΥ ΥΠΕΡΥΨΗΛΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ (UNI) ΜΕ ΙΣΧΥΡΑ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΙΝΑ .....</b>	<b>33</b>
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ .....	33
2.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ UNI ΜΕ ΕΝΑ ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ .....	35
2.2.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΗ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ .....	39

2.2.2	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ .....	41
2.3	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ UNI ΜΕ ΕΝΑ ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ .....	44
2.4	ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΤΕΡΟΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΦΑΣΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ .....	49
2.4.1	ΚΥΜΑΤΑ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΦΕΡΟΥΣΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΑΛΛΑ ΒΡΙΣΚΟΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΙΔΙΑ ΠΟΛΩΣΗ .....	51
2.5	ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ – ΤΟ ΒΙΣΜΟΥΘΙΟ ΩΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥΣ .....	54
2.5.1	ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ .....	54
2.5.2	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΙΣΧΥΡΑ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΙΝΩΝ ΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΒΙΣΜΟΥΘΙΟΥ .....	58
2.6	ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ UNI ΩΣ 2×2 ΟΠΤΙΚΟΣ ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ .....	62
2.6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ .....	62
2.6.2	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΗ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ .....	65
2.6.3	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ .....	68

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

	<b>ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ 2×2 ΟΠΤΙΚΟΥ ΔΙΑΚΟΠΤΗ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ .....</b>	<b>73</b>
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ .....	73
3.2	ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ .....	74
3.2.1	ΜΟΡΦΗ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ .....	74
3.2.2	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ 2×2 ΔΙΑΚΟΠΤΗ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ .....	77
3.3	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ .....	82
3.3.1	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΣΗΜΑΤΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ .....	84

3.3.1.1 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ 1 .....	89
3.3.1.2 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ 2 .....	94
3.3.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ .....	97
3.3.3 ΚΥΚΛΩΜΑ ΤΟΥ 2×2 ΟΠΤΙΚΟΥ ΔΙΑΚΟΠΤΗ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ .....	98
3.3.4 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΥΟ ΣΗΜΑΤΩΝ ΕΞΟΔΟΥ .....	101
3.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ .....	104
3.4.1 ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟΝ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟ ΚΑΙ ΣΤΟΝ ΑΥΤΟΣΥΣΧΕΤΙΣΤΗ .....	104
3.4.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΥΘΜΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ (BER) .....	112

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

<b>ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΤΟΥ UNI ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ VPI .....</b>	<b>117</b>
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ .....	117
4.2 Η ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ UNI ΠΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΤΗΚΕ ΣΤΟ VPI .....	118
4.2.1 ΣΗΜΑΤΑ ΕΙΣΟΔΟΥ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ .....	119
4.2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ .....	121
4.2.3 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΙΣΧΥΡΑ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΙΝΑΣ .....	125
4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΕΝΟΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ ΡΥΘΜΟΥ 10 Gbps .....	127
4.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΕΝΟΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ ΡΥΘΜΟΥ 40 Gbps .....	137
4.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΔΥΟ ΣΗΜΑΤΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ .....	148

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### **ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ**

#### **2×2 ΟΠΤΙΚΟΥ ΔΙΑΚΟΠΤΗ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ**

#### **ΣΤΑ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ ΠΑΚΕΤΟΥ ..... 159**

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ..... 159

5.2 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ..... 160

5.3 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΠΟΛΥΠΛΕΚΤΩΝ  
ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ – ΑΦΑΙΡΕΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ..... 162

5.4 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΗΜΙΑΘΡΟΙΣΤΩΝ ..... 163

5.5 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΑΦΑΙΡΕΣΗΣ  
ΚΑΙ ΕΠΑΝΑΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΕΠΙΚΕΦΑΛΙΔΑΣ ΠΑΚΕΤΩΝ ..... 165

5.6 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ  
ΑΝΤΙΜΕΤΑΘΕΣΗΣ ΧΡΟΝΟΣΧΙΣΜΩΝ ..... 167

5.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ..... 168

#### **ΑΝΑΦΟΡΕΣ ..... 169**

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ: ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΤΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

---

### 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

Αναμφισβήτητα, η σημερινή εποχή μπορεί να χαρακτηριστεί ως η εποχή της πληροφορίας. Η μαζική αύξηση της διαθεσιμότητας φθηνών και ιδιαίτερα γρήγορων προσωπικών υπολογιστών έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη μεγάλης κλίμακας δικτύων, τα οποία εξυπηρετούν έναν πολύ μεγάλο αριθμό χρηστών. Πλέον καθίσταται απαραίτητη η απευθείας επικοινωνία σε πολύ μεγάλες ταχύτητες μεταξύ ενός ολοένα αυξανόμενου αριθμού τερματικών, με αποτέλεσμα να προβάλλεται ως επιτακτική η ανάγκη για ανάπτυξη νέων τύπων δικτύων τα οποία θα είναι σε θέση να ικανοποιήσουν την απαιτούμενη χωρητικότητα. Η μεγάλη ζήτηση σε εύρος ζώνης τροφοδοτείται από μια πλειάδα παραγόντων, μερικοί από τους οποίους είναι οι εξής:

- Η ανάπτυξη του Internet και του παγκόσμιου ιστού, όπου διαδικασίες όπως μεταφορά αρχείων, video κτλ επιτελούνται από έναν τεράστιο αριθμό χρηστών.
- Η αυξανόμενη ανάπτυξη τεχνολογιών ευρυζωνικής πρόσβασης όπως για παράδειγμα η ψηφιακή συνδρομητική γραμμή (DSL) και τα καλωδιακά modem.
- Η συνεχής δικτύωση επιχειρήσεων με γραμμές μεταφοράς πολύ υψηλών ταχυτήτων είτε για εσωτερική είτε για εξωτερική αλληλοσύνδεση.

- Οι αλλαγές στον τύπο της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, καθώς στα δίκτυα επικοινωνιών παρουσιάζεται συνεχής αύξηση στη μετάδοση δεδομένων.

Σήμερα η τεχνολογία εκείνη η οποία υπόσχεται να δώσει λύση στην αυξανόμενη ζήτηση για εύρος ζώνης είναι η φωτονική τεχνολογία. Το μέσο μετάδοσης των φωτονικών δικτύων είναι η οπτική ίνα. Σε σύγκριση με το καλώδιο χαλκού ή την ασύρματη μετάδοση, η οπτική ίνα παρέχει την δυνατότητα μετάδοσης που χαρακτηρίζεται από χαμηλές απώλειες και πάρα πολύ υψηλούς ρυθμούς (της τάξεως των Tbps με εφαρμογή συγκεκριμένων τεχνικών πολυπλεξίας). Ακόμη, το φασματικό εύρος μετάδοσης είναι της τάξης των 25 THz και είναι πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης οποιουδήποτε άλλου μέσου μετάδοσης [1], ενώ ο ρυθμός σφαλμάτων που επιτυγχάνεται είναι ιδιαίτερος χαμηλός.

Η δυνατότητα μετάδοσης ψηφιακών εικόνων υψηλής ευκρίνειας με κίνηση, ψηφιακής φωνής και παροχής άλλων υπηρεσιών από τους τηλεπικοινωνιακούς οργανισμούς προς τους συνδρομητές γίνεται δυνατή σε μεγάλο βαθμό λόγω της αξιοποίησης των οπτικών ινών στην πράξη. Ακόμη, είναι ιδιαίτερος σημαντικό το γεγονός ότι η ψηφιακή τεχνολογία τηλεπικοινωνιών που άρχισε να αναπτύσσεται από τις αρχές της δεκαετίας του 1960 βρήκε απόλυτη αντιστοιχία με τις τεχνικές μετάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε οπτικές ίνες.

Εντούτοις, παρά την ευρεία χρήση της οπτικής ίνας σε διάφορες δικτυακές εφαρμογές, ακόμη δεν έχει καταστεί δυνατή η εκμετάλλευση όλων των δυνατοτήτων της. Αυτό αναμένεται να συμβεί μόνο με την ανάπτυξη των “αμιγώς οπτικών δικτύων”, τα οποία βρίσκονται ακόμη σε καθαρά ερευνητικό στάδιο. Κύριο χαρακτηριστικό των εν λόγω δικτύων είναι η αμιγώς οπτική επεξεργασία του σήματος και η πλήρης αποφυγή οποιασδήποτε ηλεκτρονικής διάταξης στο δίκτυο. Είναι πλέον σαφές ότι τα ηλεκτρονικά έχουν προσεγγίσει τα όριά τους όσον αφορά την ταχύτητα μετάδοσης. Στα αμιγώς οπτικά δίκτυα οι διάφορες συνδέσεις θα γίνονται μόνο μέσω ενός ενιαίου φυσικού φορέα, χωρίς να διακόπτονται από οπτοηλεκτρονικούς μετατροπείς, με άμεση συνέπεια την πολύ μεγάλη αύξηση στις ταχύτητες μετάδοσης.

Στην συνέχεια θα γίνει μια σύντομη αναφορά στα χαρακτηριστικά και τις παραμέτρους των δικτύων γενικά καθώς και στην εξέλιξη των οπτικών δικτύων που

έχουν υλοποιηθεί μέχρι σήμερα. Έπειτα, θα αναλυθούν τα μελλοντικά οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτου και θα αναδειχθούν οι τεράστιες δυνατότητές τους. Στο τέλος του παρόντος κεφαλαίου γίνεται μια πρώτη αναφορά στη διάταξη του αμιγώς οπτικού 2×2 διακόπτη μεταγωγής (2×2 All – Optical Exchange – Bypass Switch) ως δομικού τμήματος ενός οπτικού δικτύου μεταγωγής πακέτου.

## 1.2 ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ – ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΙΚΤΥΩΝ

Ένα κριτήριο με βάση το οποίο ταξινομούνται τα δίκτυα επικοινωνιών είναι η κλίμακά τους. Οι τρεις κατηγορίες δικτύων είναι οι εξής: Τα τοπικά δίκτυα (LANs), τα μητροπολιτικά δίκτυα (MANs) και τα δίκτυα ευρείας περιοχής (WANs). Αναλυτικότερα, τα χαρακτηριστικά της κάθε κατηγορίας παρατίθενται επιγραμματικά παρακάτω [2]:

Τα **τοπικά δίκτυα** (local area networks), συνήθως αποκαλούμενα LANs, είναι ιδιωτικά δίκτυα εκτεινόμενα εντός ενός μοναδικού κτιρίου ή σε εγκαταστάσεις ακτίνας έως μερικά χιλιόμετρα. Χρησιμοποιούνται ευρύτατα για να συνδέουν προσωπικούς υπολογιστές και σταθμούς εργασίας σε γραφεία εταιρειών και σε εργοστάσια, με σκοπό την κοινή χρήση των μέσων και την ανταλλαγή πληροφοριών. Τα LANs είναι περιορισμένου μεγέθους και συχνά χρησιμοποιούν μια τεχνολογία μετάδοσης που αποτελείται από ένα απλό καλώδιο στο οποίο έχουν συνδεθεί όλα τα τερματικά. Στα LANs εκπομπής διάφορες τοπολογίες είναι εφικτές, όπως για παράδειγμα οι τοπολογίες αρτηρίας και δακτυλίου. Εκείνο που πρέπει να τονιστεί είναι ότι τα LANs δεν απαιτείται να έχουν πολύ μεγάλη χωρητικότητα καθώς εξυπηρετούν τον τελικό χρήστη.

Τα **μητροπολιτικά δίκτυα** (metropolitan area networks) ή MANs είναι βασικά μεγαλύτερες εκδοχές των LANs, συνήθως χρησιμοποιούν παρόμοια τεχνολογία και μπορούν να καλύπτουν ομάδες γειτονικών γραφείων μιας επιχείρησης ή μιας πόλης. Ένα χαρακτηριστικό των MANs είναι η ύπαρξη ενός μέσου εκπομπής πάνω στο οποίο συνδέονται όλοι οι υπολογιστές, κάτι που απλοποιεί ιδιαίτερα τη σχεδίαση σε σύγκριση με άλλα είδη δικτύων. Είναι σημαντικό να έχουν τη δυνατότητα να επεκτείνονται εύκολα αφού γενικά αυξάνονται πολύ γρήγορα.

Τα *δίκτυα ευρείας περιοχής* (wide area networks) ή WANs καλύπτουν μεγάλες γεωγραφικές περιοχές, συχνά χώρες ή και ηπείρους. Στα περισσότερα WANs το υποδίκτυο απαρτίζεται από τα εξής δύο διακριτά στοιχεία: τις γραμμές μετάδοσης και τα στοιχεία μεταγωγής. Οι γραμμές μετάδοσης (αποκαλούμενες επίσης και ζεύξεις, κυκλώματα ή δίαυλοι) μεταφέρουν τα bits ενώ τα στοιχεία μεταγωγής είναι εξειδικευμένοι υπολογιστές που συνδέουν δύο ή περισσότερες γραμμές μετάδοσης. Σε αντίθεση με τα LANs, τα WANs πρέπει απαραίτητως να έχουν υψηλή χωρητικότητα εξαιτίας της πολύ μεγάλης κίνησης την οποία καλούνται να εξυπηρετήσουν.

Το εύρος ζώνης ενός δικτύου οφείλει συνεχώς να αυξάνεται και είναι πλέον επιτακτικό οι νέες συνδέσεις να μπορούν να πραγματοποιηθούν εντός λεπτών ή ωρών από τη στιγμή που θα ζητηθούν και όχι εντός μηνών όπως συνέβαινε παλαιότερα. Πέραν όμως από το εύρος ζώνης οι επιδόσεις όλων των τηλεπικοινωνιακών δικτύων μπορούν να ελεγχθούν από μια σειρά παραμέτρους [3]:

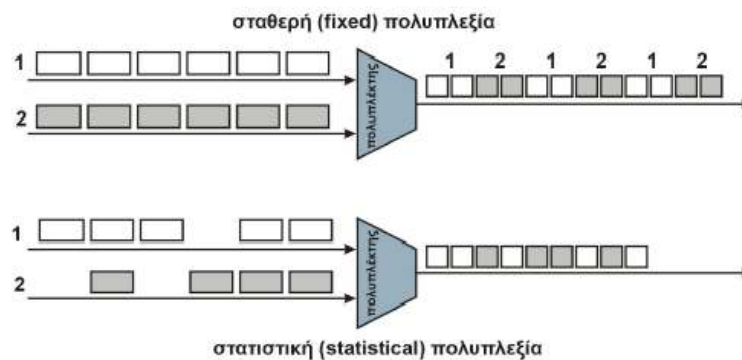
- **Διεισδυτικότητα** (Pervasiveness). Στην ιδανική περίπτωση θα έπρεπε να είναι δυνατή η σύνδεση οποιουδήποτε χρήστη με οποιονδήποτε άλλο.
- **Ικανότητα πρόσβασης ή προσβασιμότητα** (Reachability). Δεν αρκεί να έχει κανείς εγκαταστήσει το φυσικό μέσο της μετάδοσης σε όλη του την έκταση αν δεν παρέχεται η ευχέρεια στους χρήστες να επικοινωνήσουν ο ένας με τον άλλον με ελάχιστα εμπόδια.
- **Ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας** (Bitrate). Είναι στενά συνεζευγμένος με την παράμετρο της διεισδυτικότητας. Όσο μεγαλώνει το bitrate για κάθε χρήστη, τόσο μικραίνει ο αριθμός των χρηστών που μπορεί να υποστηρίξει το δίκτυο.
- **Καθυστερήση ή χρόνος αναμονής ή και λανθάνουσα κατάσταση** (Latency). Πολλές εφαρμογές παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία στο χρόνο. Οι εν λόγω εφαρμογές θα απαιτήσουν τον περιορισμό του πλήθους των “κύκλων επανάληψης χειραψιών μεταξύ πρωτοκόλλων” (round-trip protocol handshakes).
- **Συμβατότητα με διαφορετικά πρωτόκολλα**. Με αυτό τον τρόπο όλοι οι διαφορετικοί τύποι υπηρεσιών μπορούν να προσφερθούν από ένα και μόνο δίκτυο.



- **Διαθεσιμότητα** (Availability). Η λειτουργία χωρίς διακοπές είναι για μερικές εφαρμογές επιτακτική ανάγκη, όπως για παράδειγμα σε ορισμένες ιατρικές εφαρμογές άμεσης επικοινωνίας (on – line). Οι τηλεπικοινωνιακοί φορείς παρέχουν τυπικά 99,999% διαθεσιμότητα, η οποία αντιστοιχεί σε “νεκρό” χρόνο ίσο με 5 λεπτά ανά έτος.
- **Ρυθμός σφάλματος**. Μερικές εφαρμογές όπως η τηλεϊατρική θέτουν δραστικούς περιορισμούς στα όρια του μέγιστου επιτρεπόμενου ρυθμού σφάλματος. Περιορίζεται κυρίως από τις ιδιότητες του φυσικού μέσου καθώς και τη χρησιμοποιούμενη κωδικοποίηση.
- **Ασφάλεια και ιδιωτικό απόρρητο** (Security and privacy).
- **Ποιότητα υπηρεσίας** (Quality of Service – Qos).
- **Χαμηλό κόστος**.

### 1.3 ΜΕΤΑΓΩΓΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ – ΜΕΤΑΓΩΓΗ ΠΑΚΕΤΟΥ

Τα σημερινά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες με βάση τον τρόπο που η κίνηση πολυπλέκεται και μετάγεται μέσα στο δίκτυο: Στα δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος και στα δίκτυα μεταγωγής πακέτου. Γενικά, τα δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος χρησιμοποιούν την τεχνική της σταθερής (fixed) πολυπλεξίας ενώ τα δίκτυα μεταγωγής πακέτου την τεχνική της στατιστικής (statistical) πολυπλεξίας, όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 1.1:



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

Η *μεταγωγή κυκλώματος* (Circuit Switching) [4] χρησιμοποιείται στα κλασικά τηλεφωνικά συστήματα και βασίζεται στην εγκατάσταση ενός κυκλώματος καθ' όλη τη διάρκεια χρήσης μιας αντίστοιχης υπηρεσίας. Συνεπώς, για να χρησιμοποιήσει κάποιος μια υπηρεσία δικτύου βασισμένη σε μεταγωγή κυκλώματος, πρέπει να εγκαταστήσει πρώτα μια σύνδεση την οποία και απολύει όταν δεν επιθυμεί πλέον πρόσβαση στην υπηρεσία. Είναι σαφές ότι η σηματοδότηση στις υπηρεσίες αυτού του τύπου είναι απαραίτητη για την εγκατάσταση, τον έλεγχο και την κατάργηση των συνδέσεων. Ένα επιπρόσθετο χαρακτηριστικό της μεταγωγής κυκλώματος, που απορρέει από το γεγονός της ύπαρξης σύνδεσης μεταξύ των οντοτήτων που επικοινωνούν, είναι ότι τα δεδομένα καταφθάνουν πάντα στον παραλήπτη με τη σειρά που τα μετέδωσε ο αποστολέας, αφού μεταφέρονται στο εκ των προτέρων εγκατεστημένο μονοπάτι μετάδοσης.

Η μεταγωγή κυκλώματος αναφέρεται συχνά και ως τρόπος σύγχρονης μεταφοράς (Synchronous Transfer Mode – STM), ως αποτέλεσμα του ότι η πληροφορία μεταφέρεται με μια συγκεκριμένη συχνότητα επανάληψης (πχ 8 bits / 125 μsec για 64 Kbps). Η βασική μονάδα για αυτή τη συχνότητα επανάληψης ονομάζεται χρονική θυρίδα (time slot) ή κανάλι. Όπως αναφέρθηκε ήδη, το απλούστερο παράδειγμα ενός δικτύου μεταγωγής κυκλώματος είναι το τηλεφωνικό δίκτυο, το οποίο προσφέρει στους τελικούς χρήστες μια μόνιμη σύνδεση με σταθερό εύρος ζώνης (τυπικά 4 KHz), από τη στιγμή της εγκαθίδρυσης της ζεύξης. Το δίκτυο αυτό έχει σχεδιαστεί για τη μεταγωγή φωνής και είναι απόλυτα κατάλληλο για την εφαρμογή αυτή.

Το αδιαμφισβήτητο στοιχείο που συνηγορεί υπέρ της μεταγωγής κυκλώματος είναι η εγγύηση της ποιότητας υπηρεσίας, αφού οι πόροι δεσμεύονται εκ των προτέρων. Ακόμη, η διατήρηση της ορθής σειράς παράδοσης είναι ένα γεγονός που πιστώνεται στα θετικά. Εντούτοις, υπάρχουν σοβαρά μειονεκτήματα τα οποία δεν μπορούν να αγνοηθούν. Πρώτον, η μεταγωγή κυκλώματος οδηγεί σε κατασπατάληση των πόρων του δικτύου, αφού αυτοί εκχωρούνται αρχικά για μία σύνδεση κατά τη διάρκεια εγκατάστασής της. Συνεπώς, δεν είναι σε θέση να υποστηρίξει εφαρμογές “εκρηκτικής” κίνησης δεδομένων (bursty data traffic), αφού οι πόροι παραμένουν δεσμευμένοι καθ' όλη τη διάρκεια της κλίσης, έστω κι αν δεν χρησιμοποιούνται εξ' ολοκλήρου για αυτό το χρονικό διάστημα. Παράλληλα, το κανάλι είναι κβαντισμένο (πχ στα 64 Kbps, 128 Kbps κτλ) πράγμα που περιορίζει σημαντικά την ευελιξία του συστήματος, αφού δεν υπάρχει η δυνατότητα

δυναμικής εκχώρησης εύρους ζώνης. Συνέπεια αυτού είναι ότι ακόμη και μια υπηρεσία συγκριτικά μικρού εύρους ζώνης θα καταλάβει ολόκληρο το κανάλι, οδηγώντας εκ νέου σε κακή διαχείριση των πόρων του δικτύου [4].

Προκειμένου να αντιμετωπισθούν τα μειονεκτήματα της μεταγωγής κυκλώματος, ιδιαίτερα η αδυναμία της να εξυπηρετήσει εφαρμογές εκρηκτικής κίνησης, υιοθετήθηκε η **μεταγωγή πακέτου** (Packet Switching) [5]. Στα συστήματα μεταγωγής πακέτου οι ροές δεδομένων οργανώνονται σε πακέτα, τα οποία πολυπλέκονται με άλλα πακέτα που προέρχονται από άλλες ζεύξεις μέσα στο δίκτυο. Εκτός από την πληροφορία του χρήστη (φορτίο – Payload), τα πακέτα περιέχουν και επιπλέον πληροφορία γνωστή και ως επικεφαλίδα (Header), η οποία χρησιμοποιείται εσωτερικά στο δίκτυο για δρομολόγηση, διόρθωση λαθών, έλεγχο ροής κ.α. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι του δικτύου αναγνωρίζουν τις επικεφαλίδες των πακέτων και τα δρομολογούν ανάλογα με τον εκάστοτε προορισμό τους. Η επανασύνδεση των πακέτων στην αρχική μορφή της ροής δεδομένων γίνεται μόλις αυτά φθάσουν στην επιθυμητή διεύθυνση. Οι εφαρμογές διαδικτύου είναι οι κυριότερες, ίσως, εφαρμογές, οι οποίες χρησιμοποιούν δίκτυα μεταγωγής πακέτων. Στις εφαρμογές αυτές χρησιμοποιείται για την μεταγωγή και τη δρομολόγηση κάθε πακέτου στον επιθυμητό προορισμό του το πρωτόκολλο διαδικτύου (Internet Protocol – IP).

Γενικά, τα δίκτυα μεταγωγής πακέτου χρησιμοποιούν την τεχνική της στατιστικής πολυπλεξίας για τη μεταφορά πολλών εκρηκτικών ροών δεδομένων ταυτόχρονα σε μία ζεύξη [5]. Εφόσον κάθε ροή δεδομένων είναι εκρηκτική, είναι πιθανό ότι σε κάθε χρονική στιγμή κάποιες από αυτές θα είναι ενεργές, ενώ κάποιες άλλες όχι. Εντούτοις, η πιθανότητα να είναι όλες μαζί ενεργές είναι μικρή. Με τον τρόπο αυτό, το εύρος που απαιτείται να έχει η ζεύξη μπορεί να γίνει σημαντικά μικρότερο σε σχέση με το αν όλες οι ροές δεδομένων ήταν ταυτόχρονα ενεργές. Από αυτή την άποψη, η τεχνική της στατιστικής πολυπλεξίας βελτιώνει σε σημαντικό βαθμό την αποδοτικότητα του διαθέσιμου εύρους ζώνης.

Επιπρόσθετα, τα δίκτυα μεταγωγής πακέτου παρέχουν εξυπηρέτηση βέλτιστης προσπάθειας (Best Effort Service), δηλαδή προσπαθούν τα βέλτιστα να μεταφέρουν δεδομένα από την πηγή στον προορισμό όσο το δυνατόν γρηγορότερα, χωρίς όμως να προσφέρουν εγγυήσεις. Αυτού του είδους η εξυπηρέτηση είναι κατάλληλη για έναν

αριθμό εφαρμογών, όπως είναι η πλοήγηση στο διαδίκτυο και η μεταφορά αρχείων, εφαρμογές που δεν είναι ευαίσθητες στη χρονική καθυστέρηση. Από την άλλη πλευρά, εφαρμογές όπως η μετάδοση βίντεο ή φωνής σε πραγματικό χρόνο (Real Time Video – Voice), δε μπορούν να ανεχτούν τυχαίες καθυστερήσεις πακέτων. Για το λόγο αυτό, γίνεται σήμερα μεγάλη προσπάθεια για το σχεδιασμό δικτύων μεταγωγής πακέτου, τα οποία να προσφέρουν εγγυήσεις για την ποιότητα της υπηρεσίας (Quality of Service – QoS) που παρέχουν. Παραδείγματα ποιότητας υπηρεσιών αποτελούν συγκεκριμένες εγγυήσεις για τη μέγιστη χρονική καθυστέρηση πακέτου, για τη μεταβολή της καθυστέρησης αυτής καθώς και για την εξασφάλιση ενός ελάχιστου εύρους ζώνης για κάθε σύνδεση.

Το δίκτυο ATM (Asynchronous Transfer Mode) προήλθε ως συνέπεια των ανωτέρω σκέψεων, ενώ και το IP έχει διαμορφωθεί ώστε να παρέχει παρόμοιες υπηρεσίες. Οι περισσότερες προσπάθειες για ποιότητα υπηρεσίας βασίζονται στην ιδέα ύπαρξης ενός επιπέδου προσανατολισμένου στη σύνδεση (Connection – Oriented). Παράδειγμα αποτελεί το πρωτόκολλο MPLS (Multi – Protocol Label Switching), το οποίο παρέχει εικονικά κυκλώματα (Virtual Circuits) [6]. Τα εικονικά κυκλώματα ωθούν όλα τα πακέτα, που ανήκουν σε ένα κύκλωμα, να ακολουθήσουν την ίδια διαδρομή μέσα από το δίκτυο, επιτρέποντας έτσι ιδανική κατανομή των πόρων αυτού, ώστε να παρέχονται συγκεκριμένες εγγυήσεις QoS, όπως είναι για παράδειγμα οι οριοθετημένες καθυστερήσεις πακέτων. Σε αντίθεση, όμως, με τα δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος τα εικονικά κυκλώματα δεν εγγυώνται την παροχή σταθερού εύρους ζώνης κατά τη διάρκεια της μετάδοσης των πακέτων, καθώς χρησιμοποιείται στατιστική πολυπλεξία μεταξύ των εικονικών κυκλωμάτων ενός δικτύου.

## **1.4 ΤΑ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΠΡΩΤΗΣ ΚΑΙ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΓΕΝΕΑΣ**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το βασικό μέσο μετάδοσης στα οπτικά δίκτυα είναι η *οπτική ίνα*. Η χρησιμοποίηση οπτικών ινών για επικοινωνιακές ζεύξεις προτάθηκε από τους Kao και Hockham το 1966. Αν και εκείνη την εποχή οι καλύτερες ίνες είχαν απώλειες 1000 dB/km, οι Kao και Hockham διατύπωσαν την δυνατότητα κατασκευής

ινών με απώλειες περίπου 20 dB/km, οπότε θα μπορούσαν οι κυματοδηγοί αυτοί να χρησιμοποιηθούν για τηλεπικοινωνιακούς σκοπούς. Άρχισε αμέσως εντατική έρευνα από διάφορα εργαστήρια για την ανάπτυξη ινών με μικρή απόσβεση. Προσεγγίστηκε το τεχνολογικό αυτό πρόβλημα με την ανάπτυξη πολυσυνισταμένων και πλούσιων σε πυρίτιο γυαλιών. Αποδείχθηκε ότι η χρησιμοποίηση πολυσυνισταμένων γυαλιών δεν μπορούσε να αποφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα επειδή η επιτυγχανόμενη καθαρότητα από προσμίξεις είναι μικρή. Παρόλα αυτά αναπτύχθηκαν κυματοδηγοί με απόσβεση 100 dB/km με την μέθοδο αυτή. Οι κυματοδηγοί αυτοί είχαν βαθμιαία κατανομή διηλεκτρικής σταθεράς. Η χρησιμοποίηση πλούσιων σε πυρίτιο γυαλιών απέδωσε το 1970 απόσβεση 20 dB/km για ίνες με ομοιόμορφο πυρήνα και με διάδοση μοναδικού ρυθμού. Με την ίδια τεχνική σύντομα επιτεύχθηκε απόσβεση 4 dB/km [7]. Στο παρακάτω σχήμα 1.2 παρουσιάζεται η πλευρική όψη μίας ίνας και η εγκάρσια όψη ενός περιβλήματος με τρεις ίνες:



**Σχήμα 1.2:** (α) Πλευρική όψη μίας ίνας. (β) Εγκάρσια όψη ενός περιβλήματος με τρεις ίνες.

Η χρήση των οπτικών ινών στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα οδηγεί σε συγκεκριμένα και πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα [2], [8]. Αρχικά, η οπτική ίνα χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα χαμηλό συντελεστή απωλειών. Η ενέργεια παγιδεύεται και εγκλείεται τόσο αποτελεσματικά μέσα στην οπτική ίνα ώστε το κανάλι να μην υπόκειται καθόλου στις επιδράσεις των εξωτερικών πεδίων. Συνεπώς, οι οπτικές ίνες μπορούν να σχηματίζουν ομάδες στις οποίες τα διαδιδόμενα πεδία δεν παρεμβάλλουν μεταξύ τους. Το γεγονός ότι οι οπτικές ίνες δεν παρουσιάζουν διαρροές φωτός καθιστά πολύ δύσκολες τις υποκλοπές, κάτι που κάνει τις ίνες ιδιαίτερα ασφαλείς. Ακόμη, ο εγκλεισμός των οπτικών σημάτων στο εσωτερικό των διαστάσεων της ίνας αποτρέπει την μείωση της πυκνότητας ενέργειας κατά τον γνωστό παράγοντα  $1/r^2$  η οποία λαμβάνει χώρα κατά τη διάδοση

ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στον ελεύθερο χώρο. Το κλειδί αυτής της ιδιότητας των οπτικών ινών είναι συνέπεια του νόμου του Snell για την ολική εσωτερική ανάκλαση.

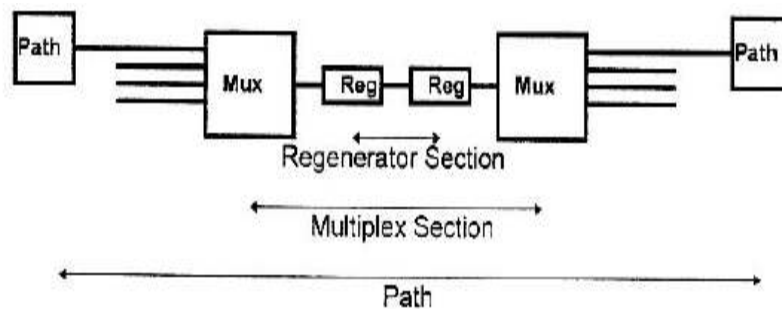
Όπως έχει ήδη τονιστεί, οι οπτικές ίνες έχουν την ικανότητα παροχής τεράστιου εύρους ζώνης, πολύ μεγαλύτερου από τα αντίστοιχα χάλκινα καλώδια. Οι επιτυγανόμενοι ρυθμοί μετάδοσης μπορούν να φτάσουν μέχρι και μερικά Tbps. Με βάση αυτό το χαρακτηριστικό μπορούν να σχεδιαστούν πολύ ευέλικτα δίκτυα πολλαπλής πρόσβασης (Multiple – Access) χρησιμοποιώντας συγκεκριμένες μεθόδους πολυπλεξίας που θα αναλυθούν παρακάτω, ενώ ο ρυθμός σφαλμάτων που επιτυγχάνεται είναι ιδιαιτέρως χαμηλός. Οι εταιρείες προτιμούν τις οπτικές ίνες για έναν ακόμα λόγο: είναι λεπτές και ελαφρές. Πολλές από τις υπάρχουσες σωληνώσεις καλωδίων είναι πλέον εντελώς γεμάτες οπότε δεν υπάρχει χώρος για να προστεθεί νέα χωρητικότητα. Η απομάκρυνση όλων των χάλκινων καλωδίων και η αντικατάστασή τους με οπτικές ίνες ελευθερώνει το χώρο μέσα στις σωληνώσεις. Όσον αφορά στην εγκατάσταση νέων διαδρομών, οι οπτικές ίνες κερδίζουν ασυζητητί, εξαιτίας του πολύ χαμηλότερου κόστους εγκατάστασης [2], [8].

Εντούτοις, η χρησιμοποίηση οπτικών ινών προϋποθέτει και την ανάπτυξη τερματικών στοιχείων δηλαδή πομποδεκτών [7]. Στην περίπτωση του πομπού το οπτικό κύμα από την πηγή εκπομπής πρέπει να διαμορφωθεί πρώτα και να συζευχθεί στην οπτική ίνα. Στο δέκτη πρέπει να γίνει η σύζευξη της οπτικής ενέργειας από την ίνα στην πρώτη βαθμίδα φώρασης. Και στις δύο περιπτώσεις χρειάζεται μετασχηματισμός του κυματοδηγούμενου πεδίου σε κατανομές πεδίων που εμφανίζουν καλή προσαρμογή είτε στο στόμιο ενός φωρατή είτε στο εκπεμπόμενο σήμα από ένα διαμορφωτή. Έχοντας και το προηγούμενο παράδειγμα της επιτυχίας των ολοκληρωμένων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, με την εμφάνιση των οπτικών τηλεπικοινωνιακών πειραματικών διατάξεων άρχισε παράλληλη έρευνα και για ολοκληρωμένα οπτικά κυκλώματα.

Τα οπτικά δίκτυα που έχουν σχεδιαστεί και υλοποιηθεί μέχρι σήμερα μπορούν να χωριστούν σε πρώτης και δεύτερης γενεάς. Στα **οπτικά δίκτυα πρώτης γενεάς** η οπτική ίνα χρησιμοποιείται μόνο ως φυσικό μέσο μετάδοσης και παροχής χωρητικότητας, ενώ η μεταγωγή, η δρομολόγηση, καθώς και όλες οι άλλες ευφυείς δικτυακές διεργασίες επιτελούνται από ηλεκτρονικά κυκλώματα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα οπτικών

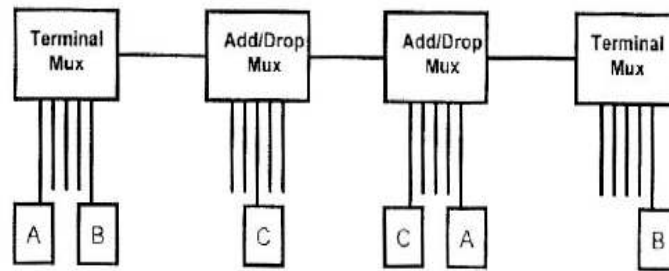
δικτύων πρώτης γενεάς είναι το Σύγχρονο Οπτικό Δίκτυο (Synchronous Optical Network – SONET) και το SDH (Synchronous Digital Hierarchy) [9], [10], [11]. Το SONET είναι το καθιερωμένο πρότυπο μετάδοσης και πολυπλεξίας για μεταδόσεις υψηλών ταχυτήτων σημάτων στη Βόρεια Αμερική. Αντιστοίχως, το πρότυπο SDH υιοθετήθηκε στην Ευρώπη και στην Ιαπωνία και για τις περισσότερες υποθαλάσσιες συνδέσεις. Τα SONET και SDH είναι δίκτυα κυκλώματος. Υπάρχουν τέσσερις βασικές κατηγορίες αρχιτεκτονικών δικτύου για *δίκτυα SONET*:

- **Σύνδεσμοι Point – to – Point.** Αυτή είναι η πιο απλή αρχιτεκτονική δικτυακής μετάδοσης. Η υλοποίηση που δημιουργεί και τερματίζει το SONET Path – Level σήμα αναφέρεται σαν υλοποίηση τερματισμού μονοπατιού. Η προστασία της διάταξης από αστοχίες επιτυγχάνεται με τον πλεονασμό ηλεκτρονικού εξοπλισμού και οπτικών ινών.



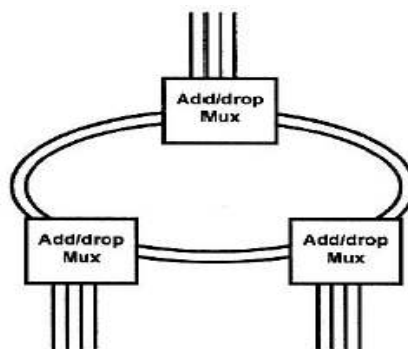
Σχήμα 1.3: Σύνθεση Point – to – Point SONET συνδέσμων μετάδοσης.

- **Αλυσίδες.** Η αλυσίδα διαμοιράζεται το εύρος ζώνης για να ανταποκριθεί στις επικοινωνιακές ανάγκες του συνόλου των απαιτήσεων κίνησης. Πολυπλέκτες προσθήκης/αφαίρεσης (Add/Drop Multiplexers – ADMs) χρησιμοποιούνται σε ενδιάμεσα σημεία κατά μήκος της αλυσίδας. Καθώς αλλάζει η μορφή της κίνησης, οι τερματικοί και οι Add/Drop πολυπλέκτες μπορούν να ανασχηματιστούν για να διεκπεραιώσουν τις καινούργιες ανάγκες. Οι αλυσίδες με ADMs παρέχουν μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα και χαμηλότερο κόστος συγκριτικά με τα Point – to – Point συστήματα μεταξύ κάθε ζεύγους κόμβων.



Σχήμα 1.4: Αλυσίδα με τερματικούς πολυπλέκτες και Add – Drop πολυπλέκτες.

➔ *Αυτοϊασόμενοι δακτύλιοι.* Αυτή η αρχιτεκτονική παρέχει την ίδια προσαρμοστικότητα με τις SONET αλυσίδες, λόγω της ικανότητάς τους να διεκπεραιώνουν ένα μείγμα από μορφές κίνησης ανάμεσα σε όλη την διασυνδεδεμένη διάταξη. Επίσης παρέχουν την βιωσιμότητα των υπηρεσιών των συστημάτων οπτικής δρομολόγησης. Όταν κοπεί ένα καλώδιο, ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός είναι υπεύθυνος να αλλάξει τη δρομολόγηση της κίνησης για να παρακάμψει το κόψιμο. Στην περίπτωση αστοχίας ενός κόμβου, η κίνηση αναδιαρθρώνεται για να αποφευχθεί ο κόμβος που έχει πρόβλημα. Η κίνηση σε αυτό τον κόμβο διακόπτεται, ενώ οι υπόλοιποι κόμβοι συνεχίζουν να λειτουργούν με την κοινή τους κίνηση.

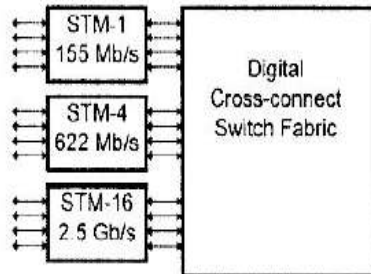


Σχήμα 1.5: Αυτοϊασόμενος δακτύλιος SONET.

➔ *Δίκτυα Διακοπών.* Αυτά αποτελούνται από ένα πλέγμα από διακόπτες που διασυνδέονται σε αυθαίρετο σχηματισμό. Οι διακόπτες SONET αναφέρονται σαν ψηφιακοί Cross – Connect διακόπτες (DCSs). Οι DCSs μπορούν να παρέχουν



διασύνδεση σε μεγάλο αριθμό δικτύων δακτυλίου. Είναι οι πιο προσαρμοζόμενες και υψηλής χωρητικότητας διατάξεις.



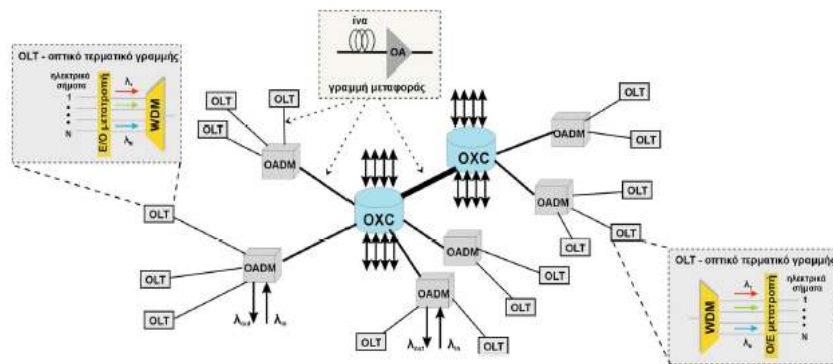
Σχήμα 1.6: Θεμελιώδες διάγραμμα ενός ψηφιακού cross – connect διακόπτη.

Στα οπτικά δίκτυα πρώτης γενεάς το οπτικό σήμα μεταδίδεται διαμέσου των ινών και μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα στους διάφορους κόμβους του δικτύου. Εν συνεχεία, το ηλεκτρικό σήμα υφίσταται την κατάλληλη επεξεργασία στον κόμβο (δρομολόγηση, μεταγωγή κτλ) και αν χρειαστεί επανεκπομπή του, τότε αυτό μετατρέπεται εκ νέου σε οπτικό σήμα προκειμένου να οδηγηθεί διαμέσου άλλων ινών (o/e/o Conversion). Είναι προφανές ότι η διαδικασία αυτή επιβαρύνει το δίκτυο με σημαντικές καθυστερήσεις αφού τα ηλεκτρονικά κυκλώματα λειτουργούν σε πολύ μικρότερες ταχύτητες από την ολική ρυθμοδότηση του δικτύου, ενώ το εύρος ζώνης των ηλεκτρονικών είναι κι αυτό με τη σειρά του πολύ μικρότερο σε σχέση με το αντίστοιχο της οπτικής ίνας. Ακόμη, σημαντικά είναι τα προβλήματα της απαγωγής θερμότητας και της ολοκλήρωσης των ηλεκτρονικών, τα οποία εντείνονται όσο αυξάνονται οι ταχύτητες και τα μεγέθη των κυκλωμάτων αυτών.

Από τα παραπάνω καθίσταται προφανές ότι η παρουσία των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων συνιστά περιοριστικό παράγοντα στα οπτικά δίκτυα. Οι τεράστιες δυνατότητες της οπτικής ίνας μπορούν να αξιοποιηθούν μόνο αν αντικατασταθούν τα ηλεκτρονικά με οπτικές διατάξεις οι οποίες θα είναι σε θέση να επιτελούν τις ευφυείς διαδικασίες μεταγωγής και δρομολόγησης στους κόμβους των δικτύων με οπτικό τρόπο, χωρίς να απαιτείται οπτοηλεκτρονική μετατροπή του σήματος. Μέχρι στιγμής δεν έχει καταστεί δυνατή η πλήρης αντικατάσταση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων από αντίστοιχα οπτικά. Εντούτοις, ορισμένες διεργασίες μεταγωγής και δρομολόγησης που

στα δίκτυα πρώτης γενεάς γίνονταν με ηλεκτρονικά έχουν ήδη μεταφερθεί στο οπτικό επίπεδο, με αποτέλεσμα να προκύψουν τα **οπτικά δίκτυα δεύτερης γενεάς** τα οποία έχουν αρχίσει σταδιακά να εγκαθίστανται. Τα δίκτυα αυτά χαρακτηρίζονται από ορισμένα πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα καθώς ορισμένες λειτουργίες γίνονται σε συντομότερο χρονικό διάστημα και ταυτόχρονα απαλλάσσονται τα υπάρχοντα ηλεκτρονικά κυκλώματα από την επεξεργασία όλου του όγκου δεδομένων.

Από τις δύο τεχνικές πολυπλεξίας που χρησιμοποιούνται στα οπτικά δίκτυα (πολυπλεξία κατά μήκος κύματος – WDM και οπτική πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου – OTDM), στα σημερινά οπτικά δίκτυα δεύτερης γενεάς εφαρμόζεται μόνο η WDM. Αναλυτική επισκόπηση και των δύο τεχνικών πολυπλεξίας θα γίνει στην επόμενη ενότητα. Στο παρακάτω σχήμα 1.7 παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική ενός τυπικού WDM οπτικού δικτύου δεύτερης γενεάς:



Σχήμα 1.7: Αρχιτεκτονική ενός τυπικού WDM οπτικού δικτύου δεύτερης γενεάς.

Όπως φαίνεται κι από το ανωτέρω σχήμα, τα βασικά δομικά τμήματα των δικτύων αυτών είναι τα οπτικά τερματικά γραμμής (Optical Line Terminals – OLTs), οι οπτικοί πολυπλέκτες προσθήκης/αφαίρεσης δεδομένων (Optical Add/Drop Multiplexers – OADMs) και τα οπτικά στοιχεία διασύνδεσης (Optical Cross/Connects – OXCs). Ακόμη, ανά τακτά διαστήματα μετάδοσης χρησιμοποιούνται και οπτικοί ενισχυτές (Optical Amplifiers – OAs) προκειμένου να ενισχυθούν τα οπτικά σήματα. Αναλυτικότερα, τα OLTs χρησιμοποιούνται στο τέρμα των ζεύξεων για την οπτοηλεκτρονική μετατροπή του σήματος και την WDM πολυπλεξία ή αποπολυπλεξία των διαφόρων καναλιών. Αντιστοίχως, οι OADMs και τα OXCs τοποθετούνται σε ενδιάμεσα σημεία των ζεύξεων

και ο βασικός τους ρόλος είναι η δρομολόγηση των εισερχόμενων WDM καναλιών, με τη διαφορά ότι τα OXCs διαχειρίζονται σημαντικά περισσότερες εισόδους – εξόδους και πιο πολύπλοκες τοπολογίες δικτύων από τους OADMs [11].

Τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενεάς παρέχουν τη δυνατότητα για ευρυζωνικές συνδέσεις υψηλής ταχύτητας δεδομένων και μεγάλης διάρκειας, καθώς και τη δυνατότητα για αποδοτική διαχείριση πολύ μεγάλου όγκου δεδομένων απευθείας στο οπτικό επίπεδο. Τα εν λόγω χαρακτηριστικά είναι ελκυστικά κυρίως για τα μεγάλης έκτασης δίκτυα ευρείας περιοχής (WANs) στα οποία η τηλεπικοινωνιακή κίνηση είναι πάρα πολύ αυξημένη και είναι επιθυμητή η δέσμευση υψηλής χωρητικότητας για μεγάλο χρονικό διάστημα. Συνεπώς, τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενεάς εφαρμόζονται σήμερα κυρίως στα WANs.

Εντούτοις, τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενεάς επιτελούν μεταγωγή κυκλώματος και οι συνδέσεις παραμένουν στατικές αφού εδραιωθούν. Κατά συνέπεια, τα δίκτυα αυτά δεν είναι σε θέση να παρέχουν εύρος ζώνης κατ' απαίτηση και είναι εντελώς αδύνατη η εξυπηρέτηση εκρηκτικών ροών δεδομένων. Επιπρόσθετα, ο αριθμός των δυνατών συνδέσεων καθορίζεται από τον μέγιστο αριθμό των χρησιμοποιούμενων καναλιών – μηκών κύματος (πολυπλεξία WDM), με αποτέλεσμα να υπάρχουν συγκρούσεις (Collisions) στην κίνηση δεδομένων, όταν οι αιτούμενες συνδέσεις ξεπερνούν σε αριθμό τα διαθέσιμα μήκη κύματος. Τα ανωτέρω μειονεκτήματα καθιστούν απαγορευτική την χρήση των οπτικών δικτύων δεύτερης γενεάς σε δίκτυα πολύ μεγάλης εκρηκτικότητας και άμεσης πρόσβασης, όπως είναι επί παραδείγματι τα μητροπολιτικά δίκτυα (MANs) [10]. Είναι προφανές ότι η εκμετάλλευση του εύρους ζώνης δεν μπορεί να είναι αποδοτική στα εν λόγω δίκτυα, καθώς για κάθε μία από τις πάρα πολλές συνδέσεις τους θα χρειάζεται και ένα κανάλι – μήκος κύματος το οποίο θα παραμένει ανενεργό για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα εξαιτίας της στατικότητας των συνδέσεων.

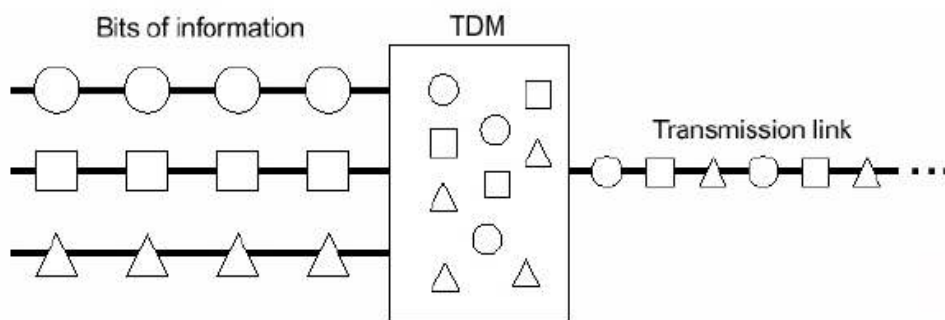
## 1.5 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑΣ

Όπως ήδη αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, δύο είναι οι τεχνικές πολυπλεξίας που χρησιμοποιούνται στα οπτικά δίκτυα: Η οπτική πολυπλεξία με διαίρεση

χρόνου (Optical Time Division Multiplexing – OTDM) και η πολυπλεξία κατά μήκος κύματος (Wavelength Division Multiplexing – WDM). Η ανάγκη για πολυπλεξία των σημάτων στα οπτικά δίκτυα προέκυψε από το γεγονός ότι η μετάδοση μέσω μιας οπτικής ίνας σε πολύ υψηλούς ρυθμούς είναι πολύ πιο συμφέρουσα οικονομικά σε σχέση με τη χρησιμοποίηση περισσότερων ινών για μετάδοση με χαμηλότερους ρυθμούς.

Στην τεχνική **OTDM**, πολλές συνεχόμενες ροές δεδομένων χαμηλού ρυθμού πολυπλέκονται σε μία συνεχόμενη ροή υψηλού ρυθμού. Ο χρόνος διαιρείται σε χρονοθυρίδες (Time – Slots) σταθερού μεγέθους με την κάθε ροή δεδομένων να χρησιμοποιεί διαφορετική χρονοθυρίδα. Η τεχνική OTDM αυξάνει την χωρητικότητα του συνδέσμου μετάδοσης διαμοιράζοντας το χρόνο σε μικρότερα διαστήματα, έτσι ώστε τα bits από πολλαπλές εισόδους να μπορούν να μεταδοθούν στο μέσο μετάδοσης αποδοτικά, αυξάνοντας έτσι τον αριθμό των bits που μεταδίδονται ανά δευτερόλεπτο.

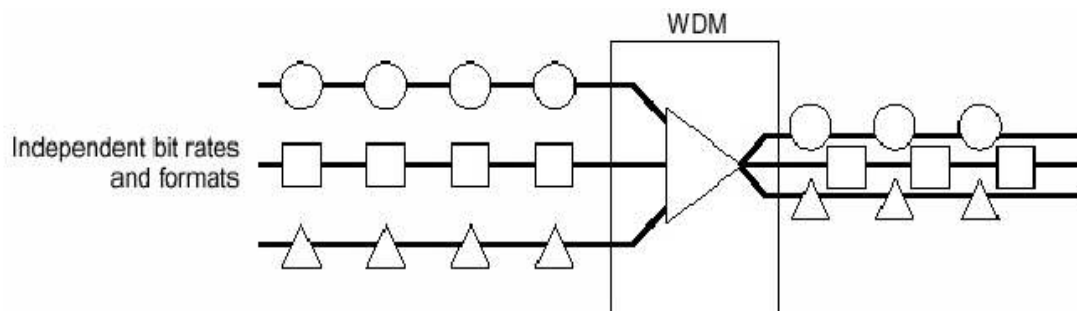
Η τεχνική πολυπλεξίας OTDM έχει εφαρμοσθεί μέχρι σήμερα μόνο στα οπτικά δίκτυα πρώτης γενεάς. Αντιθέτως, τα OTDM δίκτυα δεύτερης γενεάς βρίσκονται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο. Τα πρότυπα που έχουν υιοθετηθεί για οπτική μετάδοση OTDM δεδομένων είναι το SONET και το SDH. Αυτά τα πρότυπα καθορίζουν παραμέτρους αλληλεπίδρασης, ρυθμούς μετάδοσης, μεθόδους πολυπλεξίας και διαχείριση για σύγχρονο OTDM σε οπτικό επίπεδο. Τα SONET/SDH παίρνουν  $N$  ροές δεδομένων, τις πολυπλέκουν και με οπτική διαμόρφωση σήματος στέλνουν το πολυπλεγμένο σήμα χρησιμοποιώντας ένα μέσο μετάδοσης φωτός μέσω οπτικής ίνας με ρυθμό μετάδοσης ίσο με  $N$  φορές τον εισερχόμενο ρυθμό. Η αρχή της οπτικής πολυπλεξίας με διαίρεση χρόνου (OTDM) παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήμα 1.8:



Σχήμα 1.8: Οπτική πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου – OTDM.

Στην τεχνική *WDM*, πολλά σήματα με διαφορετικά μήκη κύματος φωτός (διαφορετικές φέρουσες συχνότητες) εντός μιας προκαθορισμένης ζώνης μεταδίδονται ταυτόχρονα στην ίδια οπτική ίνα. Σε κάθε WDM σύστημα, κάθε μήκος κύματος διοχετεύεται στην οπτική ίνα και τα σήματα αποπολυπλέκονται στον τελικό δέκτη. Όπως και στην τεχνική OTDM, ο τελικός ρυθμός μετάδοσης προκύπτει από το άθροισμα των ρυθμών των σημάτων εισόδου, αλλά η WDM τεχνική αντιμετωπίζει κάθε εισερχόμενο σήμα ανεξάρτητα από όλα τα υπόλοιπα. Αυτό σημαίνει ότι κάθε κανάλι έχει το δικό του εύρος ζώνης. Η τεχνική WDM είναι η αντίστοιχη της τεχνικής πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Multiplexing – FDM), η οποία χρησιμοποιείται στα ηλεκτρονικά κυκλώματα.

Όπως ήδη αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, τα σημερινά οπτικά δίκτυα δεύτερης γενεάς χρησιμοποιούν την τεχνική πολυπλεξίας WDM. Η τεχνική WDM ουσιαστικά παρέχει στο δίκτυο πολλαπλά νοητά κυκλώματα ανάμεσα στους κόμβους. Εξαιτίας αυτού η τεχνική αυτή είναι κατάλληλη για αρχιτεκτονικές μεταγωγής κυκλώματος, κάτι το οποίο ισχύει στα σημερινά οπτικά δίκτυα δεύτερης γενεάς. Η αρχή της πολυπλεξίας κατά μήκος κύματος (WDM) παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 1.9:



Σχήμα 1.9: Πολυπλεξία κατά μήκος κύματος – WDM.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι οι δύο τεχνικές πολυπλεξίας OTDM και WDM δεν είναι ανταγωνιστικές μεταξύ τους αλλά συμπληρωματικές. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να συνδυαστούν συνθέτοντας την *υβριδική πολυπλεξία OTDM/WDM* προκειμένου να αυξηθεί περαιτέρω η χωρητικότητα των οπτικών δικτύων. Στην υβριδική πολυπλεξία κάθε μήκος κύματος – κανάλι εισέρχεται πρώτα σε έναν OTDM πολυπλέκτη και στη συνέχεια τα πολυπλεγμένα κατά OTDM κανάλια εισέρχονται στον WDM

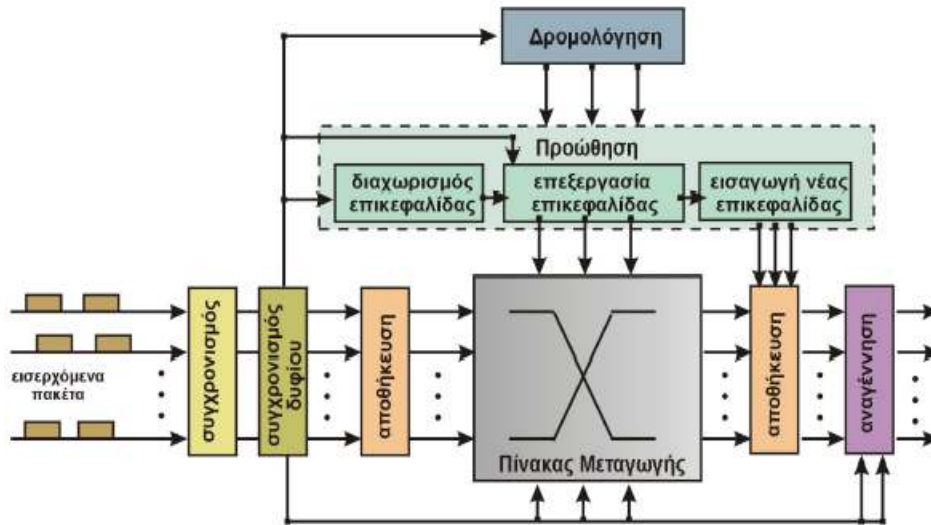
πολυπλέκτη, με αποτέλεσμα στην έξοδο του τελευταίου να προκύπτει τελικά το υβριδικά πολυπλεγμένο σήμα.

## 1.6 ΤΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΑ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΤΡΙΤΗΣ ΓΕΝΕΑΣ

Κατά την μελέτη των οπτικών δικτύων δεύτερης γενεάς υπογραμμίστηκε ότι αυτά δεν είναι σε θέση να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές εκρηκτικής κίνησης και άμεσης πρόσβασης, κυρίως επειδή επιτελούν μεταγωγή κυκλώματος. Η λύση προκειμένου να εξυπηρετηθούν τέτοιου είδους εφαρμογές (όπως είναι επί παραδείγματι τα μητροπολιτικά δίκτυα – MANs [10]) αναμένεται να δοθεί από τα **μελλοντικά οπτικά δίκτυα τρίτης γενεάς** γύρω από τα οποία έχει συγκεντρωθεί μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Ο κύριος σκοπός των μελλοντικών οπτικών δικτύων τρίτης γενεάς είναι η αποδοτική εκμετάλλευση του εύρους ζώνης, μέσω παροχής συνδέσεων υψηλής χωρητικότητας μόνο για το χρονικό διάστημα κατά το οποίο οι συνδέσεις αυτές είναι ενεργές. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτός ο σκοπός έχει υιοθετηθεί η **τεχνική οπτικής μεταγωγής πακέτου**. Στα εν λόγω οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτου εφαρμόζεται στατιστική πολυπλεξία των οπτικών σημάτων.

Η τεχνική οπτικής μεταγωγής πακέτου είναι σε θέση να προσφέρει τη δυνατότητα παροχής υπηρεσιών εικονικού κυκλώματος (Virtual Circuit Services) [12]. Με τα εικονικά κυκλώματα το δίκτυο προσφέρει συνδέσεις που μοιάζουν με μεταγωγής κυκλώματος μεταξύ δύο κόμβων, οι οποίες όμως μπορούν να μη χρησιμοποιούν όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης της γραμμής. Η αυξανόμενη ζήτηση σε εύρος ζώνης και η ανάγκη παροχής διαφόρων οπτικών υπηρεσιών οδηγούν στην ανάπτυξη ενός ευφυούς οπτικού επιπέδου, παρακάμπτοντας ενδιάμεσα στρώματα όπως το SDH και το ATM.

Στο σχήμα 1.10 που ακολουθεί φαίνεται το δομικό διάγραμμα του κόμβου δρομολόγησης (Router) στα οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτου. Οι σημαντικότερες λειτουργικές διεργασίες που επιτελεί αυτός ο κόμβος είναι οι εξής: δρομολόγηση (Routing), προώθηση (Forwarding), μεταγωγή (Switching), αποθήκευση (Buffering), πολυπλεξία (Multiplexing), συγχρονισμός (Synchronization) και αναγέννηση (Regeneration). Οι λειτουργίες αυτές θα αναλυθούν στη συνέχεια.



Σχήμα 1.10: Η μορφή του κόμβου δρομολόγησης στα οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτου.

**Δρομολόγηση** (Routing). Είναι η διαδικασία εύρεσης του επόμενου κόμβου – σταθμού του πακέτου με βάση τον τελικό του προορισμό μέσα στα δίκτυο. Κάθε δρομολογητής κρατά πληροφορίες για την τοπολογία του δικτύου σε ειδικούς πίνακες δρομολόγησης (Routing Tables). Επομένως, για οποιοδήποτε πακέτο που φτάνει στον κόμβο, αυτός γνωρίζει ποιος είναι ο προορισμός του και έτσι αποφασίζει από ποια έξοδο πρέπει αυτό να εξέλθει.

**Πρωώθηση** (Forwarding). Η επικεφαλίδα (Header) κάθε εισερχόμενου πακέτου στον κόμβο διαχωρίζεται από το φορτίο του (Payload) και οδηγείται στον κύριο επεξεργαστή του κόμβου. Εκεί, με βάση τον πίνακα δρομολόγησης καθορίζεται η κατάλληλη έξοδος από τον μεταγωγέα και εισάγεται μια νέα επικεφαλίδα (Header Insertion) προκειμένου το πακέτο να δρομολογηθεί κατάλληλα στον επόμενο κόμβο του δικτύου.

**Μεταγωγή** (Switching). Είναι η διαδικασία οδήγησης του εισερχόμενου πακέτου στη καθορισμένη από τη διαδικασία πρωώθησης έξοδο του κόμβου. Η λειτουργία αυτή επιτελείται από τον πίνακα μεταγωγής (Switching Matrix), ο οποίος αποτελείται από συστοιχίες κατάλληλα συνδεδεμένων μεμονωμένων οπτικών διακοπών. Ο μεταγωγέας είναι στη γενική περίπτωση ένα οπτικό στοιχείο διασύνδεσης (OXC) με  $N$  εισόδους και  $M$  εξόδους, το οποίο μπορεί να κατασκευαστεί από  $2 \times 2$  διακόπτες, χρησιμοποιώντας κατάλληλες τοπολογίες. Τη σχεδίαση και τη λειτουργία ενός τέτοιου  $2 \times 2$  διακόπτη πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία.

**Αποθήκευση** (Buffering). Χρησιμοποιείται κυρίως για την αποφυγή των συγκρούσεων των πακέτων στον κόμβο, στην περίπτωση που δύο ή περισσότερα πακέτα επιθυμούν ταυτόχρονα την ίδια έξοδο του κόμβου. Οι καταχωρητές αποθήκευσης τοποθετούνται τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο του κόμβου. Πρέπει να σημειωθεί ότι στον τομέα της αποθήκευσης η οπτική τεχνολογία μειονεκτεί εμφανώς έναντι της ηλεκτρονικής, αφού ακόμη δεν έχει υλοποιηθεί μια αξιόπιστη οπτική μνήμη ανάλογη της ηλεκτρονικής RAM.

**Πολυπλεξία** (Multiplexing). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε OTDM είτε WDM τεχνική πολυπλεξίας. Η πολυπλεξία επιτελείται αφενός για την αύξηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης και αφετέρου για την προσθήκη/αφαίρεση ροών δεδομένων (Add/Drop). Κάθε δρομολογητής πραγματοποιεί την αποπολυπλεξία και την πολυπλεξία ροών δεδομένων, προκειμένου να αφαιρέσει (Drop) τα δεδομένα που έχουν ως τελικό προορισμό τον κόμβο αυτό και να προσθέσει (Add) νέα με προορισμούς μετέπειτα κόμβους. Η πολυπλεξία/αποπολυπλεξία στο οπτικό επίπεδο επιτυγχάνεται με χρήση οπτικών συμβολομετρικών διακοπών, η λειτουργία των οποίων θα εξηγηθεί στα επόμενα κεφάλαια.

**Συγχρονισμός** (Synchronization). Στη γενική περίπτωση είναι η διαδικασία χρονικής διάταξης δύο σημάτων. Καθώς στις εισόδους του κόμβου δρομολόγησης εισέρχονται δεδομένα από διάφορα σημεία του δικτύου, αυτά δεν είναι μεταξύ τους συγχρονισμένα στο χρόνο. Προκειμένου να επεξεργαστεί ο δρομολογητής την πληροφορία που δέχεται, πρέπει να συγχρονίσει όλα τα εισερχόμενες ροές δεδομένων μεταξύ τους καθώς και με το τοπικό του ρολόι.

**Αναγέννηση** (Regeneration). Τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο του δρομολογητή γίνεται αναγέννηση των δεδομένων σε επίπεδο παλμών. Η αναγέννηση περιλαμβάνει τρεις λειτουργίες, γι αυτό και ονομάζεται 3R αναγέννηση. Οι εν λόγω λειτουργίες είναι οι εξής: Ο επανασυγχρονισμός (Re – Timing) των bits του σήματος, η αναμόρφωση του σχήματος των παλμών του (Re – Shaping) και η επανενίσχυση (Re – Amplifying) του σήματος. Η αναγέννηση στην είσοδο του κόμβου είναι απαραίτητη προκειμένου να μπορέσει ο κόμβος να επεξεργαστεί τα σήματα με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Παράλληλα, η αναγέννηση στην έξοδο χρειάζεται προκειμένου να κυκλοφορούν καλής



ποιότητας σήματα στο δίκτυο, απαλλαγμένα από θόρυβο ή διακαναλική παρεμβολή τα οποία μπορούν να εισαχθούν κατά την επεξεργασία του σήματος στον κόμβο.

Καταληκτικά, πρέπει να σημειωθεί ότι η επίτευξη βέλτιστης ταχύτητας επεξεργασίας των πακέτων μπορεί να επιτευχθεί μόνο όταν όλες οι προαναφερθείσες λειτουργίες μεταφερθούν στο οπτικό επίπεδο. Κάτι τέτοιο ακόμη δεν έχει καταστεί δυνατό να πραγματοποιηθεί και έτσι είναι επιβεβλημένη η χρησιμοποίηση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων για κάποιες από αυτές τις λειτουργίες. Άμεση συνέπεια είναι ο περιορισμός του ρυθμού μετάδοσης προκειμένου να μπορούν να ανταποκριθούν τα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα, το οποίο ήδη αναφέρθηκε παραπάνω, είναι η μέχρι στιγμής αδυναμία υλοποίησης αξιόπιστων οπτικών μηνυμάτων ανάλογων με την ηλεκτρονική μνήμη τυχαίας προσπέλασης (RAM) για την λειτουργία της αποθήκευσης. Η υλοποίηση αμιγώς οπτικών δικτύων μεταγωγής πακέτου βρίσκεται σε καθαρά ερευνητικό στάδιο σε διάφορα εργαστήρια ανά τον κόσμο.

## 1.7 ΑΜΙΓΩΣ ΟΠΤΙΚΟΣ 2×2 ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ

Η υλοποίηση του κυκλώματος του αμιγώς οπτικού 2×2 διακόπτη μεταγωγής (2×2 All – Optical Exchange – Bypass Switch) [13], [14] εντάσσεται στο ευρύτερο πλαίσιο των πειραμάτων οπτικής λογικής που έχουν ως σκοπό την ανάπτυξη των οπτικών δικτύων μεταγωγής πακέτου. Όπως ήδη αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, ένας τέτοιος 2×2 διακόπτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δομικό τμήμα ενός οπτικού στοιχείου διασύνδεσης (OXC) το οποίο με τη σειρά του χρησιμοποιείται σε έναν κόμβο δρομολόγησης ενός οπτικού δικτύου μεταγωγής πακέτου. Γενικά, ο 2×2 διακόπτης μεταγωγής αποτελεί βασική δομική μονάδα για μια πληθώρα οπτικών κυκλωμάτων τα οποία επιτελούν διάφορες λειτουργίες και τα οποία μπορούν να βρουν εφαρμογή σε ένα οπτικό δίκτυο μεταγωγής πακέτου. Η λειτουργία του 2×2 διακόπτη είναι αμιγώς οπτική, δηλαδή δεν απαιτεί κανενός είδους ηλεκτρονικό κύκλωμα, οι ρυθμοί μετάδοσης στους οποίους μπορεί να λειτουργήσει ο διακόπτης είναι ιδιαίτερα υψηλοί και ο επιτυχανόμενος ρυθμός σφαλμάτων είναι πάρα πολύ χαμηλός.

Η σχεδίαση, η θεωρητική ανάλυση, η πειραματική υλοποίηση, τα αποτελέσματα του πειράματος και η προσομοίωση που διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών παρατίθενται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Η διάρθρωση του υπολοίπου κειμένου έχει ως εξής:

- **Κεφάλαιο 2:** Θεωρητική ανάλυση της λειτουργίας του Μη Γραμμικού Συμβολομέτρου Υπερυψηλής Ταχύτητας (Ultrafast Nonlinear Interferometer – UNI) με χρήση ισχυρά μη γραμμικής ίνας οξειδίου του Βισμούθιου, στο οποίο βασίζεται η υλοποίηση του 2×2 οπτικού διακόπτη μεταγωγής. Παράλληλη περιγραφή των βασικών οπτικών στοιχείων που συνθέτουν το κύκλωμα του UNI, με έμφαση στις ιδιότητες της ισχυρά μη γραμμική ίνας. Ανάλυση του φαινομένου της ετεροδιαμόρφωσης φάσης (Cross Phase Modulation – XPM).
- **Κεφάλαιο 3:** Παρουσίαση του κυκλώματος 2×2 οπτικού διακόπτη μεταγωγής που υλοποιήθηκε στο εργαστήριο με βάση το UNI και ανάλυση της λειτουργίας των βασικών δομικών τμημάτων του. Περιγραφή και σχολιασμός των πειραματικών αποτελεσμάτων.
- **Κεφάλαιο 4:** Προσομοίωση της διάταξης του UNI τόσο με ένα σήμα εισόδου όσο και ως 2×2 οπτικός διακόπτης μεταγωγής, με χρήση του λογισμικού πακέτου VPI που διαθέτει το εργαστήριο.
- **Κεφάλαιο 5:** Εφαρμογές του κυκλώματος 2×2 οπτικού διακόπτη μεταγωγής που υλοποιήθηκε, στα οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτου.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΟΥ ΥΠΕΡΥΨΗΛΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ (UNI) ΜΕ ΙΣΧΥΡΑ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΙΝΑ

---

### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

Η ανάπτυξη αμιγώς οπτικών διακοπών αποτέλεσε αναμφισβήτητα σταθμό στην πορεία προς την οπτική μεταγωγή πακέτου και την αμιγώς οπτική επεξεργασία σήματος. Στη γενική περίπτωση η υλοποίηση ενός αμιγώς οπτικού διακόπτη γίνεται με τη χρήση κατάλληλων οπτικών συμβολομετρικών διατάξεων, οι οποίες γενικά εκμεταλλεύονται το μη γραμμικό φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης φάσης (Cross Phase Modulation – XPM) [1], [15] το οποίο λαμβάνει χώρα στο εσωτερικό οπτικών ινών ή στοιχείων όπως ο οπτικός ενισχυτής ημιαγωγού (Semiconductor Optical Amplifier – SOA). Ουσιαστικά οι συμβολομετρικές διατάξεις λειτουργούν ως απλές οπτικές πύλες οι οποίες ελέγχονται μέσω κατάλληλων οπτικών σημάτων. Ανάλογα με την τιμή που λαμβάνει το οπτικό σήμα ελέγχου, ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση μεταγωγής ή μη μεταγωγής αντιστοίχως.

Μέχρι σήμερα έχουν προταθεί και παρουσιαστεί διάφορες οπτικές συμβολομετρικές διατάξεις οι οποίες λειτουργούν εκμεταλλευόμενες το φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης φάσης. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι οι εξής [16]:

- **NOLM** : Nonlinear Optical Loop Mirror – Μη Γραμμικός Καθρέπτης Βρόχου Ίνας.
- **Συμβολόμετρο Sagnac**.
- **SLALOM / TOAD** : Semiconductor Laser Amplifier in a Loop Mirror – Καθρέπτης Βρόχου με Ημιαγωγίμο Οπτικό Ενισχυτή / Terahertz Optical Asymmetric Demultiplexer – Ασύμμετρος Οπτικός Αποπολυπλέκτης.
- **Συμβολόμετρο Mach – Zehnder** : Υπάρχουν δύο αρχιτεκτονικές του εν λόγω συμβολομέτρου: Colliding Pulse Mach – Zehnder (CPMZ) και Symmetric Mach – Zehnder (SMZ).
- **UNI** : Ultrafast Nonlinear Interferometer – Μη Γραμμικό Συμβολόμετρο Υπερυψηλής Ταχύτητας.

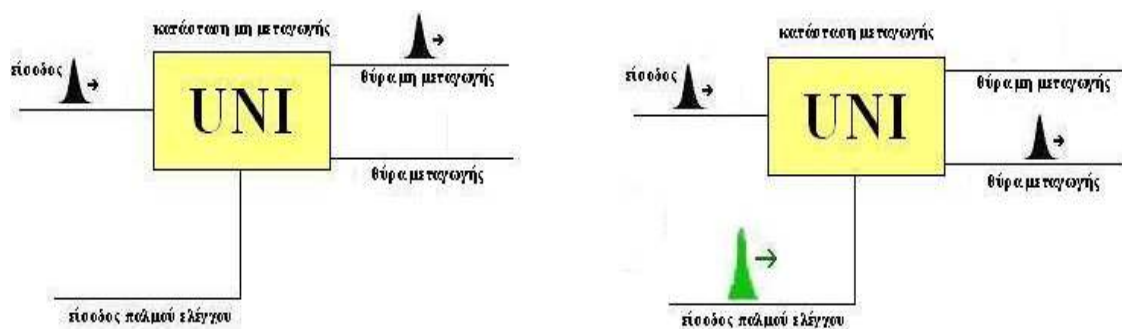
Στην περίπτωση του πειράματός μας, ο  $2 \times 2$  οπτικός διακόπτης μεταγωγής (Exchange – Bypass Switch) [13], [14] υλοποιήθηκε με βάση το **μη γραμμικό συμβολόμετρο υπερυψηλής ταχύτητας (Ultrafast Nonlinear Interferometer – UNI)** [17], [18] ενώ το μη γραμμικό μέσο που χρησιμοποιήθηκε για την διέγερση του φαινομένου της ετεροδιαμόρφωσης φάσης (XPM) ήταν μια **ισχυρά μη γραμμική ίνα Οξειδίου του Βισμούθιου (Bismuth Oxide Nonlinear Fiber)** [19].

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι παλαιότερες υλοποιήσεις του UNI (κυρίως χρησιμοποιώντας SOA ως μη γραμμικό μέσο) έχουν ήδη λειτουργήσει ως  $2 \times 2$  διακόπτες μεταγωγής οι οποίοι δύνανται να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές. Οι διακόπτες αυτοί λειτουργούν με πακέτα δεδομένων αυθαιρέτου μήκους και περιεχομένου και είναι κατάλληλοι για οπτική μεταγωγή πακέτου σε υπερυψηλές ταχύτητες (Optical Packet Switching), υλοποίηση οπτικών στοιχείων διασύνδεσης (Optical Cross/Connects – OXCs) αντιμετάθεση χρονοσχισμών (Time Slot Interchanging), οπτική πολυπλεξία προσθήκης/αφαίρεσης (Optical Add/Drop Multiplexing) και εισαγωγή/έξαγωγή της επικεφαλίδας πακέτου (Packet Header Insertion/Extraction) [23], [24]. Ακόμη, με βάση το UNI έχουν υλοποιηθεί οπτικά κυκλώματα ψηφιακής λογικής όπως απλές λογικές πύλες AND και XOR [20], [21], [22], ημιαθροιστές [42] καθώς και αμιγώς οπτικά κυκλώματα ανάκτησης ρολογιού (Clock Recovery) [20], [43].

Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα παρουσιασθεί εκτενώς η αρχή λειτουργίας του UNI και στην περίπτωση ενός αλλά και στην περίπτωση δύο οπτικών σημάτων εισόδου (λειτουργία ως  $2 \times 2$  διακόπτης) με παράλληλη περιγραφή των βασικών οπτικών στοιχείων που συνθέτουν το κύκλωμα. Ακόμη, θα αναλυθεί θεωρητικά το μη γραμμικό φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης φάσης στο εσωτερικό της ισχυρά μη γραμμικής ίνας Βισμουθίου, της οποίας θα παρατεθούν οι ιδιότητες καθώς και οι κύριες εφαρμογές.

## 2.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ UNI ΜΕ ΕΝΑ ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ

Στην παράγραφο αυτή θα αναλυθεί η αρχή λειτουργίας του μη γραμμικού συμβολομέτρου υπερυψηλής ταχύτητας (UNI) στην περίπτωση ενός οπτικού σήματος εισόδου. Βέβαια, στην περίπτωση του πειράματός μας, το UNI χρησιμοποιήθηκε ως  $2 \times 2$  οπτικός διακόπτης μεταγωγής, δηλαδή με δύο οπτικά σήματα εισόδου και δύο οπτικά σήματα εξόδου. Εντούτοις, η μελέτη του UNI με ένα σήμα εισόδου είναι επιβεβλημένη για την καλύτερη κατανόησή του, αφού η λειτουργία του ως  $2 \times 2$  διακόπτης είναι αρκετά περίπλοκη. Η αρχή λειτουργίας του UNI με ένα σήμα εισόδου παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 2.1 απουσία και παρουσία σήματος ελέγχου αντιστοίχως:

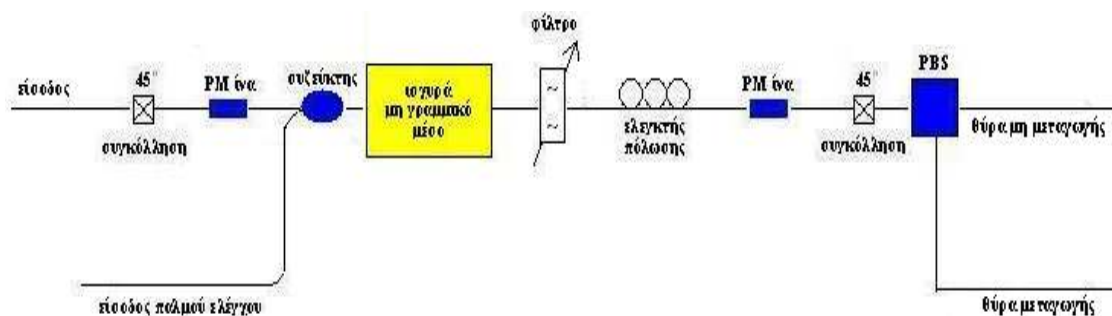


Σχήμα 2.1: Αρχή λειτουργίας του UNI με ένα σήμα εισόδου σε κατάσταση μη μεταγωγής και μεταγωγής αντιστοίχως.

Όπως φαίνεται και από το ανωτέρω σχήμα, το μοναδικό σήμα εισόδου εισέρχεται στο UNI και δύναται να εξέλθει από μία εκ των δύο θυρών εξόδου του. Η θύρα εξόδου καθορίζεται από την απουσία ή την παρουσία του σήματος ελέγχου. Πιο συγκεκριμένα,

απουσία του σήματος ελέγχου, ο παλμός εξέρχεται από τη θύρα μη μεταγωγής και λέμε ότι το συμβολόμετρο βρίσκεται σε κατάσταση μη μεταγωγής, ενώ παρουσία του σήματος ελέγχου, ο παλμός εξέρχεται από τη θύρα μεταγωγής και λέμε ότι το συμβολόμετρο βρίσκεται σε κατάσταση μεταγωγής. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι στην περίπτωση που μελετούμε το σήμα εισόδου και το σήμα ελέγχου στην κατάσταση μεταγωγής είναι συνδιαδιδόμενα και έχουν διαφορετικό μήκος κύματος, καθώς υπάρχουν και υλοποιήσεις του UNI στις οποίες τα σήματα αυτά διαδίδονται αντίθετα.

Η γενική μορφή του μη γραμμικού συμβολομέτρου υπερυψηλής ταχύτητας (UNI) στην περίπτωση ενός σήματος εισόδου το οποίο συνδιαδίδεται με το σήμα ελέγχου στην κατάσταση μεταγωγής παρουσιάζεται στο κατωτέρω σχήμα 2.2. Στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη περιγραφή των κυριότερων οπτικών στοιχείων που φαίνονται στο εν λόγω σχήμα, τα οποία συνθέτουν το κύκλωμα του UNI. Αμέσως μετά περιγράφεται αναλυτικά η λειτουργία του UNI στις περιπτώσεις μη μεταγωγής και μεταγωγής αντιστοίχως.



**Σχήμα 2.2:** Γενική μορφή της διάταξης του UNI στην περίπτωση ενός σήματος εισόδου το οποίο συνδιαδίδεται με το σήμα ελέγχου στην κατάσταση μεταγωγής.

**PM ίνα** (Polarization Maintaining Fiber – Ίνα διατήρησης της πόλωσης). Γενικά, οι οπτικές ίνες δεν διατηρούν τη πολωτική κατάσταση του οπτικού πεδίου που κυκλοφορεί μέσα τους. Εξαιτίας της μη τέλειας κυκλικής συμμετρίας των ινών, ο δείκτης διάθλασης και συνεπώς οι ταχύτητες φάσης είναι διαφορετικές για τις δύο κάθετες συνιστώσες του πεδίου και το μέσο διάδοσης λέμε ότι εμφανίζει διπλοθλαστικότητα (Birefringence). Εξαιτίας της διπλοθλαστικότητας η πολωτική κατάσταση του φωτός στην έξοδο της ίνας μεταβάλλεται βαθμιαία με αποτέλεσμα να προκαλείται σύζευξη του φωτός από τη μία

κατάσταση στην άλλη. Για τη καταστολή της ανεπιθύμητης σύζευξης ισχύος από άξονα σε άξονα αναπτύχθηκαν οι διπλοθλαστικές ίνες ή αλλιώς, ίνες διατήρησης της πόλωσης (PM fibers). Η ιδέα πάνω στην οποία στηρίζεται η κατασκευή PM ινών είναι η τεχνητή αύξηση της διαφοράς των ταχυτήτων διάδοσης στους δύο άξονες. Με το τρόπο αυτό περιορίζεται η σύζευξη σε αμελητέα επίπεδα. Οι μηχανισμός μέσω του οποίου αυξάνεται η διαφορά στις ταχύτητες μεταξύ των δύο αξόνων έγκεινται συνήθως είτε στη μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της ίνας (ελλειπτική κατασκευή του πυρήνα ή του μανδύα), είτε στην άσκηση αξονικής πίεσης και στην κάμψη της ίνας, είτε στην άσκηση εξωτερικής δύναμης και στην περιστροφή της.

**Οπτικός συζεύκτης** (Optical Coupler). Ο οπτικός συζεύκτης χρησιμοποιείται για τον χωρισμό ή τη σύζευξη της οπτικής ισχύος σε συγκεκριμένο ποσοστό. Ο μηχανισμός λειτουργίας του συζεύκτη στηρίζεται στην ύπαρξη μιας στενής, κενής περιοχής ανάμεσα σε δύο προσκείμενες ίνες. Αυτό επιτρέπει τη ζεύξη ανάμεσα στους δύο πυρήνες που έρχονται σε επαφή καθώς το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εκτείνεται πέρα από αυτούς. Ο συζεύκτης είναι παθητική διάταξη, στην οποία υφίσταται μεταφορά ισχύος από την ή τις εισόδους στην ή στις εξόδους του. Ανάλογα με τον αριθμό των θυρών εισόδου – εξόδου ο συζεύκτης αναφέρεται και ως διαχωριστής, συγκεντρωτής, συζεύκτης αστέρα. Στην περίπτωση μας, ο συζεύκτης χρησιμοποιείται για τη σύζευξη των ισχύων των σημάτων εισόδου και ελέγχου. Υπάρχουν δύο τεχνικές κατασκευής συζευκτών. Η πιο διαδεδομένη είναι η τεχνική των συντηγμένων συζευκτών δικωνικής εκλέπτυνσης ενώ η άλλη τεχνική είναι η τεχνική της λειασμένης επιφάνειας.

**Ισχυρά μη γραμμικό μέσο** (Highly NonLinear Medium). Είναι το σημαντικότερο οπτικό στοιχείο του UNI καθώς είναι υπεύθυνο για την διέγερση του μη γραμμικού φαινομένου της ετεροδιαμόρφωσης φάσης (XPM). Η μη γραμμικότητα εισάγεται από την εξάρτηση του δείκτη διάθλασης του μέσου από τη συνολικά κυματοδηγούμενη ισχύ, ένα φαινόμενο το οποίο είναι γνωστό και ως φαινόμενο Kerr [1], [15]. Η εκμετάλλευση του εν λόγω φαινομένου έγκειται στην μεταβολή της φάσης κατά  $180^\circ$  μιας συγκεκριμένης συνιστώσας του σήματος εισόδου η οποία συνδιαδίδεται με το σήμα ελέγχου στο εσωτερικό του μη γραμμικού μέσου. Το μη γραμμικό μέσο μπορεί να είναι είτε ένας οπτικός ενισχυτής ημιαγωγού (Semiconductor Optical Amplifier – SOA) είτε ένα κατάλληλο μήκος οπτικής ίνας κατασκευασμένης από συγκεκριμένο υλικό, όπως

συμβαίνει στην περίπτωση μας με την ισχυρά μη γραμμική ίνα οξειδίου του Βισμούθιου. Συγκρινόμενες με αντίστοιχες διατάξεις ημιαγωγών οι οποίες παρουσιάζουν περιορισμένη ταχύτητα λειτουργίας, οι διατάξεις που βασίζονται σε οπτικές ίνες παρέχουν συγκεκριμένα πλεονεκτήματα όπως μικρό χρόνο απόκρισης (μερικά fsec), καμία ανάγκη ηλεκτρικής πόλωσης και αποφυγή σπατάλης θερμότητας [25].

**Οπτικό φίλτρο** (Optical Filter). Το οπτικό φίλτρο γενικά χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου είναι επιθυμητή η διέλευση ενός σήματος συγκεκριμένου μήκους κύματος και παράλληλα η αποκοπή όλων των υπολοίπων σημάτων διαφορετικού μήκους κύματος. Είναι μια ζωνοπερατή διάταξη η οποία εκμεταλλεύεται το φαινόμενο της συμβολής το οποίο προκύπτει από την υπέρθεση δύο ή περισσότερων οπτικών κυμάτων. Στην περίπτωση μας, το οπτικό φίλτρο έχει κεντρικό μήκος κύματος αυτό του σήματος εισόδου έτσι ώστε να αποκόπτει την διέλευση του παλμού ελέγχου, ο οποίος έχει διαφορετικό μήκος κύματος και να επιτρέπει τη διέλευση μόνο του σήματος εισόδου μετά το μη γραμμικό μέσο.

**Ελεγκτής πόλωσης** (Polarization Controller). Ο ελεγκτής πόλωσης είναι ένα οπτικό στοιχείο με τρεις βαθμούς ελευθερίας που μας επιτρέπει να στρέφουμε με συστηματικό τρόπο τη γωνία πόλωσης του πολωμένου φωτός που προσπίπτει σε αυτόν. Αποτελείται από συνδυασμό πλακιδίων καθυστέρησης φάσης  $\lambda/2$  και  $\lambda/4$ . Στα πλακίδια αυτά οι συνιστώσες του φωτός αποκτούν διαφορετική καθυστέρηση, ανάλογα με τον άξονα διάδοσης που τους αντιστοιχεί. Η διαφορά φάσης που εισάγεται φτάνει τις  $180^\circ$  και  $90^\circ$  αντίστοιχα. Στρέφοντας τα πλακίδια αλλάζουμε τη γωνία με την οποία το φως προσπίπτει πάνω τους, μεταβάλλοντας αντίστοιχα τις δύο συνιστώσες και ρυθμίζοντας άρα τη διαφορά φάσης που θα αποκτήσουν. Με τον τρόπο αυτό μεταβάλλουμε την πολωτική κατάσταση του φωτός. Στην περίπτωση μας, ο ελεγκτής πόλωσης χρησιμοποιείται για την στροφή της φάσης και των δύο συνιστωσών του σήματος εισόδου κατά  $90^\circ$ .

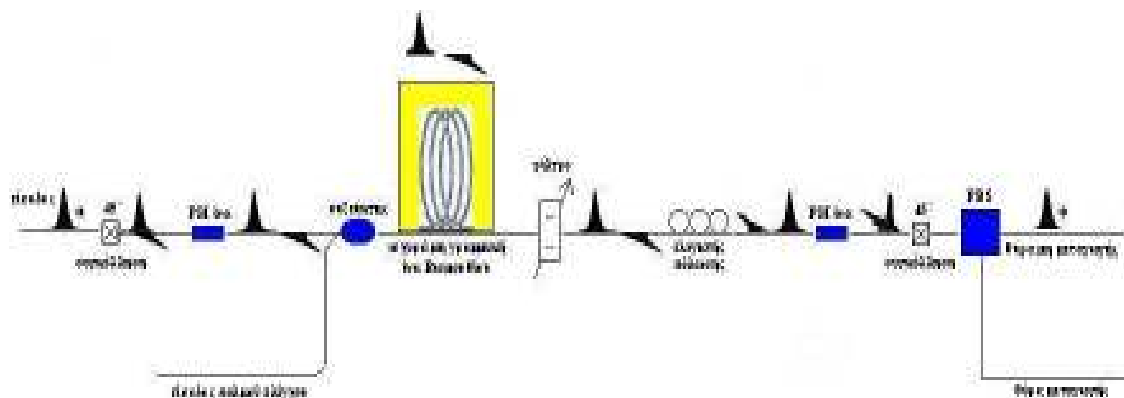
**PBS** (Polarization Beam Splitter – διαχωριστής πόλωσης). Ο διαχωριστής πόλωσης είναι ένας κατευθυντικός συζεύκτης ευαίσθητος στην πόλωση, ο οποίος χρησιμοποιείται για πολυπλεξία ή αποπολυπλεξία πολώσεων ή μηκών κύματος. Ο διαχωριστής πόλωσης διαιρεί μία προσπίπτουσα ακτινοβολία σε δυο κάθετα πολωμένες συνιστώσες, εμφανίζοντας καθεμία από αυτές σε δύο ξεχωριστές εξόδους. Μπορεί όμως να



χρησιμοποιηθεί και αντίστροφα με δύο εισερχόμενα σήματα εισόδου από τα οποία περνούν στην μοναδική έξοδο συγκεκριμένες κάθετες μεταξύ τους συνιστώσες. Στην περίπτωση μας, οι δύο εξοδοί του PBS αποτελούν και τις δύο θύρες εξόδου του UNI, μεταγωγής και μη μεταγωγής αντιστοίχως. Παρακάτω θα δούμε ότι για να λειτουργήσει το UNI ως  $2 \times 2$  οπτικός διακόπτης, απαιτείται η προσθήκη ενός ακόμη PBS στην είσοδο της διάταξης. Η βασική αρχή λειτουργίας των περισσοτέρων PBS βασίζεται στις συνέπειες της διπλοθλαστικότητας, της διάθλασης σε πολυστρωματικά διηλεκτρικά, της απορρόφησης, της περίθλασης σε δομές φράγματος, ή και σε συνδυασμό κάποιων από τα ανωτέρω.

### 2.2.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΗ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ

Στην ενότητα αυτή θα αναλυθεί λεπτομερώς η λειτουργία του UNI με ένα σήμα εισόδου στην κατάσταση μη μεταγωγής, δηλαδή απουσία σήματος ελέγχου. Στο παρακάτω σχήμα 2.3 παρουσιάζεται η διάταξη του UNI και επιδεικνύεται αναλυτικά η πορεία των οπτικών σημάτων στο εσωτερικό του στην κατάσταση μη μεταγωγής.



Σχήμα 2.3: Η πορεία των οπτικών σημάτων στο εσωτερικό του UNI στην περίπτωση ενός σήματος εισόδου και στην κατάσταση μη μεταγωγής.

Έστω ότι στην είσοδο του UNI, στο αριστερό μέρος του παραπάνω σχήματος, εισέρχονται οπτικοί παλμοί συχνότητας  $f_{\text{bit}} = 1/T_{\text{bit}}$  όπου  $T_{\text{bit}}$  είναι η περίοδος των παλμών. Περνώντας από τη συγκόλληση των  $45^\circ$ , το σήμα εισόδου διαχωρίζεται σε δύο

ίσες συνιστώσες, μία οριζόντια και μία κάθετη. Ακολουθεί ένα κατάλληλο μήκος PM ίνας της οποίας κάθε άξονας έχει διαφορετικό δείκτη διάθλασης, έστω  $n_x$  και  $n_y$  αντίστοιχα. Ως αποτέλεσμα, καθεμία από τις δύο κάθετες συνιστώσες του παλμού διαδίδεται με διαφορετική ταχύτητα μέσα στην PM ίνα, ίση με  $c/n_x$  και  $c/n_y$  αντίστοιχα, όπου  $c$  η ταχύτητα του φωτός στο κενό. Μόλις οι δύο συνιστώσες εξέρχονται από την PM ίνα, έχουν αποκτήσει μια χρονική καθυστέρηση ίση με  $\Delta t$ , η οποία δίνεται από την εξής σχέση:

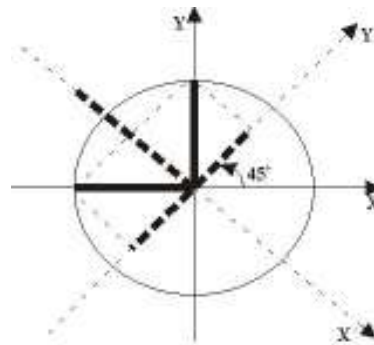
$$\Delta t = \frac{L}{\left| \frac{c}{n_x} - \frac{c}{n_y} \right|} \quad (2.1)$$

όπου  $L$  το μήκος της PM ίνας. Χρησιμοποιώντας επομένως κατάλληλο μήκος αυτής της ίνας μπορεί να εισαχθεί μεταξύ των δυο ορθογώνια πολωμένων συνιστωσών οποιαδήποτε επιθυμητή καθυστέρηση.

Εν συνεχεία, οι δύο κάθετα πολωμένες συνιστώσες του παλμού εισέρχονται κατά σειρά στον οπτικό συζεύκτη, στην ισχυρά μη γραμμική ίνα Βισμουθίου και στο οπτικό φίλτρο. Τα τρία ανωτέρω οπτικά στοιχεία δεν επηρεάζουν τη μορφή, την καθυστέρηση και την πολωτική κατάσταση των δύο συνιστωσών, αφού δεν εισέρχεται οπτικός παλμός ελέγχου στη δεύτερη είσοδο του οπτικού συζεύκτη. Το επόμενο βήμα είναι ο ελεγκτής πόλωσης, ο οποίος προκαλεί μια στροφή φάσης κατά  $90^\circ$  και στις δύο συνιστώσες, οι οποίες μόλις εισέλθουν στη δεύτερη PM ίνα θα καθυστερήσουν αντίστροφα σε σχέση με την πρώτη PM ίνα. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι η δεύτερη PM ίνα έχει το ίδιο μήκος  $L$  με την πρώτη ώστε να προκαλεί την ίδια χρονική καθυστέρηση  $\Delta t$ . Συνεπώς, εξερχόμενες οι συνιστώσες από τη δεύτερη PM ίνα και αφού έχουν καθυστερήσει αντίστροφα, θα συμπίπτουν χρονικά αλλά θα βρίσκονται σε κάθετες μεταξύ τους πολώσεις.

Ακολούθως οι δύο συνιστώσες συναντούν τον PBS, ο οποίος είναι συγκολλημένος στις  $45^\circ$  με την δεύτερη PM ίνα. Στο UNI ο PBS χρησιμοποιείται για να πραγματοποιηθεί η συμβολή των δύο κάθετα πολωμένων συνιστωσών που εξέρχονται από την δεύτερη PM ίνα. Ο μηχανισμός της συμβολής παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 2.4, όπου απεικονίζονται οι δύο συνιστώσες μόλις περνούν από το σημείο της

συγκόλλησης των  $45^\circ$  στον PBS. Με  $X$  και  $Y$  συμβολίζονται οι άξονες της δεύτερης PM ίνας ενώ με  $X'$  και  $Y'$  οι άξονες της εισόδου του PBS. Οι συμπαγείς μαύρες γραμμές συμβολίζουν τις δύο κάθετα πολωμένες συνιστώσες του παλμού στην έξοδο της PM ίνας, ενώ οι διακεκομμένες γραμμές συμβολίζουν τις αναλυμένες συνιστώσες στους άξονες του PBS.



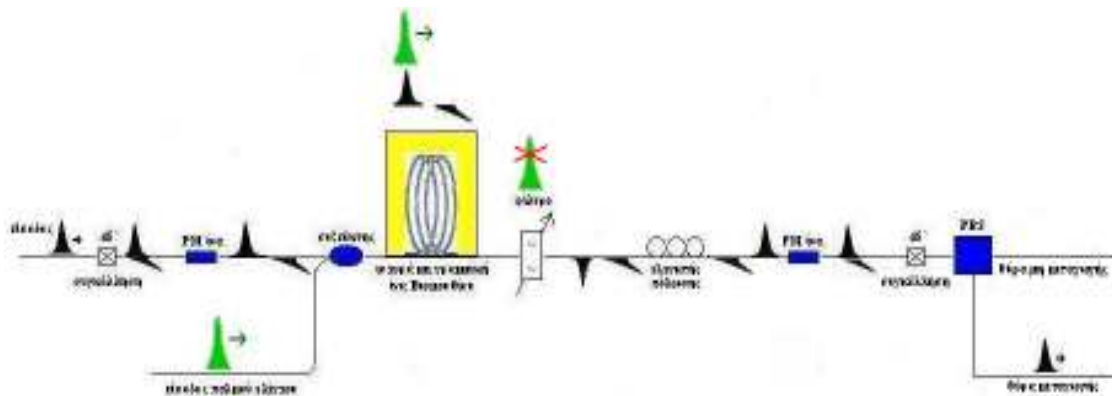
Σχήμα 2.4: Συμβολή των δύο συνιστωσών στον PBS, στην κατάσταση μη μεταγωγής.

Παρατηρείται ότι στον άξονα  $X'$  υπάρχει θετική συμβολή ενώ στον  $Y'$  αρνητική. Επομένως, ο παλμός που σχηματίζεται από τη θετική συμβολή θα εξέλθει από τη μία από τις δύο θύρες εξόδου του PBS (αυτή που αντιστοιχεί στον  $X'$ ), η οποία και ονομάζεται θύρα εξόδου μη μεταγωγής (Unswitched Port – U). Αντίθετα, στον  $Y'$  δε σχηματίζεται παλμός αφού οι δύο συνιστώσες σε αυτόν τον άξονα συμβάλλουν αρνητικά και επομένως αλληλοαναιρούνται. Άρα, στην αντίστοιχη θύρα του PBS, η οποία ονομάζεται και θύρα εξόδου μεταγωγής (Switched Port – S), δεν θα εμφανιστεί παλμός.

### 2.2.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ

Στην ενότητα αυτή θα αναλυθεί λεπτομερώς η λειτουργία του UNI με ένα σήμα εισόδου στην κατάσταση μεταγωγής, δηλαδή παρουσία σήματος ελέγχου το οποίο συνδιαδίδεται με το σήμα εισόδου. Στο παρακάτω σχήμα 2.5 παρουσιάζεται η διάταξη του UNI και επιδεικνύεται αναλυτικά η πορεία των οπτικών σημάτων στο εσωτερικό του στην κατάσταση μεταγωγής. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, η πορεία των σημάτων

αριστερά από τον οπτικό συζεύκτη είναι η ίδια με την περίπτωση της μη μεταγωγής. Τώρα όμως, στην δεύτερη είσοδο του συζεύκτη εισάγεται και το παλμικό σήμα ελέγχου, το οποίο σχεδιάζεται με πράσινο χρώμα στο σχήμα. Ο παλμός ελέγχου ρυθμίζεται έτσι ώστε να συγχρονιστεί με μία από τις δύο ορθογώνιες συνιστώσες του παλμού εισόδου (έστω με αυτή που υστερεί στο χρόνο) κατά την είσοδο στην ισχυρά μη γραμμική ίνα Βισμουθίου που ακολουθεί.



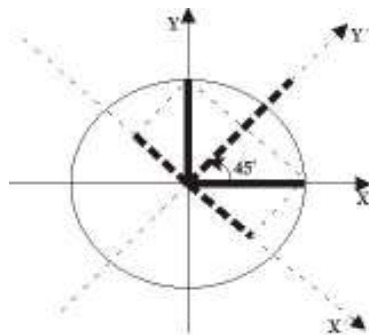
**Σχήμα 2.5:** Η πορεία των οπτικών σημάτων στο εσωτερικό του UNI στην περίπτωση ενός σήματος εισόδου το οποίο συνδιαδίδεται με το σήμα ελέγχου στην κατάσταση μεταγωγής.

Καθώς ο παλμός ελέγχου συνδιαδίδεται στο εσωτερικό της ισχυρά μη γραμμικής ίνας Βισμουθίου με το σήμα εισόδου, προκαλείται μια μεταβολή στο δείκτη διάθλασης, η οποία συνεπάγεται μεταβολή της φάσης της συνιστώσας με την οποία ο παλμός ελέγχου είναι συγχρονισμένος. Πρόκειται για το φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης φάσης (XPM). Το πόσο θα μεταβληθεί η φάση της συνιστώσας αυτής εξαρτάται από κάποιες παραμέτρους (πχ ισχύς του παλμού ελέγχου). Ο ακριβής μηχανισμός που ακολουθείται προκειμένου να προκύψει αυτή η μεταβολή της φάσης αναλύεται λεπτομερώς σε επόμενη ενότητα. Στην περίπτωσή μας, ο παλμός ελέγχου έχει συγχρονιστεί με τη συνιστώσα που υστερεί στο χρόνο, με την οποία βρίσκεται στην ίδια πολωτική κατάσταση. Με την ρύθμιση των κατάλληλων παραμέτρων και κυρίως της ισχύος του παλμού ελέγχου, μπορεί να επιτευχθεί στροφή φάσης της εν λόγω συνιστώσας κατά  $180^\circ$ , ενώ η φάση της έτερης συνιστώσας που προηγείται χρονικά δεν θα επηρεασθεί.

Ακολουθώς, το οπτικό φίλτρο αμέσως μετά την ισχυρά μη γραμμική ίνα Βισμουθίου, το οποίο είναι συντονισμένο στο μήκος κύματος του σήματος εισόδου, αποκόπτει το

σήμα ελέγχου που είναι διαφορετικού μήκους κύματος. Η συνέχεια είναι αντίστοιχη με την περίπτωση της μη μεταγωγής. Σειρά έχει ο ελεγκτής πόλωσης ο οποίος προκαλεί μια στροφή φάσης κατά  $90^\circ$  και στις δύο συνιστώσες, για να ακολουθήσει η δεύτερη PM ίνα η οποία προκαλεί αντίστροφη χρονική καθυστέρηση στις δύο συνιστώσες σε σχέση με την πρώτη PM ίνα. Συνεπώς, εξερχόμενες οι συνιστώσες από τη δεύτερη PM ίνα, θα συμπίπτουν χρονικά αλλά θα βρίσκονται σε κάθετες μεταξύ τους πολώσεις.

Στη συνέχεια οι δύο συνιστώσες συναντούν τον PBS, ο οποίος είναι συγκολλημένος στις  $45^\circ$  με την δεύτερη PM ίνα. Ο μηχανισμός της συμβολής που λαμβάνει χώρα στον PBS παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 2.6, όπου απεικονίζονται οι δύο συνιστώσες μόλις περνούν από το σημείο της συγκόλλησης των  $45^\circ$  στον PBS. Με X και Y συμβολίζονται οι άξονες της δεύτερης PM ίνας ενώ με X' και Y' οι άξονες της εισόδου του PBS. Οι συμπαγείς μαύρες γραμμές συμβολίζουν τις δύο κάθετα πολωμένες συνιστώσες του παλμού στην έξοδο της PM ίνας, ενώ οι διακεκομμένες γραμμές συμβολίζουν τις αναλυμένες συνιστώσες στους άξονες του PBS.



Σχήμα 2.6: Συμβολή των δύο συνιστωσών στον PBS, στην κατάσταση μεταγωγής.

Παρατηρείται ότι στον άξονα Y' υπάρχει θετική συμβολή ενώ στον X' αρνητική. Επομένως, ο παλμός που σχηματίζεται από τη θετική συμβολή θα εξέλθει από τη μία από τις δύο θύρες εξόδου του PBS (αυτή που αντιστοιχεί στον Y'), η οποία και ονομάζεται θύρα εξόδου μεταγωγής (Switched Port – S). Αντίθετα, στον X' δε σχηματίζεται παλμός αφού οι δύο συνιστώσες σε αυτόν τον άξονα συμβάλλουν αρνητικά και επομένως αλληλοαναιρούνται. Άρα, στην αντίστοιχη θύρα του PBS, η οποία ονομάζεται και θύρα εξόδου μη μεταγωγής (Unswitched Port – U), δεν θα εμφανιστεί παλμός.

### 2.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ UNI ΜΕ ΕΝΑ ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ

Στην προηγούμενη ενότητα περιγράφηκε λεπτομερώς και με τη βοήθεια σχημάτων η αρχή λειτουργίας του UNI με ένα σήμα εισόδου. Στην παρούσα ενότητα η ανάλυση θα γίνει με τη βοήθεια μαθηματικών σχέσεων. Αν θεωρήσουμε ότι το κύμα που εισέρχεται στο UNI έχει τυχαία πόλωση, ο μαθηματικός τύπος που το περιγράφει θα είναι ο εξής:

$$\vec{E}_{in} = \hat{p} E_{in} \exp(-j\omega t) \quad (2.2)$$

όπου  $\hat{p}$  είναι το τυχαίο διάνυσμα της πόλωσης,  $\omega$  είναι η φέρουσα συχνότητα και  $E_{in}$  είναι το πλάτος του σήματος εισόδου. Έτσι, η οπτική ισχύς του σήματος εισόδου θα έχει την εξής τιμή:

$$P_{in} = \left| \vec{E}_{in} \right|^2 = E_{in}^2 \quad (2.3)$$

Το ανωτέρω σήμα προτού εισέλθει στην πρώτη PM ίνα περνά από την συγκόλληση των  $45^\circ$  και αναλύεται σε δύο γραμμικές πολώσεις  $E_{in}^x$  και  $E_{in}^y$  ίσου πλάτους κάθετες μεταξύ τους και παράλληλες στους άξονες της ίνας. Οι συνιστώσες αυτές θα είναι της εξής μορφής:

$$E_{in}^x = E_{in}^y = E_{in} \cos(45^\circ) \exp(-j\omega t) = E_{in} \frac{\sqrt{2}}{2} \exp(-j\omega t) \quad (2.4)$$

Λόγω της διάδοσης των ανωτέρω δύο συνιστωσών σε μήκος  $L$  της PM ίνας, αυτές θα αποκτήσουν μια διαφορά φάσης ανάλογη του δείκτη διάθλασης σε κάθε άξονα της PM ίνας, ενώ τα πλάτη τους θα παραμείνουν ίσα. Συνεπώς, μετά την πρώτη PM ίνα, η εικόνα των δύο συνιστωσών θα δίνεται από τους παρακάτω τύπους (2.5) και (2.6):

$$E^x = E_{in} \frac{\sqrt{2}}{2} \exp[-j(\omega t - \beta_x L)] \quad (2.5)$$

$$E^y = E_{in} \frac{\sqrt{2}}{2} \exp[-j(\omega t - \beta_y L)] \quad (2.6)$$

Εν συνεχεία, οι δύο συνιστώσες διέρχονται από την ισχυρά μη γραμμική ίνα Βισμουθίου, στο εσωτερικό της οποίας διαδίδεται και το παλμικό σήμα ελέγχου. Έτσι, στην έξοδο της ίνας, η συνιστώσα με την οποία ο παλμός ελέγχου είναι συγχρονισμένος θα αποκτήσει μια μη γραμμική στροφή φάσης  $\Delta\varphi_{NL}$  σε σχέση με την έτερη συνιστώσα του σήματος εισόδου. Υποθέτουμε ότι ο παλμός ελέγχου έχει συγχρονισθεί με τη συνιστώσα  $E^y$  κάτι το οποίο συμφωνεί και με το σχήμα 2.5. Συνεπώς, στην έξοδο της ισχυρά μη γραμμικής ίνας, οι δύο συνιστώσες θα έχουν την εξής μορφή:

$$E^x = E_{in} \frac{\sqrt{2}}{2} \exp[-j(\omega t - \beta_x L)] \quad (2.7)$$

$$E^y = E_{in} \frac{\sqrt{2}}{2} \exp[-j(\omega t - \beta_y L + \Delta\varphi_{NL})] \quad (2.8)$$

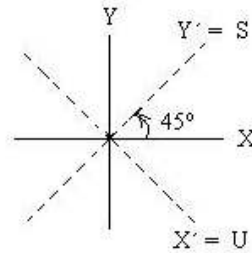
Να σημειωθεί ότι η ανάλυση γίνεται για τη γενική περίπτωση τυχαίας μη γραμμικής στροφής φάσης  $\Delta\varphi_{NL}$ . Στο τέλος της ενότητας θα παρατεθούν τα αποτελέσματα για τις ειδικές περιπτώσεις όπου η τιμή της  $\Delta\varphi_{NL}$  είναι  $180^\circ$  και  $0^\circ$  (κατάσταση μεταγωγής και μη μεταγωγής αντιστοίχως). Ειδικά η περίπτωση όπου  $\Delta\varphi_{NL} = 0^\circ$  αντιστοιχεί σε απουσία παλμού ελέγχου από το κύκλωμα.

Ακολούθως, οι δύο συνιστώσες διέρχονται από τον ελεγκτή πόλωσης, ο οποίος εισάγει μια στροφή φάσης κατά  $90^\circ$  και στις δύο συνιστώσες, για να συνεχίσουν στη δεύτερη PM ίνα η οποία προκαλεί αντίστροφη χρονική καθυστέρηση στις δύο συνιστώσες σε σχέση με την πρώτη PM ίνα, έτσι ώστε αυτές να επανενωθούν χρονικά. Έτσι, μετά και τη δεύτερη PM ίνα, η εικόνα των δύο συνιστωσών θα δίνεται από τους παρακάτω τύπους (2.9) και (2.10):

$$E^x = E_{in} \frac{\sqrt{2}}{2} \exp \left[ -j(\omega t - \beta_x L - \beta_y L + \frac{\pi}{2}) \right] \quad (2.9)$$

$$E^y = E_{in} \frac{\sqrt{2}}{2} \exp \left[ -j(\omega t - \beta_y L - \beta_x L + \Delta\phi_{NL} + \frac{\pi}{2}) \right] \quad (2.10)$$

Στο τέλος της διάταξης οι δύο συνιστώσες συναντούν τον PBS, ο οποίος είναι συγκολλημένος στις 45° με την δεύτερη PM ίνα. Ο μηχανισμός της συμβολής που λαμβάνει χώρα στον PBS για τις ειδικές περιπτώσεις μη μεταγωγής και μεταγωγής έχει παρουσιαστεί στα σχήματα 2.4 και 2.6 αντιστοίχως. Το γενικό σχηματικό διάγραμμα αξόνων στην είσοδο του PBS επαναλαμβάνεται στο παρακάτω σχήμα 2.7:



**Σχήμα 2.7: Γενικό διάγραμμα αξόνων στην είσοδο του PBS.**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, με X και Y συμβολίζονται οι άξονες της δεύτερης PM ίνας ενώ με X' και Y' οι άξονες της εισόδου του PBS. Ο άξονας Y' αντιστοιχεί στην θύρα εξόδου μεταγωγής του UNI (Switched Port – S) ενώ ο άξονας X' στη θύρα εξόδου μη μεταγωγής (Unswitched Port – U). Με οδηγό το ανωτέρω διάγραμμα και τα σχήματα 2.4 και 2.6, μπορούμε να εκφράσουμε αναλυτικά τους τύπους των κυμάτων  $E^S$  και  $E^U$  που θα εμφανισθούν στις θύρες μεταγωγής και μη μεταγωγής αντιστοίχως, συναρτήσει των κυμάτων  $E^x$  και  $E^y$  που δίνονται από τους τύπους (2.9) και (2.10). Έχουμε λοιπόν:

$$E^S = E^x \cos(45^\circ) + E^y \sin(45^\circ) = \frac{\sqrt{2}}{2} (E^x + E^y) \quad (2.11)$$

$$E^U = E^x \cos(45^\circ) - E^y \sin(45^\circ) = \frac{\sqrt{2}}{2} (E^x - E^y) \quad (2.12)$$



Οι σχέσεις που δίνουν τις τιμές των οπτικών ισχύων  $P_S$  και  $P_U$  που εξέρχονται από τις θύρες εξόδου μεταγωγής και μη μεταγωγής του UNI αντιστοίχως είναι οι εξής:

$$P_S = |E^S|^2 = \left| \frac{\sqrt{2}}{2} (E^x + E^y) \right|^2 = \frac{1}{2} (E^x + E^y)(E^x + E^y)^* \quad (2.13)$$

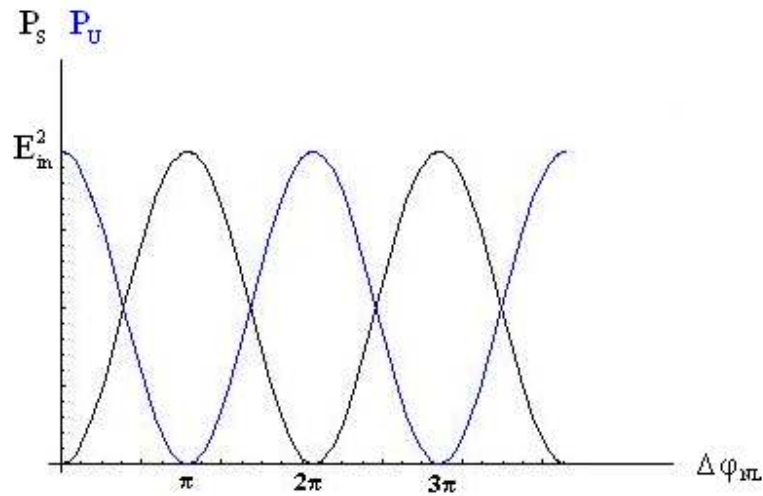
$$P_U = |E^U|^2 = \left| \frac{\sqrt{2}}{2} (E^x - E^y) \right|^2 = \frac{1}{2} (E^x - E^y)(E^x - E^y)^* \quad (2.14)$$

Αντικαθιστώντας στις δύο ανωτέρω σχέσεις τις εκφράσεις των  $E^x$  και  $E^y$  από τους τύπους (2.9) και (2.10) αντιστοίχως και εκτελώντας τις πράξεις λαμβάνουμε τα τελικά αποτελέσματα για τις τιμές των οπτικών ισχύων εξόδου  $P_S$  και  $P_U$ :

$$P_S = E_{in}^2 \sin^2 \left( \frac{\Delta\phi_{NL}}{2} \right) \quad (2.15)$$

$$P_U = E_{in}^2 \cos^2 \left( \frac{\Delta\phi_{NL}}{2} \right) \quad (2.16)$$

Οι σχέσεις (2.15) και (2.16) δείχνουν τον τρόπο με τον οποίο διαμοιράζεται η οπτική ισχύς από την θύρα εισόδου του UNI σε καθεμία από τις δύο θύρες εξόδου του. Η μοναδική παράμετρος που επηρεάζει την κατανομή της ισχύος είναι τιμή της μη γραμμικής στροφής φάσης  $\Delta\phi_{NL}$  που επιβάλλει ο παλμός ελέγχου στην συνιστώσα του σήματος εισόδου με την οποία είναι συγχρονισμένος κατά τη διάδοσή τους στο εσωτερικό της ισχυρά μη γραμμικής ίνας Βισμουθίου. Είναι φανερό ότι η οπτική ισχύς μετατοπίζεται από τη μία θύρα εξόδου στην άλλη, δηλαδή οι δύο θύρες εξόδου είναι συμπληρωματικές, με το άθροισμα των ισχύων εξόδου ( $P_S + P_U$ ) να ισούται με την ισχύ εισόδου  $P_{in}$ . Στο παρακάτω σχήμα 2.8 φαίνονται τα γραφήματα των συναρτήσεων των οπτικών ισχύων εξόδου  $P_S$  και  $P_U$  συναρτήσει της μη γραμμικής στροφής φάσης  $\Delta\phi_{NL}$ :



Σχήμα 2.8: Κατανομή των ισχύων εξόδου  $P_S$  και  $P_U$  του UNI συναρτήσει της μη γραμμικής στροφής φάσης  $\Delta\varphi_{NL}$ .

Αφού ολοκληρώθηκε η μαθηματική ανάλυση της λειτουργίας του UNI για τη γενική περίπτωση τυχαίας μη γραμμικής στροφής φάσης  $\Delta\varphi_{NL}$ , στο σημείο αυτό θα εξετάσουμε τις ιδιαίτερα σημαντικές ειδικές περιπτώσεις όπου η τιμή της  $\Delta\varphi_{NL}$  είναι  $0^\circ$  και  $180^\circ$  αντιστοίχως, με τη βοήθεια των τύπων (2.15) και (2.16).

→ **Περίπτωση  $\Delta\varphi_{NL} = 0^\circ$ .** Η εν λόγω περίπτωση αντιστοιχεί σε απουσία παλμού ελέγχου από το κύκλωμα, με συνέπεια να μην προκαλείται στροφή φάσης σε καμία από τις δύο συνιστώσες του σήματος εισόδου. Με αντικατάσταση στους τύπους (2.15) και (2.16) λαμβάνουμε τα εξής:  $P_S = 0$  και  $P_U = E_{in}^2 = P_{in}$ . Βλέπουμε ότι η οπτική ισχύς του σήματος εισόδου εξέρχεται εξ' ολοκλήρου από τη θύρα εξόδου μη μεταγωγής και λέμε ότι το UNI βρίσκεται σε **κατάσταση μη μεταγωγής**, η οποία περιγράφηκε στην ενότητα 2.2.1 μέσω του σχήματος 2.3.

→ **Περίπτωση  $\Delta\varphi_{NL} = 180^\circ$ .** Στην περίπτωση αυτή τα αποτελέσματα της αντικατάστασης στους τύπους (2.15) και (2.16) είναι τα εξής:  $P_S = E_{in}^2 = P_{in}$  και  $P_U = 0$ . Τώρα η οπτική ισχύς του σήματος εισόδου εξέρχεται εξ' ολοκλήρου

από τη θύρα εξόδου μεταγωγής και λέμε ότι το UNI βρίσκεται σε *κατάσταση μεταγωγής*, η οποία περιγράφηκε στην ενότητα 2.2.2 μέσω του σχήματος 2.5.

Κλείνοντας, υπογραμμίζουμε ότι σε όλη την ανωτέρω μαθηματική ανάλυση θεωρήσαμε ότι τα παθητικά στοιχεία του κυκλώματος του UNI δεν εισάγουν απώλειες ισχύος (αποσβέσεις) κατά την πορεία των δύο συνιστωσών του σήματος εισόδου, κάτι το οποίο προφανώς δεν είναι αληθές. Εντούτοις, η παραδοχή αυτή έγινε με σκοπό την ευκολία στην ανάλυση, αφού αν λαμβάναμε υπόψη τις αποσβέσεις θα έπρεπε να προσθέτουμε στους τύπους των πεδίων και ένα σχετικό πολλαπλασιαστικό παράγοντα μικρότερο της μονάδας, ενώ πρακτικά τα αποτελέσματα δεν θα άλλαζαν. Γενικά, στα οπτικά κυκλώματα για την αντιστάθμιση των αποσβέσεων τοποθετούνται κατά μήκος των διατάξεων ενισχυτές ίνας Ερβίου (Erbium Doped Fiber Amplifiers – EDFAs) για τους οποίους γίνεται λόγος στο επόμενο κεφάλαιο.

## 2.4 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΤΕΡΟΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΦΑΣΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

Στην παρούσα ενότητα αναλύεται με τη βοήθεια μαθηματικών σχέσεων το φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης φάσης (Cross Phase Modulation – XPM) στο εσωτερικό οπτικών ινών [1], [15]. Η ανάλυση αυτή είναι σκόπιμη καθώς στο φαινόμενο αυτό βασίζεται ουσιαστικά όλη η λειτουργία του UNI η οποία παρουσιάστηκε στις προηγούμενες ενότητες. Συγκεκριμένα, θα εξηγηθεί ο μηχανισμός με βάση τον οποίο προκύπτει η στροφή της φάσης κατά  $180^\circ$  της συνιστώσας του σήματος εισόδου η οποία είναι συγχρονισμένη με τον παλμό ελέγχου στο εσωτερικό της ισχυρά μη γραμμικής ίνας Βισμούθιου.

Γενικά, ο δείκτης διάθλασης ενός υλικού μέσου εξαρτάται από την εξωτερικά επιβαλλόμενη ισχύ των οπτικών σημάτων. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό και ως φαινόμενο Kerr και περιγράφεται από τον παρακάτω τύπο (2.17):

$$\bar{n}(\omega, |E|^2) = n(\omega) + n_2|E|^2 \quad (2.17)$$

όπου  $n(\omega)$  είναι το γραμμικό μέρος του δείκτη διάθλασης, η ποσότητα  $|E|^2$  εκφράζει την στιγμιαία ισχύ μέσα στην ίνα και ο παράγοντας  $n_2$  αποτελεί τον μη γραμμικό συντελεστή του δείκτη διάθλασης, ο οποίος σχετίζεται με τον τρίτης τάξεως όρο της επιδεκτικότητας του υλικού μέσου  $\chi_{xxx}^{(3)}$  σύμφωνα με την σχέση:

$$n_2 = \frac{3}{8n} \text{Re}(\chi_{xxx}^{(3)}) \quad (2.18)$$

Στην περίπτωση όπου δύο οπτικά κύματα κυματοδηγούνται μέσα από μια οπτική ίνα, αυτά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσω της μη γραμμικότητας του υλικού της ίνας. Για την περίπτωση της ετεροδιαμόρφωσης φάσης, η μη γραμμικότητα εισάγεται από την εξάρτηση του δείκτη διάθλασης του μέσου από τη συνολικά κυματοδηγούμενη ισχύ. Το φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης φάσης δε συμβαίνει μόνο μεταξύ κυμάτων που ανήκουν σε διαφορετικές φέρουσες συχνότητες. Αντίστοιχα φαινόμενα συμβαίνουν και στην περίπτωση όπου τα δύο αυτά κύματα έχουν την ίδια φέρουσα συχνότητα, αλλά ανήκουν σε διαφορετικές πολώσεις. Και πάλι η ισχύς του ενός κύματος της μίας πόλωσης θα συμβάλλει στη μη γραμμική διαμόρφωση του δείκτη διάθλασης τον οποίο θα δει το κύμα της άλλης πόλωσης.

Παρακάτω θα μελετηθεί μόνο η πρώτη από τις δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις, δηλαδή θα θεωρήσουμε δύο κύματα που έχουν διαφορετικές φέρουσες συχνότητες αλλά βρίσκονται στην ίδια πόλωση. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι προφανώς μας ενδιαφέρει μόνο αυτή η περίπτωση, αφού αυτή παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.2, με τον παλμό ελέγχου να διαφέρει ως προς τη φέρουσα συχνότητα (μήκος κύματος) από το σήμα εισόδου, αλλά να βρίσκεται στην ίδια πόλωση με την συνιστώσα με την οποία είναι συγχρονισμένος.

### 2.4.1 ΚΥΜΑΤΑ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΦΕΡΟΥΣΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΑΛΛΑ ΒΡΙΣΚΟΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΙΔΙΑ ΠΟΛΩΣΗ

Ο παρακάτω τύπος (2.19) παριστάνει την υπέρθεση δύο ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων τα οποία έχουν διαφορετικές φέρουσες συχνότητες αλλά βρίσκονται στην ίδια πόλωση:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \frac{1}{2} \hat{p} [E_1 \exp(-j\omega_1 t) + E_2 \exp(-j\omega_2 t)] + \text{c.c.} \quad (2.19)$$

όπου  $\hat{p}$  είναι το τυχαίο διάνυσμα της πόλωσης των δύο κυμάτων,  $\omega_1, \omega_2$  είναι οι δύο φέρουσες συχνότητες και  $E_1, E_2$  είναι τα αντίστοιχα πλάτη των παλμών. Ακόμη, θεωρούμε ότι για τα φασματικά εύρη των παλμών ισχύει:  $\Delta\omega_j \ll \omega_j$ . Στην περίπτωση του UNI που παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.2, τα δύο αυτά κύματα αντιστοιχίζονται στον παλμό ελέγχου και στη συνιστώσα του σήματος εισόδου με την οποία είναι συγχρονισμένος στο εσωτερικό της ισχυρά μη γραμμικής ίνας Βισμουθίου.

Για την ανωτέρω περίπτωση ηλεκτρομαγνητικού κύματος που παριστάνει ο τύπος (2.19), το διάνυσμα του μη γραμμικού μέρους της πόλωσης δίδεται από τον παρακάτω τύπο (2.20):

$$\begin{aligned} \vec{P}_{NL}(\vec{r}, t) = & \frac{1}{2} \hat{p} \left\{ P_{NL}(\omega_1) \exp(-j\omega_1 t) + P_{NL}(\omega_2) \exp(-j\omega_2 t) \right. \\ & + P_{NL}(2\omega_1 - \omega_2) \exp[-j(2\omega_1 - \omega_2)t] \\ & \left. + P_{NL}(2\omega_2 - \omega_1) \exp[-j(2\omega_2 - \omega_1)t] \right\} + \text{c.c.} \end{aligned} \quad (2.20)$$

όπου

$$P_{NL}(\omega_1) = \chi_{\text{eff}} (|E_1|^2 + 2|E_2|^2) E_1 \quad (2.21)$$

$$P_{NL}(\omega_2) = \chi_{\text{eff}} (|E_2|^2 + 2|E_1|^2) E_2 \quad (2.22)$$

$$P_{NL}(2\omega_1 - \omega_2) = \chi_{\text{eff}} E_1^2 E_2^* \quad (2.23)$$

$$P_{NL}(2\omega_2 - \omega_1) = \chi_{\text{eff}} E_2^2 E_1^* \quad (2.24)$$

και

$$\chi_{\text{eff}} = \frac{3\varepsilon_0}{4} \chi_{\text{xxx}}^{(3)} \quad (2.25)$$

Στην προηγούμενη σχέση (2.25), ο παράγοντας  $\chi_{\text{xxx}}^{(3)}$  παριστάνει τον τρίτης τάξεως όρο της επιδεκτικότητας του υλικού μέσου (δηλαδή της ισχυρά μη γραμμικής ίνας), ενώ ο παράγοντας  $\varepsilon_0$  παριστάνει την διηλεκτρική σταθερά του κενού.

Στο σημείο αυτό αν αγνοήσουμε την επίδραση του φαινομένου της διασποράς στο εσωτερικό της μη γραμμικής ίνας ο παράγοντας  $\chi_{\text{xxx}}^{(3)}$  δεν θα παρουσιάζει εξάρτηση από τη συχνότητα. Ακόμη, οι δύο όροι της μη γραμμικής πόλωσης της εξίσωσης (2.20) οι οποίοι ταλαντώνουν σε συχνότητες  $(2\omega_1 - \omega_2)$  και  $(2\omega_2 - \omega_1)$  μπορούν να αγνοηθούν. Οι εν λόγω όροι προκύπτουν από το φαινόμενο της μίξης τεσσάρων φωτονίων (Four Wave Mixing – FWM) και η συνθήκη βάσει της οποίας μπορούν να αγνοηθούν είναι να θεωρήσουμε ότι δεν βρίσκονται σε συμφωνία φάσης. Οι υπόλοιποι δύο όροι της εξίσωσης (2.20) συνεισφέρουν στη μη γραμμική συμπεριφορά του δείκτη διάθλασης και μπορούν να γραφούν στην εξής μορφή:

$$P_{\text{NL}}(\omega_j) = \varepsilon_0 \varepsilon_j^{\text{NL}} E_j \quad (2.26)$$

όπου  $j = 1, 2$ . Να σημειωθεί ότι ο παράγοντας  $\varepsilon_j^{\text{NL}}$  παριστάνει τη μη γραμμική συνεισφορά στη διηλεκτρική σταθερά.

Η συνολική πόλωση προκύπτει από την υπέρθεση του μη γραμμικού μέρους της, όπως αυτό δίδεται από τον τύπο (2.26) και του αντίστοιχου γραμμικού μέρους. Ο τύπος που δίνει τη συνολική πόλωση είναι ο εξής:

$$P(\omega_j) = \varepsilon_0 \varepsilon_j E_j \quad (2.27)$$

όπου

$$\varepsilon_j = \varepsilon_j^{\text{L}} + \varepsilon_j^{\text{NL}} = (n_j^{\text{L}} + \Delta n_j)^2 \quad (2.28)$$

Ο παράγοντας  $n_j^L$  παριστάνει το γραμμικό μέρος του δείκτη διάθλασης ενώ ο παράγοντας  $\Delta n_j$  παριστάνει τη μεταβολή που εισάγεται από τα τρίτης τάξεως μη γραμμικά φαινόμενα. Κάνοντας τώρα την προσέγγιση  $\Delta n_j \ll n_j^L$ , το μη γραμμικό μέρος του δείκτη διάθλασης θα δίδεται από την εξής σχέση:

$$\Delta n_j \approx \frac{\epsilon_j^{NL}}{2n_j} \approx n_2 (|E_j|^2 + 2|E_{3-j}|^2) \quad (2.29)$$

όπου ο παράγοντας  $n_2$  παριστάνει τον μη γραμμικό συντελεστή του δείκτη διάθλασης και δίδεται από τον τύπο (2.18). Ακόμη, έχουμε θεωρήσει ότι  $n_1^L = n_2^L = n$  και επίσης έχουμε αγνοήσει το φανταστικό μέρος του  $\chi_{xxx}^{(3)}$ .

Παρατηρώντας τον τύπο (2.29), είναι φανερό ότι το μη γραμμικό μέρος του δείκτη διάθλασης δεν εξαρτάται μόνο από την ισχύ του ενός κύματος, αλλά επιπλέον και από την ισχύ του άλλου κύματος. Συνεπώς, καθώς το κύμα διανύει μια απόσταση  $z$  με ταχύτητα  $c$  στο εσωτερικό της οπτικής ίνας, θα αποκτήσει μια μη γραμμική στροφή φάσης  $\Delta\phi_j^{NL}$  η οποία εξαρτάται από τη συνολικά κυματοδηγούμενη ισχύ και δίδεται από την εξής σχέση:

$$\Delta\phi_j^{NL} = \frac{\omega_j z}{c} \Delta n_j = \frac{\omega_j z n_2}{c} [ |E_j|^2 + 2|E_{3-j}|^2 ] \quad (2.30)$$

όπου  $j = 1$  ή  $2$ . Ο πρώτος όρος στην ανωτέρω σχέση είναι υπεύθυνος για το φαινόμενο της αυτοδιαμόρφωσης φάσης (Self Phase Modulation – SPM), ενώ ο δεύτερος όρος προκύπτει από τη διαμόρφωση της φάσης που επιβάλλει το ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα στο άλλο και συνιστά ουσιαστικά το φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης φάσης (Cross Phase Modulation – XPM). Ο πολλαπλασιαστικός παράγοντας 2 στον τύπο (2.30) φανερώνει ότι το φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης φάσης έχει διπλάσια επίδραση από

το αντίστοιχο φαινόμενο της αυτοδιαμόρφωσης φάσης, αν θεωρήσουμε ότι τα δύο οπτικά κύματα έχουν την ίδια ισχύ.

Ο τύπος (2.30) συμπυκνώνει όλο τον μηχανισμό λειτουργίας του UNI παρουσία παλμού ελέγχου, όπως περιγράφηκε στις προηγούμενες ενότητες. Αν αντιστοιχίσουμε τον παλμό ελέγχου με το κύμα  $E_{3-j}$  και τη συνιστώσα του σήματος εισόδου με την οποία είναι συγχρονισμένος με το κύμα  $E_j$  τότε το φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης φάσης στο εσωτερικό της ισχυρά μη γραμμικής ίνας Βισμουθίου θα προκαλέσει μια μη γραμμική στροφή φάσης  $\Delta\phi_j^{NL}$  στη συγκεκριμένη συνιστώσα του σήματος εισόδου, σύμφωνα τον ανωτέρω τύπο (2.30). Ακόμη, ρυθμίζοντας κατάλληλα την ισχύ  $|E_{3-j}|^2$  του παλμού ελέγχου, μπορούμε να επιτύχουμε στροφή φάσης  $\Delta\phi_j^{NL}$  ίση με την επιθυμητή τιμή των  $180^\circ$  ώστε να λειτουργήσει το UNI στην κατάσταση μεταγωγής. Να σημειωθεί ότι η φάση της έτερης συνιστώσας του σήματος εισόδου δεν θα επηρεαστεί.

Καταληκτικά, θα πρέπει να τονισθεί ότι σε όλη την παραπάνω μαθηματική ανάλυση έχουμε θεωρήσει ότι δεν υπάρχει γεωμετρικός περιορισμός στη διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Προφανώς, για την περίπτωση της οπτικής ίνας έχουμε διάδοση σε κυκλικό κυματοδηγό και δεχόμαστε ότι η κατανομή των διεγερόμενων ρυθμών επηρεάζεται ελάχιστα.

## **2.5 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ – ΤΟ ΒΙΣΜΟΥΘΙΟ ΩΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥΣ**

### **2.5.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ**

Έχει ήδη τονιστεί ότι υπάρχει πληθώρα εφαρμογών οπτικής επεξεργασίας σήματος οι οποίες εκμεταλλεύονται τα τρίτης τάξης μη γραμμικά φαινόμενα, όπως για παράδειγμα η μετατροπή μήκους κύματος (Wavelength Conversion), η οπτική πολυπλεξία και αποπολυπλεξία (Optical Multiplexing – Demultiplexing), η αναγέννηση σήματος (Signal Regeneration) κ.α. Μέχρι στιγμής όλες αυτές οι διαδικασίες γίνονταν κατά κύριο λόγο μέσω συμπαγών διατάξεων που βασίζονται σε ημιαγωγούς (πχ SOA), αφού αυτές προσφέρουν δυνατότητα για μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωση και απαιτούν σχετικά



χαμηλή ισχύ. Εντούτοις, υπάρχουν και συγκεκριμένες κατηγορίες οπτικών ινών οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως τρίτης τάξεως μη γραμμικά μέσα. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, σε σύγκριση με αντίστοιχες διατάξεις ημιαγωγών οι οποίες παρουσιάζουν περιορισμένη ταχύτητα λειτουργίας, οι διατάξεις που βασίζονται σε οπτικές ίνες παρέχουν συγκεκριμένα πλεονεκτήματα όπως μικρό χρόνο απόκρισης (μερικά fsec), καμία ανάγκη ηλεκτρικής πόλωσης και αποφυγή σπατάλης θερμότητας [25].

Γενικά, ο *συντελεστής μη γραμμικότητας*  $\gamma$  μιας ίνας δίδεται από τον παρακάτω τύπο (2.31) και εκφράζεται σε μονάδες  $W^{-1}km^{-1}$  [1], [15]:

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}} = \frac{\omega n_2}{c A_{\text{eff}}} \quad (2.31)$$

όπου  $n_2$  είναι ο μη γραμμικός συντελεστής του δείκτη διάθλασης και  $A_{\text{eff}}$  είναι η ενεργός επιφάνεια του πυρήνα της ίνας. Συνδυάζοντας των ανωτέρω τύπο με τον τύπο (2.30) της προηγούμενης ενότητας, προκύπτει η σχέση (2.32) η οποία συσχετίζει τη μη γραμμική στροφή φάσης  $\Delta\phi_j^{\text{NL}}$  που υφίσταται ένα κύμα λόγω ετεροδιαμόρφωσης φάσης κατά τη διάδοσή του στο εσωτερικό μιας οπτικής ίνας, με το συντελεστή μη γραμμικότητας  $\gamma_j$  της οπτικής ίνας (που αντιστοιχεί σε φέρουσα συχνότητα  $\omega_j$ ):

$$\Delta\phi_j^{\text{NL}} = \gamma_j A_{\text{eff}} z \left[ |E_j|^2 + 2|E_{3-j}|^2 \right] \quad (2.32)$$

Είναι φανερό ότι η μη γραμμική στροφή φάσης  $\Delta\phi_j^{\text{NL}}$  εξαρτάται ευθέως από την τιμή του συντελεστή μη γραμμικότητας  $\gamma_j$  της ίνας. Συνεπώς, για να καταστεί εντονότερη η επίδραση του φαινομένου της ετεροδιαμόρφωσης φάσης, πρέπει ο συντελεστής μη γραμμικότητας  $\gamma$  της ίνας να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερος. Με τη βοήθεια του τύπου (2.31) παρατηρούμε ότι υπάρχουν δύο μέθοδοι αύξησης του  $\gamma$ : Πρώτον, μέσω της μείωσης της ενεργού επιφάνειας του πυρήνα της ίνας  $A_{\text{eff}}$  και δεύτερον

κατασκευάζοντας την ίνα με ένα υαλώδες υλικό το οποίο χαρακτηρίζεται από υψηλό μη γραμμικό συντελεστή του δείκτη διάθλασης  $n_2$ .

Για την περίπτωση της αυτοδιαμόρφωσης φάσης (Self Phase Modulation – SPM), ο τύπος που δίνει τη μη γραμμική στρόφη φάσης  $\Delta\phi^{NL}$  είναι αντίστοιχος με τον τύπο (2.32) της ετεροδιαμόρφωσης φάσης [1], [15]:

$$\frac{\Delta\phi^{NL}}{2P_{in}} = \gamma L_{eff} \quad (2.33)$$

όπου  $P_{in}$  είναι η ισχύς εισόδου στην ίνα, ενώ ο παράγοντας  $L_{eff}$  παριστάνει το ενεργό μήκος της ίνας, το οποίο εξαρτάται από τον παράγοντα απωλειών  $a$  και το φυσικό μήκος  $L$  της ίνας μέσω του παρακάτω τύπου (2.34):

$$L_{eff} = \frac{[1 - \exp(-aL)]}{a} \quad (2.34)$$

Παρατηρούμε λοιπόν ότι για βέλτιστη επίδοση σε συνδυασμό με χαμηλή ισχύ εισόδου, θα πρέπει και το  $\gamma$  και το  $L_{eff}$  να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερα. Το μέγιστο ενεργό μήκος  $L_{eff,max}$  προκύπτει ότι είναι το αντίστροφο του παράγοντα απωλειών  $L_{eff,max} = 1/a$  που σημαίνει ότι ο όρος  $\gamma/a$  περιγράφει την ίνα όταν χρησιμοποιείται μεγάλο μήκος. Εντούτοις, προκειμένου να κατασκευαστούν συμπαγείς μη γραμμικές διατάξεις είναι επιθυμητά τα μικρά μήκη ίνας, οπότε ο όρος  $\gamma/a$  δεν είναι ο κατάλληλος. Συνεπώς, σε αρκετές περιπτώσεις τυπικά επιλέγεται να ορισθεί το πραγματικό μήκος της ίνας στο 1 m και να υπολογισθεί το  $L_{eff}$  για μήκος ίνας 1 m μέσω του τύπου (2.34). Έτσι, ο όρος  $\gamma L_{eff,1m}$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να χαρακτηρίσει τις ίνες που εφαρμόζονται σε συμπαγείς μη γραμμικές διατάξεις.

Κατά το παρελθόν, οι πλέον διαδεδομένες μη γραμμικές ίνες ήταν οι ίνες μετατοπισμένης διασποράς (Dispersion Shifted Fibers – DSFs), οι οποίες μάλιστα χαρακτηρίζονται από μηδενική διασπορά (Group Velocity Dispersion – GVD) στην

περιοχή των 1550 nm. Εντούτοις, ο μη γραμμικός συντελεστής των εν λόγω ινών δεν είναι ιδιαίτερα υψηλός, με αποτέλεσμα να απαιτούνται πολλά χιλιόμετρα ίνας προκειμένου να υλοποιηθούν οι οπτικές διατάξεις. Όπως είναι λοιπόν λογικό, η υλοποίηση των διατάξεων με βάση τις ίνες αυτού του τύπου είναι ασύμφορη, ιδιαίτερα όσον αφορά εφαρμογές πολλαπλών πυλών. Συνεπώς, η έρευνα στράφηκε προς την υλοποίηση άλλων τύπων ινών, με πολύ ισχυρότερη μη γραμμικότητα από τις DSFs, έτσι ώστε να μειωθούν τα απαιτούμενα μήκη ίνας.

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί μια νέα κατηγορία οπτικών ινών, οι οποίες περιλαμβάνουν μια σειρά από κυλινδρικές οπές αέρος κατά μήκος τους (Holey Fibers – HF) [26], [27], [28], [29]. Οι οπές αυτές στο εσωτερικό των ινών λειτουργούν ως ο μανδύας και το φως μπορεί να κυματοδηγηθεί με βάση την αρχή της τροποποιημένης ολικής εσωτερικής ανάκλασης. Οι οπές δρουν ελαττώνοντας τον ενεργό δείκτη διάθλασης στην περιοχή του μανδύα με αποτέλεσμα το φως να εγκλωβίζεται στο εσωτερικό του στερεού πυρήνα ο οποίος έχει σχετικά μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης. Οι ίνες με οπές έχουν συγκεντρώσει αυξανόμενο ερευνητικό ενδιαφέρον γιατί υπόσχονται την ανάπτυξη των συμπαγών μη γραμμικών διατάξεων οι οποίες λειτουργούν με χαμηλή ισχύ.

Ο τρόπος κατασκευής των ινών με οπές, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους και η ευλυγισία στη σχεδίασή τους παρέχουν μια ευρύτερη γκάμα οπτικών ιδιοτήτων σε σχέση με τις συμβατικές ίνες, με κυριότερη την ιδιότητα της πολύ μικρότερης ενεργού επιφανείας  $A_{\text{eff}}$ . Επί παραδείγματι, η τιμή του  $\gamma$  μιας κλασσικής μονότροπης ίνας κατασκευασμένης από οξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ) βρίσκεται στην περιοχή των  $2.7 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$  ενώ για μια ίνα με οπές του ίδιου υλικού με πολύ μικρότερο  $A_{\text{eff}}$  η τιμή του  $\gamma$  αυξάνεται προσεγγίζοντας τα  $60 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$  [29]. Ακόμη, οι καινοτόμες ιδιότητες κυματοδηγήσής των ινών με οπές προσφέρουν τη δυνατότητα υπερνίκησης της μεγάλης κανονικής διασποράς υλικού. Εντούτοις, οι απώλειες διάδοσης γενικά αυξάνονται με τη μείωση των διαστάσεων του πυρήνα της ίνας ενώ η περαιτέρω βελτίωση της ποιότητας της επιφάνειας είναι μια υποσχόμενη οδός για να μειωθούν οι απώλειες των ινών με οπές. Όσον αφορά τον συντελεστή μη γραμμικότητας  $\gamma$ , αυτός προφανώς αυξάνεται δραστικά μέσω της μείωσης της διαμέτρου του πυρήνα.

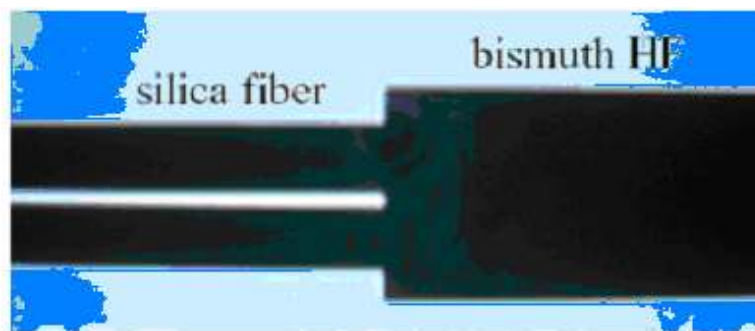
### 2.5.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΙΣΧΥΡΑ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΙΝΩΝ ΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΒΙΣΜΟΥΘΙΟΥ

Είδαμε στην προηγούμενη ενότητα πως είναι εφικτή η αύξηση του συντελεστή μη γραμμικότητας  $\gamma$  μιας ίνας μέσω τεχνικών μείωσης της ενεργού επιφανείας της  $A_{\text{eff}}$  (ανάπτυξη ινών με οπές – Holely Fibers). Στην παρούσα ενότητα θα δούμε ότι η αύξηση του  $\gamma$  μπορεί να επιτευχθεί μέσω της κατασκευής της ίνας από εναλλακτικά υλικά, τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλό μη γραμμικό συντελεστή του δείκτη διάθλασης  $n_2$ . Ένα τέτοιο υλικό είναι και το οξείδιο του Βισμούθιου (Bismuth Oxide –  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ). Η ανάπτυξη ινών οξειδίου του Βισμούθιου είναι πολύ πρόσφατη και τα μέχρι στιγμής αποτελέσματα είναι ιδιαίτερος ενθαρρυντικά όσον αφορά την κατασκευή ινών με πάρα πολύ υψηλό συντελεστή μη γραμμικότητας  $\gamma$ . Μάλιστα, ο μη γραμμικός συντελεστής των εν λόγω ινών μπορεί να λάβει πολύ μεγάλες τιμές ακόμη και με τη συμβατική δομή κατασκευής step – index χωρίς σμίκρυνση της ενεργού επιφανείας [19].

Πιο συγκεκριμένα, ο συντελεστής μη γραμμικότητας  $\gamma$  των οπτικών ινών Βισμούθιου έχει ξεπεράσει την τιμή των  $1000 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$  σε αρκετές σχετικές υλοποιήσεις που έχουν προταθεί στο πρόσφατο παρελθόν αγγίζοντας και τα  $1360 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$  σε συμβατική ίνα step – index τύπου [19] ενώ ο μη γραμμικός συντελεστής του δείκτη διάθλασης  $n_2$  μπορεί να λάβει τιμές αυξημένες κατά εκατοντάδες φορές σε σύγκριση με τις αντίστοιχες ίνες Πυριτίου, αγγίζοντας την ιδιαίτερα υψηλή τάξη μεγέθους των  $10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$  [19]. Επιπρόσθετα, τέτοιου είδους ίνες οξειδίου του Βισμούθιου παρουσιάζουν καλή μηχανική, θερμική και χημική συμπεριφορά. Σε αντίθεση με άλλα ισχυρά μη γραμμικά σύνθετα γυαλιά, τα γυαλιά από Βισμούθιο δεν περιέχουν τοξικά στοιχεία όπως Pb, As, Se, Te [30] και οι ίνες που κατασκευάζονται από Βισμούθιο μπορούν να συγκολληθούν με τις ίνες Πυριτίου [31], κάτι που επιτρέπει εύκολη ολοκλήρωση σε συστήματα βασισμένα στο Πυρίτιο. Εντούτοις, απαιτείται περαιτέρω έρευνα με σκοπό την ανάπτυξη βελτιωμένων μεθόδων για τη μείωση των απωλειών συγκόλλησης.

Εκτός από τη συμβατική δομή step – index, το γυαλί από οξείδιο του Βισμούθιου έχει επίσης χρησιμοποιηθεί και για την κατασκευή ισχυρά μη γραμμικών ινών με οπές (Holey Fibers) [28]. Οι ίνες Βισμούθιου με οπές προσφέρουν καλύτερες επιδόσεις σε συμπαγείς

μη γραμμικές διατάξεις σε σύγκριση με τις ισχυρά μη γραμμικές ίνες Πυριτίου, εξαιτίας της σαφώς μεγαλύτερης ενεργής μη γραμμικότητάς τους, η οποία επιτρέπει την μείωση της απαιτούμενης ισχύος λειτουργίας. Οι αρνητικές συνέπειες των υψηλότερων απωλειών που παρουσιάζουν οι ίνες Βισμούθιου με οπές συγκρινόμενες με τις ίνες Πυριτίου με οπές μπορούν να ξεπεραστούν μόνο όταν χρησιμοποιούνται μικρά μήκη ίνας ( $< 1$  m). Στο παρακάτω σχήμα 2.9 παρουσιάζεται μια εικόνα της συγκόλλησης μιας ίνας Βισμούθιου με οπές με ίνα Πυριτίου, μέσω οπτικού μικροσκοπίου:



**Σχήμα 2.9:** Εικόνα συγκόλλησης ίνας Βισμούθιου με οπές με ίνα Πυριτίου, μέσω οπτικού μικροσκοπίου.

Έτσι, είναι πλέον εφικτή η ανάπτυξη μη γραμμικών διατάξεων επεξεργασίας σήματος οι οποίες χρησιμοποιούν πολύ μικρά μήκη ίνας και λειτουργούν σε χαμηλές ισχύεις. Μόλις 1 m μιας τέτοιας ισχυρά μη γραμμικής ίνας Βισμούθιου ή και λιγότερο είναι αρκετό για να δημιουργηθεί η απαιτούμενη μη γραμμική στροφή φάσης. Η σταθερότητα και η ευκολία ολοκλήρωσης οπτικών διατάξεων που βασίζουν τη λειτουργία τους σε τέτοιου είδους ίνες συγκριτικά με αντίστοιχες διατάξεις που βασίζονται σε ημιαγωγούς μπορούν να αυξηθούν σημαντικά χρησιμοποιώντας μη γραμμικές ίνες μικρού μήκους. Ακόμη, η μη γραμμική ίνα Βισμούθιου έχει το μοναδικό πλεονέκτημα ενός σχετικά υψηλού κατωφλίου εξαναγκασμένης σκέδασης Brillouin (Stimulated Brillouin Scattering – SBS) σε σύγκριση με την αντίστοιχη ίνα Πυριτίου, που σημαίνει ότι η υλοποίηση μιας γκάμας οπτικών διατάξεων που βασίζονται στην μίξη τεσσάρων φωτονίων (Four – Wave Mixing) είναι εύκολα επιτεύξιμη [32]. Ένα σημαντικό σημείο όσον αφορά τη χρήση τόσο μικρού μήκους μη γραμμικής ίνας Βισμούθιου (1 m) έγκειται στο ότι δεν απαιτείται κάποια ιδιαίτερη καταπίεση της

αστάθειας της πόλωσης του σήματος, η οποία προκαλείται από την τοπική και εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία διακύμανση της διπλοθλαστικότητας, κάτι που συχνά παρατηρείται στο εσωτερικό ενός μεγάλου μήκους συμβατικής οπτικής ίνας. Μάλιστα μέχρι στιγμής το πρόβλημα της αστάθειας στην πόλωση είχε σταθεί περιοριστικός παράγοντας για πολλές εφαρμογές και ξεπεράστηκε με τη χρησιμοποίηση της ισχυρά μη γραμμικής ίνας Βισμούθιου.

Παρακάτω παρατίθεται ένας ενδεικτικός πίνακας, ο οποίος αντιπαραβάλλει τα χαρακτηριστικά ορισμένων μη γραμμικών οπτικών ινών οξειδίου του Βισμούθιου οι οποίες έχουν ήδη υλοποιηθεί στο πρόσφατο παρελθόν με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά άλλων τύπων μη γραμμικών ινών. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή απωλειών (σε dB/m), του μη γραμμικού συντελεστή  $\gamma$ , του  $L_{\text{eff,max}}$ , του  $\gamma L_{\text{eff,max}} = \gamma/a$ , του  $L_{\text{eff,1m}}$  και του  $\gamma L_{\text{eff,1m}}$  μετρημένα στα 1550 nm. Οι τύποι ινών που εξετάζονται είναι μία ίνα μετατοπισμένης διασποράς (Dispersion Shifted fiber – DSF), ίνες με οπές (Holey Fibers – HFs) διαφόρων υλικών και συμβατικές ίνες (CFs – Conventional fibers) Βισμούθιου.

fiber	fiber loss (dB/m)	$\gamma$ ( $\text{W}^{-1} \text{km}^{-1}$ )	$L_{\text{eff,max}}$ (m)	$\gamma L_{\text{eff,max}} = \gamma/a$ ( $\text{W}^{-1}$ )	$L_{\text{eff,1m}}$ (m)	$\gamma L_{\text{eff,1m}}$ ( $10^{-3} \text{W}^{-1}$ )
silica HN-DSF [33]	0.0005	20	8680	174	1.00	20
silica HF [32]	0.19	70	23	1.6	0.99	70
tellurite HF [34]	0.4	675	11	7.4	0.96	640
bismuth CF [35]	0.8	64	5.4	0.3	0.91	60
bismuth CF [19]	1.9	1360	2.3	3.1	0.81	1100
bismuth HF#3	2.8	735	1.6	1.1	0.74	540
bismuth HF#3	3.4	1100	1.3	1.4	0.69	760
SF57 HF [27]	2.6	640	1.7	1.1	0.75	480
theoretical limit for bismuth silicate HF [28]	1.0	2200	4.3	9.6	0.89	1970

**Πίνακας 2.1:** Αντιπαραβολή των χαρακτηριστικών των ινών Βισμούθιου με άλλου τύπου μη γραμμικές ίνες. Τα χαρακτηριστικά μετρήθηκαν για μήκος κύματος 1550 nm.

Είναι φανερό ότι οι ίνες Βισμούθιου γενικά υπερέχουν ως προς τον συντελεστή μη γραμμικότητας  $\gamma$  αλλά και ως προς την παράμετρο  $\gamma L_{\text{eff,1m}}$  η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να χαρακτηρίσει τις ίνες που εφαρμόζονται σε συμπαγείς μη

γραμμικές διατάξεις. Εντούτοις, διαπιστώνεται μειονέκτημα όσον αφορά τον συντελεστή απωλειών των ινών Βισμούθιου. Η τελευταία γραμμή του πίνακα παρουσιάζει ένα εντυπωσιακό θεωρητικό όριο στην τιμή του μη γραμμικού συντελεστή  $\gamma$  ( $2200 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ ) μιας συγκεκριμένης υλοποίησης ίνας Βισμούθιου με οπές [28], συνιστώντας ακόμη ένα δείγμα των τεράστιων δυνατοτήτων που παρέχει η χρησιμοποίηση του Βισμούθιου.

Μέχρι σήμερα έχει παρουσιασθεί μια σειρά από διατάξεις οι οποίες βασίζουν τη λειτουργία τους σε ισχυρά μη γραμμικές ίνες Βισμούθιου, ενώ φαίνεται ότι υπάρχουν πολλές προοπτικές για περαιτέρω έρευνα. Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να παρατεθούν ορισμένες χαρακτηριστικές περιπτώσεις τέτοιων διατάξεων. Αρχικά, στο πείραμά μας μια ισχυρά μη γραμμική ίνα Βισμούθιου χρησιμοποιείται για την υλοποίηση του UNI και κατ' επέκταση ενός  $2 \times 2$  διακόπτη μεταγωγής. Η ίνα έχει μόλις 0.8 m μήκος ενώ χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα υψηλό συντελεστή μη γραμμικότητας  $\gamma$  της τάξεως των  $950 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$  [36]. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η διάταξη βασίζει τη λειτουργία της στο φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης φάσης.

Πρόσφατα υλοποιήθηκε πειραματικά και παρουσιάσθηκε μια συμπαγής διάταξη πολυπλέκτη προσθήκης/αφαίρεσης (Add/Drop Multiplexer – ADM) στα 160 Gbps χρησιμοποιώντας μόλις 1 m ισχυρά μη γραμμικής ίνας Βισμούθιου ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) step – index τύπου ( $\gamma \approx 1100 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$  στα 1550 nm) [37]. Η διάταξη βασίζει τη λειτουργία της στο φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης φάσης σε συνδυασμό με την αρχή της μη γραμμικής διπλοθλαστικότητας. Επί της παρούσης, η εν λόγω υλοποίηση δεν παρέχει καλύτερες επιδόσεις από τη χρησιμοποίηση μη γραμμικής ίνας Πυριτίου μήκους μερικών εκατοντάδων μέτρων. Εντούτοις, υπάρχει αισιοδοξία ότι μπορεί να επιτευχθεί συγκρίσιμη ή και καλύτερη επίδοση στο κοντινό μέλλον αν λάβουμε υπόψη την πρόοδο στη σχεδίαση και υλοποίηση μη γραμμικών ινών Βισμούθιου.

Ακόμη, μία ίδιου τύπου ισχυρά μη γραμμική ίνα Βισμούθιου χρησιμοποιήθηκε πρόσφατα και για την υλοποίηση ενός μετατροπέα μήκους κύματος (Wavelength Converter) για σήματα OTDM, μετά από επιτυχή συγκόλληση της ίνας Βισμούθιου με συμβατική ίνα Πυριτίου [38]. Ο εν λόγω μετατροπέας μήκους κύματος βασίζεται στη συμβατική αρχή του Kerr, εκμεταλλευόμενος τη μη γραμμική διπλοθλαστικότητα και η λειτουργία του γίνεται σε ρυθμό 80 Gbps. Αρκετές ερευνητικές προσπάθειες έχουν παρουσιασθεί με σκοπό την ανάπτυξη μετατροπέων μήκους κύματος οι οποίοι

βασίζονται σε ίνες, εκμεταλλευόμενοι μη γραμμικά φαινόμενα όπως η μίξη τεσσάρων φωτονίων και η ετεροδιαμόρφωση φάσης. Μέχρι στιγμής ένα από τα βασικά μειονεκτήματα ήταν η έλλειψη σταθερότητας των διατάξεων εξαιτίας του μεγάλου μήκους ίνας. Προκειμένου να ξεπερασθεί το πρόβλημα αυτό προτάθηκαν διάφοροι τύποι ινών όπως ισχυρά μη γραμμικές ίνες μετατοπισμένης διασποράς (Dispersion Shifted Fibers – DSFs) και ίνες με οπές (HFs). Εντούτοις, ακόμη και τέτοιου είδους ίνες απαιτείται να έχουν μήκος μερικές δεκάδες μέτρα για την υλοποίηση μετατροπέων μήκους κύματος, περιορίζοντας τις πρακτικές τους εφαρμογές. Με τη χρησιμοποίηση ισχυρά μη γραμμικής ίνας Βισμουθίου ( $\gamma \approx 1100 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$  στα 1550 nm) το μήκος της ίνας περιορίζεται μόλις στο 1 m ενώ η διασπορά βρίσκεται σε κανονικά επίπεδα, μια ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος για την επιτυχή λειτουργία μη γραμμικών οπτικών διατάξεων επεξεργασίας σήματος.

Από όλα τα ανωτέρω, είναι φανερό ότι η ίνα Βισμουθίου υπολογίζεται πλέον ως βασική υποψήφια για πρακτικές εφαρμογές μη γραμμικής οπτικής επεξεργασίας σήματος και αναμένεται να παρουσιαστούν στο άμεσο μέλλον ακόμη περισσότερες διατάξεις οι οποίες θα βασίζονται τη λειτουργία τους σε τέτοιου τύπου ίνες. Βέβαια, απαιτείται επιπλέον ερευνητική προσπάθεια προκειμένου να ξεπεραστούν ορισμένες βασικές αδυναμίες όπως, επί παραδείγματι, πρέπει να μειωθούν οι απώλειες συγκόλλησης της ίνας Βισμουθίου με άλλες SMF ίνες αλλά και οι απώλειες διάδοσης στο εσωτερικό της και να βελτιωθούν οι επιδόσεις της ίνας Βισμουθίου όσον αφορά τη διασπορά.

## **2.6 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ UNI ΩΣ 2×2 ΟΠΤΙΚΟΣ ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ**

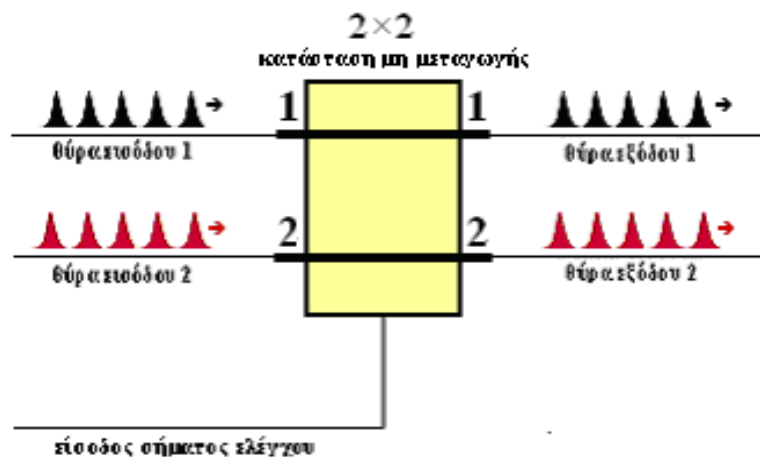
### **2.6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ**

Στις προηγούμενες ενότητες του παρόντος κεφαλαίου εξετάστηκε ενδελεχώς η λειτουργία του UNI με ένα σήμα εισόδου. Με ακριβώς αντίστοιχο τρόπο, στην παρούσα ενότητα θα αναλυθεί θεωρητικά η αρχή λειτουργίας του UNI ως 2×2 οπτικός διακόπτης μεταγωγής (Exchange – Bypass Switch). Είναι σκόπιμο η ανάλυση να ξεκινήσει από τη



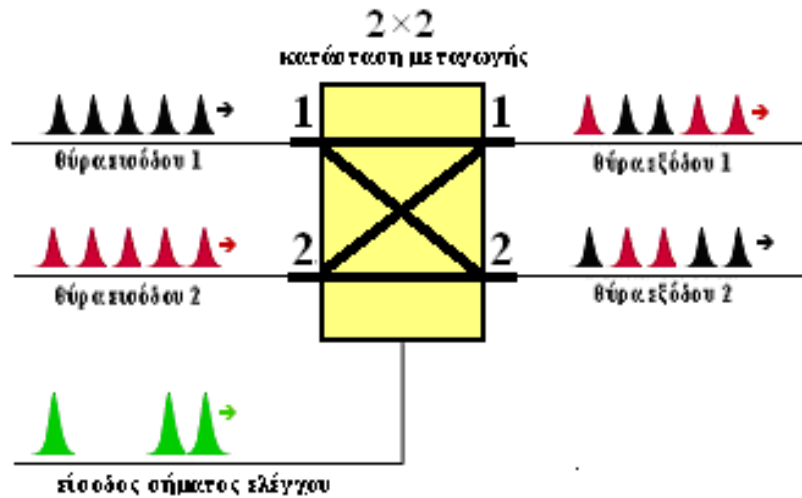
γενική αρχή λειτουργίας ενός τυχόντος  $2 \times 2$  οπτικού διακόπτη μεταγωγής και στη συνέχεια να επικεντρωθεί στο UNI. Γενικά, ένας  $2 \times 2$  οπτικός διακόπτης μεταγωγής είναι ένα στοιχείο δύο εισόδων και δύο εξόδων. Ανάλογα με την απουσία ή την παρουσία ενός κατάλληλου σήματος ελέγχου, τα δύο σήματα εισόδου εξέρχονται είτε από τις αντίστοιχες θύρες εξόδου είτε εναλλάσσονται σε αυτές. Η αρχή λειτουργίας του  $2 \times 2$  διακόπτη παρουσιάζεται με σαφήνεια στα σχήματα που ακολουθούν.

Στο σχήμα 2.10 φαίνεται η περίπτωση απουσίας σήματος ελέγχου. Τα δύο οπτικά σήματα εισέρχονται στις θύρες εισόδου 1 και 2 και εξέρχονται ανεπηρέαστα από τις θύρες εξόδου 1 και 2 αντιστοίχως. Στην περίπτωση αυτή ο διακόπτης λειτουργεί στην **κατάσταση μη μεταγωγής (Bar State)**.



Σχήμα 2.10: Αρχή λειτουργίας  $2 \times 2$  διακόπτη σε κατάσταση μη μεταγωγής (bar state).

Στο σχήμα 2.11 φαίνεται η περίπτωση παρουσίας σήματος ελέγχου, στην οποία απαιτείται συγχρονισμός των δύο σημάτων εισόδου. Η διαδικασία της αντιμετάθεσης των παλμών στις εξόδους του διακόπτη αφορά τους παλμούς εισόδου οι οποίοι είναι συγχρονισμένοι με παλμούς ελέγχου. Με την παρουσία δηλαδή του παλμού ελέγχου, ο παλμός που εισέρχεται στην είσοδο 1 εξέρχεται από την έξοδο 2, ενώ ο χρονικά αντίστοιχος παλμός που εισέρχεται στην είσοδο 2 εξέρχεται από την έξοδο 1. Αντιθέτως, οι παλμοί εισόδου οι οποίοι δεν είναι συγχρονισμένοι με παλμούς ελέγχου εξέρχονται ανεπηρέαστοι από τις αντίστοιχες θύρες εξόδου. Στην περίπτωση αυτή ο διακόπτης λειτουργεί στην **κατάσταση μεταγωγής (Cross State)**.



Σχήμα 2.11: Αρχή λειτουργίας 2x2 διακόπτη σε κατάσταση μεταγωγής (cross state).

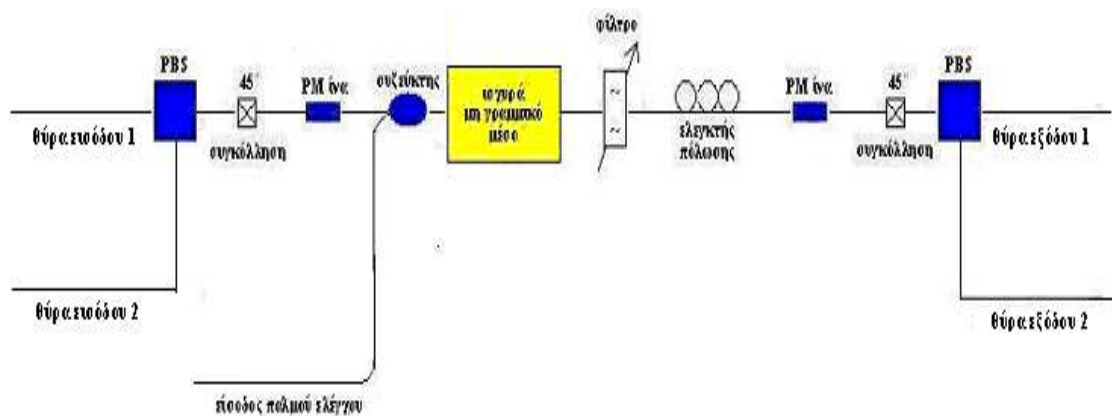
Με βάση όλα τα ανωτέρω, ο πίνακας αληθείας ενός τυπικού 2x2 οπτικού διακόπτη μεταγωγής είναι ο εξής:

Σήμα Εισόδου 1	Σήμα Εισόδου 2	Σήμα Ελέγχου	Έξοδος 1	Έξοδος 2
0	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	1	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	1	0	1	1
1	1	1	1	1

Πίνακας 2.2: Πίνακας αληθείας ενός τυπικού 2x2 οπτικού διακόπτη μεταγωγής.

Στην περίπτωσή μας, η διάταξη του UNI που υλοποιεί τον 2x2 διακόπτη μεταγωγής περιλαμβάνει δύο θύρες εισόδου και δύο θύρες εξόδου αντιστοίχως, ενώ η γενική μορφή της στην περίπτωση που τα δύο σήματα εισόδου και το σήμα ελέγχου είναι συνδιαδιδόμενα στην κατάσταση μεταγωγής είναι όμοια με εκείνη του σχήματος 2.2. Η

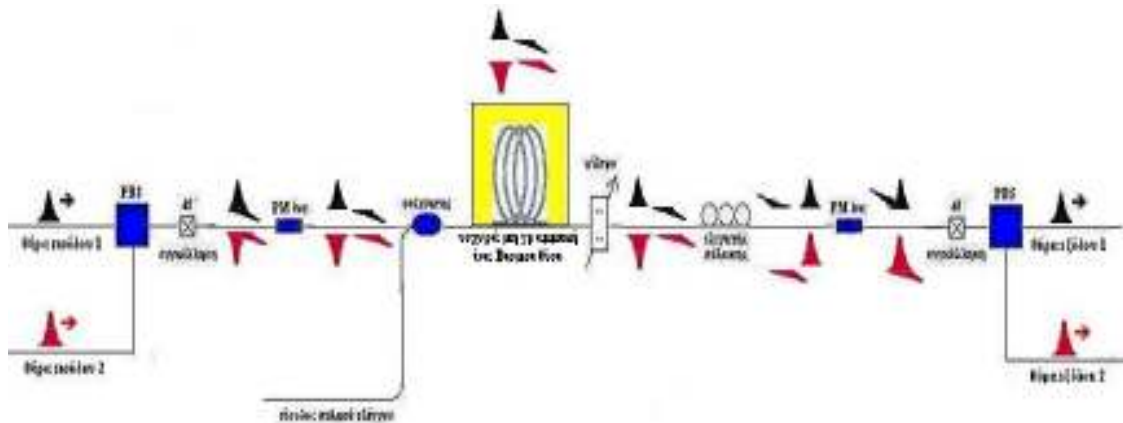
μοναδική διαφοροποίηση έγκειται στην προσθήκη ενός κατάλληλου PBS στο αριστερό μέρος της διάταξης, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.12 που ακολουθεί. Αμέσως μετά περιγράφεται αναλυτικά η λειτουργία του UNI ως  $2 \times 2$  διακόπτης στις περιπτώσεις μη μεταγωγής και μεταγωγής αντιστοίχως. Υπενθυμίζεται ότι στην περίπτωση που εξετάζεται, το μη γραμμικό μέσο είναι η ισχυρά μη γραμμική ίνα Βισμουθίου.



Σχήμα 2.12: Γενική μορφή της διάταξης του UNI ως  $2 \times 2$  διακόπτης στην περίπτωση που τα δύο σήματα εισόδου και το σήμα ελέγχου είναι συνδιαδιδόμενα στην κατάσταση μεταγωγής.

## 2.6.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΗ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ

Στην παρούσα ενότητα θα αναλυθεί η λειτουργία του UNI ως  $2 \times 2$  διακόπτης μεταγωγής σε κατάσταση μη μεταγωγής (Bar State), δηλαδή απουσία σήματος ελέγχου από το κύκλωμα. Οι πολωτικές καταστάσεις των δύο σημάτων εισόδου διαφέρουν κατά  $90^\circ$  ενώ η πορεία τους στο εσωτερικό της διάταξης του UNI επιδεικνύεται αναλυτικά στο σχήμα 2.13 που ακολουθεί, όπου τα δύο σήματα εμφανίζονται με μαύρο και κόκκινο χρώμα αντιστοίχως. Η ανάλυση της πορείας των δύο σημάτων είναι όμοια με εκείνη που παρουσιάστηκε στην περίπτωση ενός σήματος εισόδου και ουσιαστικά ακολουθεί της αρχή της υπέρθεσης.



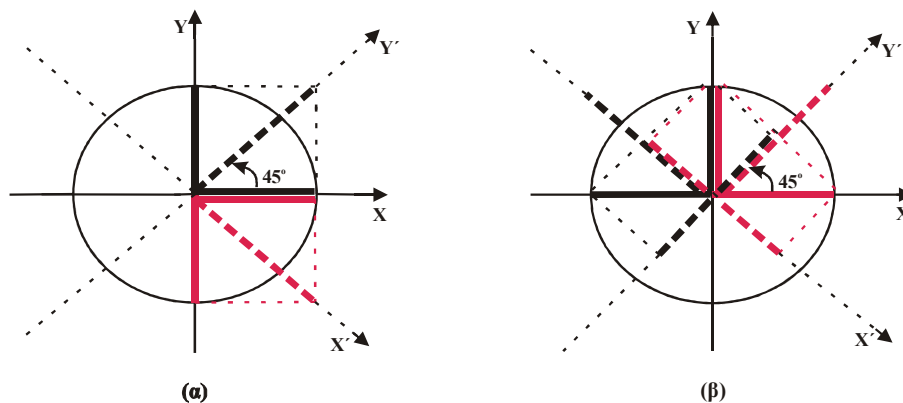
**Σχήμα 2.13: Η πορεία των οπτικών σημάτων στο εσωτερικό του 2×2 διακόπτη UNI στην κατάσταση μη μεταγωγής (bar state).**

Τα δύο σήματα εισόδου διερχόμενα από τον πρώτο PBS και την συγκόλληση των 45° διαχωρίζονται σε δύο ίσες συνιστώσες, μία οριζόντια και μία κάθετη. Η ανάλυση των σημάτων εισόδου στις δύο ορθογώνιες συνιστώσες περιγράφεται μέσω του σχήματος 2.14(α). Με X και Y συμβολίζονται οι άξονες της πρώτης PM ίνας η οποία ακολουθεί ενώ με X' και Y' οι άξονες της εισόδου του πρώτου PBS. Η μαύρη και η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή συμβολίζουν τα δύο σήματα εισόδου αντιστοίχως, οι πολώσεις των οποίων διαφέρουν κατά 90°, ενώ οι συμπαγείς μαύρες και κόκκινες γραμμές συμβολίζουν τις αντίστοιχες κάθετες αναλυμένες συνιστώσες. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι η σχετική θέση των συνιστωσών του σήματος εισόδου 1 (μαύρο χρώμα) και αυτών του σήματος εισόδου 2 (κόκκινο χρώμα), όπως αυτή παριστάνεται στο σχήμα 2.13, είναι τυχαία αφού στην κατάσταση μη μεταγωγής δεν απαιτείται συγχρονισμός των δύο σημάτων εισόδου.

Ακολουθεί η πρώτη PM ίνα η οποία εισάγει χρονική καθυστέρηση μεταξύ των ορθογώνιων συνιστωσών και των δύο σημάτων, με τον μηχανισμό που έχει εξηγηθεί σε προηγούμενη ενότητα. Εν συνεχεία, οι ορθογώνιες συνιστώσες των δύο σημάτων εισέρχονται κατά σειρά στον οπτικό συζεύκτη και στην ισχυρά μη γραμμική ίνα Βισμουθίου. Τα ανωτέρω οπτικά στοιχεία δεν επηρεάζουν τη μορφή, την καθυστέρηση και την πολωτική κατάσταση των δύο συνιστωσών, αφού δεν εισέρχεται οπτικός παλμός ελέγχου στη δεύτερη είσοδο του οπτικού συζεύκτη. Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει και κατά τη διέλευση των ορθογώνιων συνιστωσών των δύο σημάτων από το οπτικό φίλτρο που

ακολουθεί, το οποίο χρησιμεύει για την απόρριψη του σήματος ελέγχου. Το επόμενο βήμα είναι ο ελεγκτής πόλωσης, ο οποίος προκαλεί μια στροφή φάσης κατά  $90^\circ$  και στις δύο συνιστώσες των δύο σημάτων οι οποίες, μόλις εισέλθουν στη δεύτερη PM ίνα θα καθυστερήσουν αντίστροφα σε σχέση με την πρώτη PM ίνα. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι η δεύτερη PM ίνα έχει το ίδιο μήκος  $L$  με την πρώτη ώστε να προκαλεί την ίδια χρονική καθυστέρηση  $\Delta t$ . Συνεπώς, εξερχόμενες οι συνιστώσες των δύο σημάτων από τη δεύτερη PM ίνα και αφού έχουν καθυστερήσει αντίστροφα, θα συμπίπτουν χρονικά αλλά θα βρίσκονται σε κάθετες μεταξύ τους πολώσεις.

Ακολούθως οι δύο συνιστώσες των δύο σημάτων συναντούν τον δεύτερο PBS, ο οποίος είναι συγκολλημένος στις  $45^\circ$  με την δεύτερη PM ίνα. Ο μηχανισμός της συμβολής που λαμβάνει χώρα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.14(β). Με  $X$  και  $Y$  συμβολίζονται οι άξονες της δεύτερης PM ίνας ενώ με  $X'$  και  $Y'$  οι άξονες της εισόδου του δεύτερου PBS. Οι συμπαγείς μαύρες και κόκκινες γραμμές συμβολίζουν τις δύο ορθογώνιες συνιστώσες των δύο σημάτων στην έξοδο της PM ίνας, ενώ οι διακεκομμένες μαύρες και κόκκινες γραμμές συμβολίζουν τις αναλυμένες συνιστώσες στους άξονες του PBS.



**Σχήμα 2.14:** Οι συνιστώσες των δύο σημάτων εισόδου (α) στον πρώτο PBS και (β) στον δεύτερο PBS για την περίπτωση λειτουργίας του διακόπτη στην κατάσταση μη μεταγωγής.

Όσον αφορά το σήμα εισόδου 1 (μαύρο χρώμα) παρατηρείται θετική συμβολή στον άξονα  $X'$  και αρνητική στον άξονα  $Y'$ . Επομένως, ο παλμός που σχηματίζεται από τη θετική συμβολή θα εξέλθει από τη μία από τις δύο θύρες εξόδου του PBS (αυτή που αντιστοιχεί στον  $X'$ ), η οποία και ονομάζεται θύρα εξόδου 1. Αντιστοίχως, όσον αφορά

το σήμα εισόδου 2 (κόκκινο χρώμα) παρατηρείται θετική συμβολή στον άξονα  $Y'$  και αρνητική στον άξονα  $X'$ . Επομένως, ο παλμός που σχηματίζεται από τη θετική συμβολή θα εξέλθει από την άλλη θύρα εξόδου του PBS (αυτή που αντιστοιχεί στον  $Y'$ ), η οποία και ονομάζεται θύρα εξόδου 2.

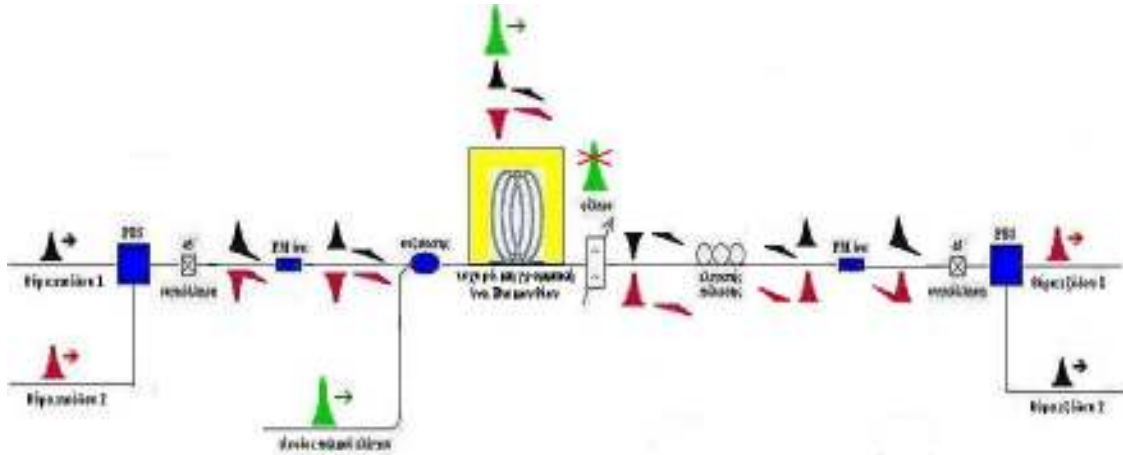
Συνεπώς, στην κατάσταση μη μεταγωγής (Bar State) τα δύο οπτικά σήματα εισερχόμενα στις θύρες εισόδου 1 και 2 του διακόπτη θα εξέρχονται ανεπηρέαστα από τις θύρες εξόδου 1 και 2 αντιστοίχως.

### 2.6.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ

Στην παρούσα ενότητα θα αναλυθεί η λειτουργία του UNI ως  $2 \times 2$  διακόπτης μεταγωγής σε κατάσταση μεταγωγής (Cross State), δηλαδή παρουσία σήματος ελέγχου στο κύκλωμα. Όμοια με προηγούμενως, οι πολωτικές καταστάσεις των δύο σημάτων εισόδου διαφέρουν κατά  $90^\circ$  ενώ η πορεία τους στο εσωτερικό της διάταξης του UNI επιδεικνύεται αναλυτικά στο σχήμα 2.15 που ακολουθεί, όπου τα δύο σήματα εμφανίζονται με μαύρο και κόκκινο χρώμα αντιστοίχως. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, η πορεία των σημάτων αριστερά από τον οπτικό συζεύκτη είναι η ίδια με την περίπτωση της μη μεταγωγής. Η ανάλυση των σημάτων εισόδου στις δύο ορθογώνιες συνιστώσες μετά τον πρώτο PBS και τη συγκόλληση των  $45^\circ$  περιγράφεται μέσω του σχήματος 2.16(α) το οποίο ταυτίζεται με το σχήμα 2.14(α) της προηγούμενης ενότητας.

Τώρα όμως, στην δεύτερη είσοδο του συζεύκτη εισάγεται και το παλμικό σήμα ελέγχου, το οποίο σχεδιάζεται με πράσινο χρώμα στο σχήμα. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι προκειμένου να λειτουργήσει ο διακόπτης στην κατάσταση μεταγωγής, τα δύο σήματα εισόδου απαιτείται να είναι συγχρονισμένα κατά την είσοδό τους στην ισχυρά μη γραμμική ίνα Βισμουθίου. Έτσι, μετά την πρώτη PM ίνα, οι οριζόντιες και οι κατακόρυφες συνιστώσες των δύο σημάτων εισόδου θα πρέπει να βρίσκονται στην ίδια χρονική κλίμακα μεταξύ τους. Ο παλμός ελέγχου ρυθμίζεται έτσι ώστε να συγχρονιστεί κι αυτός με τη σειρά του είτε με τις οριζόντιες είτε με τις κατακόρυφες συνιστώσες των δύο σημάτων. Στην περίπτωση του σχήματος 2.15 ο παλμός ελέγχου συγχρονίζεται με τις

κατακόρυφες συνιστώσες, οι οποίες υστερούν χρονικά σε σχέση με τις οριζόντιες συνιστώσες.



**Σχήμα 2.15:** Η πορεία των οπτικών σημάτων στο εσωτερικό του 2×2 διακόπτη UNI στην κατάσταση μεταγωγής (cross state).

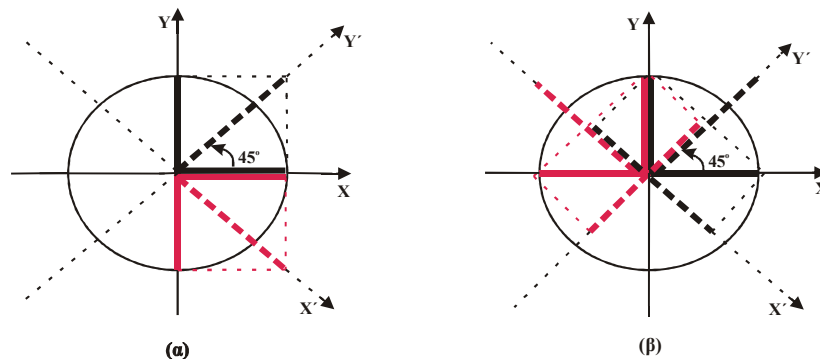
Καθώς ο παλμός ελέγχου συνδιαδίδεται στο εσωτερικό της ισχυρά μη γραμμικής ίνας Βισμουθίου με τα δύο σήματα εισόδου, προκαλείται μια μεταβολή στο δείκτη διάθλασης, η οποία συνεπάγεται μεταβολή της φάσης των κατακόρυφων συνιστωσών με τις οποίες ο παλμός ελέγχου είναι συγχρονισμένος. Όπως έχει ήδη τονισθεί, πρόκειται για το φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης φάσης (XPM). Το πόσο θα μεταβληθεί η φάση των εν λόγω συνιστωσών εξαρτάται από κάποιες παραμέτρους (πχ ισχύς του παλμού ελέγχου), ενώ ο ακριβής μηχανισμός που ακολουθείται προκειμένου να προκύψει αυτή η μεταβολή της φάσης έχει ήδη αναλυθεί λεπτομερώς σε προηγούμενη ενότητα. Στην περίπτωση μας, ο παλμός ελέγχου έχει συγχρονιστεί με τις κατακόρυφες συνιστώσες που υστερούν στο χρόνο. Με την ρύθμιση των κατάλληλων παραμέτρων και κυρίως της ισχύος του παλμού ελέγχου, μπορεί να επιτευχθεί στροφή φάσης των εν λόγω συνιστωσών κατά  $180^\circ$ , ενώ η φάση των δύο οριζόντιων συνιστωσών που προηγούνται χρονικά θα παραμείνει ανεπηρέαστη.

Ακολουθεί το οπτικό φίλτρο το οποίο έχει ως σκοπό την απόρριψη του σήματος ελέγχου. Προκειμένου να επιτευχθεί ο σκοπός αυτός με αποδοτικό τρόπο, θα πρέπει τα δύο σήματα εισόδου να βρίσκονται σε κοντινά μήκη κύματος και το σήμα ελέγχου σε αρκετά μακρινό μήκος κύματος. Να σημειωθεί ότι αντί για οπτικό φίλτρο μπορούν να

χρησιμοποιηθούν και άλλες οπτικές διατάξεις οι οποίες επιτελούν αντίστοιχη λειτουργία. Για παράδειγμα, μια τέτοια διάταξη είναι ο WDM συζεύκτης – αποπολυπλέκτης, ο οποίος περιλαμβάνει μία είσοδο και δύο εξόδους. Στη μία έξοδο περνούν τα σήματα με μήκη κύματος κοντά σε μία τιμή και στην άλλη έξοδο περνούν τα σήματα με μήκη κύματος κοντά σε μία άλλη σχετικά μακρινή τιμή. Μια τέτοια διάταξη χρησιμοποιήθηκε κατά την εργαστηριακή υλοποίηση του  $2 \times 2$  διακόπτη, η οποία θα παρουσιασθεί στο επόμενο κεφάλαιο, προκειμένου να απομακρυνθεί το σήμα ελέγχου.

Η συνέχεια είναι αντίστοιχη με την περίπτωση της μη μεταγωγής. Σειρά έχει ο ελεγκτής πόλωσης ο οποίος προκαλεί μια στροφή φάσης κατά  $90^\circ$  και στις δύο συνιστώσες των δύο σημάτων, για να ακολουθήσει η δεύτερη PM ίνα η οποία προκαλεί αντίστροφη χρονική καθυστέρηση στις δύο συνιστώσες των δύο σημάτων σε σχέση με την πρώτη PM ίνα. Συνεπώς, εξερχόμενες οι συνιστώσες των δύο σημάτων από τη δεύτερη PM ίνα, θα συμπίπτουν χρονικά αλλά θα βρίσκονται σε κάθετες μεταξύ τους πολώσεις.

Ακολούθως οι δύο συνιστώσες των δύο σημάτων συναντούν τον δεύτερο PBS, ο οποίος είναι συγκολλημένος στις  $45^\circ$  με την δεύτερη PM ίνα. Ο μηχανισμός της συμβολής που λαμβάνει χώρα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.16(β). Με X και Y συμβολίζονται οι άξονες της δεύτερης PM ίνας ενώ με X' και Y' οι άξονες της εισόδου του δεύτερου PBS. Οι συμπαγείς μαύρες και κόκκινες γραμμές συμβολίζουν τις δύο ορθογώνιες συνιστώσες των δύο σημάτων στην έξοδο της PM ίνας, ενώ οι διακεκομμένες μαύρες και κόκκινες γραμμές συμβολίζουν τις αναλυμένες συνιστώσες στους άξονες του PBS.



**Σχήμα 2.16:** Οι συνιστώσες των δύο σημάτων εισόδου (α) στον πρώτο PBS και (β) στον δεύτερο PBS για την περίπτωση λειτουργίας του διακόπτη στην κατάσταση μεταγωγής.



Όσον αφορά το σήμα εισόδου 1 (μαύρο χρώμα) παρατηρείται θετική συμβολή στον άξονα  $Y'$  και αρνητική στον άξονα  $X'$ . Επομένως, ο παλμός που σχηματίζεται από τη θετική συμβολή θα εξέλθει από τη μία από τις δύο θύρες εξόδου του PBS (αυτή που αντιστοιχεί στον  $Y'$ ), η οποία και ονομάζεται θύρα εξόδου 2. Αντιστοίχως, όσον αφορά το σήμα εισόδου 2 (κόκκινο χρώμα) παρατηρείται θετική συμβολή στον άξονα  $X'$  και αρνητική στον άξονα  $Y'$ . Επομένως, ο παλμός που σχηματίζεται από τη θετική συμβολή θα εξέλθει από την άλλη θύρα εξόδου του PBS (αυτή που αντιστοιχεί στον  $X'$ ), η οποία και ονομάζεται θύρα εξόδου 1.

Συνεπώς, στην κατάσταση μεταγωγής (Cross State) τα δύο οπτικά σήματα εισερχόμενα στις θύρες εισόδου του διακόπτη 1 και 2 θα εξέρχονται εναλλασσόμενα από τις θύρες εξόδου 2 και 1 αντιστοίχως.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ 2×2 ΟΠΤΙΚΟΥ ΔΙΑΚΟΠΤΗ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ

---

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύθηκε θεωρητικά η λειτουργία ενός 2×2 οπτικού διακόπτη μεταγωγής (Exchange – Bypass Switch) που βασίζεται στο μη γραμμικό συμβολόμετρο υπερυψηλής ταχύτητας (UNI). Η κυκλωματική διάταξη του διακόπτη που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών παρουσιάζεται με αναλυτικό τρόπο στο παρόν κεφάλαιο. Στο παρακάτω σχήμα 3.1 φαίνεται μια άποψη του εργαστηρίου, στο οποίο διεξήχθη το πείραμα.



Σχήμα 3.1: Άποψη του Εργαστηρίου Φωτονικών Επικοινωνιών.

Συγκεκριμένα, θα παρουσιασθούν τα δομικά τμήματα του κυκλώματος και θα εξηγηθεί η λειτουργία των σημαντικότερων οπτικών στοιχείων που τα συνθέτουν. Ακόμη, θα παρατεθούν και θα σχολιασθούν τα αποτελέσματα του πειράματος, τα οποία καταδεικνύουν ιδιαίτερα ικανοποιητική λειτουργία του οπτικού διακόπτη σε κατάσταση μη μεταγωγής και μεταγωγής αντιστοίχως. Οι ρυθμοί μετάδοσης στους οποίους λειτουργεί ο διακόπτης είναι ιδιαίτερα υψηλοί και ο ρυθμός σφαλμάτων (Bit Error Rate – BER) που επετεύχθη είναι εξαιρετικά χαμηλός.

Στο σημείο αυτό τονίζεται ότι η λειτουργία του διακόπτη είναι αμιγώς οπτική, δηλαδή δεν απαιτεί κανενός είδους ηλεκτρονικό κύκλωμα. Συνεπώς, η οπτική διάταξη που υλοποιήθηκε μπορεί να βρει εφαρμογή στα μελλοντικά οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτου. Προτού όμως παρουσιασθεί η πειραματική διάταξη θα αναλυθεί συνοπτικά η αρχή λειτουργίας του κυκλώματος.

## **3.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ**

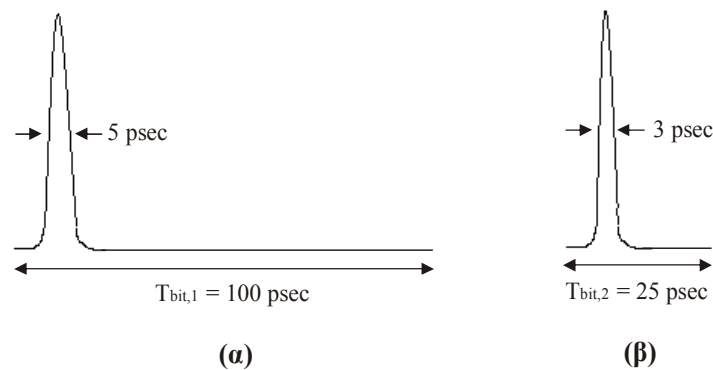
Τα βασικά δομικά τμήματα του κυκλώματος αφορούν αφενός μεν την παραγωγή των δύο σημάτων εισόδου του διακόπτη αλλά και του σήματος ελέγχου, αφετέρου δε την υλοποίηση της διάταξης του UNI ως 2×2 οπτικού διακόπτη μεταγωγής. Υπάρχει βέβαια και το τελικό τμήμα της διάταξης που συνίσταται στην παρατήρηση και επεξεργασία των δύο σημάτων εξόδου του διακόπτη.

### **3.2.1 ΜΟΡΦΗ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ**

Τα δύο σήματα εισόδου του διακόπτη βρίσκονται σε διαφορετικά αλλά σχετικά κοντινά μήκη κύματος ενώ οι ρυθμοί μετάδοσής τους είναι επίσης διαφορετικοί. Πιο συγκεκριμένα, το σήμα εισόδου 1 βρίσκεται σε μήκος κύματος 1558 nm ενώ ο ρυθμός μετάδοσής του είναι 10 Gbps. Αντιστοίχως, το σήμα εισόδου 2 βρίσκεται σε μήκος κύματος 1553 nm ενώ ο ρυθμός μετάδοσής του είναι 40 Gbps. Το κοινό στοιχείο των δύο σημάτων εισόδου είναι ότι εισέρχονται στον διακόπτη σε μορφή συνεχόμενων bits

(αλληλουχίες “λογικών άσσων” και “λογικών μηδενικών”), δηλαδή δεν οργανώνονται σε πακέτα. Ο τρόπος παραγωγής των σημάτων εισόδου με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά παρατίθεται αναλυτικά σε επόμενη ενότητα.

Η περίοδος ενός τυχαίου bit του σήματος εισόδου 1 θα δίνεται κατά τα γνωστά από την σχέση:  $T_{bit,1} = (1/10 \text{ Gbps}) = 100 \text{ psec}$ . Ομοίως, η περίοδος ενός τυχαίου bit του σήματος εισόδου 2 θα είναι:  $T_{bit,2} = (1/40 \text{ Gbps}) = 25 \text{ psec}$ . Δηλαδή, όσο χρόνο διαρκεί 1 bit του σήματος εισόδου 1 θα διαρκούν 4 bits του σήματος εισόδου 2. Προφανώς, το “λογικό 1” θα αντιπροσωπεύεται από την ύπαρξη παλμού, ο οποίος είναι τύπου Gauss και για τα δύο σήματα εισόδου, ενώ αντιστοίχως το “λογικό 0” θα αντιπροσωπεύεται από την απουσία παλμού. Οι εν λόγω παλμοί Gauss είναι τύπου RZ (Return – to – Zero) που σημαίνει ότι το χρονικό εύρος ημίσειας ισχύος τους (Full Width at Half Maximum – FWHM) θα είναι αρκετά μικρότερο από την αντίστοιχη περίοδο του bit. Συγκεκριμένα, οι τιμές του FWHM έχουν ρυθμιστεί στα 5 psec και 3 psec για τα σήματα εισόδου 1 και 2 αντιστοίχως, με τρόπο που θα δειχθεί σε επόμενη ενότητα. Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, η μορφή των “λογικών άσσων” των δύο σημάτων εισόδου μπορεί να απεικονισθεί στο παρακάτω σχήμα 3.2:

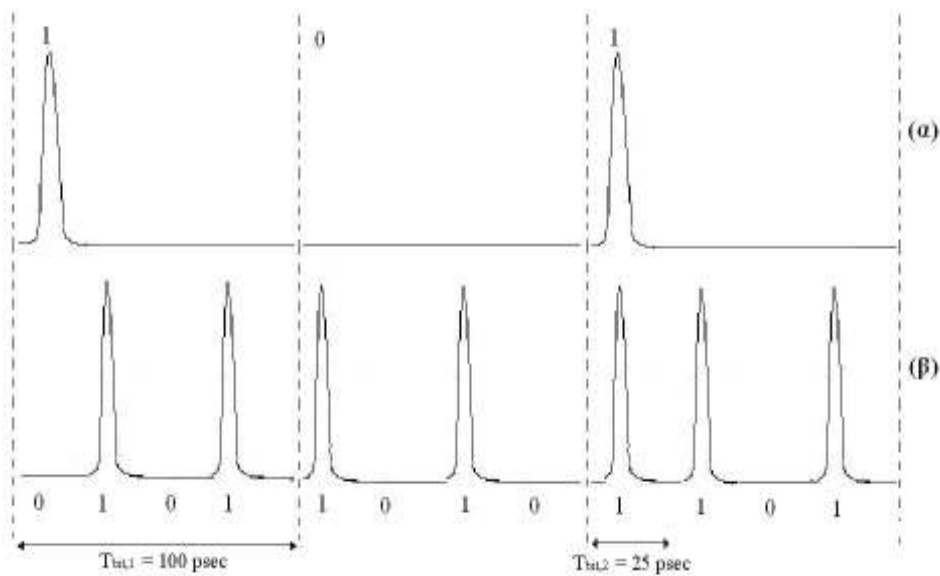


**Σχήμα 3.2: Μορφή των άσσων στην περίπτωση (α) του σήματος εισόδου 1 και (β) του σήματος εισόδου 2.**

Στο σχήμα 3.3 που ακολουθεί παρατίθεται ένα παράδειγμα απεικόνισης των εξής τυχαίων αλληλουχιών bits των δύο σημάτων εισόδου:

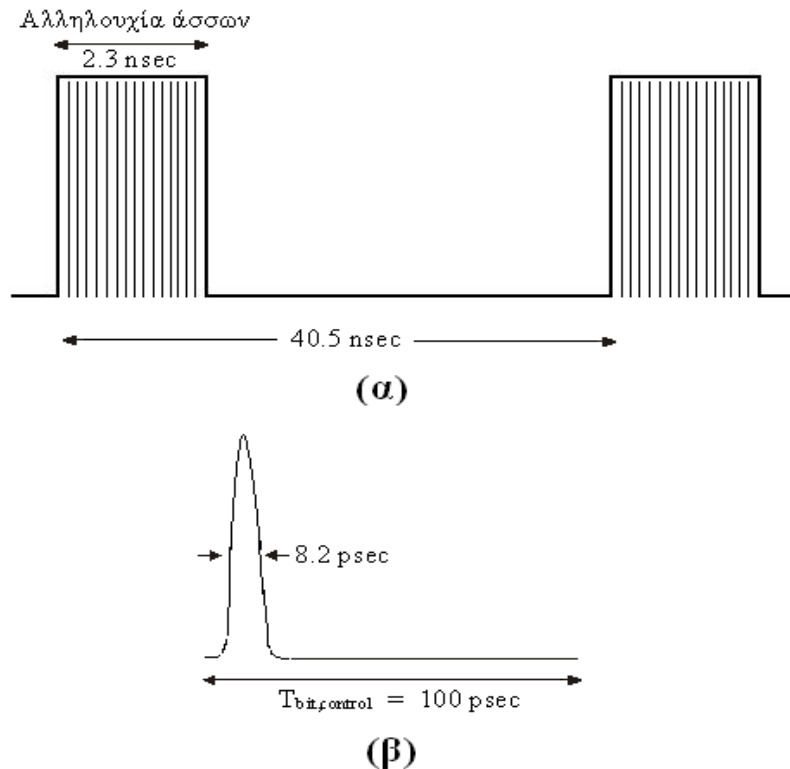
Σήμα εισόδου 1 → 1 0 1  
 Σήμα εισόδου 2 → 0 1 0 1 1 0 1 0 1 1 0 1

Στο εν λόγω σχήμα φαίνεται με τον πλέον παραστατικό τρόπο ότι όσο χρόνο διαρκεί 1 bit του σήματος εισόδου 1 θα διαρκούν 4 bits του σήματος εισόδου 2. Ακόμη, στη συγκεκριμένη περίπτωση του σχήματος, ο παλμός που αντιστοιχεί σε τυχόντα άσσο του σήματος εισόδου 1 έχει συγχρονισθεί με το πρώτο από τα χρονικά αντίστοιχα του 4 bits του σήματος εισόδου 2.



**Σχήμα 3.3:** Εικόνα τυχαίας αλληλουχίας bits στην περίπτωση (α) του σήματος εισόδου 1 και (β) του σήματος εισόδου 2. Ο παλμός που αντιστοιχεί σε τυχόντα άσσο του σήματος εισόδου 1 έχει συγχρονισθεί με το πρώτο από τα χρονικά αντίστοιχα του 4 bits του σήματος εισόδου 2.

Σε αντίθεση με τα δύο σήματα εισόδου, το σήμα ελέγχου εισάγεται στον διακόπτη σε μορφή πακέτων ρολογιού, σε μήκος κύματος 1534 nm και με ρυθμό μετάδοσης 10 Gbps. Τα εν λόγω πακέτα ρολογιού έχουν διάρκεια 2.3 nsec και περίοδο 40.5 nsec και είναι ουσιαστικά αλληλουχίες άσσων. Η περίοδος του bit είναι και σε αυτή την περίπτωση 100 psec ενώ κάθε ένας από τους παλμούς Gauss έχει χρονικό εύρος ημίσειας ισχύος της τάξεως των 8.2 psec. Στο παρακάτω σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η μορφή των πακέτων ρολογιού στα οποία οργανώνεται το σήμα ελέγχου, αλλά και η μορφή των άσσων η οποία είναι αντίστοιχη με την περίπτωση των σημάτων εισόδου.



Σχήμα 3.4: (α) Η μορφή των πακέτων ρολογιού στα οποία οργανώνεται το σήμα ελέγχου και (β) η μορφή των άσσεων του σήματος ελέγχου.

### 3.2.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ 2×2 ΔΙΑΚΟΠΤΗ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ

Στην ενότητα 2.6.1 του προηγούμενου κεφαλαίου παρουσιάστηκε η αρχή λειτουργίας ενός 2×2 οπτικού διακόπτη μεταγωγής (Exchange – Bypass Switch) με παλμικά σήματα εισόδου και ελέγχου τυχόντων χαρακτηριστικών. Στην παρούσα ενότητα θα εξεταστεί η λειτουργία του 2×2 διακόπτη με βάση τα συγκεκριμένα πειραματικά δεδομένα για τα σήματα εισόδου και ελέγχου, όπως αυτά παρουσιάστηκαν αμέσως παραπάνω. Η ανάλυση θα βασιστεί στη θεώρηση δύο τυχαίων αλληλουχιών bits για τα δύο σήματα εισόδου και θα παρουσιαστεί ο τρόπος λειτουργίας του διακόπτη στις καταστάσεις μη μεταγωγής (Bar State) και μεταγωγής (Cross State) αντιστοίχως.

Αρχικά, όπως έχει ήδη τονιστεί από το προηγούμενο κεφάλαιο, προκειμένου ο διακόπτης να λειτουργήσει στην κατάσταση μεταγωγής απαιτείται αρχικά συγχρονισμός των δύο σημάτων εισόδου. Στην περίπτωση των σημάτων εισόδου που εξετάζεται, το 1

bit του σήματος εισόδου 1 διαρκεί όσο χρόνο διαρκούν 4 bits του σήματος εισόδου 2. Συνεπώς, ο παλμός που αντιστοιχεί σε τυχόντα άσσο του σήματος εισόδου 1 θα πρέπει να συγχρονισθεί με κάποιο από τα χρονικά αντίστοιχά του 4 bits του σήματος εισόδου 2. Στο παράδειγμα του σχήματος 3.3 που προηγήθηκε, ο εν λόγω συγχρονισμός του παλμού εισόδου 1 έγινε με το πρώτο από τα 4 bits του σήματος εισόδου 2. Με την ίδια ακριβώς λογική, σε κάποια άλλη περίπτωση θα μπορούσε ο συγχρονισμός να γίνει με το δεύτερο, με το τρίτο ή με το τέταρτο bit.

Επιπρόσθετα, το bit του σήματος ελέγχου διαρκεί όσο και το bit του σήματος εισόδου 1, δηλαδή όσο διαρκούν 4 bits του σήματος εισόδου 2. Συνεπώς, για σωστή λειτουργία στην κατάσταση μεταγωγής, θα πρέπει ο παλμός που αντιστοιχεί σε τυχόντα άσσο του σήματος ελέγχου να συγχρονιστεί με τη σειρά του με εκείνο από τα 4 bits του σήματος εισόδου 2 με το οποίο έχει συγχρονιστεί και ο παλμός εισόδου 1. Πρόκειται δηλαδή για τριπλό συγχρονισμό των σημάτων εισόδου και ελέγχου. Έτσι, στο παράδειγμα του σχήματος 3.3, θα πρέπει ο τυχόν παλμός ελέγχου να συγχρονιστεί με το πρώτο από τα 4 bits του σήματος εισόδου 2. Με την ίδια ακριβώς λογική, σε κάποια άλλη περίπτωση ο συγχρονισμός θα έπρεπε να γίνει με το δεύτερο, με το τρίτο ή με το τέταρτο bit αντιστοίχως.

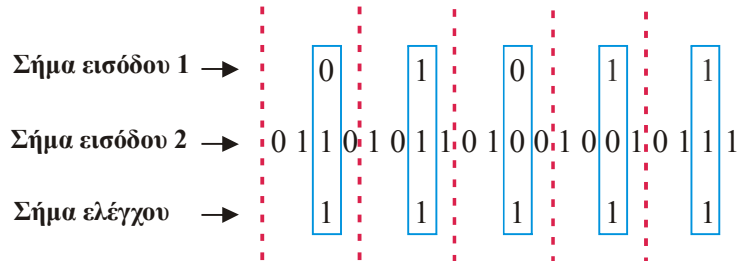
Ας θεωρηθούν οι εξής τυχαίες αλληλουχίες bits των δύο σημάτων εισόδου:

Σήμα εισόδου 1 → 0 1 0 1 1  
 Σήμα εισόδου 2 → 0 1 1 0 1 0 1 1 0 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 1

Επιλέγουμε να συγχρονίσουμε τον τυχόντα παλμό του σήματος εισόδου 1 με το τρίτο από τα χρονικά αντίστοιχά του 4 bits του σήματος εισόδου 2. Ακόμη, από το πακέτο ρολογιού του σήματος ελέγχου (αλληλουχία συνεχόμενων άσπων διάρκειας 2.3 nsec) απομονώνουμε 5 συνεχόμενους παλμούς ο καθένας από τους οποίους με τη σειρά του συγχρονίζεται επίσης με το τρίτο από τα χρονικά αντίστοιχά του 4 bits του σήματος εισόδου 2. Οι συγχρονισμοί που προαναφέρθηκαν παρουσιάζονται παραστατικά στο παρακάτω σχήμα 3.5. Οι κόκκινες κατακόρυφες διακεκομμένες γραμμές ομαδοποιούν τις

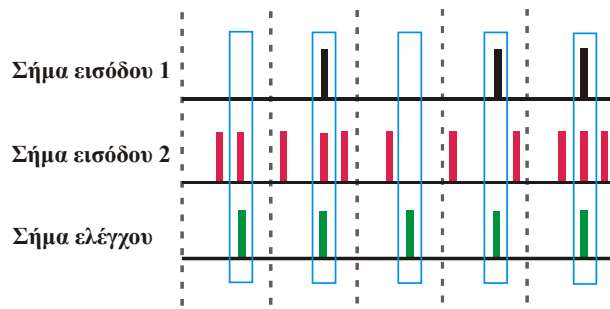


τετράδες των bits του σήματος εισόδου 2, ενώ τα γαλάζια πλαίσια περικλείουν τα ζευγάρια των bits εισόδου τα οποία έχουν συγχρονισθεί με παλμό ελέγχου.



**Σχήμα 3.5:** Στο παράδειγμα, τα bits του σήματος εισόδου 1 και του σήματος ελέγχου συγχρονίζονται με το τρίτο από τα χρονικά αντίστοιχα 4 bits του σήματος εισόδου 2.

Με οδηγό το παράδειγμα του ανωτέρω σχήματος 3.5, στο σχήμα 3.6 που ακολουθεί σχεδιάζονται οι αντίστοιχες παλμικές ακολουθίες των σημάτων εισόδου και ελέγχου, οι οποίες εισέρχονται στον 2×2 διακόπτη μεταγωγής.

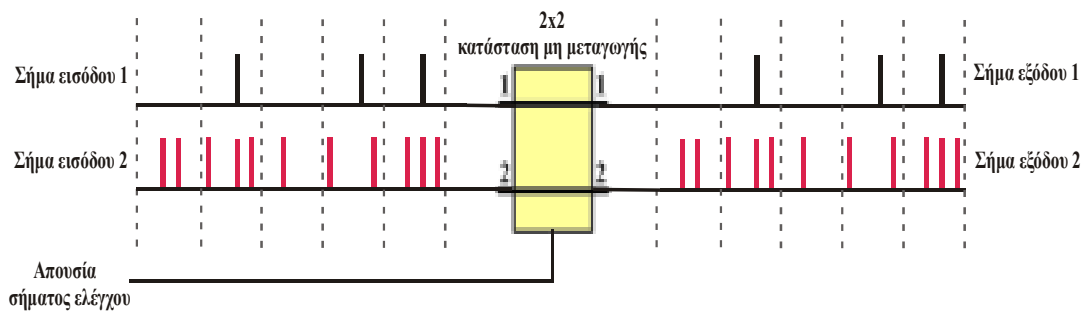


**Σχήμα 3.6:** Οι παλμικές ακολουθίες των σημάτων εισόδου και ελέγχου που αντιστοιχούν στο παράδειγμα. Συγχρονισμός του σήματος εισόδου 1 και του σήματος ελέγχου με το τρίτο από τα χρονικά αντίστοιχα 4 bits του σήματος εισόδου 2.

Οι παλμοί σχεδιάζονται με κατακόρυφα ευθύγραμμα τμήματα, με την παρουσία παλμού να υποδηλώνει λογικό άσσο ενώ την απουσία παλμού να υποδηλώνει λογικό μηδενικό. Οι παλμοί του σήματος εισόδου 1 και 2 σχεδιάζονται με μαύρο και κόκκινο χρώμα αντιστοίχως, ενώ οι παλμοί του σήματος ελέγχου με πράσινο χρώμα. Στο σχήμα αυτό είναι ευδιάκριτη η σχετική θέση των παλμών στην κλίμακα του χρόνου. Όμοια με προηγουμένως, οι κατακόρυφες διακεκομμένες γραμμές ομαδοποιούν τις τετράδες των

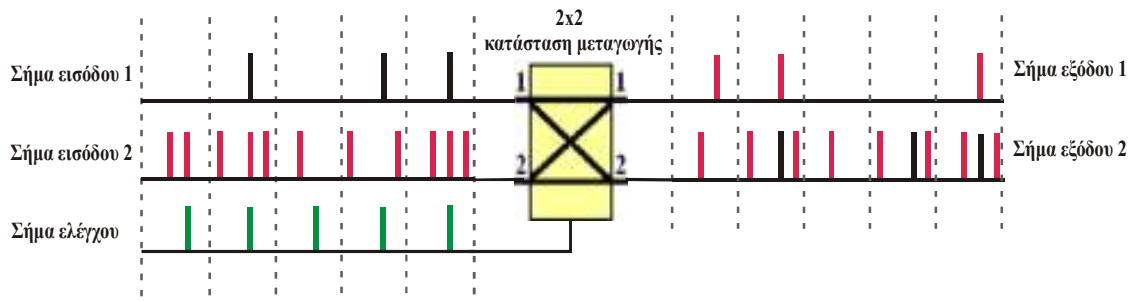
bits του σήματος εισόδου 2, ενώ τα γαλάζια πλαίσια περικλείουν τα ζευγάρια των bits εισόδου τα οποία έχουν συγχρονισθεί με παλμό ελέγχου.

Έχοντας ήδη παρουσιάσει την μορφή των παλμικών ακολουθιών των σημάτων εισόδου και ελέγχου μέσω του σχήματος 3.6, παρακάτω θα παρουσιασθεί η λειτουργία του διακόπτη στις καταστάσεις μη μεταγωγής (Bar State) και μεταγωγής (Cross State) αντιστοίχως. Η αρχή γίνεται με την **κατάσταση μη μεταγωγής**, κατά την οποία απουσιάζει το σήμα ελέγχου από το κύκλωμα. Οι παλμικές ακολουθίες των σημάτων εισόδου 1 και 2 εισέρχονται στον διακόπτη και εξέρχονται ανεπηρέαστες από τις θύρες εξόδου 1 και 2 αντιστοίχως, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα 3.7:



**Σχήμα 3.7:** Λειτουργία του 2×2 διακόπτη σε κατάσταση μη μεταγωγής (bar state) στην περίπτωση του παραδείγματος.

Συνεχίζοντας, εξετάζεται η **κατάσταση μεταγωγής**, κατά την οποία εκτός από τα δύο σήματα εισόδου εισάγεται και το σήμα ελέγχου στο διακόπτη, ενώ ο συγχρονισμός των σημάτων φαίνεται στο σχήμα 3.6. Η διαδικασία της αντιμετάθεσης των παλμών στις εξόδους του διακόπτη αφορά μόνο τους παλμούς εισόδου οι οποίοι είναι συγχρονισμένοι με παλμούς ελέγχου, δηλαδή αφορά τους παλμούς οι οποίοι περικλείονται στα γαλάζια πλαίσια στο σχήμα 3.6. Με την παρουσία δηλαδή του παλμού ελέγχου, ένας παλμός που εισέρχεται στην είσοδο 1 εξέρχεται από την έξοδο 2, ενώ αντιστοίχως ένας παλμός που εισέρχεται στην είσοδο 2 εξέρχεται από την έξοδο 1. Αντιθέτως, οι παλμοί του σήματος εισόδου 2 οι οποίοι δεν είναι συγχρονισμένοι με παλμούς ελέγχου εξέρχονται ανεπηρέαστοι από την έξοδο 2. Η λειτουργία του διακόπτη σε κατάσταση μεταγωγής, όπως μόλις περιγράφηκε, παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 3.8:



**Σχήμα 3.8:** Λειτουργία του 2×2 διακόπτη σε κατάσταση μεταγωγής (cross state) στην περίπτωση του παραδείγματος.

Συνεπώς, οι αλληλουχίες bits των δύο σημάτων εξόδου που έχουν προκύψει στην κατάσταση μεταγωγής θα είναι οι εξής:

$$\begin{aligned} \text{Σήμα εξόδου 1} &\rightarrow 11001 \\ \text{Σήμα εξόδου 2} &\rightarrow 01001011010010110111 \end{aligned}$$

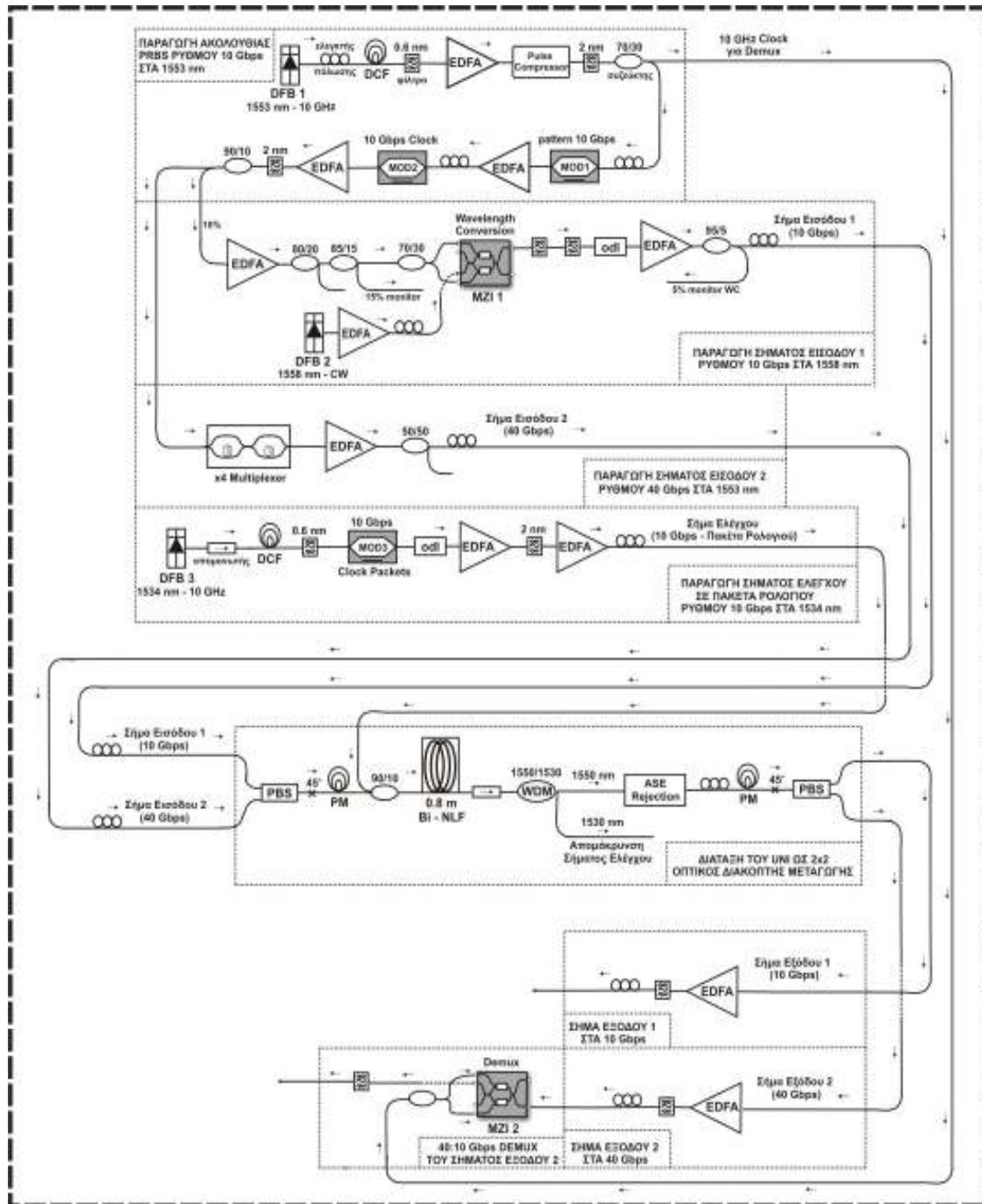
Παρατηρούμε ότι η παλμική ακολουθία της εξόδου 1 έχει ρυθμό μετάδοσης 10 Gbps (όσο έχει και το σήμα εισόδου 1) και αποτελείται μόνο από παλμούς του σήματος εισόδου 2 (κόκκινο χρώμα), οι οποίοι βρίσκονται σε μήκος κύματος 1553 nm. Καθ' όλη τη διάρκεια εισαγωγής του πακέτου ρολογιού του σήματος ελέγχου, κανένας παλμός του σήματος εισόδου 1 (μαύρο χρώμα) μήκους κύματος 1558 nm δεν περνά στη έξοδο 1, αφού όλοι οι εν λόγω παλμοί έχουν συγχρονιστεί με τους παλμούς ελέγχου, με συνέπεια να μετάγονται στην έξοδο 2.

Αντιθέτως, η παλμική ακολουθία της εξόδου 2 έχει ρυθμό μετάδοσης 40 Gbps (όσο έχει και το σήμα εισόδου 2) και είναι υβριδικής μορφής, δηλαδή αποτελείται από παλμούς του σήματος εισόδου 2 (κόκκινο χρώμα) μήκους κύματος 1553 nm αλλά και από παλμούς του σήματος εισόδου 1 (μαύρο χρώμα) μήκους κύματος 1558 nm. Οι παλμοί του σήματος εισόδου 2 που περνούν ανεπηρέαστοι στην έξοδο 2 είναι εκείνοι οι οποίοι δεν έχουν συγχρονιστεί με παλμούς ελέγχου.

Τέλος, όπως θα δούμε σε επόμενη ενότητα, στο τελικό στάδιο της πειραματικής διάταξης το σήμα εξόδου 2 περνά από έναν 40:10 Gbps αποπολυπλέκτη, με συνέπεια ο ρυθμός μετάδοσής του να πέσει από τα 40 Gbps στα 10 Gbps.

### 3.3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Η πλήρης πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 3.9:



Σχήμα 3.9: Η πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε στο εργαστήριο.

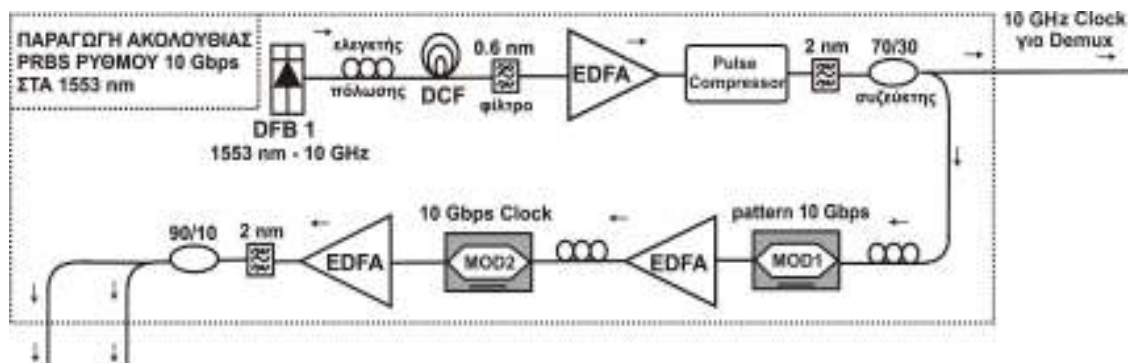
Η λειτουργία βασικών οπτικών στοιχείων που εμφανίζονται πολύ συχνά στη διάταξη, όπως του ελεγκτή πόλωσης, του οπτικού φίλτρου και του οπτικού συζεύκτη έχει ήδη αναλυθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Εντούτοις, η λειτουργία ενός πολύ βασικού οπτικού στοιχείου, με πολύ έντονη παρουσία στην ανωτέρω κυκλωματική διάταξη, δεν έχει ακόμη αναλυθεί. Πρόκειται για τον ενισχυτή ίνας Ερβίου (Erbium Doped Fiber Amplifier – EDFA), του οποίου η λειτουργία αναλύεται ευθύς αμέσως.

Ο **EDFA** είναι ένας ενισχυτής κατασκευασμένος από ίνα νοθευμένη με ιόντα Ερβίου. Το φαινόμενο στο οποίο βασίζει τη λειτουργία του είναι η Απορρόφηση Διεγερμένων Καταστάσεων (ESA – Excited State Absorption). Σύμφωνα με αυτό, η ισχύς άντλησης απορροφάται από κάποια ανεπιθύμητη μετάπτωση που συμβαίνει να βρίσκεται ακριβώς ή πολύ κοντά στο κατάλληλο μήκος κύματος. Συγκεκριμένα, το ιόν Ερβίου απορροφά ένα φωτόνιο άντλησης και μεταβαίνει σε διεγερμένη στάθμη, όπου όμως αντί να αποδιεγερθεί εξαναγκασμένα από φωτόνιο σήματος, απορροφά ένα ακόμα φωτόνιο άντλησης και μεταβαίνει σε ακόμα υψηλότερη στάθμη, οπότε και τελικά αποδιεγείρεται δίνοντας φωτόνια μικρότερου μήκους κύματος. Η άντληση γίνεται στα 980 nm ή στα 1480 nm. Η κυριότερη συνιστώσα θορύβου στους Ενισχυτές Ερβίου είναι η Ενισχυμένη Αυθόρμητη Εκπομπή (ASE – Amplified Spontaneous Emission). Κατά το φαινόμενο αυτό ένα διεγερμένο ιόν αποδιεγείρεται εξαναγκασμένα χωρίς την πρόσπτωση φωτονίου σήματος. Το ασύμφωνο φωτόνιο που παράγεται ενισχύεται κινούμενο και προς τα δύο τερματικά άκρα, με αποτέλεσμα στην έξοδο να έχουμε σήμα άσχετο με το πραγματικό, που μπορεί και να μην υπάρχει. Για την αποκοπή του θορύβου συνήθως στην έξοδο του ενισχυτή χρησιμοποιείται κατάλληλο οπτικό φίλτρο.

Εν συνεχεία, θα αναλυθεί με λεπτομέρεια η λειτουργία των κυριότερων δομικών τμημάτων του κυκλώματος καθώς και ορισμένων σημαντικών και εξειδικευμένων οπτικών στοιχείων που τα συνθέτουν. Συγκεκριμένα, θα παρουσιαστούν κατά σειρά τα κυκλώματα παραγωγής των σημάτων εισόδου και ελέγχου με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, η διάταξη του UNI ως 2×2 οπτικός διακόπτης μεταγωγής καθώς και το τελικό τμήμα της διάταξης που συνίσταται στην επεξεργασία των δύο σημάτων εξόδου του διακόπτη.

### 3.3.1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΣΗΜΑΤΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ

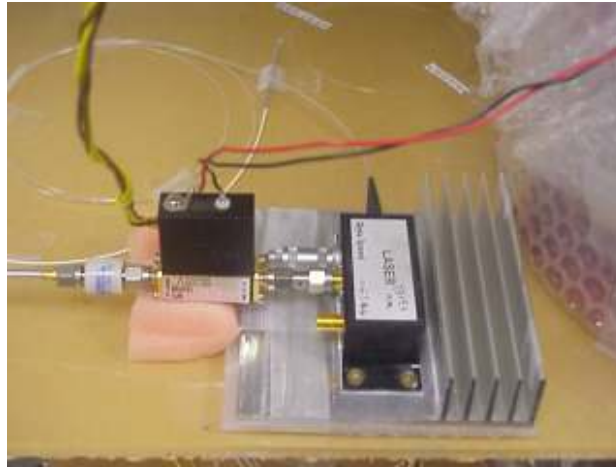
Προκειμένου να σχηματισθούν τα δύο σήματα εισόδου, αρχικά παράγεται μια ψευδοτυχαία ακολουθία (PseudoRandom Bit Sequence – PRBS) με περίοδο  $2^7 - 1 = 127$  bits και ρυθμό 10 Gbps. Το υποκύκλωμα παραγωγής της εν λόγω PRBS παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 3.10:



Σχήμα 3.10: Παραγωγή ακολουθίας PRBS ρυθμού 10 Gbps για τον σχηματισμό των δύο σημάτων εισόδου.

#### Παραγωγή παλμοσειράς με δίοδο laser DFB

Για την παραγωγή της παλμοσειράς εισόδου (ακολουθία συνεχόμενων λογικών άσων) χρησιμοποιήθηκε μία δίοδος laser καταμεμημένης ανάδρασης (Distributed Feedback Semiconductor Diode – DFB). Η δίοδος αυτή (DFB 1) εκπέμπει σε μήκος κύματος 1553 nm και για να παράγει παλμούς λειτουργεί με τη μέθοδο της διαμόρφωσης απολαβής (Gain Switching). Η τεχνική αυτή συνίσταται στην υπέρθεση ενός RF ημιτονικού σήματος στο DC ρεύμα τροφοδοσίας της δίοδου. Το DC ρεύμα ρυθμίζεται έτσι ώστε να πολώνει τη δίοδο στη στάθμη έναρξης εκπομπής της σύμφωνης ακτινοβολίας (Lasing Threshold). Ο ρόλος του ημιτονικού σήματος είναι η αυξομείωση του συνολικού ρεύματος γύρω από το κατάφλι αυτό, με αποτέλεσμα η δίοδος να μην εκπέμπει όταν βρίσκεται κάτω από αυτό. Λόγω της μη γραμμικής χαρακτηριστικής της δίοδου, η ημιτονική μεταβολή του ρεύματος τροφοδοσίας διαμορφώνει την περιβάλλουσα της οπτικής ακτινοβολίας σε παλμούς Gauss με περίοδο ίση με εκείνη του RF σήματος. Η εικόνα μιας τυπικής δίοδου laser DFB παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 3.11:



**Σχήμα 3.11: Δίοδος Laser DFB.**

Οι παλμοί τους οποίους παρήγαγε η δίοδος είχαν χρονικό εύρος 35 psec και το σήμα RF που χρησιμοποιήθηκε είχε ακριβή συχνότητα 10.0250055 GHz λόγω περιορισμών στα χαρακτηριστικά της δίοδου. Η τιμή του DC ρεύματος ήταν γύρω στα 50 mA ενώ η ισχύς του RF ήταν περί τα 23 dBm. Η υπέρθεση των δύο σημάτων DC και RF στη δίοδο γίνεται με τη βοήθεια του Bias – T. Πρόκειται για ένα στοιχείο με δύο εισόδους και μία έξοδο, το οποίο με τη βοήθεια ενός πηνίου αποκόπτει ενδεχόμενη RF συνιστώσα από το τροφοδοτικό ενώ με χρήση ενός πυκνωτή απορρίπτει ενδεχόμενη DC συνιστώσα από την RF γεννήτρια. Πρέπει να σημειωθεί ότι η δίοδος DFB πρέπει απαραίτητα να συνδέεται με έναν ελεγκτή θερμοκρασίας, για την απαγωγή της θερμότητας που αναπτύσσεται επάνω της μέσω του φαινομένου Peltie. Έτσι ρυθμίζουμε τη θερμοκρασία στους 20 °C, διότι αν ξεπεραστεί αυτό το επίπεδο αφενός αυξάνεται το ρεύμα κατωφλίου της δίοδου, αφετέρου προκαλείται πρόωρη γήρανσή της.

#### **Γραμμική συμπίεση παλμών με DCF ίνα**

Όπως είδαμε παραπάνω, η δίοδος DFB παράγει παλμούς χρονικού εύρους 35 psec και έτσι δε μπορεί από μόνη της να ανταποκριθεί στη ζήτηση για στενούς οπτικούς παλμούς. Δεδομένου ότι γενικά οι πηγές Laser παράγουν παλμούς ευρύτερους από το επιθυμητό, συνήθως χρησιμοποιούνται διατάξεις συμπίεσης παλμών. Μία τέτοια διάταξη γραμμικής συμπίεσης βασίζεται σε ίνα αντιστάθμισης της διασποράς (Dispersion Compensating Fiber – DCF), η οποία έχει την ιδιότητα να παρουσιάζει έντονη αρνητική

διασπορά σε μήκη κύματος περί τα 1550 nm, δηλαδή στην περιοχή του μήκους κύματος λειτουργίας της διόδου laser. Γενικά, όταν το γινόμενο  $C\beta_2$  είναι αρνητικό, όπου C είναι το αρχικό chirp ενός παλμού και  $\beta_2$  ο παράγοντας διασποράς της ίνας, τότε ο παλμός συμπιέζεται χρονικά. Το C για δίοδο laser DFB είναι αρνητικό, επομένως με χρήση DCF ίνας, όπου  $\beta_2 > 0$ , επιτυγχάνεται συμπίεση του παλμού. Στην πειραματική διάταξη, με χρήση DCF ίνας μήκους 550 m καταφέραμε να συμπιέσουμε τους παλμούς από τα 35 psec στα 10 psec, όπως μετρήθηκε στον αυτοσυσχετιστή.

Ο αυτοσυσχετιστής είναι ένα όργανο που διαθέτει το εργαστήριο, που έχει ως σκοπό την παρατήρηση πολύ στενών παλμών (ως προς τη μορφή, το χρονικό εύρος κλπ.), οι οποίοι δε μπορούν να διαγνωσθούν με άλλα όργανα (π.χ. παλμογράφος) που έχουν περιορισμένη διακριτική ικανότητα. Το όργανο αυτό χρησιμοποιεί την διαδικασία της παραγωγής της δεύτερης αρμονικής (Second Harmonic Generation – SHG) για τον υπολογισμό με αμιγώς οπτικό τρόπο της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης των προς μέτρηση παλμών. Η συνάρτηση αυτή μπορεί στη συνέχεια να αποσυνελιχθεί για τον υπολογισμό της πραγματικής διάρκειας των παλμών. Για παλμούς Gauss, δηλαδή της μορφής  $\exp[-(t/T)^2]$ , η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης ισχύος είναι  $\exp[-(t/\sqrt{2} T)^2]$ . Ο λόγος μεταξύ του εύρους ημισείας ισχύος του αυτοσυσχετισμένου παλμού Gauss σε σχέση με το εύρος ημισείας ισχύος του αρχικού παλμού είναι 1.414. Έτσι, είναι δυνατόν από την ένδειξη του αυτοσυσχετιστή να υπολογιστεί το πραγματικό χρονικό εύρος του παλμού.

### **Μη γραμμική συμπίεση παλμών με διάταξη συμπιεστή**

Μετά τη DCF ίνα, η παλμοσειρά περνά από φίλτρο και ενισχυτή EDFA, για να ακολουθήσει ένα επόμενο στάδιο συμπίεσης, αυτή τη φορά μη γραμμικής. Η τυπική σχεδίαση ενός μη γραμμικού συμπιεστή (Pulse Compressor) περιλαμβάνει ένα κομμάτι μη γραμμικής ίνας με μηδενική διασπορά που εισάγει αυτοδιαμόρφωση φάσης και διευρύνει το φάσμα των παλμών, ακολουθούμενο από ένα κομμάτι ίνας που εισάγει διασπορά επηρεάζοντας το χρονικό εύρος των παλμών. Στην πράξη, η ίνα που χρησιμοποιείται για τη διέγερση της αυτοδιαμόρφωσης φάσης είναι ίνα μετατοπισμένης διασποράς (Dispersion Shifted Fiber – DSF), η οποία χαρακτηρίζεται από σχετικά υψηλή τιμή μη γραμμικού συντελεστή  $\gamma$  και μηδενική διασπορά στην περιοχή των 1550 nm. Το



γραμμικό μέσο διασποράς που ακολουθεί είναι συμβατική μονότροπη ίνα (Single Mode Fiber – SMF), η οποία χαρακτηρίζεται από ανώμαλη διασπορά και πολύ μικρότερη, πρακτικά αμελητέα τιμή μη γραμμικού συντελεστή  $\gamma$ . Στην πειραματική διάταξη, στην έξοδο του μη γραμμικού συμπιεστή ελήφθησαν παλμοί συμπιεσμένοι από τα 10 psec στα 3 psec, όπως μετρήθηκε στον αυτοσυσχετιστή.

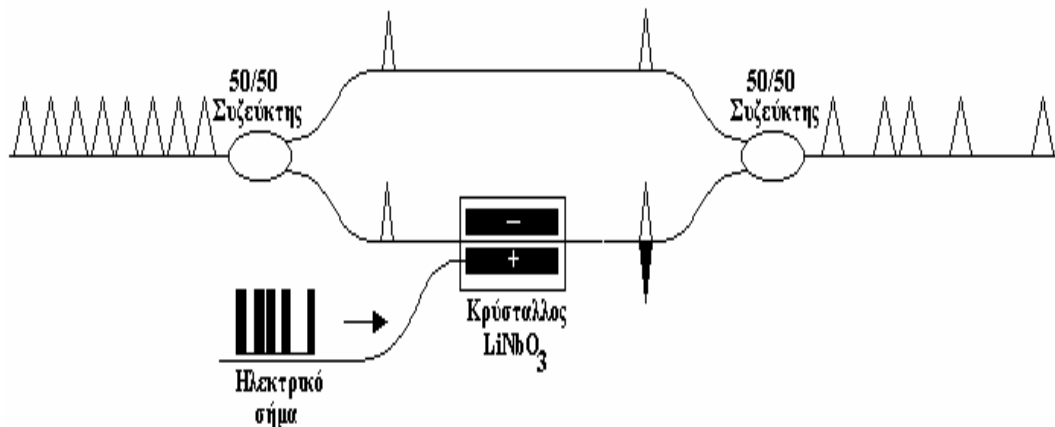
Το φίλτρο 2 nm που έπεται αποκόπτει το θόρυβο του EDFA και διώχνει τις φασματικές συνιστώσες που αντιστοιχούν στα φτερά των παλμών (Pulse Shaping). Πλέον έχει δημιουργηθεί μια αλληλουχία συνεχόμενων παλμών (λογικών άσσων) στα 10 GHz, με το χρονικό εύρος του παλμού να είναι 3 psec και την περίοδο του bit να είναι 100 psec. Η εν λόγω παλμοσειρά εισέρχεται σε έναν οπτικό συζεύκτη 70/30 δύο εξόδων. Η μία έξοδος χρησιμοποιείται για να οδηγήσει τον αποπολυπλέκτη 40:10 Gbps στον οποίο εισέρχεται το σήμα εξόδου 2 του 2×2 διακόπτη, όπως θα αναλυθεί λεπτομερώς σε επόμενη ενότητα. Η άλλη έξοδος του συζεύκτη συνδέεται μέσω ενός ελεγκτή πόλωσης σε έναν ηλεκτροοπτικό διαμορφωτή που ακολουθεί (Modulator 1).

#### **Δημιουργία ψευδοτυχαίας ακολουθίας (PRBS) σε ηλεκτροοπτικό διαμορφωτή**

Ακολουθώς, επιθυμούμε πάνω στην ακολουθία άσσων στα 10 GHz που έχει δημιουργηθεί να “γράψουμε” μία συγκεκριμένη ακολουθία από bits η οποία θα περιλαμβάνει και μηδενικά, έτσι ώστε το αποτέλεσμα να συνιστά μια ακολουθία δεδομένων. Η λειτουργία αυτή μπορεί να επιτελεστεί με τη βοήθεια του ηλεκτροοπτικού διαμορφωτή (Modulator 1) που ακολουθεί.

Ο ηλεκτροοπτικός διαμορφωτής είναι ένα στοιχείο κατασκευασμένο από έναν κρύσταλλο  $\text{Li:NbO}_3$ . Το υλικό αυτό έχει την ιδιότητα να μεταβάλλει τη φάση του φωτός που το διατρέχει ανάλογα με την ηλεκτρική τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του. Η λειτουργία του ηλεκτροοπτικού διαμορφωτή βασίζεται στο φαινόμενο της συμβολής. Συγκεκριμένα, το φως εισάγεται πρώτα σε έναν συζεύκτη 50/50, όπου χωρίζεται σε δύο ίσες συνιστώσες. Το στοιχείο  $\text{Li:NbO}_3$  τοποθετείται στον ένα κλάδο του συμβολομέτρου. Ανάλογα με την τάση που εφαρμόζεται στο στοιχείο, είναι δυνατό να ρυθμιστεί η στροφή φάσης που θα υποστεί η αντίστοιχη συνιστώσα του φωτός. Συνεπώς μπορούμε για κάποια τιμή της τάσης να προκαλέσουμε είτε προσθετική συμβολή των δύο

συνιστωσών (το σήμα εισόδου δηλαδή ο λογικός άσσος παρουσιάζεται και στην έξοδο) στον δεξιό συζεύκτη, είτε αναιρετική συμβολή (στην έξοδο παρουσιάζεται λογικό μηδενικό). Έτσι, με την διαδικασία που μόλις αναλύθηκε μπορούμε να “γράψουμε” τα μηδενικά μίας οποιασδήποτε ακολουθίας από bits πάνω στην αρχική παλμοσειρά. Στο σχήμα 3.12 που ακολουθεί φαίνεται η λειτουργία ενός ηλεκτροοπτικού διαμορφωτή όπως περιγράφηκε αμέσως παραπάνω:



Σχήμα 3.12: Διάταξη και λειτουργία του ηλεκτροοπτικού διαμορφωτή.

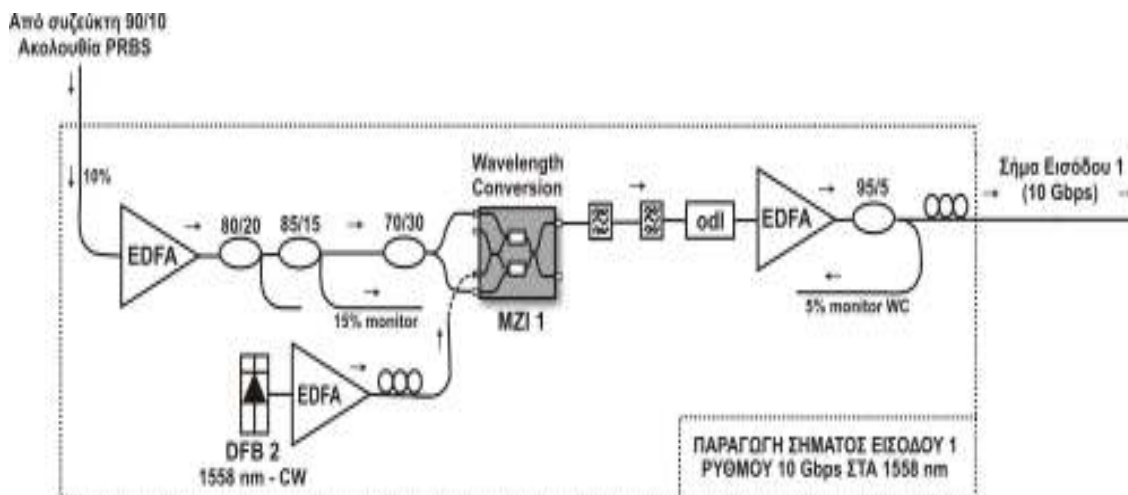
Στην πειραματική διάταξη, σαν είσοδος επελέγη μία ψευδοτυχαία ακολουθία (PseudoRandom Bit Sequence – PRBS)  $2^7-1$  που παρήχθη από κατάλληλο όργανο PRBS Generator. Με αυτό τον τρόπο καταφέραμε να κατασκευάσουμε ένα οπτικό σήμα PRBS στα 10 Gbps. Η περίοδος του bit καθώς και το χρονικό εύρος των παλμών δεν μεταβάλλονται και παραμένουν στις τιμές των 100 psec και 3 psec αντιστοίχως, ενώ το μήκος κύματος είναι 1553 nm.

Στη συνέχεια, αφού το σήμα ενισχυθεί και περάσει από ελεγκτή πόλωσης, εισάγεται σε έναν δεύτερο ηλεκτροοπτικό διαμορφωτή (Modulator 2), ο οποίος είναι ο ίδιος με τον πρώτο με τη διαφορά ότι δεν τρέχει με PRBS αλλά με clock σήμα (συνεχόμενοι άσσοι). Ο σκοπός του δεν είναι να αλλοιώσει την μορφή της ψευδοτυχαίας ακολουθίας που παρήχθη από τον πρώτο διαμορφωτή, μιας και δεν αφαιρεί άσσους για να εισάγει μηδενικά. Αντιθέτως, έχει ως σκοπό την αφαίρεση του υποβάθρου της ψευδοτυχαίας ακολουθίας. Το υπόβαθρο θα μπορούσε να δημιουργήσει ανεπιθύμητα φαινόμενα

συμβολής στον τετραπλασιαστή που ακολουθεί, του οποίου η λειτουργία θα αναλυθεί παρακάτω. Αφού το σήμα ενισχύεται εκ νέου και φιλτράρεται, εισέρχεται σε ένα συζεύκτη δύο εξόδων με λόγο 90/10. Η πρώτη έξοδος οδηγεί την ψευδοτυχαία ακολουθία στη διάταξη σχηματισμού του σήματος εισόδου 1, ενώ η δεύτερη έξοδος οδηγεί την ψευδοτυχαία ακολουθία στη διάταξη σχηματισμού του σήματος εισόδου 2.

### 3.3.1.1 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ 1

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η πρώτη εκ των δύο εξόδων του συζεύκτη 90/10 οδηγεί την ψευδοτυχαία ακολουθία στη διάταξη σχηματισμού του σήματος εισόδου 1, η οποία παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 3.13:



Σχήμα 3.13: Σχηματισμός του σήματος εισόδου 1 ρυθμού 10 Gbps στα 1558 nm.

Η ακολουθία PRBS ρυθμού 10 Gbps στα 1553 nm περνά από ενισχυτή EDFA, μέρος της περνά από την έξοδο συζεύκτη 85/15 προκειμένου να παρατηρηθεί στον παλμογράφο (monitor) και εν τέλει εισάγεται ως σήμα ελέγχου στο συμβολόμετρο Mach – Zehnder που ακολουθεί (MZI 1), προκειμένου οι παλμοί της να υποστούν μετατροπή μήκους κύματος (Wavelength Conversion) από τα 1553 nm στα 1558 nm.

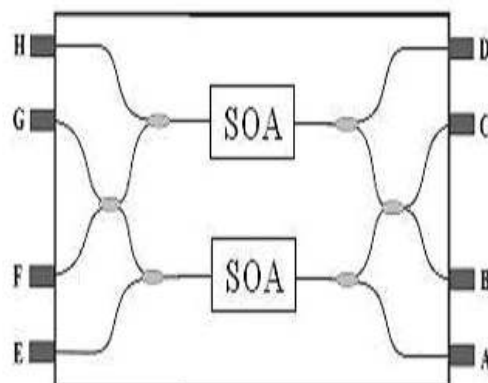
### Μετατροπή μήκους κύματος με συμβολόμετρο Mach – Zehnder

Το συμβολόμετρο Mach – Zehnder (Mach – Zehnder Interferometer – MZI) είναι ένας οπτικός διακόπτης δύο εισόδων και δύο εξόδων. Η αρχή λειτουργίας του είναι η ίδια με τη γενική περίπτωση ενός οπτικού διακόπτη μεταγωγής και στην περίπτωση ενός και στην περίπτωση δύο οπτικών σημάτων εισόδου, όπως έχει ήδη περιγραφεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Συνοπτικά λοιπόν, στην περίπτωση που εισάγεται ένα παλμικό σήμα εισόδου στον διακόπτη Mach – Zehnder, αυτό δύναται να εξέλθει από μία εκ των δύο θυρών εξόδου του, αναλόγως με την παρουσία ή την απουσία ενός κατάλληλου σήματος ελέγχου. Αντιστοίχως, στην περίπτωση εισαγωγής δύο παλμικών σημάτων εισόδου, αυτά είτε θα εξέλθουν ανεπηρέαστα από τις αντίστοιχες θύρες εξόδου στην περίπτωση απουσίας σήματος ελέγχου, είτε θα αντιμετατεθούν στις θύρες εξόδου στην περίπτωση παρουσίας σήματος ελέγχου.

Ο διακόπτης Mach – Zehnder (MZI) είναι ο πρώτος και μέχρι πριν λίγο ήταν και ο μοναδικός μεταξύ των οπτικών διακοπών ο οποίος έχει ολοκληρωθεί σε ένα μόνο πλινθίο. Πλέον μάλιστα είναι και εμπορικά διαθέσιμος, κυρίως για εφαρμογές μετατροπής μήκους κύματος, όπως αυτή που εξετάζεται. Αυτό είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό πλεονέκτημα της διάταξης του MZI, καθώς βελτιώνει τη σταθερότητα, διευκολύνει τη χρήση του και επιτρέπει θεωρητικά την κατασκευή πολύπλοκων διατάξεων με χρήση πολλαπλών πυλών. Στο παρακάτω σχήμα 3.14 παρουσιάζεται η εικόνα ενός τυπικού ολοκληρωμένου διακόπτη MZI που διαθέτει το εργαστήριο καθώς και το δομικό διάγραμμα κατασκευής του:



(α)

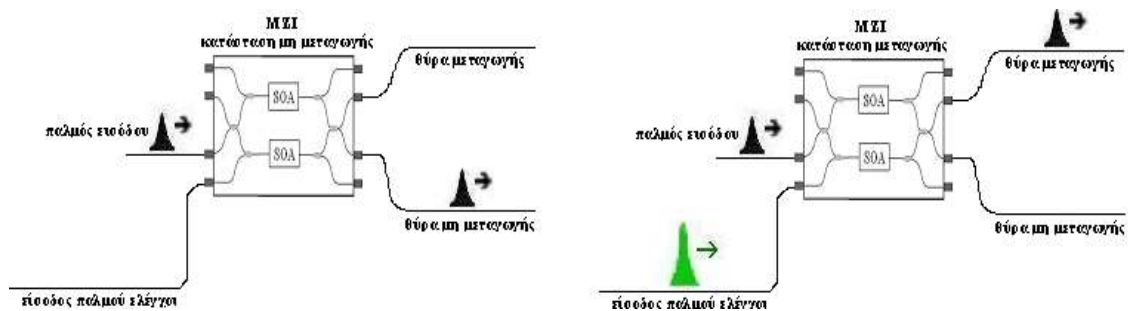


(β)

Σχήμα 3.14: (α) Εικόνα ολοκληρωμένου MZI. (β) Δομικό διάγραμμα κατασκευής τυπικού MZI.

Στο ανωτέρω σχήμα 3.14(β) φαίνεται ότι ο διακόπτης MZI περιλαμβάνει δύο βραχίονες – οπτικούς δρόμους, καθένας από τους οποίους έχει έναν οπτικό ενισχυτή ημιαγωγού (Semiconductor Optical Amplifier – SOA), ενώ η όλη διάταξη περιέχει έξι οπτικούς συζεύκτες. Οι θύρες B, C και F, G μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως θύρες εισόδου και εξόδου αντίστοιχα, αλλά και αντιστρόφως, ενώ οι δύο συζεύκτες που ενώνουν τις θύρες B, C και F, G έχουν λόγο σύζευξης 50/50. Ακόμη, οποιαδήποτε από τις θύρες A, D, E ή H μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να εισαχθεί το σήμα ελέγχου στον έναν ή και στους δύο SOAs.

Η αρχή λειτουργίας του MZI με ένα παλμικό σήμα εισόδου, όπως περιγράφηκε συνοπτικά παραπάνω, παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 3.15:



**Σχήμα 3.15:** Αρχή λειτουργίας του MZI με ένα παλμικό σήμα εισόδου σε κατάσταση μη μεταγωγής και μεταγωγής αντίστοιχως.

Όπως φαίνεται και από το ανωτέρω σχήμα, το παλμικό σήμα εισόδου εισέρχεται στο MZI και δύναται να εξέλθει από μία εκ των δύο θυρών εξόδου του. Η θύρα εξόδου καθορίζεται από την απουσία ή την παρουσία του σήματος ελέγχου. Πιο συγκεκριμένα, απουσία του σήματος ελέγχου, ο παλμός εξέρχεται από τη θύρα εξόδου μη μεταγωγής (Unswitched Port – U) και λέμε ότι το συμβολόμετρο βρίσκεται σε κατάσταση μη μεταγωγής, ενώ παρουσία του σήματος ελέγχου, ο παλμός εξέρχεται από τη θύρα εξόδου μεταγωγής (Switched Port – S) και λέμε ότι το συμβολόμετρο βρίσκεται σε κατάσταση μεταγωγής. Και στις δύο καταστάσεις ο παλμός εισόδου διασπάται στο συζεύκτη εισόδου σε δύο συνιστώσες, εκ των οποίων η μία διαδίδεται στον πάνω και η άλλη στον κάτω βραχίονα του MZI. Το φαινόμενο που λαμβάνει χώρα στην κατάσταση μεταγωγής είναι η ετεροδιαμόρφωση φάσης (XPM) στο εσωτερικό του κάτω SOA καθώς η μία συνιστώσα του παλμού εισόδου συνδιαδίδεται με τον παλμό ελέγχου. Ως αποτέλεσμα, θα

μεταβληθεί ο δείκτης διάθλασης του SOA και η φάση της εν λόγω συνιστώσας του σήματος εισόδου θα στραφεί κατά  $180^\circ$ . Εξαιτίας αυτής της στροφής φάσης, το σήμα εν τέλει εξέρχεται από την θύρα εξόδου μεταγωγής, ενώ στην παρούσα ανάλυση δεν θα παρατεθούν οι περαιτέρω λεπτομέρειες του μηχανισμού.

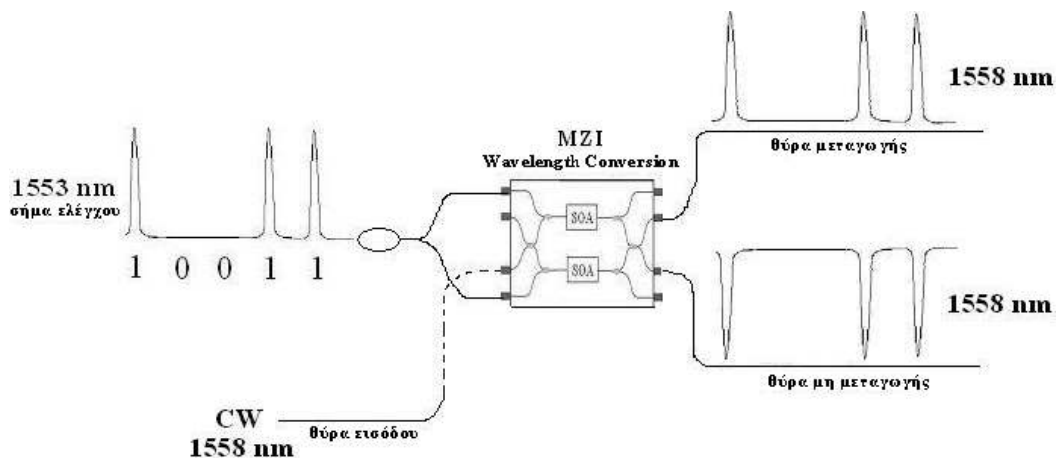
Στην πειραματική διάταξη, το συμβολόμετρο MZI 1 χρησιμοποιείται για να πραγματοποιήσει μετατροπή μήκους κύματος (Wavelength Conversion) της ακολουθίας PRBS από τα 1553 nm στα 1558 nm. Όταν ένα MZI χρησιμοποιείται για μετατροπή μήκους κύματος, το σήμα εισόδου του δεν είναι παλμικό αλλά συνεχές (Continuous Wave – CW), ενώ η παλμική ακολουθία της οποίας επιθυμούμε να αλλάξουμε το μήκος κύματος εισέρχεται στο MZI ως σήμα ελέγχου. Μάλιστα, η νέα παλμική ακολουθία θα εμφανίζεται στην θύρα εξόδου μεταγωγής του MZI και θα βρίσκεται στο μήκος κύματος του συνεχούς σήματος εισόδου (CW). Το CW σήμα μήκους κύματος 1558 nm παρέχεται από μία δίοδο laser (DFB 2), στη συνέχεια ενισχύεται, περνά από ελεγκτή πόλωσης και εισάγεται στη μία εκ των δύο θυρών εισόδου του MZI 1.

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 3.13, η ακολουθία PRBS εισάγεται ως σήμα ελέγχου και στις δύο αντίστοιχες θύρες του MZI, μέσω ενός οπτικού συζεύκτη 70/30. Πρόκειται για μία τεχνική γνωστή ως push – pull [39], η οποία συμβάλλει στη βελτίωση της ποιότητας του σήματος εξόδου του MZI. Πιο συγκεκριμένα, αν η PRBS εισαγόταν μόνο στη μία θύρα ελέγχου του MZI, ενδεχομένως να παρουσιαζόταν σημαντικό πρόβλημα με το χρόνο ανάκαμψης κέρδους του αντίστοιχου SOA, ιδιαίτερα στην περίπτωση που αυτός είναι μεγαλύτερος από την περίοδο του bit (100 psec). Στην περίπτωση αυτή λαμβάνει χώρα διασυμβολική παρεμβολή και η μορφή των παλμών εξόδου είναι ιδιαίτερα αλλοιωμένη. Η τεχνική push – pull έρχεται να λύσει αυτό το πρόβλημα, με το σήμα ελέγχου να εισάγεται και στους δύο SOAs των δύο βραχιόνων του MZI. Το κλειδί είναι ότι δεν έχει σημασία η απόλυτη τιμή της στροφής φάσης της μίας συνιστώσας του σήματος να είναι  $180^\circ$  αλλά η σχετική διαφορά φάσης μεταξύ των δύο συνιστωσών. Συνεπώς, εισάγοντας μια χρονικά καθυστερημένη εκδοχή του σήματος ελέγχου στον δεύτερο SOA, πετυχαίνουμε η σχετική στροφή φάσης των δύο συνιστωσών να γίνει  $180^\circ$  και μειώνουμε το χρονικό “παράθυρο μεταγωγής” (Switching Window). Το αποτέλεσμα είναι σημαντική ποιοτική βελτίωση του σήματος εξόδου του MZI.

Η λειτουργία της μετατροπής μήκους κύματος γίνεται ευκολότερα κατανοητή με ένα παράδειγμα. Ας θεωρηθεί λοιπόν το εξής τυχαίο τμήμα της PRBS, το οποίο εισάγεται στις δύο θύρες ελέγχου του MZI 1:

Τμήμα της PRBS  $\rightarrow$  1 0 0 1 1

Η μορφή των bits της PRBS έχει αναλυθεί εκτενώς σε προηγούμενες ενότητες, ενώ η περίοδος του bit καθώς και το χρονικό εύρος των παλμών είναι 100 psec και 3 psec αντιστοίχως. Η μορφή των σημάτων στις δύο θύρες εξόδου του MZI φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 3.16:



Σχήμα 3.16: Μετατροπή μήκους κύματος ενός τυχαίου τμήματος της ακολουθίας PRBS, με συμβολόμετρο MZI.

Έτσι λοιπόν, η νέα παλμική ακολουθία θα εμφανίζεται στη θύρα εξόδου μεταγωγής του MZI, θα βρίσκεται στο μήκος κύματος του CW δηλαδή στα 1558 nm ενώ δε θα συμβεί καμία αλλαγή από άσσο σε μηδενικό ή αντιστρόφως. Εντούτοις, η διαδικασία μετατροπής μήκους κύματος επηρεάζει το χρονικό εύρος των παλμών εξόδου, το οποίο προκύπτει αυξημένο από τα 3 psec στα 5 psec με το ρυθμό μετάδοσης όμως να παραμένει σταθερός στα 10 Gbps. Όσον αφορά το σήμα στη θύρα εξόδου μη μεταγωγής, παρατηρούμε ότι οι παλμοί βρίσκονται σε μήκος κύματος 1558 nm αλλά εμφανίζονται ανεστραμμένοι. Προφανώς λοιπόν, μας ενδιαφέρει το σήμα της θύρας εξόδου μεταγωγής, το οποίο στη συνέχεια περνάει από οπτικά φίλτρα.

### **Συγχρονισμός των σημάτων με οπτική γραμμή καθυστέρησης**

Πλέον το σήμα εισόδου 1 είναι σχεδόν έτοιμο να συνδεθεί με το υποκύκλωμα του 2×2 οπτικού διακόπτη μεταγωγής. Προτού όμως γίνει αυτό θα πρέπει να περάσει από μια οπτική γραμμή καθυστέρησης (Optical Delay Line – ODL) προκειμένου να επιτευχθεί τριπλός συγχρονισμός με το σήμα εισόδου 2 και το σήμα ελέγχου, όπως έχει εξηγηθεί αναλυτικά στην ενότητα 3.2. Συγκεκριμένα, ο τυχόν παλμός του σήματος εισόδου 1 επιλέγεται να συγχρονισθεί με το τρίτο από τα χρονικά αντίστοιχά του 4 bits του σήματος εισόδου 2. Όπως θα δούμε παρακάτω, ο συγχρονισμός μεταξύ των τριών οπτικών σημάτων επιτυγχάνεται με τη βοήθεια μιας ακόμη ODL που τοποθετήθηκε στο υποκύκλωμα παραγωγής του σήματος ελέγχου.

Η οπτική γραμμή καθυστέρησης (ODL) είναι ένα παθητικό στοιχείο που έχει στο εσωτερικό του διάφορους καθρέφτες. Το φως ανακλάται στους καθρέφτες και έτσι αυξάνεται η απόσταση που διανύει, οπότε προστίθεται μια χρονική καθυστέρηση στο οπτικό σήμα. Με ένα ρυθμιστή μπορούμε να ελέγξουμε της γωνίες των καθρεπτών αυτών και επομένως να μεταβάλλουμε τον οπτικό δρόμο που θα διανύσει ο παλμός στην ODL λόγω ανακλάσεων, άρα και τη χρονική καθυστέρηση που θα εισαχθεί τελικά.

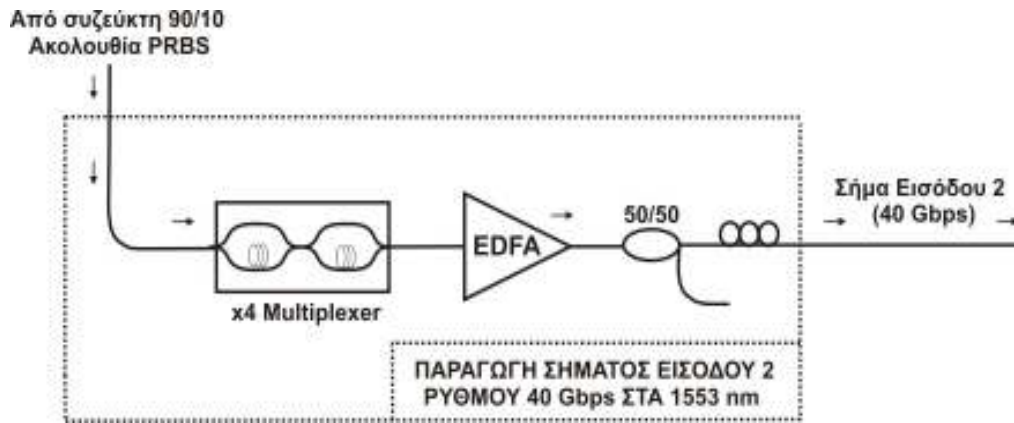
Τα τελευταία οπτικά στοιχεία πριν τη σύνδεση του σήματος εισόδου 1 ρυθμού 10 Gbps στα 1558 nm με το υποκύκλωμα του 2×2 οπτικού διακόπτη μεταγωγής είναι ένας EDFA, ένας οπτικός συζεύκτης που περνάει ένα μικρό τμήμα της ισχύος του σήματος εισόδου 1 στην είσοδο του παλμογράφου για παρατήρηση (monitor), καθώς και ένας ελεγκτής πόλωσης.

#### **3.3.1.2 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ 2**

Η δεύτερη εκ των δύο εξόδων του συζεύκτη 90/10 οδηγεί την ψευδοτυχαία ακολουθία ρυθμού 10 Gbps στα 1553 nm στη διάταξη σχηματισμού του σήματος εισόδου 2, η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 3.17 που ακολουθεί. Η βασική λειτουργία της εν λόγω διάταξης αποτελεί ο τετραπλασιασμός του ρυθμού μετάδοσης της



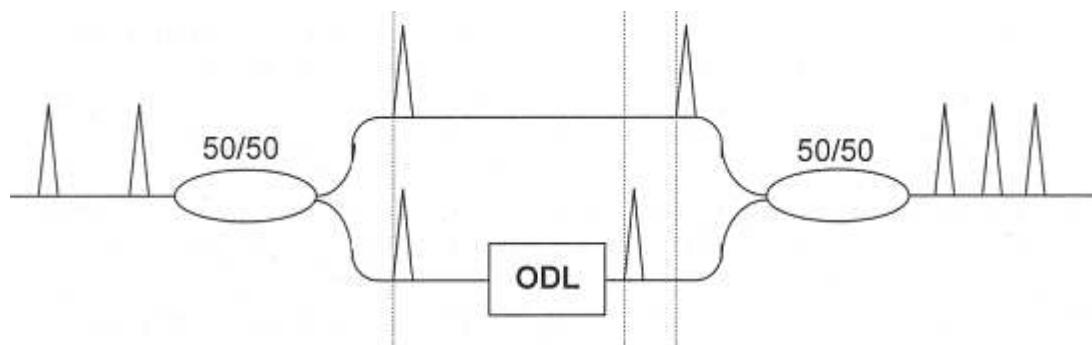
ακολουθίας από τα 10 Gbps στα 40 Gbps, με το μήκος κύματος να παραμένει σταθερό στα 1553 nm.



Σχήμα 3.17: Σχηματισμός του σήματος εισόδου 2 ρυθμού 40 Gbps στα 1553 nm.

### Τετραπλασιασμός του ρυθμού μετάδοσης με διάταξη τετραπλασιαστή

Η διάταξη του τετραπλασιαστή αποτελείται στην ουσία από δύο διπλασιαστές σε σειρά. Η τυπική σχεδίαση ενός διπλασιαστή είναι πολύ απλή, καθώς περιλαμβάνει δύο οπτικούς συζεύκτες 50/50 και μια οπτική γραμμή καθυστέρησης (ODL). Η μορφή του διπλασιαστή παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 3.18:

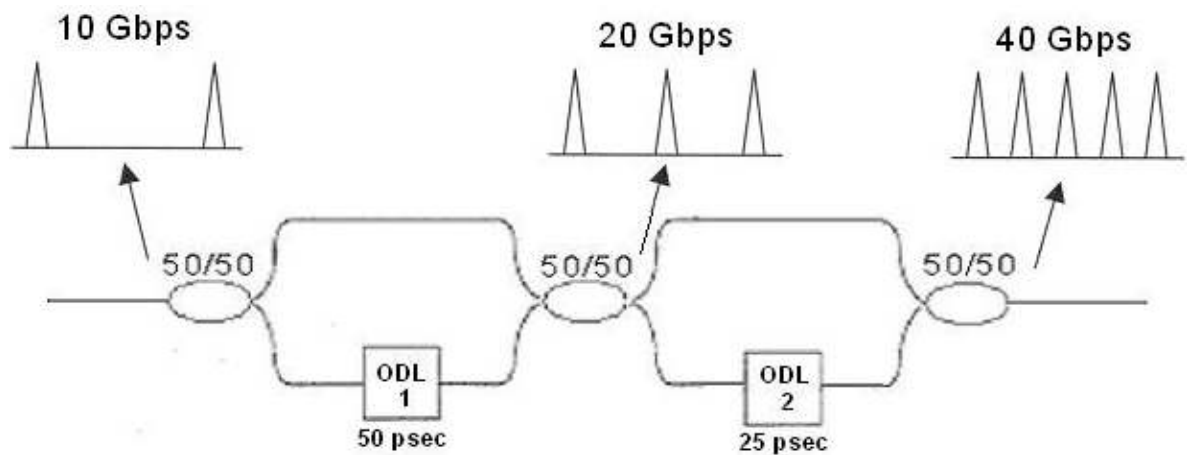


Σχήμα 3.18: Τυπική σχεδίαση διπλασιαστή ρυθμού μετάδοσης.

Το σήμα εισόδου του διπλασιαστή εισάγεται στον αριστερό συζεύκτη, όπου χωρίζεται σε δύο ίσες συνιστώσες. Η μία από αυτές υφίσταται μεταβλητή καθυστέρηση καθώς διαδίδεται μέσω της ODL, ενώ η άλλη διαδίδεται κανονικά χωρίς να υποστεί καμία

καθυστέρηση. Έτσι, όταν οι δύο συνιστώσες συμβάλλουν στον δεξιό συζεύκτη τότε στην έξοδο αυτού εμφανίζονται δύο αντίγραφα του αρχικού παλμού με επιθυμητή χρονική απόσταση. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ο διπλασιασμός του ρυθμού μετάδοσης.

Προκειμένου να επιτευχθεί τετραπλασιασμός του ρυθμού μετάδοσης της εισαγόμενης ακολουθίας PRBS, συνδέονται δύο τέτοιου τύπου διπλασιαστές σε σειρά, ρυθμίζοντας κατάλληλα τις τιμές των καθυστερήσεων στις δύο ODL. Έτσι, η ODL 1 εισάγει καθυστέρηση:  $T_{PRBS/2} = T_{bit}/2 = (100 \text{ psec})/2 = 50 \text{ psec}$ , ενώ η ODL 2 εισάγει καθυστέρηση:  $T_{PRBS/4} = T_{bit}/4 = (100 \text{ psec})/4 = 25 \text{ psec}$ . Η μορφή του τετραπλασιαστή παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 3.19:



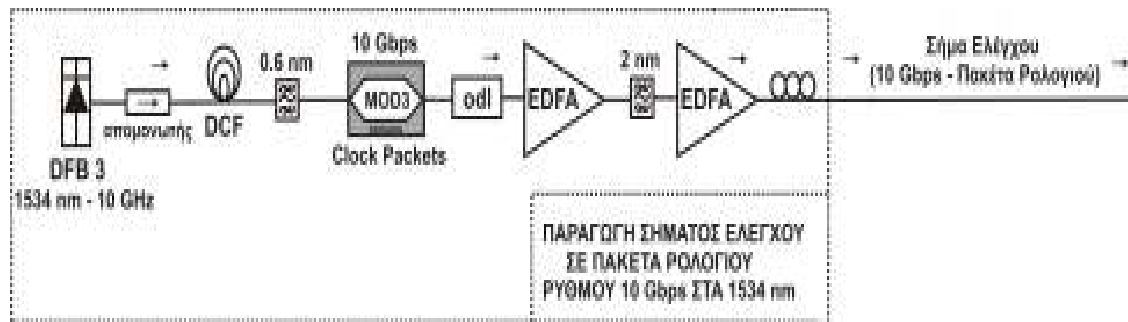
Σχήμα 3.19: Η μορφή του τετραπλασιαστή που υλοποιήθηκε.

Έτσι, η προκύπτουσα ακολουθία PRBS στην έξοδο του τετραπλασιαστή θα έχει περίοδο  $2^7 - 1 = 127 \text{ bits}$ , όπως και η PRBS εισόδου, ενώ ο ρυθμός μετάδοσής της είναι θα είναι 40 Gbps. Συνεπώς, η περίοδος το bit θα έχει υποτετραπλασιαστεί από τα 100 psec στα 25 psec, ενώ το χρονικό εύρος των παλμών δεν θα επηρεασθεί και θα παραμένει στα 3 psec.

Προτού συνδεθεί το σήμα εισόδου 2 ρυθμού 40 Gbps στα 1553 nm με το υποκύκλωμα του 2×2 οπτικού διακόπτη μεταγωγής, ενισχύεται μέσω ενός EDFA, συνδέεται στον παλμογράφο μέσω οπτικού συζεύκτη και περνά από ελεγκτή πόλωσης.

### 3.3.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ

Το υποκύκλωμα παραγωγής του σήματος ελέγχου σε μορφή πακέτων ρολογιού παρουσιάζεται στο σχήμα 3.20 που ακολουθεί:



Σχήμα 3.20: Παραγωγή του σήματος ελέγχου σε πακέτα ρολογιού με ρυθμό 10 Gbps στα 1534 nm.

Για την παραγωγή της παλμοσειράς του σήματος ελέγχου (ακολουθία συνεχόμενων λογικών άσων) χρησιμοποιήθηκε ακόμη μία δίοδος laser (DFB 3). Η δίοδος αυτή εκπέμπει σε μήκος κύματος 1534 nm και για να παράγει παλμούς λειτουργεί με τη μέθοδο της διαμόρφωσης απολαβής (Gain Switching), η οποία εξηγήθηκε αναλυτικά σε προηγούμενη ενότητα. Το σήμα RF που χρησιμοποιήθηκε είχε ακριβή συχνότητα 10.0250055 GHz λόγω περιορισμών στα χαρακτηριστικά της δίοδου. Η τιμή του DC ρεύματος ήταν γύρω στα 60 mA ενώ η ισχύς του RF ήταν περί τα 25.5 dBm.

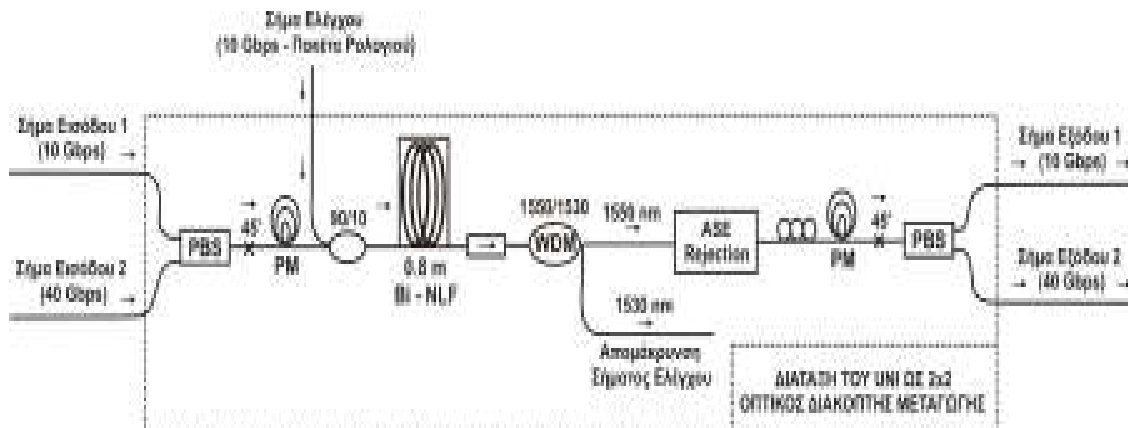
Αμέσως μετά τη δίοδο έχει τοποθετηθεί ένας απομονωτής που έχει ως σκοπό την προστασία της. Ο απομονωτής είναι ένα οπτικό στοιχείο που επιτρέπει τη διέλευση του φωτός μόνο προς μία κατεύθυνση. Η λειτουργία του στηρίζεται στη στροφή Faraday, δηλαδή τη μεταβολή της πολωτικής κατάστασης ενός κύματος όταν αυτό διαδίδεται σε κατάλληλο υλικό. Το φως πρώτα περνάει από έναν πολωτή και στη συνέχεια αφού διαδοθεί στο υλικό, η πόλωσή του στρέφεται κατά 45°. Αν ξαναδιαδοθεί με την αντίθετη κατεύθυνση, τότε στρέφεται άλλες 45° προς την ίδια φορά, οπότε συναντά κάθετα τον πολωτή και δεν μπορεί να τον διαπεράσει. Γενικά, η παρουσία απομονωτών μετά από δίοδους είναι πολύ συχνή, γιατί οποιαδήποτε ανεπιθύμητη ανάκλαση από τη διάταξη διαδοθεί στο εσωτερικό της δίοδου μπορεί να την οδηγήσει σε ανεξέλεγκτες ταλαντώσεις με αποτέλεσμα την καταστροφή της.

Εν συνεχεία, η παλμοσειρά στα 10 GHz η οποία έχει δημιουργηθεί περνά από κομμάτι DCF ίνας προκειμένου οι παλμοί να υποστούν γραμμική συμπίεση. Το χρονικό εύρος των παλμών στην έξοδο της DCF ίνας μετρήθηκε στα 8.2 psec με τη βοήθεια του αυτοσυσχετιστή. Να σημειωθεί ότι στην περίπτωση του σήματος ελέγχου δεν χρησιμοποιήθηκε μη γραμμικός συμπίεστής για περαιτέρω συμπίεση των παλμών, όπως είχε γίνει στην περίπτωση της παλμοσειράς η οποία προοριζόταν για τα δύο σήματα εισόδου. Η παλμοσειρά φιλτράρεται και εισέρχεται σε ηλεκτροοπτικό διαμορφωτή (Modulator 3) ο οποίος δημιουργεί τα πακέτα ρολογιού (Clock Packets) ρυθμού 10 Gbps. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην ενότητα 3.2, τα εν λόγω πακέτα ρολογιού συνιστούν αλληλουχίες συνεχόμενων άσπων μήκους κύματος 1534 nm, η διάρκειά τους είναι 2.3 nsec και η περίοδός τους είναι 40.5 nsec. Η μορφή των πακέτων ρολογιού έχει παρουσιασθεί στο σχήμα 3.4(α).

Ακολουθεί μια οπτική γραμμή καθυστέρησης (ODL), η οποία σε συνδυασμό με την έτερη ODL που έχει τοποθετηθεί στη διάταξη σχηματισμού του σήματος εισόδου 1 χρησιμοποιείται προκειμένου να επιτευχθεί τριπλός συγχρονισμός των δύο σημάτων εισόδου και του σήματος ελέγχου. Εν συνεχεία, το σήμα ελέγχου ενισχύεται από έναν EDFA, περνάει από φίλτρο 2 nm το οποίο αποκόπτει το θόρυβο του EDFA και ενισχύεται εκ νέου από έτερο EDFA υψηλής ισχύος. Η περαιτέρω ενίσχυση του σήματος ελέγχου είναι επιβεβλημένη, καθώς το σήμα ελέγχου θα πρέπει να έχει πολύ υψηλότερη ισχύ σε σχέση με τα δύο σήματα εισόδου, προκειμένου να διεγερθεί με αποδοτικό τρόπο το φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης φάσης στο εσωτερικό της ισχυρά μη γραμμικής ίνας Βισμουθίου του 2×2 διακόπτη. Τέλος, το σήμα ελέγχου περνά από ελεγκτή πόλωσης και συνδέεται με το υποκύκλωμα του 2×2 οπτικού διακόπτη μεταγωγής.

### **3.3.3 ΚΥΚΛΩΜΑ ΤΟΥ 2×2 ΟΠΤΙΚΟΥ ΔΙΑΚΟΠΤΗ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ**

Στο σχήμα 3.21 που ακολουθεί παρουσιάζεται το βασικό δομικό τμήμα της πειραματικής διάταξης που υλοποιήθηκε στο εργαστήριο, που είναι το υποκύκλωμα του UNI σε λειτουργία 2×2 οπτικού διακόπτη μεταγωγής. Ακόμη, παρατίθεται και σχετική φωτογραφία της εν λόγω διάταξης του UNI στο σχήμα 3.22.



Σχήμα 3.21: Πειραματική διάταξη του UNI ως 2×2 οπτικός διακόπτης μεταγωγής.



Σχήμα 3.22: Φωτογραφία της πειραματικής διάταξης του UNI ως 2×2 οπτικός διακόπτης μεταγωγής, όπως υλοποιήθηκε στο εργαστήριο.

Η αρχή λειτουργίας του 2×2 διακόπτη με τη συγκεκριμένη μορφή των σημάτων εισόδου και ελέγχου έχει παρουσιασθεί στην ενότητα 3.2, ενώ η πορεία των οπτικών σημάτων στο εσωτερικό του έχει εξηγηθεί με αναλυτικό τρόπο στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τα δύο σήματα εισόδου ρυθμού 10 Gbps και 40 Gbps αντιστοίχως εισέρχονται στον διακόπτη μέσω του αριστερού PBS και εξέρχονται από αυτόν μέσω του δεξιού PBS, ενώ τα δύο ίδια κομμάτια PM ίνας, τα οποία είναι συγκολλημένα στις 45° με τους αντίστοιχους PBS, έχουν μήκος 5 m και εισάγουν χρονική καθυστέρηση της τάξεως των 10 psec μεταξύ των ορθογωνίων συνιστωσών των δύο σημάτων. Το σήμα ελέγχου ρυθμού 10 Gbps σε μορφή πακέτων ρολογιού εισάγεται στη διάταξη του διακόπτη μέσω

ενός συζεύκτη 90/10 και συνδιαδίδεται με τις συγκεκριμένες συνιστώσες των σημάτων εισόδου στο εσωτερικό της ισχυρά μη γραμμικής ίνας Βισμουθίου, η οποία έχει μήκος 0.8 m. Βεβαίως, όπως έχει τονισθεί κατ' επανάληψη, απαιτείται κατάλληλος τριπλός συγχρονισμός μέσω των δύο ODL μεταξύ του σήματος ελέγχου και των συγκεκριμένων συνιστωσών των σημάτων εισόδου. Ακόμη, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή στροφή φάσης των εν λόγω συνιστωσών κατά 180°, ρυθμίζεται κατάλληλα και ισχύς κορυφής των παλμών ελέγχου. Η λειτουργία του διακόπτη στην κατάσταση μη μεταγωγής επιτυγχάνεται με τον μηδενισμό της ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου.

Μετά την ισχυρά μη γραμμική ίνα Βισμουθίου ακολουθεί ένας απομονωτής και στη συνέχεια το οπτικό στοιχείο που απομακρύνει το σήμα ελέγχου. Πρόκειται για έναν WDM συζεύκτη – αποπολυπλέκτη ο οποίος περιλαμβάνει μία είσοδο και δύο εξόδους στις οποίες γίνεται διαχωρισμός των μηκών κύματος. Συγκεκριμένα, στη μία έξοδο περνούν τα σήματα με μήκη κύματος στην περιοχή των 1550 nm, δηλαδή τα δύο σήματα εισόδου και στην άλλη έξοδο περνούν τα σήματα με μήκη κύματος στην περιοχή των 1530 nm δηλαδή το σήμα ελέγχου. Εντούτοις, επειδή το σήμα ελέγχου έχει πολύ υψηλότερη ισχύ από τα σήματα εισόδου, ακολουθεί και δεύτερο στάδιο απόρριψής του, μέσω ενός ειδικού φίλτρου ASE Rejection, το οποίο αποκόπτει εκ νέου τα μήκη κύματος στην περιοχή των 1530 nm. Πλέον, έχουν απομείνει στη διάταξη μόνο οι συνιστώσες των σημάτων εισόδου, οι οποίες περνούν από τον ελεγκτή πόλωσης για να στραφούν κατά 90°.

Να σημειωθεί ότι το σήμα εξόδου 1 του διακόπτη θα έχει ρυθμό 10 Gbps ενώ το σήμα εξόδου 2 θα έχει ρυθμό 40 Gbps, ανεξάρτητα αν ο διακόπτης λειτουργεί στην κατάσταση μεταγωγής ή μη μεταγωγής, όπως έχει εξηγηθεί και στην ενότητα 3.2.2.

### **Τεχνικά χαρακτηριστικά της ισχυρά μη γραμμικής ίνας Βισμουθίου**

Το Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών προμηθεύτηκε την ισχυρά μη γραμμική ίνα Βισμουθίου από το ερευνητικό κέντρο της ιαπωνικής εταιρείας ASAHI GLASS Company Ltd, σε συνεννόηση με τον Dr. Naoki Sugimoto. Πρόκειται για ίνα με ιδιαίτερα υψηλό συντελεστή μη γραμμικότητας  $\gamma$  της τάξεως των  $950 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$  [36]. Μόλις 0.8 m από αυτή την ίνα αρκούν προκειμένου να διεγερθεί με αποδοτικό τρόπο το φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης φάσης (XPM) στο εσωτερικό της. Ακόμη, το μικρό

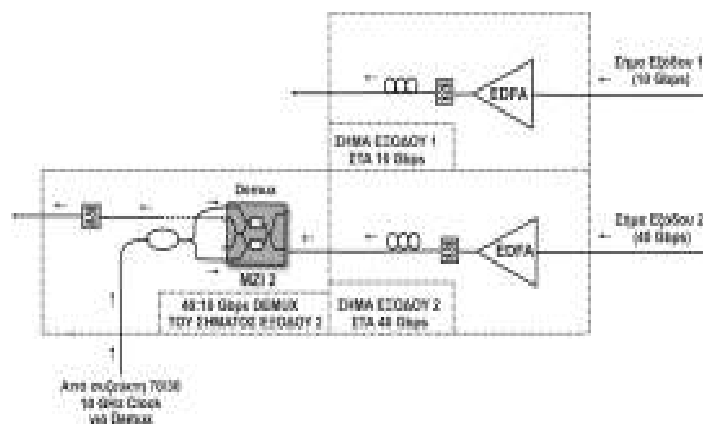
μήκος της ίνας εξασφαλίζει λειτουργική σταθερότητα της διάταξης και πολύ μικρή καθυστέρηση λειτουργίας, ενώ ο χρόνος απόκρισης που επιτυγχάνεται είναι επίσης ιδιαίτερα μικρός (κάτω από 200 fsec). Οι απώλειες διάδοσης στο εσωτερικό της ανέρχονται στα 1.3 dB/m, ενώ η συγκόλλησή της με SMF ίνα Πυριτίου εισάγει επιπρόσθετες απώλειες της τάξεως των 2.1 dB. Ακόμη, η διασπορά (Dispersion) που εισάγει η ίνα έχει τιμή  $-260$  psec/nm/km, ενώ η ενεργός της επιφάνεια ( $A_{\text{eff}}$ ) είναι  $3.3 \mu\text{m}^2$ . Στο παρακάτω σχήμα 3.23 παρουσιάζεται η φωτογραφία της ίνας Βισμούθιου που χρησιμοποιήθηκε:



Σχήμα 3.23: Φωτογραφία της ισχυρά μη γραμμικής ίνας Βισμούθιου που χρησιμοποιήθηκε.

### 3.3.4 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΥΟ ΣΗΜΑΤΩΝ ΕΞΟΔΟΥ

Τα δύο σήματα εξόδου του διακόπτη στα 10 Gbps και στα 40 Gbps αντιστοίχως, υφίστανται κάποια επιπλέον επεξεργασία. Το υποκύκλωμα που επιτελεί την εν λόγω επεξεργασία παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 3.24:



Σχήμα 3.24: Επεξεργασία των δύο σημάτων εξόδου του διακόπτη.

Όπως φαίνεται από το ανωτέρω σχήμα, υπάρχει ένα αρχικό στάδιο επεξεργασίας που αφορά και τα δύο σήματα εξόδου. Έτσι, προκειμένου τα δύο σήματα να παρατηρηθούν, ενισχύονται μέσω ενισχυτών EDFA, εν συνεχεία φιλτράρονται για να αποκοπεί ο ανεπιθύμητος θόρυβος και τέλος περνούν κι από ελεγκτή πόλωσης. Πλέον, τα δύο σήματα εξόδου στα 10 Gbps και στα 40 Gbps αντιστοίχως μπορούν να παρατηρηθούν στον παλμογράφο και να ελεγχθεί η ορθότητα της λειτουργίας του διακόπτη στις καταστάσεις μη μεταγωγής και μεταγωγής αντιστοίχως.

Πέρα όμως από την παρατήρηση των σημάτων εξόδου στον παλμογράφο, η ορθότητα της λειτουργίας του διακόπτη ελέγχεται και μέσω μετρήσεων του ρυθμού σφαλμάτων (Bit Error Rate – BER) στις δύο εξόδους του. Οι εν λόγω μετρήσεις γίνονται με μια ειδική συσκευή που διαθέτει το εργαστήριο, τον Bit Error Rate Tester, ο οποίος όμως δουλεύει σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gbps. Έτσι, ενώ με το σήμα εξόδου 1 ρυθμού 10 Gbps δεν υπάρχει πρόβλημα, το σήμα εξόδου 2 ρυθμού 40 Gbps θα πρέπει πρώτα να περάσει από έναν αποπολυπλέκτη 40:10 Gbps. Ουσιαστικά ένα σήμα ρυθμού 40 Gbps αναπαριστά τέσσερα “κανάλια” ρυθμού 10 Gbps το καθένα. Συνεπώς, με τη διαδικασία της αποπολυπλεξίας (Demux) λαμβάνουμε μετρήσεις BER για καθένα από τα εν λόγω τέσσερα κανάλια. Βέβαια, πολύ περισσότερο μας ενδιαφέρουν οι μετρήσεις BER που αφορούν το τρίτο κανάλι, αφού ο τυχόν παλμός του σήματος εισόδου 1 έχει επιλεγθεί να συγχρονισθεί με το τρίτο από τα χρονικά αντίστοιχά του 4 bits του σήματος εισόδου 2. Συνεπώς, η διαδικασία της αντιμετάθεσης των παλμών στις εξόδους του διακόπτη στην κατάσταση μεταγωγής θα αφορά το τρίτο κανάλι του σήματος εισόδου 2.

#### **Αποπολυπλεξία 40:10 Gbps του σήματος εξόδου 2 με συμβολόμετρο Mach–Zehnder**

Η διαδικασία της αποπολυπλεξίας (Demux) 40:10 Gbps του σήματος εξόδου 2 γίνεται με ένα δεύτερο ολοκληρωμένο συμβολόμετρο Mach – Zehnder (MZI 2). Συγκεκριμένα, το σήμα εξόδου 2 ρυθμού 40 Gbps εισέρχεται σε μία από τις δύο θύρες εισόδου του MZI 2. Οι δύο θύρες ελέγχου του MZI 2 τροφοδοτούνται με σήμα ρολογιού, το οποίο συνιστά η αλληλουχία συνεχόμενων παλμών (λογικών άσσων) στα 10 GHz η οποία είχε δημιουργηθεί στο υποκύκλωμα παραγωγής της PRBS για το σχηματισμό των δύο σημάτων εισόδου (βλ. σχήμα 3.10). Οι παλμοί της συγκεκριμένης παλμοσειράς έχουν χρονικό εύρος 3 psec και μήκος κύματος 1553 nm και τροφοδοτούνται στο MZI 2



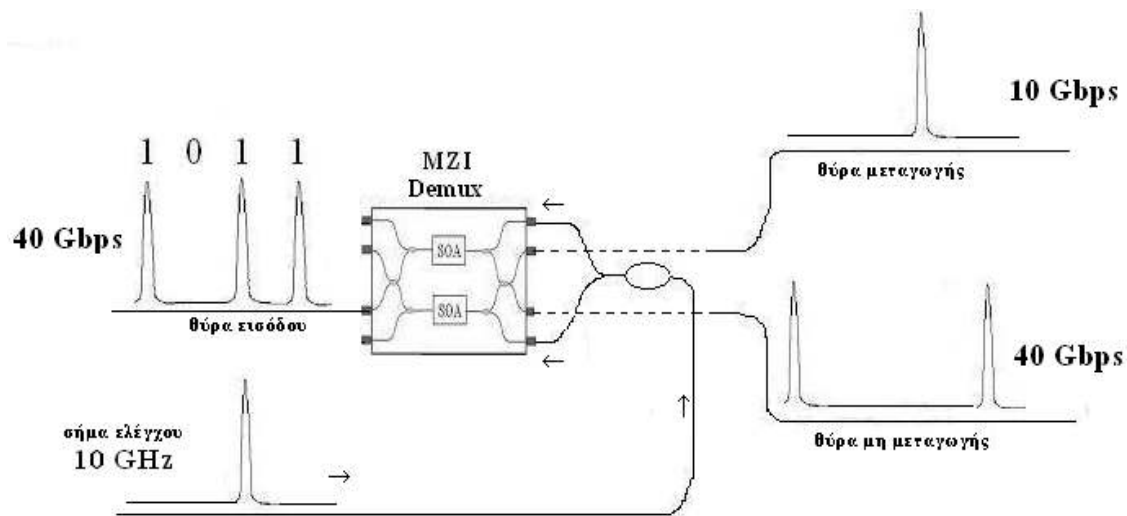
μέσω της εξόδου ενός οπτικού συζεύκτη 70/30 που βρίσκεται στο υποκύκλωμα παραγωγής της PRBS. Όπως και στην περίπτωση της μετατροπής μήκους κύματος, έτσι και στην συγκεκριμένη περίπτωση της αποπολυπλεξίας το σήμα ελέγχου εισάγεται και στις δύο αντίστοιχες θύρες ελέγχου του MZI, δηλαδή εφαρμόζεται εκ νέου η τεχνική push – pull.

Οι παλμοί ελέγχου στα 10 GHz επιλέγεται να συγχρονισθούν με ένα από τα τέσσερα κανάλια του σήματος εξόδου 2 του διακόπτη. Στην θύρα εξόδου μεταγωγής του MZI 2 θα εμφανιστεί αυτό το συγκεκριμένο κανάλι. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να λάβουμε στη θύρα εξόδου μεταγωγής του MZI 2 και τα τέσσερα κανάλια ρυθμού 10 Gbps το καθένα που συνθέτουν το σήμα εξόδου 2 του διακόπτη, συγχρονίζοντας τους παλμούς ελέγχου με το πρώτο, το δεύτερο, το τρίτο ή το τέταρτο κανάλι αντιστοίχως. Ουσιαστικά, το σήμα που εμφανίζεται στη θύρα εξόδου μεταγωγής του MZI 2 είναι το αποτέλεσμα της λογικής πράξης AND μεταξύ του σήματος εξόδου 2 του διακόπτη ρυθμού 40 Gbps και του παλμικού σήματος ελέγχου στα 10 GHz που τροφοδοτείται στο MZI 2.

Η λειτουργία της αποπολυπλεξίας 40:10 Gbps γίνεται ευκολότερα κατανοητή με ένα παράδειγμα. Ας θεωρηθεί λοιπόν η εξής τυχαία τετράδα bits του σήματος εξόδου 2 του διακόπτη ρυθμού 40 Gbps, η οποία θα εισαχθεί σε μία θύρα εισόδου του MZI 2:

Τετράδα του σήματος εξόδου 2 ρυθμού 40 Gbps  $\rightarrow$  1 0 1 1

Το πρώτο από τα 4 bits θα ανήκει στο πρώτο κανάλι, το δεύτερο bit θα ανήκει στο δεύτερο κανάλι και ούτω καθεξής. Επιλέγουμε να συγχρονίσουμε την παλμοσειρά ελέγχου με το τρίτο κανάλι. Άλλωστε, όπως προαναφέρθηκε, το τρίτο κανάλι έχει περισσότερο ενδιαφέρον αφού αυτό αφορά η διαδικασία της αντιμετάθεσης των παλμών στις εξόδους του διακόπτη. Στην θύρα εξόδου μεταγωγής του MZI 2 θα εμφανισθεί μόνο το τρίτο bit της ανωτέρω τετράδας, δηλαδή άσος. Αν το τρίτο bit ήταν μηδενικό, θα εμφανιζόταν αντιστοίχως μηδενικό. Έτσι, αφού ο κάθε παλμός ελέγχου έχει συγχρονισθεί με το τρίτο bit της κάθε τετράδας, στη θύρα εξόδου μεταγωγής του MZI 2 θα εμφανιστεί το τρίτο κανάλι ρυθμού 10 Gbps. Η μορφή των σημάτων στις δύο θύρες εξόδου του MZI 2 για το συγκεκριμένο παράδειγμα φαίνεται στο σχήμα 3.25 που ακολουθεί:



Σχήμα 3.25: Παράδειγμα αποπολυπλεξίας 40:10 Gbps του τρίτου καναλιού του σήματος εξόδου 2 του διακόπτη, με συμβολόμετρο MZI.

Με ανάλογο τρόπο μπορούμε να λάβουμε στη θύρα εξόδου μεταγωγής του MZI 2 και τα υπόλοιπα τρία κανάλια του σήματος εξόδου 2 του διακόπτη και πλέον οι μετρήσεις ρυθμού σφαλμάτων στον Bit Error Rate Tester μπορούν να πραγματοποιηθούν για κάθε κανάλι ξεχωριστά. Να σημειωθεί ότι προτού συνδεθεί το εκάστοτε αποπολυπλεγμένο κανάλι στον Bit Error Rate Tester, περνά από οπτικό φίλτρο. Τέλος, όσον αφορά το σήμα στη θύρα εξόδου μη μεταγωγής του MZI 2, από το ανωτέρω σχήμα παρατηρούμε ότι έχει ρυθμό 40 Gbps, αφού στην εν λόγω θύρα περνούν τα υπόλοιπα 3 bits της τετράδας τα οποία δεν έχουν συγχρονισθεί με τον παλμό ελέγχου. Προφανώς το σήμα αυτό δεν μας ενδιαφέρει.

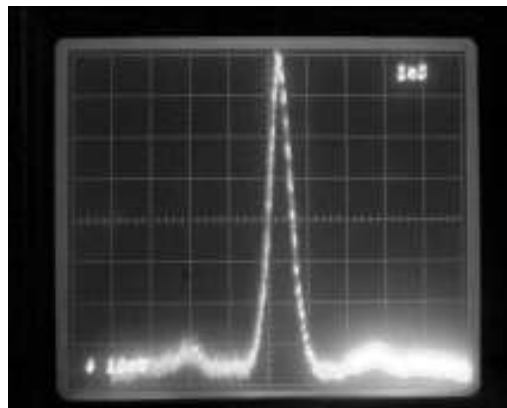
### 3.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

#### 3.4.1 ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟΝ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟ ΚΑΙ ΣΤΟΝ ΑΥΤΟΣΥΣΧΕΤΙΣΤΗ

Στην παρούσα ενότητα θα παρατεθούν ορισμένες ενδεικτικές εικόνες των σημάτων στον παλμογράφο, οι οποίες καταδεικνύουν την ορθότητα της λειτουργίας του 2×2 οπτικού διακόπτη μεταγωγής (Exchange – Bypass Switch) ο οποίος υλοποιήθηκε στο

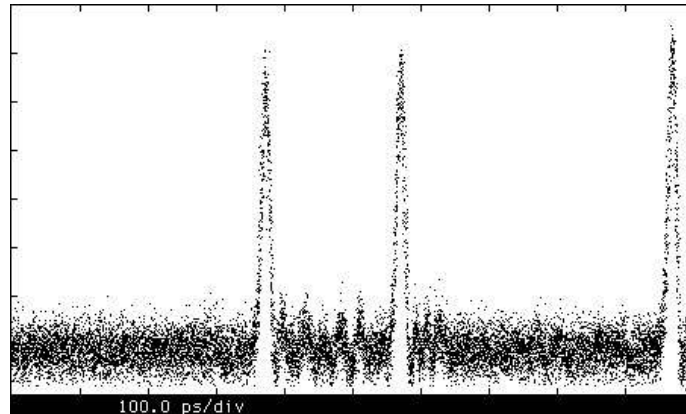
πείραμα. Τα σήματα εισόδου του διακόπτη περνούν και από τον αυτοσυσχετιστή, αφού η διακριτική ικανότητα του παλμογράφου δεν είναι επαρκής ώστε να μπορούμε να δούμε με λεπτομέρεια τη μορφή των παλμών. Να σημειωθεί ότι σε όλες τις επόμενες εικόνες που αποτυπώνουν σήματα στον παλμογράφο, η χρονική κλίμακα του παλμογράφου έχει ρυθμιστεί στην τιμή των 100 psec/div. Αυτό σημαίνει ότι όσον αφορά τα σήματα ρυθμού 10 Gbps, σε μία υποδιαίρεση της κλίμακας του χρόνου θα “χωράει” ένα bit, ενώ όσον αφορά τα σήματα ρυθμού 40 Gbps, σε μία υποδιαίρεση της κλίμακας του χρόνου θα “χωρούν” 4 bits. Όπως έχει ήδη τονιστεί στις προηγούμενες ενότητες, ο τυχόν παλμός του σήματος εισόδου 1 ρυθμού 10 Gbps καθώς και του σήματος ελέγχου ρυθμού 10 Gbps έχει επιλεγεί να συγχρονισθεί με το τρίτο από τα χρονικά αντίστοιχα του 4 bits του σήματος εισόδου 2 ρυθμού 40 Gbps.

Τα δύο σήματα εισόδου έχουν σχηματισθεί από μία κοινή ακολουθία PRBS ρυθμού 10 Gbps στα 1553 nm. Στο παρακάτω σχήμα 3.26 παρουσιάζεται η μορφή του τυχόντος παλμού της εν λόγω PRBS στον αυτοσυσχετιστή. Το χρονικό εύρος του παλμού αυτού είναι 3 psec.



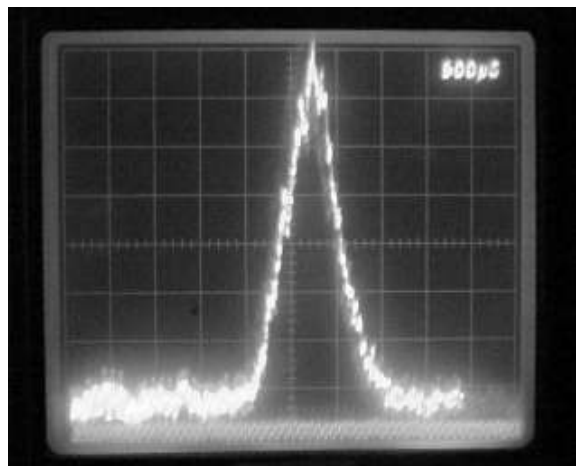
**Σχήμα 3.26:** Η μορφή τυχόντος παλμού της ακολουθίας PRBS ρυθμού 10 Gbps στα 1553 nm. Η χρονική κλίμακα έχει οριστεί στα 5.88 psec/div.

Το σήμα εισόδου 1 ρυθμού 10 Gbps έχει προκύψει από μετατροπή μήκους κύματος της ανωτέρω ακολουθίας PRBS από τα 1553 nm στα 1558 nm. Στο παρακάτω σχήμα 3.27 παρουσιάζεται ένα χρονικό στιγμιότυπο του σήματος εισόδου 1 όπως φαίνεται στον παλμογράφο.



Σχήμα 3.27: Χρονικό στιγμιότυπο του σήματος εισόδου 1 ρυθμού 10 Gbps στα 1558 nm.

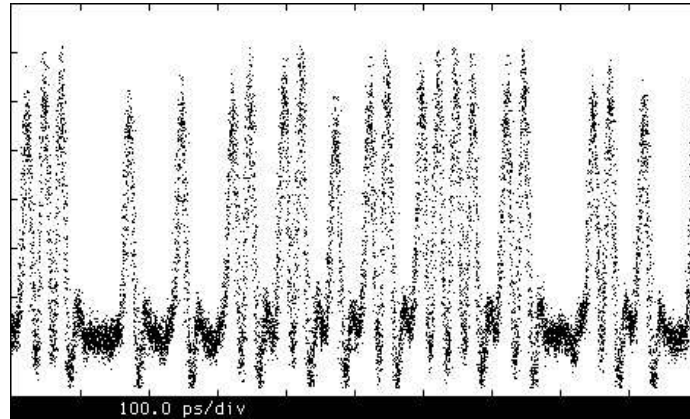
Στο σχήμα 3.28 που ακολουθεί παρουσιάζεται η μορφή του τυχόντος παλμού του σήματος εισόδου 1 στον αυτοσυσχετιστή. Παρατηρώντας την εικόνα αυτή και συγκρίνοντάς την με εκείνη του σχήματος 3.26, είναι φανερό ότι το σχήμα του παλμού έχει υποστεί μια σχετική αλλοίωση μετά το πέρασμά του από τον μετατροπέα μήκους κύματος, ενώ είναι φανερή και η αύξηση του χρονικού εύρους του παλμού που λαμβάνει χώρα. Συγκεκριμένα, το χρονικό εύρος του παλμού αυξάνεται από τα 3 psec στα 5 psec.



Σχήμα 3.28: Η μορφή τυχόντος παλμού του σήματος εισόδου 1 ρυθμού 10 Gbps στα 1558 nm. Η χρονική κλίμακα έχει οριστεί στα 2.94 psec/div.

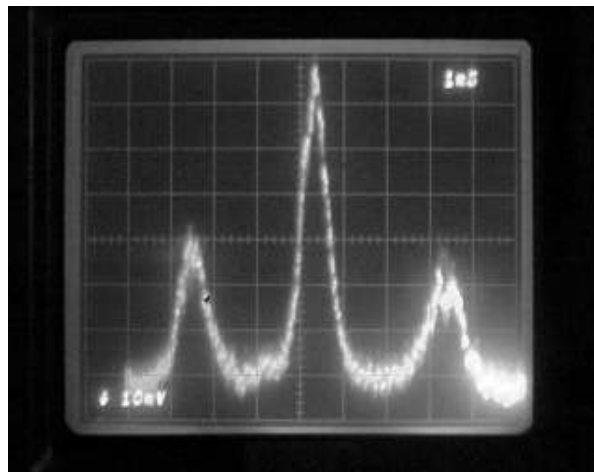
Το σήμα εισόδου 2 ρυθμού 40 Gbps έχει προκύψει από τετραπλασιασμό του ρυθμού μετάδοσης της ακολουθίας PRBS ρυθμού 10 Gbps. Στο παρακάτω σχήμα 3.29

παρουσιάζεται ένα χρονικό στιγμιότυπο του σήματος εισόδου 2 όπως φαίνεται στον παλμογράφο.



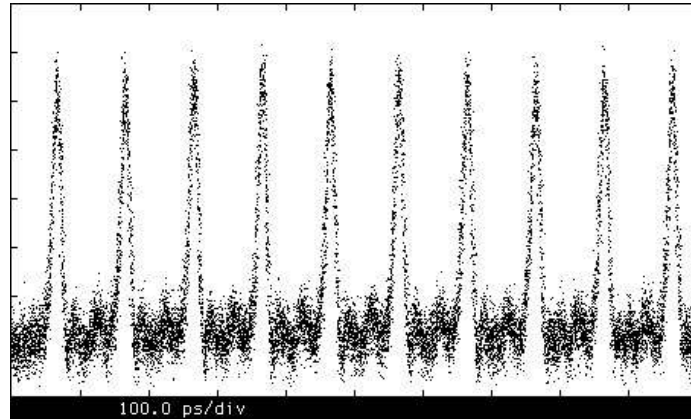
Σχήμα 3.29: Χρονικό στιγμιότυπο του σήματος εισόδου 2 ρυθμού 40 Gbps στα 1553 nm.

Παρατηρούμε ότι υπάρχει ένα σχετικό Amplitude Modulation, δηλαδή οι παλμοί του σήματος εισόδου 2 δεν είναι απολύτως ισοϋψείς. Στο σχήμα 3.30 που ακολουθεί παρουσιάζεται η μορφή του τυχόντος παλμού του σήματος εισόδου 2 στον αυτοσυσχετιστή. Το χρονικό εύρος των παλμών δεν θα επηρεασθεί από τον τετραπλασιασμό του ρυθμού μετάδοσης και θα παραμένει στα 3 psec.



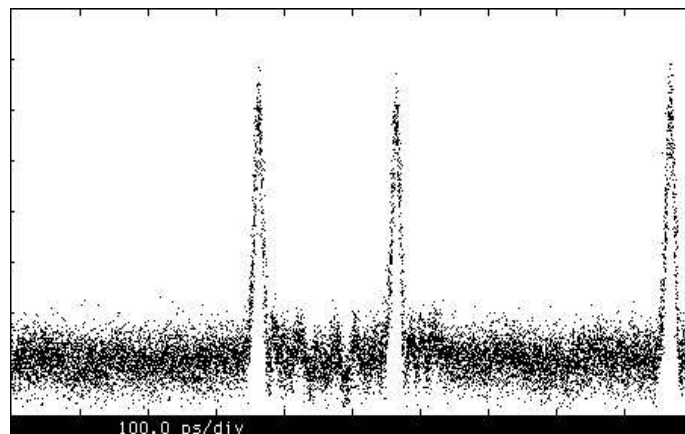
Σχήμα 3.30: Η μορφή τυχόντος παλμού του σήματος εισόδου 2 ρυθμού 40 Gbps στα 1553 nm. Η χρονική κλίμακα έχει οριστεί στα 5.88 psec/div.

Το σήμα ελέγχου ρυθμού 10 Gbps στα 1534 nm είναι σε μορφή πακέτων ρολογιού διάρκειας 2.3 nsec και περιόδου 40.5 nsec. Στο παρακάτω σχήμα 3.31 παρουσιάζεται ένα τμήμα του πακέτου ρολογιού του σήματος ελέγχου όπως φαίνεται στον παλμογράφο.

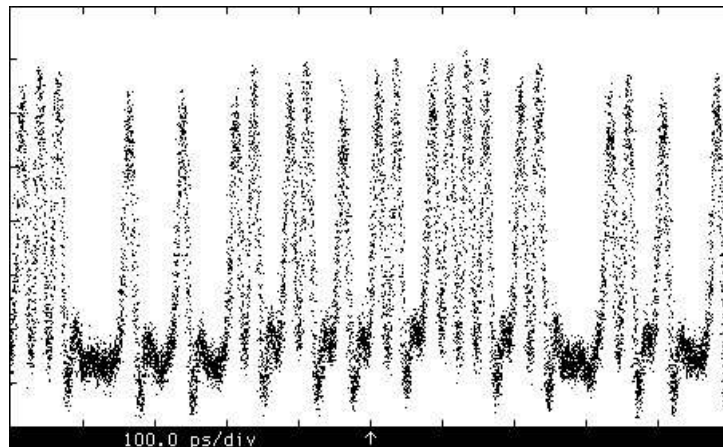


Σχήμα 3.31: Τμήμα του πακέτου ρολογιού του σήματος ελέγχου ρυθμού 10 Gbps στα 1534 nm.

Τα δύο σήματα εισόδου και το σήμα ελέγχου συνδέονται στον 2×2 οπτικό διακόπτη μεταγωγής, ενώ έχει επιτευχθεί τριπλός συγχρονισμός στο τρίτο bit του σήματος εισόδου 2. Αρχικά η ισχύς κορυφής των παλμών ελέγχου μηδενίζεται προκειμένου να ελεγχθεί η ορθότητα της λειτουργίας του διακόπτη στην κατάσταση μη μεταγωγής (Bar State). Στα παρακάτω σχήματα 3.32 και 3.33 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα χρονικά στιγμιότυπα των σημάτων εξόδου 1 και 2 ρυθμού 10 Gbps και 40 Gbps αντίστοιχως όπως φαίνονται στον παλμογράφο.



Σχήμα 3.32: Αντίστοιχο χρονικό στιγμιότυπο του σήματος εξόδου 1 ρυθμού 10 Gbps όταν ο διακόπτης λειτουργεί στην κατάσταση μη μεταγωγής (bar state).



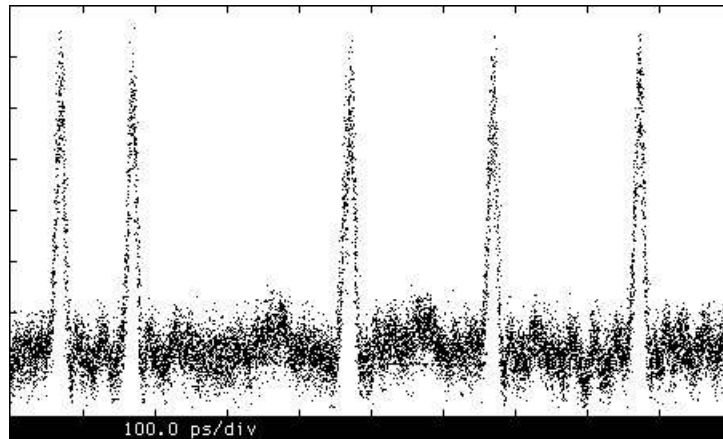
**Σχήμα 3.33:** Αντίστοιχο χρονικό στιγμιότυπο του σήματος εξόδου 2 ρυθμού 40 Gbps όταν ο διακόπτης λειτουργεί στην κατάσταση μη μεταγωγής (bar state).

Παρατηρούμε λοιπόν ότι τα σήματα εισόδου 1 και 2 εξέρχονται ανεπηρέαστα από τις αντίστοιχες θύρες εξόδου 1 και 2 του διακόπτη, κάτι που επιβεβαιώνει την ορθότητα της λειτουργίας του στην κατάσταση μη μεταγωγής.

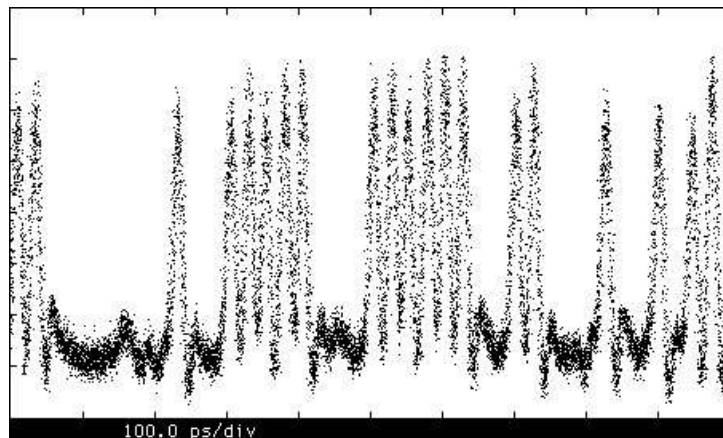
Εν συνεχεία, η ισχύς κορυφής των παλμών ελέγχου αυξάνεται σε σχέση με τη μηδενική στάθμη όπου βρισκόταν προηγουμένως, προκειμένου να ελεγχθεί η ορθότητα της λειτουργίας του διακόπτη στην κατάσταση μεταγωγής (Cross State). Μετά από αρκετές δοκιμές, η βέλτιστη λειτουργία του διακόπτη επετεύχθη όταν η ισχύς κορυφής των παλμών ελέγχου ήταν 8.5 W. Προφανώς με αυτή την τιμή ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου θα διεγείρεται με τον πλέον αποδοτικό τρόπο το φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης φάσης στο εσωτερικό της ισχυρά μη γραμμικής ίνας Βισμούθιου, με αποτέλεσμα η στροφή φάσης των συγκεκριμένων συνιστωσών των σημάτων εισόδου να τείνει στις 180°. Με δεδομένο ότι το χρονικό εύρος των παλμών ελέγχου είναι 8.2 psec, η αντίστοιχη ενέργεια των παλμών ελέγχου θα είναι:  $(8.2 \times 8.5) = 69.7$  pJ. Να σημειωθεί ότι οι συγκεκριμένη στάθμη ισχύος αφορά την είσοδο της ίνας Βισμούθιου και δεν συμπεριλαμβάνει τις απώλειες συγκόλλησης μεταξύ της ίνας Βισμούθιου και της SMF ίνας Πυριτίου.

Η διαδικασία της αντιμετάθεσης των παλμών στις εξόδους του διακόπτη αφορά το τρίτο bit κάθε τετράδας του σήματος εισόδου 2 σύμφωνα με τον τριπλό συγχρονισμό που έχει γίνει. Στα σχήματα 3.34 και 3.35 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα χρονικά στιγμιότυπα

των σημάτων εξόδου 1 και 2 ρυθμού 10 Gbps και 40 Gbps αντιστοίχως όπως φαίνονται στον παλμογράφο, όταν ο διακόπτης λειτουργεί στην κατάσταση μεταγωγής.



**Σχήμα 3.34:** Αντίστοιχο χρονικό στιγμιότυπο του σήματος εξόδου 1 ρυθμού 10 Gbps όταν ο διακόπτης λειτουργεί στην κατάσταση μεταγωγής (cross state).



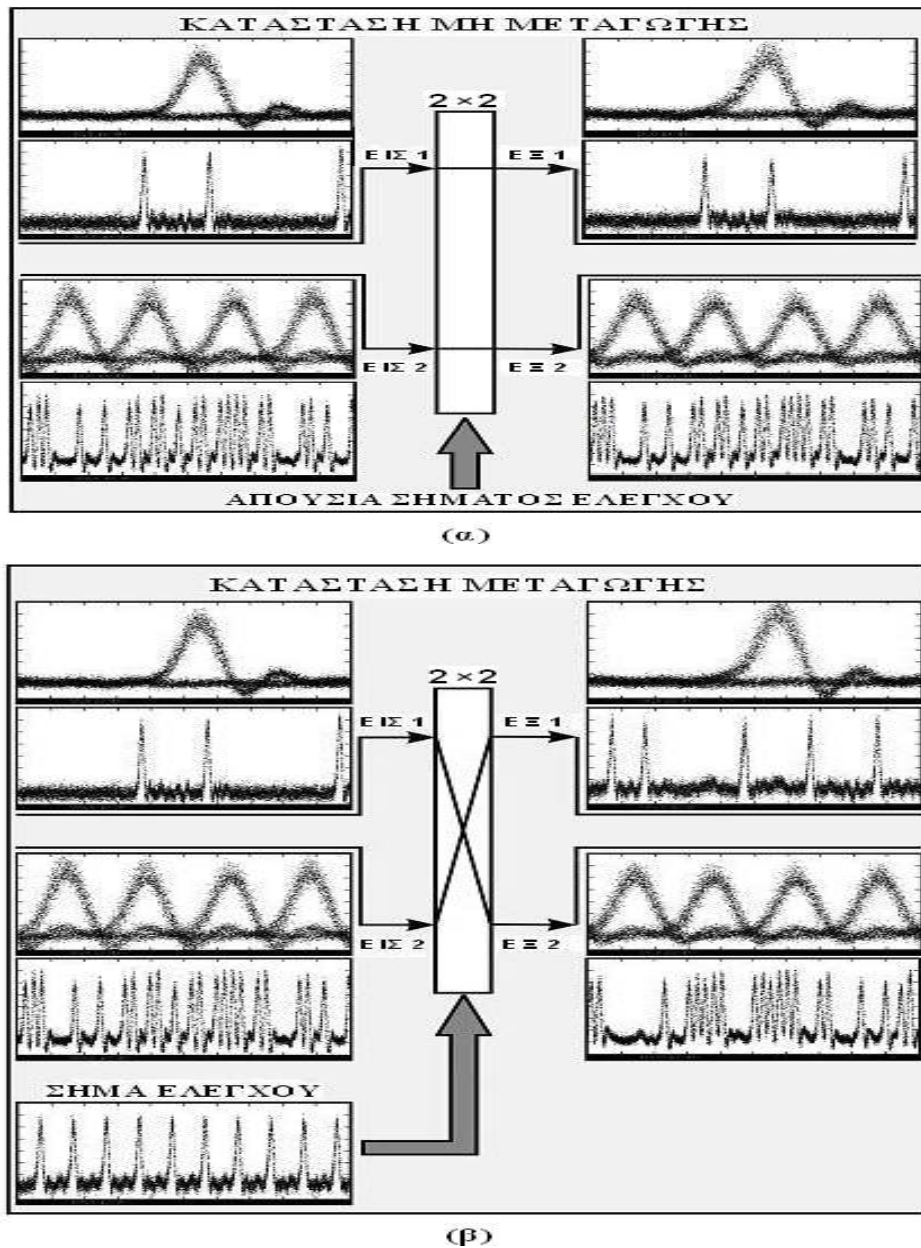
**Σχήμα 3.35:** Αντίστοιχο χρονικό στιγμιότυπο του σήματος εξόδου 2 ρυθμού 40 Gbps όταν ο διακόπτης λειτουργεί στην κατάσταση μεταγωγής (cross state).

Με προσεκτική παρατήρηση των ανωτέρω εικόνων, σε αντιπαραβολή με τις εικόνες των σημάτων εισόδου που προηγήθηκαν, επιβεβαιώνεται η ορθότητα της λειτουργίας του διακόπτη και στην κατάσταση μεταγωγής. Όπως έχει ήδη αναφερθεί και στην ενότητα 3.2.2, η παλμική ακολουθία της εξόδου 1 ρυθμού 10 Gbps αποτελείται μόνο από παλμούς του σήματος εισόδου 2 οι οποίοι βρίσκονται σε μήκος κύματος 1553 nm, ενώ η



παλμική ακολουθία της εξόδου 2 ρυθμού 40 Gbps είναι υβριδικής μορφής, δηλαδή αποτελείται από παλμούς του σήματος εισόδου 2 μήκους κύματος 1553 nm αλλά και από παλμούς του σήματος εισόδου 1 μήκους κύματος 1558 nm.

Η λειτουργία του 2×2 διακόπτη μεταγωγής συνοψίζεται στο παρακάτω σχήμα 3.36:



Σχήμα 3.36: Λειτουργία του 2×2 διακόπτη (α) στην κατάσταση μη μεταγωγής και (β) στην κατάσταση μεταγωγής. Η χρονική κλίμακα έχει οριστεί στα 100 psec/div για τα στιγμιότυπα των σημάτων στον παλμογράφο και στα 10 psec/div για τα διαγράμματα ματιού.

Τα χρονικά στιγμιότυπα των σημάτων στον παλμογράφο που απεικονίζονται στο ανωτέρω σχήμα 3.36 είναι προφανώς τα ίδια με εκείνα που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα σχήματα της παρούσας ενότητας. Μαζί με το χρονικό στιγμιότυπο κάθε σήματος έχει παρατεθεί και το αντίστοιχο διάγραμμα ματιού (eye diagram) με χρονική κλίμακα 10 psec/div. Ένα διάγραμμα ματιού ουσιαστικά απεικονίζει τους παλμούς ενός σήματος τον έναν πάνω στον άλλον. Με το διάγραμμα ματιού μπορούμε να εξετάσουμε την ποιότητα ενός σήματος, ανιχνεύοντας την ύπαρξη Amplitude Modulation ή Time Jitter. Όπως έχει ήδη ειπωθεί, το Amplitude Modulation συνιστά διαφορά στα ύψη, δηλαδή στην ισχύ κορυφής των παλμών ενός σήματος. Το Time Jitter αντιστοιχώς συνιστά διαφορά στη σχετική θέση των παλμών στην κλίμακα του χρόνου. Προφανώς επιθυμούμε ελαχιστοποίηση και του Amplitude Modulation και του Time Jitter.

Με τη βοήθεια των διαγραμμάτων ματιού μπορεί να εκτιμηθεί και το Extinction Ratio των δύο σημάτων εξόδου. Το Extinction Ratio είναι ο λόγος των ισχύων μεταξύ του κοντύτερου άσσου και του ψηλότερου μηδενικού ενός σήματος. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του Extinction Ratio τόσο καλύτερα θα λειτουργεί ο 2×2 διακόπτης τόσο στην κατάσταση μη μεταγωγής όσο και στην κατάσταση μεταγωγής. Στην κατάσταση μη μεταγωγής επετεύχθη Extinction Ratio περίπου 10.1 dB για το σήμα εξόδου 1 και 11 dB για το σήμα εξόδου 2. Αντιστοίχως, στην κατάσταση μεταγωγής επετεύχθη Extinction Ratio περίπου 9.5 dB για το σήμα εξόδου 1 και 10 dB για το σήμα εξόδου 2. Η σχετικά μικρή μείωση του Extinction Ratio στην κατάσταση μεταγωγής είναι αναμενόμενη αφού λαμβάνει χώρα αντιμετάθεση παλμών από τη μία θύρα εξόδου του διακόπτη στην άλλη.

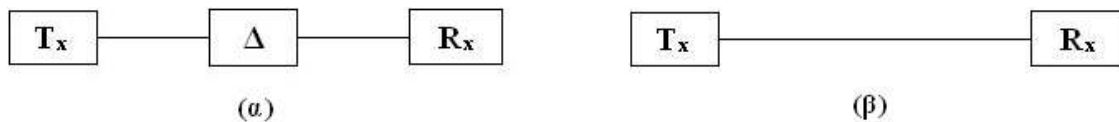
### **3.4.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΥΘΜΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ (BER)**

Στην παρούσα ενότητα θα παρατεθούν οι μετρήσεις ρυθμού σφαλμάτων (Bit Error Rate – BER) που έγιναν με τον Bit Error Rate Tester, σε μορφή καμπυλών BER. Ο Bit Error Rate Tester του εργαστηρίου δουλεύει σε ρυθμό 10 Gbps και μια φωτογραφία του φαίνεται στο σχήμα 3.37 που ακολουθεί.



Σχήμα 3.37: Ο Bit Error Rate Tester του εργαστηρίου.

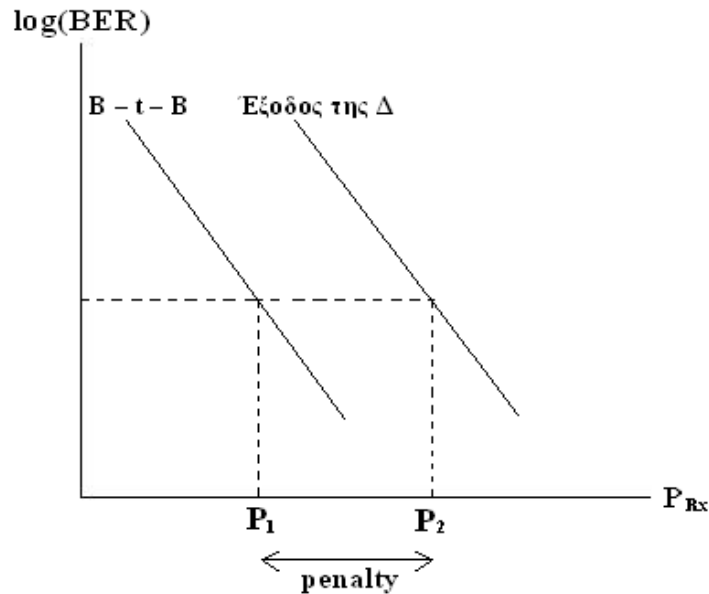
Ας θεωρηθεί κατά πρώτον μια τυχούσα διάταξη που περιλαμβάνει έναν πομπό  $T_x$ , μια οποιαδήποτε διάταξη  $\Delta$  και έναν δέκτη  $R_x$ . Εν συνεχεία θεωρείται μόνο ο πομπός  $T_x$  και ο δέκτης  $R_x$  οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους μέσω γραμμής. Η εν λόγω διάταξη πομπού – γραμμής – δέκτη αποκαλείται και διάταξη Back – to – Back ( $B - t - B$ ). Τα ανωτέρω παρουσιάζονται και στο παρακάτω σχήμα 3.38:



Σχήμα 3.38: (α) Πομπός – Διάταξη – Δέκτης. (β) Πομπός – Γραμμή – Δέκτης (Back – to – Back).

Στον δέκτη γίνεται επανειλημμένα καταγραφή της εισερχόμενης ισχύος  $P_{R_x}$  και του αντίστοιχου ρυθμού σφαλμάτων BER, στην περίπτωση που ο πομπός και ο δέκτης είναι συνδεδεμένοι με τη διάταξη  $\Delta$  αλλά και στην περίπτωση Back – to – Back ( $B - t - B$ ). Έτσι προκύπτουν οι καμπύλες BER συναρτήσεως της εισερχόμενης ισχύος  $P_{R_x}$ . Προφανώς, οι καμπύλες αυτές θα έχουν φθίνουσα μορφή, αφού αυξανόμενης της  $P_{R_x}$  θα μειώνεται ο ρυθμός σφαλμάτων BER. Στις περισσότερες περιπτώσεις διατάξεων  $\Delta$ , η καμπύλη Back – to – Back βρίσκεται αριστερά της καμπύλης που αντιστοιχεί στην έξοδο της διάταξης  $\Delta$ . Αυτό σημαίνει ότι στην περίπτωση Back – to – Back απαιτείται λιγότερη ισχύς  $P_{R_x}$  σε σύγκριση με την περίπτωση όπου η διάταξη  $\Delta$  είναι συνδεδεμένη,

προκειμένου να επιτευχθεί μια δεδομένη στάθμη BER. Αυτό συμβαίνει και στην περίπτωση μας όπου η διάταξη Δ είναι ο 2×2 διακόπτης μεταγωγής. Η γενική μορφή των καμπυλών BER για αυτές τις περιπτώσεις παρουσιάζεται στο σχήμα 3.39 που ακολουθεί.

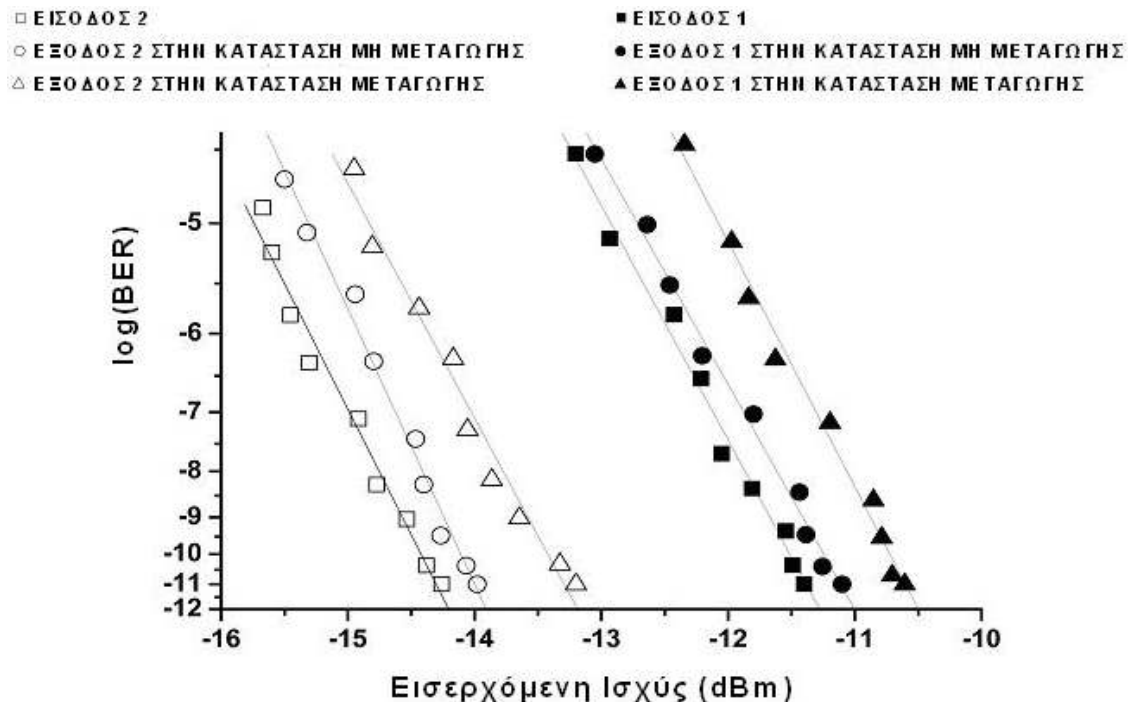


Σχήμα 3.39: Γενική μορφή καμπυλών BER.

Το penalty ισχύος, όπως απεικονίζεται στο ανωτέρω σχήμα, είναι ουσιαστικά η οριζόντια απόσταση από την καμπύλη B - t - B έως την καμπύλη που αντιστοιχεί στην έξοδο της διάταξης Δ. Προφανώς, στις περιπτώσεις αυτές όπου η καμπύλη B - t - B βρίσκεται αριστερά της καμπύλης που αντιστοιχεί στην έξοδο της διάταξης Δ, επιθυμούμε το penalty να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο. Εντούτοις, υπάρχουν και διατάξεις αναγεννητών, όπως για παράδειγμα ο δέκτης εκρηκτικής κίνησης (Burst Mode Receiver - BMR) όπου η καμπύλη B - t - B βρίσκεται δεξιά της καμπύλης που αντιστοιχεί στην έξοδο της διάταξης Δ. Στις περιπτώσεις αυτές το penalty λαμβάνει αρνητικές τιμές και επιθυμούμε να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερο κατ' απόλυτο τιμή.

Στην περίπτωση του πειράματός μας, οι καμπύλες BER που αντιστοιχούν στη διάταξη του 2×2 διακόπτη μεταγωγής παρουσιάζονται στο σχήμα 3.40 που ακολουθεί. Οι εν λόγω καμπύλες αφορούν τα σήματα εισόδου 1 και εξόδου 1 ρυθμού 10 Gbps, αλλά και τα αντίστοιχα κανάλια ρυθμού 10 Gbps των σημάτων εισόδου 2 και εξόδου 2, όταν ο

διακόπτης λειτουργεί στις καταστάσεις μη μεταγωγής και μεταγωγής αντιστοίχως. Έχει ήδη περιγραφεί σε προηγούμενη ενότητα η αποπολυπλεξία του σήματος εξόδου 2 ρυθμού 40 Gbps στα 4 κανάλια ρυθμού 10 Gbps. Οι καμπύλες BER αφορούν το τρίτο κανάλι, στο οποίο λαμβάνει χώρα η διαδικασία της αντιμετάθεσης των παλμών.



Σχήμα 3.40: Καμπύλες BER για τη λειτουργία του 2×2 διακόπτη μεταγωγής.

Όπως φαίνεται στις ανωτέρω καμπύλες, ο ρυθμός σφαλμάτων που επετεύχθη είναι εξαιρετικά χαμηλός, αγγίζοντας την τιμή του  $10^{-11}$ . Ουσιαστικά λοιπόν επετεύχθη πρακτικά αλάνθαστη (error – free) λειτουργία του 2×2 διακόπτη και στις δύο καταστάσεις μη μεταγωγής και μεταγωγής αντιστοίχως, με χαμηλές τιμές penalty ισχύος. Συγκεκριμένα, στην κατάσταση μη μεταγωγής οι τιμές του penalty μετρήθηκαν στα 0.3 dB και 0.28 dB για τις θύρες εξόδου 1 και 2 αντιστοίχως. Οι καμπύλες που αντιστοιχούν στην κατάσταση μεταγωγής βρίσκονται δεξιά των καμπυλών που αντιστοιχούν στην κατάσταση μη μεταγωγής, με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι τιμές του penalty στα 0.8 dB και 1.06 dB για τις θύρες εξόδου 1 και 2 αντιστοίχως. Η εν λόγω αύξηση του penalty είναι αναμενόμενη αφού στην κατάσταση μεταγωγής, όπου λαμβάνει χώρα η διαδικασία

της αντιμετάθεσης των παλμών, είναι πιθανότερο να συμβούν λάθη. Τέλος, το επιπρόσθετο penalty της τάξεως των 2 dB που αφορά το σήμα εισόδου 1 σε σύγκριση με το σήμα εισόδου 2 οφείλεται στη μετατροπή μήκους κύματος που λαμβάνει χώρα στο MZI 1.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΤΟΥ UNI ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ VPI

---

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται μια προσομοίωση της διάταξης του Μη Γραμμικού Συμβολομέτρου Υπερυψηλής Ταχύτητας (UNI) που πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού πακέτου VPI Transmission Maker που διαθέτει το Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών. Το εν λόγω πακέτο είναι εμπορικά διαθέσιμο και έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης μιας ευρείας γκάμας φωτονικών διατάξεων.

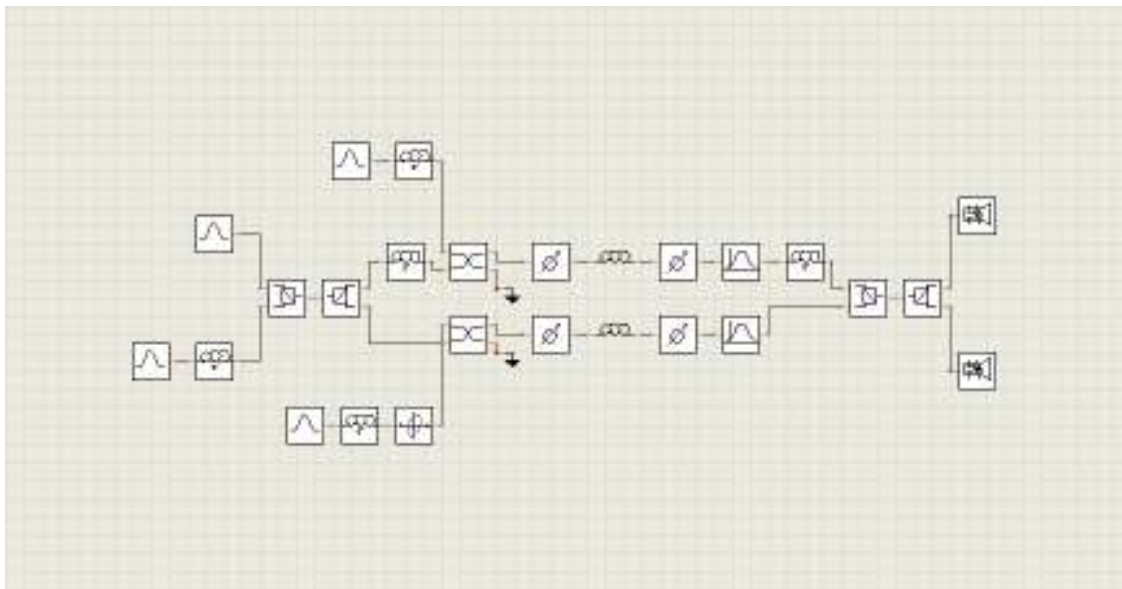
Η προσομοίωση αφορά τη λειτουργία του UNI τόσο με ένα σήμα εισόδου όσο και ως 2×2 οπτικός διακόπτης μεταγωγής (Exchange – Bypass Switch). Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν τρεις σειρές προσομοιώσεων. Στην πρώτη σειρά προσομοιώθηκε η λειτουργία του UNI με ένα σήμα εισόδου ρυθμού 10 Gbps και μήκους κύματος 1558 nm. Αντιστοίχως, στη δεύτερη σειρά προσομοιώθηκε εκ νέου η λειτουργία του UNI με ένα σήμα εισόδου ρυθμού 40 Gbps και μήκους κύματος 1553 nm. Στην τρίτη σειρά προσομοιώθηκε η λειτουργία του UNI ως 2×2 οπτικός διακόπτης μεταγωγής με σήματα εισόδου της ίδιας μορφής με εκείνα που χρησιμοποιήθηκαν στις δύο πρώτες σειρές. Μάλιστα, τα ανωτέρω χαρακτηριστικά των σημάτων εισόδου είναι τα ίδια με τα αντίστοιχα πειραματικά, όπως παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Σε κάθε μία από τις τρεις σειρές ελήφθησαν αποτελέσματα της προσομοίωσης στον παλμογράφο, τα

οποία πιστοποιούν την ορθή λειτουργία της διάταξης του UNI που σχεδιάστηκε στις καταστάσεις μη μεταγωγής και μεταγωγής αντιστοίχως. Ακόμη, ελήφθησαν μετρήσεις του Extinction Ratio στις θύρες εξόδου του UNI συναρτήσει συγκεκριμένων μεγεθών και χαράχθηκαν οι σχετικές γραφικές παραστάσεις.

Αρχικά παρουσιάζεται η διάταξη του UNI που σχεδιάστηκε στο VPI και αναλύεται η λειτουργία και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των βασικών οπτικών στοιχείων που τη συνθέτουν. Στη συνέχεια παρουσιάζονται με αναλυτικό τρόπο τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για καθεμία από τις τρεις σειρές.

## 4.2 Η ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ UNI ΠΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΤΗΚΕ ΣΤΟ VPI

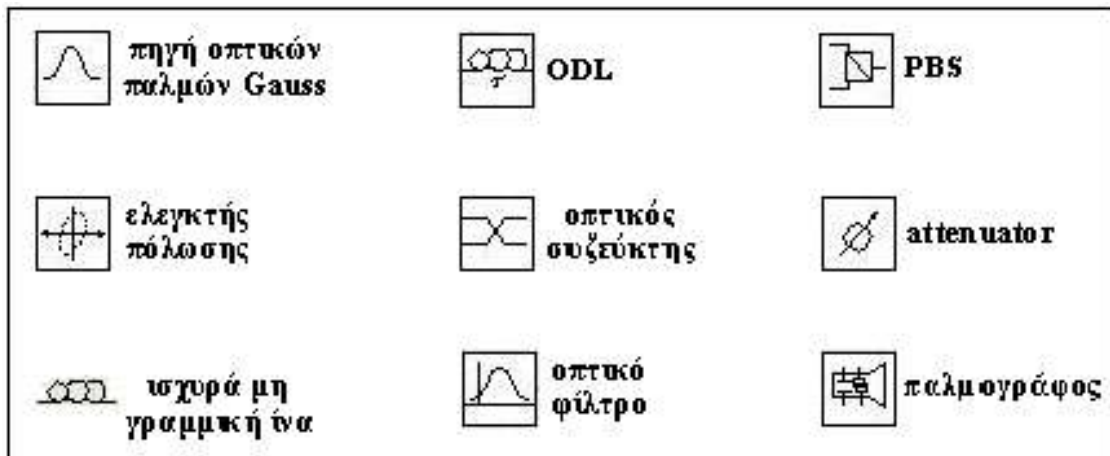
Η διάταξη του UNI που σχεδιάστηκε στο VPI παρουσιάζεται στο σχήμα 4.1 που ακολουθεί. Θα ακολουθήσει η ανάλυση της λειτουργίας της διάταξης αλλά των βασικών οπτικών στοιχείων που τη συνθέτουν.



Σχήμα 4.1: Η διάταξη του UNI που σχεδιάστηκε στο VPI.

Στο παρακάτω σχήμα 4.2 γίνεται η επεξήγηση των συμβόλων των βασικών στοιχείων της ανωτέρω διάταξης.





Σχήμα 4.2: Επεξήγηση των συμβόλων των βασικών στοιχείων της διάταξης.

### 4.2.1 ΣΗΜΑΤΑ ΕΙΣΟΔΟΥ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1, η γενική μορφή της διάταξης περιλαμβάνει στο αριστερό μέρος της δύο πηγές οπτικών παλμών Gauss, μία για καθένα από τα δύο οπτικά σήματα εισόδου. Προφανώς, οι πηγές αυτές θα είναι και οι δύο ενεργές στην τρίτη σειρά προσομοιώσεων, όπου το UNI λειτουργεί ως  $2 \times 2$  οπτικός διακόπτης μεταγωγής. Αντιθέτως, στις άλλες δύο περιπτώσεις λειτουργίας του UNI με ένα σήμα εισόδου, μία από τις δύο πηγές κάθε φορά θα απενεργοποιείται. Όπως προαναφέρθηκε, για τον καθορισμό των χαρακτηριστικών των δύο σημάτων εισόδου λαμβάνονται υπόψη τα δεδομένα του πειράματος, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Αρχικά, το σήμα εισόδου 1, το οποίο παράγεται από την πάνω πηγή, θα έχει ρυθμό 10 Gbps και μήκος κύματος 1558 nm. Γενικά το VPI χρησιμοποιεί τις αντίστοιχες φέρουσες συχνότητες των παλμών και όχι τα μήκη κύματος. Συνεπώς, η φέρουσα συχνότητα του σήματος εισόδου 1 ορίζεται στα 192.4 THz, η οποία αντιστοιχεί σε μήκος κύματος 1558 nm. Ακόμη, το χρονικό εύρος ημίσειας ισχύος (Full Width at Half Maximum – FWHM) του τυχόντος παλμού του σήματος εισόδου 1 ορίζεται στα 5 psec, η ισχύς κορυφής του ορίζεται στα 4 mW και η πολωτική κατάστασή του ρυθμίζεται να είναι οριζόντια, μέσω της παραμέτρου Asimuth η οποία τοποθετείται στις  $0^\circ$ . Τέλος, υπάρχει και σχετική επιλογή που ορίζει τη μορφή της παλμικής ακολουθίας που

παράγεται, μέσω της οποίας η περίοδος της ακολουθίας ρυθμίζεται στα 16 bits. Η μορφή της επαναλαμβανόμενης κωδικής λέξης μήκους 16 bits είναι η εξής:

Κωδική λέξη του σήματος εισόδου 1  $\rightarrow$  0 1 1 0 1 0 1 0 0 0 1 1 1 0 0 1

Εν συνεχεία, το σήμα εισόδου 2, το οποίο παράγεται από την κάτω πηγή, θα έχει ρυθμό 40 Gbps και μήκος κύματος 1553 nm, το οποίο αντιστοιχεί σε φέρουσα συχνότητα 193 THz. Το χρονικό εύρος FWHM του τυχόντος παλμού του σήματος εισόδου 2 ορίζεται στα 3 psec, ενώ η ισχύς κορυφής του ορίζεται στα 4 mW όπως και στο σήμα εισόδου 1. Ακόμη, οι πολωτικές καταστάσεις των δύο σημάτων εισόδου θα πρέπει να διαφέρουν κατά 90°. Συνεπώς, η πολωτική κατάσταση του σήματος εισόδου 2 ρυθμίζεται να είναι κατακόρυφη, μέσω της παραμέτρου Asimuth η οποία τοποθετείται στις 90°. Η περίοδος της παλμικής ακολουθίας ρυθμίζεται στα 16 bits, ενώ η μορφή της επαναλαμβανόμενης κωδικής λέξης είναι η εξής:

Κωδική λέξη του σήματος εισόδου 2  $\rightarrow$  0 1 0 1 0 1 1 1 1 0 0 1 0 1 0 0

Αμέσως μετά την πηγή παραγωγής του σήματος εισόδου 2 συνδέεται μια οπτική γραμμή καθυστέρησης (ODL) προκειμένου να επιτευχθεί ο συγχρονισμός των συγκεκριμένων συνιστωσών των σημάτων εισόδου και ελέγχου, με τρόπο που θα αναλυθεί σε επόμενες ενότητες.

Το σήμα ελέγχου παράγεται από δύο ταυτόσημες πηγές, για λόγο που θα εξηγηθεί με λεπτομέρεια στην επόμενη ενότητα. Ο ρυθμός μετάδοσής του είναι 10 Gbps, ενώ η φέρουσα συχνότητά του δεν συμπίπτει με την πειραματική τιμή και τίθεται στα 194 THz. Το χρονικό εύρος FWHM του τυχόντος παλμού του σήματος ελέγχου ορίζεται στα 8.2 psec, αυτή τη φορά σε συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα, ενώ η ισχύς κορυφής του μεταβάλλεται με σκοπό τη βελτιστοποίηση του Extinction Ratio στις θύρες εξόδου του UNI αλλά και τη χάραξη των σχετικών γραφικών παραστάσεων. Ακόμη, η παράμετρος Asimuth έχει τοποθετηθεί στις 0° και στις δύο ταυτόσημες πηγές του σήματος ελέγχου. Η μορφή της παλμικής ακολουθίας του σήματος ελέγχου που έχει επιλεγεί προσομοιάζει

την πειραματική μορφή των πακέτων ρολογιού (αλληλουχίες συνεχόμενων άσσων). Η περίοδος της ακολουθίας ρυθμίζεται στα 16 bits ενώ η διάρκεια των πακέτων ρολογιού στα 8 bits. Έτσι, η μορφή της επαναλαμβανόμενης κωδικής λέξης είναι η εξής:

Κωδική λέξη του σήματος ελέγχου → 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0

Αμέσως μετά και τις δύο πηγές παραγωγής του σήματος ελέγχου συνδέεται από μία οπτική γραμμή καθυστέρησης (ODL). Οι εν λόγω ODL εισάγουν ακριβώς ταυτόσημη καθυστέρηση και χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με την ODL που έχει συνδεθεί με την πηγή παραγωγής του σήματος εισόδου 2 προκειμένου, όπως ήδη αναφέρθηκε, να επιτευχθεί συγχρονισμός των συγκεκριμένων συνιστωσών των σημάτων εισόδου και ελέγχου. Εντούτοις, στην κάτω πηγή του σήματος ελέγχου συνδέεται και ένας ελεγκτής πόλωσης μετά την ODL, προκειμένου να στρέψει την πόλωση του σήματος ελέγχου που παράγεται εκεί κατά 90°.

#### 4.2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Έχοντας περιγράψει τη μορφή των σημάτων εισόδου και ελέγχου, στην παρούσα ενότητα θα περιγραφεί συνοπτικά η πορεία τους στο εσωτερικό της διάταξης του UNI που σχεδιάστηκε και παρουσιάστηκε. Η λογική της λειτουργίας του UNI είναι η ίδια με εκείνη που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2. Ωστόσο, υπάρχει μια εμφανής διαφορά η οποία γίνεται άμεσα αντιληπτή με απλή επισκόπηση του σχήματος 4.1. Βλέπουμε λοιπόν ότι στη διάταξη του σχήματος 4.1 το UNI εμφανίζεται να περιλαμβάνει δύο βραχίονες – οπτικούς δρόμους, σε αντίθεση με την κλασική μορφή της διάταξης του UNI που περιλαμβάνει ένα βραχίονα – οπτικό δρόμο. Από την ανάλυση που θα ακολουθήσει ευθύς αμέσως θα διαπιστωθεί ότι η εν λόγω διαφορά είναι ουσιαστικά εικονική, δεν αλλοιώνει καθόλου τη λειτουργία της κλασικής διάταξης του UNI και οφείλεται καθαρά σε μια συγκεκριμένη αδυναμία του λογισμικού πακέτου VPI. Η ανάλυση θα γίνει θεωρώντας τη γενική περίπτωση εισαγωγής και των δύο σημάτων εισόδου. Προφανώς, στις περιπτώσεις απουσίας του ενός από τα δύο σήματα εισόδου, η ανάλυση

θα είναι ακριβώς η ίδια, θεωρώντας την ισχύ κορυφής των παλμών του απόντος σήματος εισόδου ως μηδενική.

Αρχικά, τα δύο οπτικά σήματα εισόδου εισέρχονται στον πρώτο PBS, όπως ακριβώς και στην κλασσική μορφή της διάταξης του UNI. Η χαρακτηριστική του γωνία έχει τοποθετηθεί στις  $45^\circ$  και ο σκοπός του είναι να διαχωρίσει καθένα από τα δύο σήματα εισόδου σε δύο ίσες και κάθετες μεταξύ τους συνιστώσες, οι οποίες στο εξής θα αποκαλούνται συνιστώσες X και Y αντιστοίχως. Στο σημείο αυτό εμφανίζεται η αδυναμία του VPI, το οποίο δεν επιτρέπει την ταυτόχρονη διάδοση στον ίδιο οπτικό δρόμο σημάτων με διαφορετικές πολώσεις. Έτσι, είναι αναγκαία η ύπαρξη δύο οπτικών δρόμων. Στον πάνω οπτικό δρόμο θα διαδίδονται οι X συνιστώσες των σημάτων ενώ στον κάτω θα διαδίδονται οι Y συνιστώσες. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα τέχνασμα, το οποίο χρησιμοποιείται προκειμένου να ξεπερασθεί η αδυναμία του VPI. Ο δεύτερος PBS με χαρακτηριστική γωνία  $0^\circ$ , ο οποίος έχει τοποθετηθεί αμέσως μετά τον πρώτο, επιτελεί ακριβώς τον ανωτέρω διαχωρισμό των X συνιστωσών στον πάνω οπτικό δρόμο και των Y συνιστωσών στον κάτω οπτικό δρόμο αντιστοίχως.

Παρατηρώντας τους δύο οπτικούς δρόμους, είναι εμφανές ότι η μορφή τους είναι πανομοιότυπη. Η μοναδική διαφορά έγκειται στην ύπαρξη δύο ODL στον πάνω οπτικό δρόμο, οι οποίες δεν υπάρχουν στον κάτω. Οι εν λόγω δύο ODL προσομοιώνουν τα δύο κομμάτια PM ινών τα οποία χρησιμοποιούνται στην κλασσική διάταξη του UNI. Ο ρόλος της πρώτης PM ίνας είναι να εισάγει χρονική καθυστέρηση μεταξύ των ορθογωνίων συνιστωσών και των δύο σημάτων, ενώ της δεύτερης PM ίνας είναι να εισάγει την αντίστροφη χρονική καθυστέρηση. Στην περίπτωση της διάταξης, η πρώτη ODL στην αρχή του πάνω οπτικού δρόμου καθυστερεί τις X συνιστώσες των σημάτων κατά  $-12.5$  psec σε σχέση με τις Y συνιστώσες του κάτω οπτικού δρόμου. Αντιστοίχως, η δεύτερη ODL στο τέρμα του πάνω οπτικού δρόμου εισάγει αντίστροφη χρονική καθυστέρηση κατά  $12.5$  psec στις X συνιστώσες σε σχέση με τις Y. Έτσι, στο τέρμα και των δύο οπτικών δρόμων, οι X και οι Y συνιστώσες θα συμπίπτουν χρονικά.

Οι δύο πηγές παραγωγής του σήματος ελέγχου τροφοδοτούν καθένα από τους δύο οπτικούς δρόμους μέσω δύο πανομοιότυπων οπτικών συζευκτών με λόγο σύζευξης 90/10, όπως και στο πείραμα. Όπως ήδη αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, τα σήματα ελέγχου που παράγονται από τις δύο πηγές έχουν ακριβώς την ίδια μορφή, ενώ

οι δύο ODL που συνδέονται μετά τις πηγές εισάγουν την ίδια καθυστέρηση. Η διαφορά έγκειται στην ύπαρξη του ελεγκτή πόλωσης μετά την πηγή που συνδέεται στον κάτω οπτικό δρόμο προκειμένου να στρέψει την πόλωση του σήματος ελέγχου που παράγεται εκεί κατά  $90^\circ$ . Πρόκειται για ένα ακόμη τέχνασμα που επιχειρήθηκε με σκοπό να προσομοιωθεί η λειτουργία του UNI και να ξεπερασθεί η αδυναμία του VPI. Ουσιαστικά έχουμε ένα σήμα ελέγχου, το οποίο όντας οριζόντια πολωμένο εισέρχεται χωρίς πρόβλημα στον πάνω οπτικό δρόμο όπου διαδίδονται οι X συνιστώσες των σημάτων εισόδου. Προκειμένου όμως να εισαχθεί και στον κάτω οπτικό δρόμο όπου διαδίδονται οι Y συνιστώσες των σημάτων εισόδου θα πρέπει η πόλωσή του να στραφεί κατά  $90^\circ$  ώστε να αποφευχθεί η αδυναμία του VPI, το οποίο δεν επιτρέπει την ταυτόχρονη διάδοση στον ίδιο οπτικό δρόμο σημάτων με διαφορετικές πολώσεις.

Από τα όσα ήδη αναφέρθηκαν, τα σήματα ελέγχου που εισάγονται σε καθένα από τους δύο οπτικούς δρόμους βρίσκονται στην ίδια χρονική κλίμακα μεταξύ τους, ενώ αντίθετα υφίσταται μια χρονική απόκλιση της τάξεως των 12.5 psec μεταξύ των X συνιστωσών των σημάτων εισόδου στον πάνω οπτικό δρόμο και των Y συνιστωσών των σημάτων εισόδου στον κάτω οπτικό δρόμο. Ως αποτέλεσμα, οι συνιστώσες των σημάτων εισόδου μόνο του ενός εκ των δύο οπτικών δρόμων θα μπορέσουν να συγχρονισθούν με το σήμα ελέγχου στον αντίστοιχο οπτικό δρόμο. Κατά την εκτέλεση των προσομοιώσεων επιλέχθηκε τυχαία να συγχρονισθούν οι X συνιστώσες στον πάνω οπτικό δρόμο με το σήμα ελέγχου. Με την επιλογή αυτή οι Y συνιστώσες στον κάτω οπτικό δρόμο δεν θα είναι συγχρονισμένες με το σήμα ελέγχου. Η λογική αυτή συμβαδίζει πλήρως με την λειτουργία της κλασσικής διάταξης του UNI, όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2, όπου ο τυχόν παλμός ελέγχου ρυθμίζεται έτσι ώστε να συγχρονιστεί είτε με τις οριζόντιες είτε με τις κατακόρυφες συνιστώσες των δύο σημάτων εισόδου.

Ακολουθεί και στους δύο οπτικούς δρόμους μια ισχυρά μη γραμμική ίνα η οποία προσομοιώνει την ίνα Βισμουθίου που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα και η οποία είναι υπεύθυνη για τη διέγερση του φαινομένου της ετεροδιαμόρφωσης φάσης (XPM). Αναλυτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ίνας αυτής παρατίθενται στην επόμενη ενότητα. Η στροφή της φάσης εξαιτίας του XPM στην κατάσταση μεταγωγής θα αφορά τις συνιστώσες των σημάτων εισόδου μόνο του ενός εκ των δύο οπτικών δρόμων όπου έχει επέλθει συγχρονισμός με το αντίστοιχο σήμα ελέγχου. Σύμφωνα λοιπόν με τη

επιλογή που έχει γίνει, η στροφή της φάσης θα αφορά τις X συνιστώσες στον πάνω οπτικό δρόμο. Η προσπάθεια που έγινε κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων είχε ως στόχο την επίτευξη στροφής φάσης των X συνιστωσών όσο το δυνατόν πλησιέστερα στην τιμή των  $180^\circ$ , μεταβάλλοντας κυρίως την ισχύ κορυφής των παλμών ελέγχου. Αντιθέτως, η φάση των Y συνιστωσών στον κάτω οπτικό δρόμο παραμένει ανεπηρέαστη κατά το πέρασμά τους από την ισχυρά μη γραμμική ίνα. Να σημειωθεί ότι στα δύο άκρα της μη γραμμικής ίνας έχουν τοποθετηθεί και δύο attenuators οι οποίοι εισάγουν απώλειες της τάξεως των 1.7 dB, προσομοιώνοντας τις απώλειες συγκόλλησης της μη γραμμικής ίνας με SMF ίνα Πυριτίου.

Το επόμενο στοιχείο αμέσως μετά τις δύο πανομοιότυπες μη γραμμικές ίνες σε καθένα από τους δύο οπτικούς δρόμους είναι ένα οπτικό φίλτρο το οποίο έχει ως σκοπό την αποκοπή του σήματος ελέγχου. Η κεντρική συχνότητα και το εύρος ζώνης (Bandwidth) των δύο πανομοιότυπων φίλτρων μεταβάλλεται σε καθεμία από τις τρεις σειρές προσομοιώσεων, αναλόγως με το ποιο από τα δύο οπτικά σήματα εισόδου διαφορετικού μήκους κύματος εισέρχεται στη διάταξη. Πλέον, μετά και την ODL που προσομοιώνει τη δεύτερη PM ίνα στον πάνω οπτικό δρόμο, ακολουθεί ένας τρίτος PBS με χαρακτηριστική γωνία  $0^\circ$ , ο οποίος εκτελεί αντίστροφη λειτουργία από τον δεύτερο PBS, οδηγώντας τις δύο συνιστώσες των δύο σημάτων εισόδου στον τέταρτο και τελευταίο PBS. Στον τέταρτο PBS, χαρακτηριστικής γωνίας  $45^\circ$ , λαμβάνει χώρα η διαδικασία της συμβολής των συνιστωσών των δύο σημάτων, όπως ακριβώς και στην κλασική διάταξη του UNI, σύμφωνα με την οποία αποφασίζεται η θύρα εξόδου του PBS από την οποία θα εξέλθει ο εκάστοτε παλμός. Οι δύο παλμογράφοι που έχουν συνδεθεί στις θύρες εξόδου του τέταρτου PBS προφανώς έχουν ως σκοπό την παρατήρηση των δύο σημάτων εξόδου. Να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των προσομοιώσεων, ενίοτε τοποθετούνταν παλμογράφοι και σε άλλα σημεία της διάταξης με σκοπό την παρατήρηση των σημάτων στα σημεία αυτά.

Από την ανάλυση που μόλις προηγήθηκε σε αυτή την ενότητα, καθίσταται προφανές ότι η διάταξη που σχεδιάστηκε στο VPI προσομοιώνει με ακρίβεια την κλασική μορφή της διάταξης του UNI, παρά τα τεχνάσματα που υιοθετήθηκαν. Η ορθή λειτουργία της διάταξης πιστοποιείται από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που θα παρατεθούν στις ενότητες που ακολουθούν.

### 4.2.3 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΙΣΧΥΡΑ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΙΝΑΣ

Η ισχυρά μη γραμμική ίνα που χρησιμοποιήθηκε στη διάταξη του σχήματος 4.1 δεν είναι αναγκαστικά κατασκευασμένη με υλικό το οξειδίο του Βισμούθιου όπως συμβαίνει στο πείραμα. Πρόκειται για μια τυχαία μη γραμμική ίνα που προσομοιώνει τα βασικά χαρακτηριστικά της ίνας Βισμούθιου που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα. Στην ενότητα αυτή θα αναλυθεί ο τρόπος καθορισμού των εν λόγω βασικών χαρακτηριστικών.

Η κυριότερη παράμετρος της ισχυρά μη γραμμικής ίνας που πρέπει να καθοριστεί είναι ασφαλώς ο συντελεστής μη γραμμικότητας  $\gamma$ . Με βάση τα πειραματικά δεδομένα που έχουν παρατεθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, η τιμή του συντελεστή μη γραμμικότητας  $\gamma$  θα πρέπει να προσεγγίζει τα  $1000 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ . Εντούτοις, στο VPI η παράμετρος  $\gamma$  δεν καθορίζεται απευθείας αλλά μέσω των παραμέτρων του μη γραμμικού συντελεστή του δείκτη διάθλασης (NonLinear Index)  $n_2$  και της ενεργού επιφανείας του πυρήνα της ίνας (Core Area)  $A_{\text{eff}}$ . Τα ανωτέρω μεγέθη σχετίζονται μεταξύ τους με βάση τον τύπο (2.31) του κεφαλαίου 2, ο οποίος επαναλαμβάνεται εδώ για ευκολία:

$$\gamma = \frac{\omega n_2}{c A_{\text{eff}}} = \frac{2\pi f n_2}{c A_{\text{eff}}} \quad (4.1)$$

Θέτουμε στον ανωτέρω τύπο ως δεδομένη την τιμή  $\gamma = 1000 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ . Ακόμη, για την τιμή της συχνότητας  $f$  χρησιμοποιείται μια συχνότητα αναφοράς (Reference Frequency)  $f = 193.1 \text{ THz}$  που υπάρχει στο VPI και αφορά τη μη γραμμική ίνα, ενώ η τιμή της παραμέτρου  $A_{\text{eff}}$  καθορίζεται από τα δεδομένα του κατασκευαστή της ίνας Βισμούθιου που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα και είναι, σύμφωνα με το προηγούμενο κεφάλαιο,  $A_{\text{eff}} = 3.3 \mu\text{m}^2$ . Αντικαθιστώντας τα δεδομένα που μόλις παρατέθηκαν στον τύπο (4.1), υπολογίζουμε την απαιτούμενη τιμή της παραμέτρου  $n_2$ :

$$\gamma = \frac{2\pi f n_2}{c A_{\text{eff}}} \Rightarrow n_2 = \frac{\gamma c A_{\text{eff}}}{2\pi f} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow n_2 = \frac{(1000 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}) \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m/sec}) \cdot (3.3 \text{ }\mu\text{m}^2)}{2\pi \cdot (193.1 \text{ THz})} \Rightarrow n_2 \approx 81.6 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$$

Η τιμή της παραμέτρου  $n_2$  που υπολογίστηκε παραπάνω είναι πάρα πολύ υψηλή για τα δεδομένα του VPI, το οποίο θέτει ως άνω όριο την τιμή  $n_2 = 50 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ . Συνεπώς αναγκαστικά θα πρέπει να ελαττωθεί η τιμή της παραμέτρου  $A_{\text{eff}}$  από τα  $3.3 \text{ }\mu\text{m}^2$  που δίνει ο κατασκευαστής σε μια τιμή τέτοια ώστε να προκύπτει  $\gamma = 1000 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ , με δεδομένο ότι για την παράμετρο  $n_2$  χρησιμοποιούμε το άνω όριο του VPI, δηλαδή θέτουμε  $n_2 = 50 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ . Άλλωστε, όπως ήδη προαναφέρθηκε, η κρίσιμη παράμετρος είναι ο συντελεστής μη γραμμικότητας  $\gamma$ , του οποίου η τιμή πρέπει να είναι  $\gamma = 1000 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ . Αντικαθιστώντας τα δεδομένα που μόλις παρατέθηκαν εκ νέου στον τύπο (4.1), υπολογίζουμε την απαιτούμενη τιμή της παραμέτρου  $A_{\text{eff}}$ :

$$\gamma = \frac{2\pi f n_2}{c A_{\text{eff}}} \Rightarrow A_{\text{eff}} = \frac{2\pi f n_2}{\gamma c} \Rightarrow$$

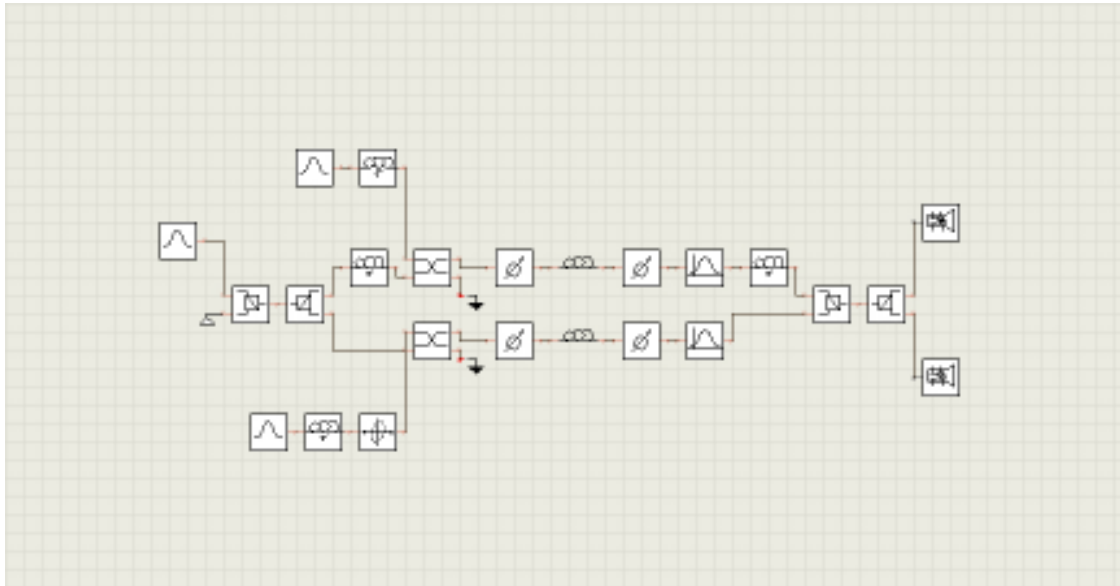
$$\Rightarrow A_{\text{eff}} = \frac{2\pi \cdot (193.1 \text{ THz}) \cdot (50 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W})}{(1000 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}) \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m/sec})} \Rightarrow A_{\text{eff}} \approx 2.02 \text{ }\mu\text{m}^2$$

Συνεπώς, οι τιμές των παραμέτρων  $A_{\text{eff}}$  (Core Area) και  $n_2$  (NonLinear Index) που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να επιτευχθεί  $\gamma = 1000 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$  είναι οι εξής:  $A_{\text{eff}} = 2.02 \text{ }\mu\text{m}^2$  και  $n_2 = 50 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ . Ακόμη, το μήκος της ίνας αρχικά ορίστηκε στα 0.8 m σε συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα. Στη συνέχεια όμως στις δύο πρώτες σειρές προσομοιώσεων θα μεταβληθεί, προκειμένου να φανεί η συσχέτιση μεταξύ του Extinction Ratio στις θύρες εξόδου του UNI συναρτήσει του μήκους της ίνας αλλά και να χαραχθούν οι σχετικές γραφικές παραστάσεις. Τέλος, καθορίστηκαν και οι παράμετροι των απωλειών διάδοσης της ίνας (Attenuation) στην τιμή των 1.3 dB/m, η οποία συμφωνεί με τα πειραματικά δεδομένα, αλλά και της διασποράς (Dispersion) στην τιμή των  $-270 \text{ psec/nm/km}$ , η οποία είναι πολύ κοντά στην πειραματική τιμή.



### 4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΕΝΟΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ ΡΥΘΜΟΥ 10 Gbps

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από την πρώτη σειρά προσομοιώσεων, η οποία αφορά τη λειτουργία του UNI με ένα σήμα εισόδου ρυθμού 10 Gbps. Η διάταξη που σχεδιάστηκε έχει ήδη παρουσιασθεί στο σχήμα 4.1, ενώ από τις δύο πηγές σημάτων εισόδου στο αριστερό μέρος της, η κάτω πηγή που παράγει το σήμα εισόδου 2 απενεργοποιείται. Έτσι, το μοναδικό σήμα εισόδου 1 ρυθμού 10 Gbps τροφοδοτείται στην αντίστοιχη θύρα εισόδου 1 του UNI μέσω της πάνω πηγής, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα 4.3.



**Σχήμα 4.3:** Πρώτη σειρά προσομοιώσεων. Εισαγωγή του σήματος εισόδου 1 ρυθμού 10 Gbps στη διάταξη μέσω της πάνω πηγής. Η κάτω πηγή που παράγει το σήμα εισόδου 2 έχει απενεργοποιηθεί.

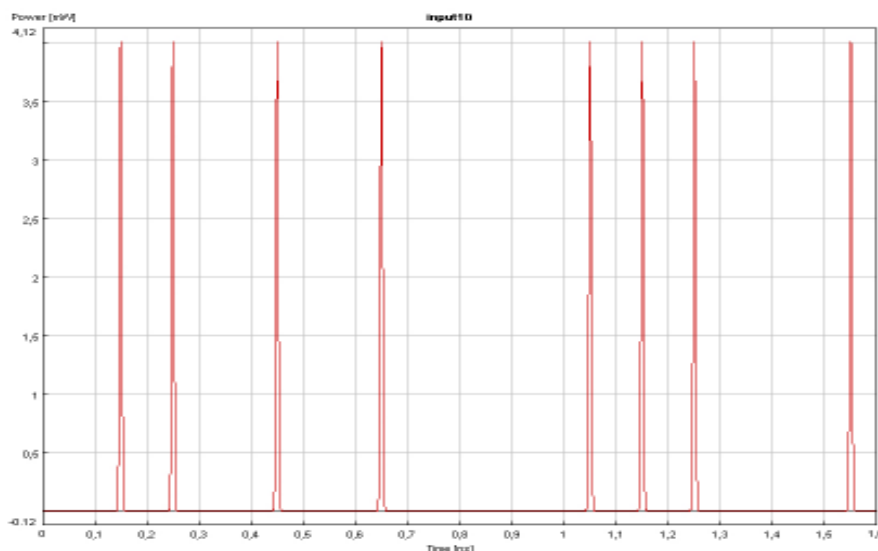
Οι τιμές των παραμέτρων των βασικών οπτικών στοιχείων που συνθέτουν τη διάταξη έχουν ήδη καθοριστεί σε προηγούμενη ενότητα. Οι μοναδικές παράμετροι που μεταβάλλονται σε καθεμία από τις τρεις σειρές προσομοιώσεων είναι η κεντρική συχνότητα και το εύρος ζώνης (Bandwidth) των δύο πανομοιότυπων οπτικών φίλτρων που έχουν ως σκοπό την αποκοπή του σήματος ελέγχου. Με δεδομένο ότι η φέρουσα συχνότητα του σήματος εισόδου 1 ρυθμού 10 Gbps είναι 192.4 THz ενώ η φέρουσα

συχνότητα του σήματος ελέγχου είναι 194 THz, η κεντρική συχνότητα των φίλτρων ρυθμίζεται στα 192.4 THz προκειμένου να επιτρέπεται η διέλευση του σήματος εισόδου 1, ενώ το εύρος ζώνης τους ρυθμίζεται στα 1.8 THz (δηλαδή  $192.4 \pm 0.9$  THz) προκειμένου να αποκόπτεται πλήρως το σήμα ελέγχου. Ακόμη, το μήκος των δύο ταυτόσημων ισχυρά μη γραμμικών ινών ρυθμίζεται αρχικά στα 0.8 m, σε συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα του προηγούμενου κεφαλαίου.

Η μορφή της επαναλαμβανόμενης κωδικής λέξης του σήματος εισόδου 1 μήκους 16 bits έχει ήδη παρουσιασθεί και επαναλαμβάνεται εδώ για ευκολία:

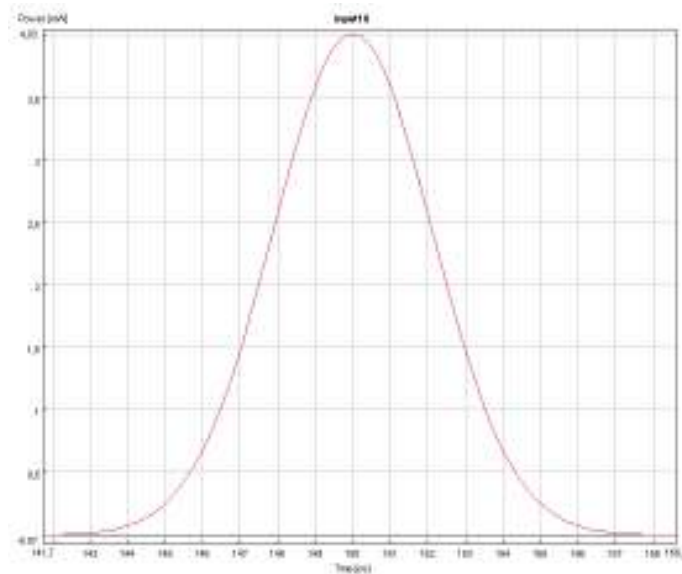
Κωδική λέξη του σήματος εισόδου 1  $\rightarrow$  0 1 1 0 1 0 1 0 0 0 1 1 1 0 0 1

Τοποθετώντας παλμογράφο αμέσως μετά την πηγή παραγωγής του σήματος εισόδου 1 παρατηρούμε τη μορφή ενός αντιγράφου της ανωτέρω επαναλαμβανόμενης κωδικής λέξης, το οποίο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 4.4. Να σημειωθεί ότι η κάθε υποδιαίρεση στην οθόνη του παλμογράφου έχει χρονική διάρκεια 100 psec. Έτσι, αφού στην πρώτη σειρά προσομοιώσεων τα σήματα έχουν ρυθμό 10 Gbps, σε κάθε υποδιαίρεση της κλίμακας του χρόνου θα “χωράει” ένα bit.



**Σχήμα 4.4:** Πρώτη σειρά προσομοιώσεων. Αποτύπωση ενός αντιγράφου της κωδικής λέξης του σήματος εισόδου 1 ρυθμού 10 Gbps.

Στο σχήμα 4.5 που ακολουθεί παρουσιάζεται η μορφή του τυχόντος παλμού Gauss του σήματος εισόδου 1. Από την εικόνα αυτή μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η ισχύς κορυφής του παλμού έχει τιμή 4 mW ενώ η τιμή του χρονικού εύρους του παλμού (FWHM) είναι 5 psec, όπως έχουν οριστεί.

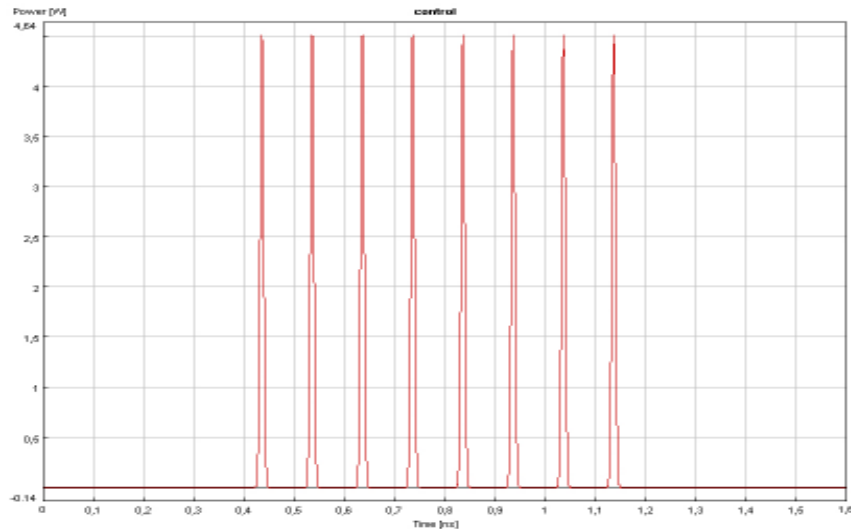


**Σχήμα 4.5: Πρώτη σειρά προσομοιώσεων. Η μορφή τυχόντος παλμού του σήματος εισόδου 1 ρυθμού 10 Gbps στα 192.4 THz.**

Έχει ήδη επισημανθεί ότι η μορφή της παλμικής ακολουθίας του σήματος ελέγχου ρυθμού 10 Gbps προσομοιάζει την πειραματική μορφή των πακέτων ρολογιού. Συγκεκριμένα, η μορφή της επαναλαμβανόμενης κωδικής λέξης του σήματος ελέγχου μήκους 16 bits είναι η εξής:

Κωδική λέξη του σήματος ελέγχου → 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0

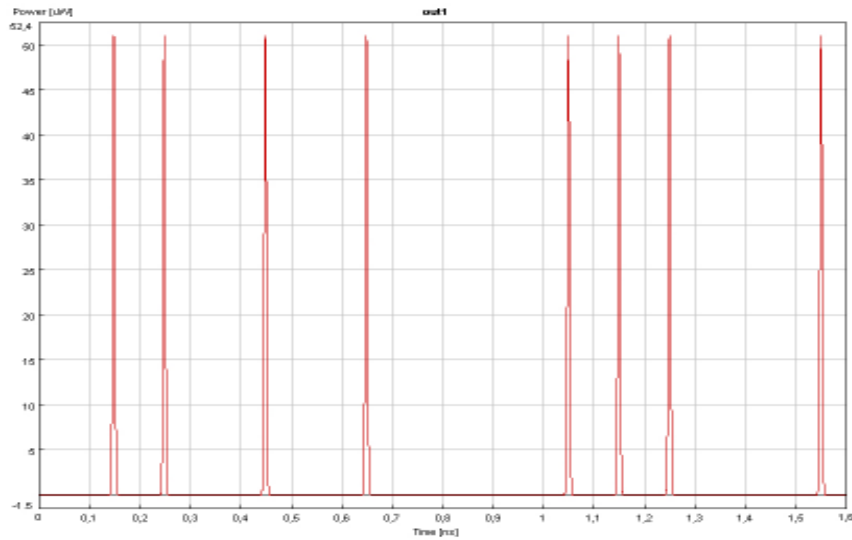
Τοποθετώντας παλμογράφο αμέσως μετά την μία από τις δύο πανομοιότυπες πηγές παραγωγής του σήματος ελέγχου, παρατηρούμε τη μορφή ενός αντιγράφου της ανωτέρω επαναλαμβανόμενης κωδικής λέξης, το οποίο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 4.6. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, το χρονικό εύρος (FWHM) των παλμών ελέγχου έχει ρυθμιστεί στα 8.2 psec.



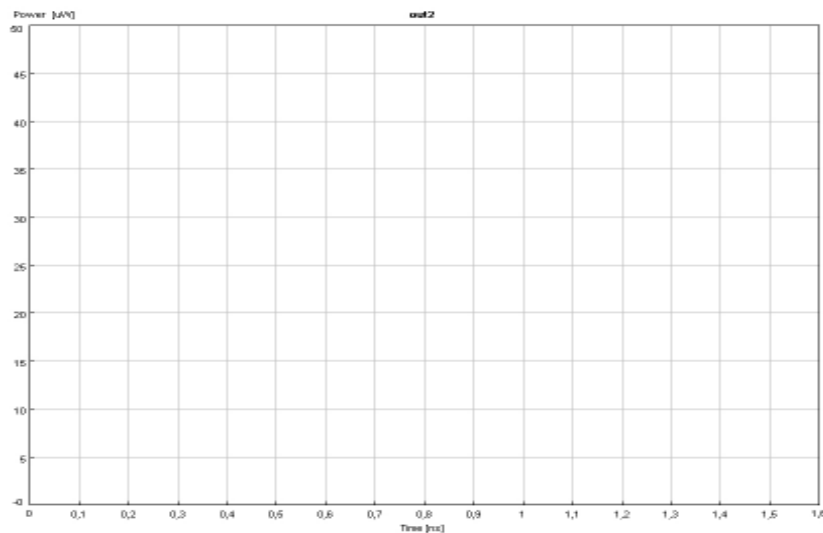
**Σχήμα 4.6: Πρώτη σειρά προσομοιώσεων. Αποτύπωση ενός αντιγράφου της κωδικής λέξης του σήματος ελέγχου ρυθμού 10 Gbps.**

Ο τυχόν παλμός ελέγχου επιλέγεται να συγχρονισθεί με τη  $X$  συνιστώσα του χρονικά αντίστοιχου παλμού του σήματος εισόδου 1, η οποία διαδίδεται στον πάνω οπτικό δρόμο. Ο συγχρονισμός επιτυγχάνεται μέσω των δύο ταυτόσημων ODL οι οποίες είναι τοποθετημένες αμέσως μετά τις δύο πανομοιότυπες πηγές παραγωγής του σήματος ελέγχου, εισάγοντας ίδια χρονική καθυστέρηση. Η επίτευξη του συγχρονισμού γίνεται τοποθετώντας παλμογράφο στην είσοδο της ισχυρά μη γραμμικής ίνας του πάνω οπτικού δρόμου και ελέγχοντας τις χρονικές θέσεις ενός παλμού του σήματος ελέγχου και της  $X$  συνιστώσας του χρονικά αντίστοιχου παλμού του σήματος εισόδου 1.

Αρχικά η ισχύς κορυφής των παλμών ελέγχου μηδενίζεται προκειμένου να ελεγχθεί η λειτουργία της διάταξης του UNI στην κατάσταση μη μεταγωγής. Εφόσον το μοναδικό σήμα εισόδου εισέρχεται στην είσοδο 1 του UNI, θα πρέπει να εξέρχεται ανεπηρέαστο από την αντίστοιχη θύρα εξόδου 1, η οποία στην περίπτωση αυτή θα συνιστά τη θύρα εξόδου μη μεταγωγής. Αντιθέτως, στη θύρα εξόδου 2, η οποία στην περίπτωση αυτή θα συνιστά τη θύρα εξόδου μεταγωγής, δεν πρέπει να εμφανίζεται σήμα. Στα σχήματα 4.7 και 4.8 που ακολουθούν παρουσιάζονται στον παλμογράφο τα αντίστοιχα σήματα στις θύρες εξόδου 1 και 2 του UNI, τα οποία επιβεβαιώνουν την ορθότητα της λειτουργίας της διάταξης στην κατάσταση μη μεταγωγής.



**Σχήμα 4.7:** Πρώτη σειρά προσομοιώσεων. Σήμα εξόδου 1 ρυθμού 10 Gbps όταν το UNI λειτουργεί στην κατάσταση μη μεταγωγής.

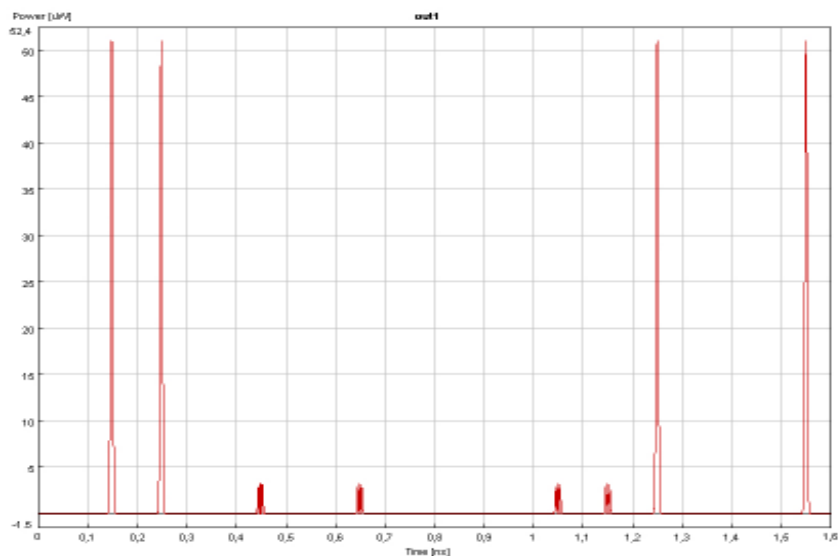


**Σχήμα 4.8:** Πρώτη σειρά προσομοιώσεων. Στη θύρα εξόδου 2 δεν εμφανίζεται σήμα όταν το UNI λειτουργεί στην κατάσταση μη μεταγωγής.

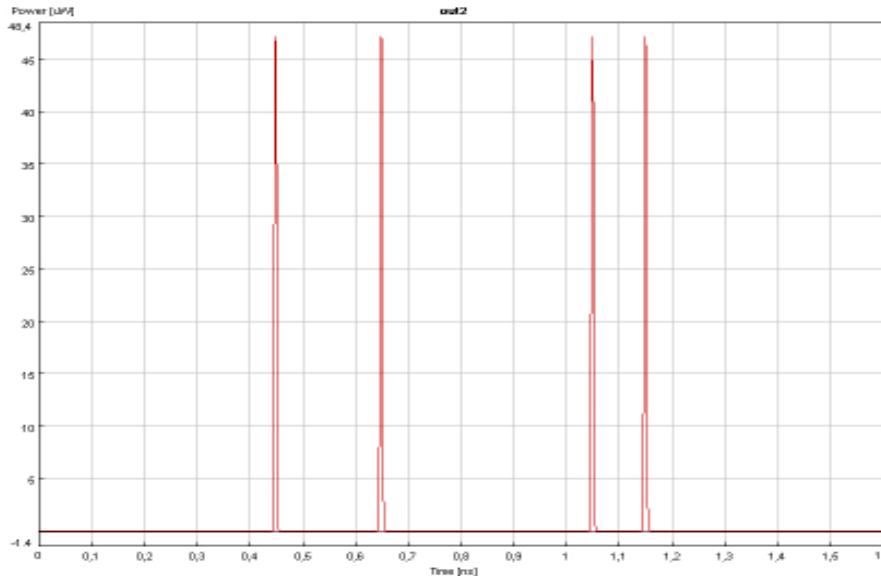
Να σημειωθεί ότι η ισχύς κορυφής των παλμών του σήματος εξόδου 1 εμφανίζεται σημαντικά μειωμένη (τάξη μεγέθους  $\mu\text{W}$ ) σε σύγκριση με την αντίστοιχη ισχύ κορυφής των παλμών του σήματος εισόδου 1 (τάξη μεγέθους  $\text{mW}$ ). Κάτι τέτοιο είναι προφανώς αναμενόμενο, αφού καθώς το σήμα ταξιδεύει στο εσωτερικό της διάταξης του UNI χάνει σημαντικό ποσοστό της ισχύος του.

Εν συνεχεία, η ισχύς κορυφής των παλμών ελέγχου αυξάνεται σε σχέση με τη μηδενική στάθμη όπου βρισκόταν προηγουμένως, προκειμένου να ελεγχθεί η λειτουργία της διάταξης του UNI στην κατάσταση μεταγωγής. Η διαδικασία της εξόδου των παλμών από τη θύρα εξόδου 2, η οποία συνιστά τη θύρα εξόδου μεταγωγής, θα αφορά τους παλμούς εισόδου οι οποίοι είναι συγχρονισμένοι με παλμούς ελέγχου. Συνεπώς, οι παλμοί εισόδου που ανήκουν στην πρώτη και στην τελευταία τετράδα bits της κωδικής λέξης θα εξέλθουν ανεπηρέαστοι από τη θύρα εξόδου 1, η οποία συνιστά τη θύρα εξόδου μη μεταγωγής, αφού η πρώτη και η τελευταία τετράδα bits της κωδικής λέξης του σήματος ελέγχου αποτελούνται από μηδενικά.

Στα σχήματα 4.9 και 4.10 που ακολουθούν παρουσιάζονται στον παλμογράφο τα αντίστοιχα σήματα στις θύρες εξόδου 1 και 2 του UNI, στην περίπτωση που η ισχύς κορυφής των παλμών ελέγχου είναι 4.5 W και η τιμή της χρονικής καθυστέρησης που εισάγεται μέσω των ταυτόσημων ODL στις πηγές παραγωγής του σήματος ελέγχου είναι – 14 psec. Τα εν λόγω σχήματα επιβεβαιώνουν την ορθότητα της λειτουργίας της διάταξης στην κατάσταση μεταγωγής. Όπως θα φανεί και στη συνέχεια, η συγκεκριμένη τιμή ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου, σε συνδυασμό με τη συγκεκριμένη τιμή καθυστέρησης έχουν ως αποτέλεσμα τη μεγιστοποίηση της τιμής του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 1, το οποίο αγγίζει την τιμή των 12.02 dB.



**Σχήμα 4.9:** Πρώτη σειρά προσομοιώσεων. Σήμα εξόδου 1 ρυθμού 10 Gbps όταν το UNI λειτουργεί στην κατάσταση μεταγωγής.



**Σχήμα 4.10:** Πρώτη σειρά προσομοιώσεων. Σήμα εξόδου 2 ρυθμού 10 Gbps όταν το UNI λειτουργεί στην κατάσταση μεταγωγής.

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, η ισχύς κορυφής των παλμών των σημάτων εξόδου εμφανίζεται σημαντικά μειωμένη (τάξη μεγέθους  $\mu\text{W}$ ) σε σύγκριση την αντίστοιχη ισχύ κορυφής των παλμών του σήματος εισόδου 1 (τάξη μεγέθους  $\text{mW}$ ). Μάλιστα, οι παλμοί οι οποίοι εξέρχονται ανεπηρέαστοι από τη θύρα εξόδου 1 έχουν λίγο μεγαλύτερη ισχύ κορυφής από τους παλμούς που εξέρχονται από τη θύρα εξόδου 2.

Προκειμένου να βρεθεί η συγκεκριμένη τιμή της ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου η οποία, σε συνδυασμό με τη συγκεκριμένη τιμή καθυστέρησης έχουν ως αποτέλεσμα τη μεγιστοποίηση της τιμής του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 1, πραγματοποιείται μια σειρά μετρήσεων, με το UNI να λειτουργεί στην κατάσταση μεταγωγής. Κατά τις μετρήσεις αυτές το μήκος των δύο ταυτόσημων ισχυρά μη γραμμικών ινών διατηρείται σταθερό στα 0.8 m, ενώ η ισχύς κορυφής των παλμών ελέγχου μεταβάλλεται σε ένα εύρος τιμών από τα 2.5 W έως τα 6.5 W. Για κάθε μια τιμή της ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου, μεταβάλλουμε την τιμή της καθυστέρησης που εισάγουν οι δύο ταυτόσημες ODL στις πηγές παραγωγής του σήματος ελέγχου, με σκοπό τη μεγιστοποίηση του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 1. Έτσι τελικά για κάθε διαφορετική τιμή της ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου έχουμε και την αντίστοιχη

βέλτιστη τιμή του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 1. Τα ζεύγη τιμών της ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου και του αντίστοιχου βέλτιστου Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 1, τα οποία προέκυψαν από την εν λόγω σειρά μετρήσεων, παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1 που ακολουθεί.

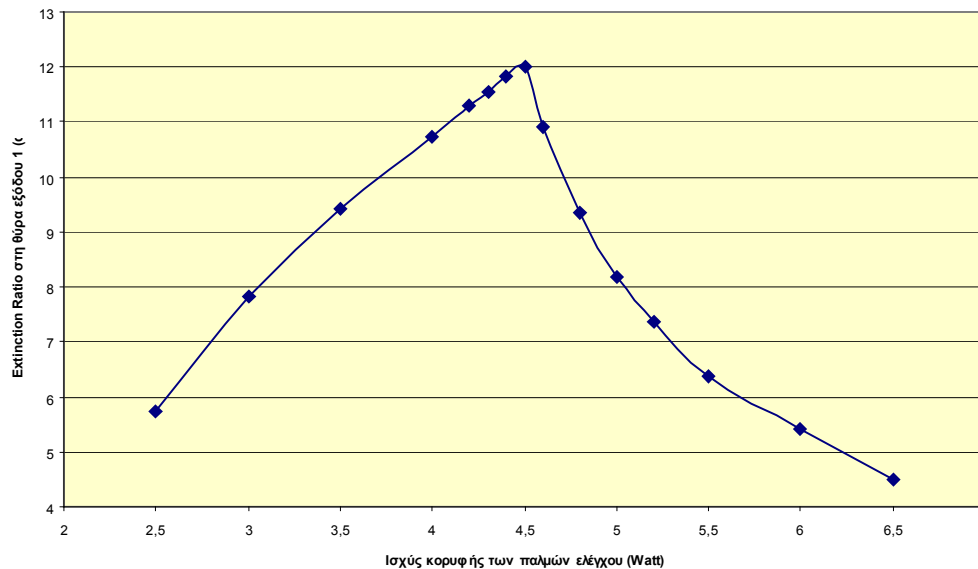
Ισχύς κορυφής των παλμών ελέγχου (Watt)	Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 1 (dB)
2.5	5.72
3	7.82
3.5	9.43
4	10.72
4.2	11.29
4.3	11.56
4.4	11.83
4.5	12.02
4.6	10.92
4.8	9.36
5	8.18
5.2	7.36
5.5	6.38
6	5.43
6.5	4.5

**Πίνακας 4.1:** Πρώτη σειρά προσομοιώσεων. Μετρήσεις του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 1 συναρτήσει της ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου.

Σύμφωνα με τα στοιχεία του ανωτέρω πίνακα, ξεκινώντας τις μετρήσεις από τα 2.5 W και καθώς αυξάνεται η ισχύς κορυφής των παλμών ελέγχου, παρατηρούμε αντίστοιχη αύξηση του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 1, έως τη μέγιστη τιμή των 12.02 dB που αντιστοιχεί στα 4.5 W. Περαιτέρω αύξηση της ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου οδηγεί σε μείωση του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 1. Η συσχέτιση μεταξύ του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 1 και της ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου γίνεται



περισσότερο εμφανής με τη βοήθεια του σχήματος 4.11, το οποίο παρουσιάζει τη γραφική παράσταση που χαράσσεται με βάση τα στοιχεία του πίνακα 4.1.



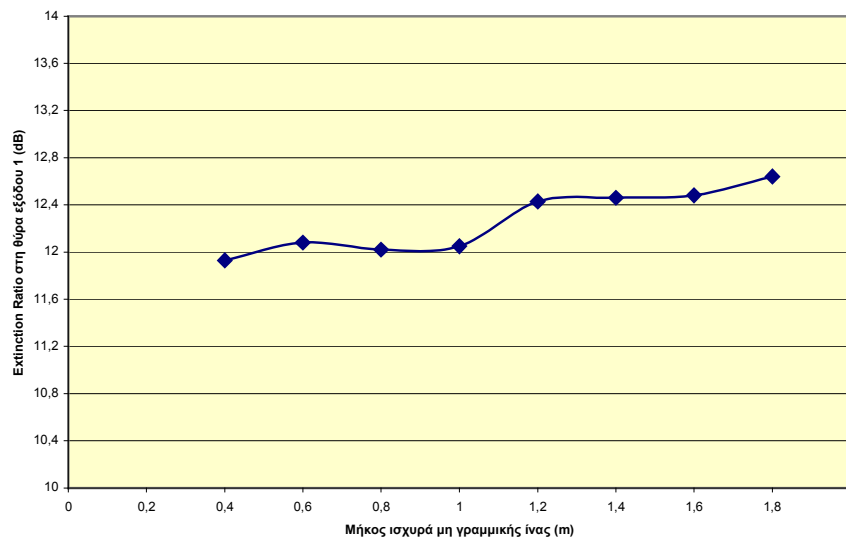
**Σχήμα 4.11: Πρώτη σειρά προσομοιώσεων. Γραφική παράσταση της συσχέτισης μεταξύ του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 1 και της ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου.**

Εκτός όμως την σειρά μετρήσεων που μόλις παρουσιάστηκε, πραγματοποιείται ακόμη μία. Η νέα αυτή σειρά μετρήσεων έχει ως στόχο να καταδείξει τη συσχέτιση μεταξύ του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 1 και του μήκους των δύο ταυτόσημων ισχυρά μη γραμμικών ινών. Το μήκος αυτό μεταβάλλεται σε ένα εύρος τιμών από τα 0.4 m έως τα 1.8 m με βήμα τα 0.2 m. Συγκεκριμένα, για καθεμία τιμή μήκους προσπαθούμε να βρούμε τη μέγιστη τιμή του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 1 μεταβάλλοντας τις τιμές της ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου και της καθυστέρησης. Ουσιαστικά οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για μήκος ίνας 0.8 m και παρουσιάστηκαν μέσω του πίνακα 4.1 επαναλαμβάνονται, με την ίδια ακριβώς λογική, για κάθε μήκος ίνας, από τα 0.4 m έως τα 1.8 m. Στον παρακάτω πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 1 για κάθε μήκος ίνας αλλά και οι αντίστοιχες τιμές της ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου με τις οποίες επετεύχθη οι καθεμία από τις μέγιστες τιμές. Ακολουθεί και η σχετική γραφική

παράσταση της συσχέτισης μεταξύ του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 1 και του μήκους της ισχυρά μη γραμμικής ίνας, η οποία εικονίζεται στο σχήμα 4.12.

Μήκος ισχυρά μη γραμμικής ίνας (m)	Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 1 (dB)	Ισχύς κορυφής των παλμών ελέγχου (Watt)
0.4	11.93	8.5
0.6	12.08	5.8
0.8	12.02	4.5
1	12.05	3.7
1.2	12.43	3.2
1.4	12.46	2.9
1.6	12.48	2.6
1.8	12.64	2.4

**Πίνακας 4.2:** Πρώτη σειρά προσομοιώσεων. Μετρήσεις του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 1 συναρτήσει του μήκους της ισχυρά μη γραμμικής ίνας. Για κάθε μήκος ίνας φαίνεται και η αντίστοιχη τιμή της ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου με την οποία επιτυγχάνεται μεγιστοποίηση του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 1.



**Σχήμα 4.12:** Πρώτη σειρά προσομοιώσεων. Γραφική παράσταση της συσχέτισης μεταξύ του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 1 και του μήκους της ισχυρά μη γραμμικής ίνας.

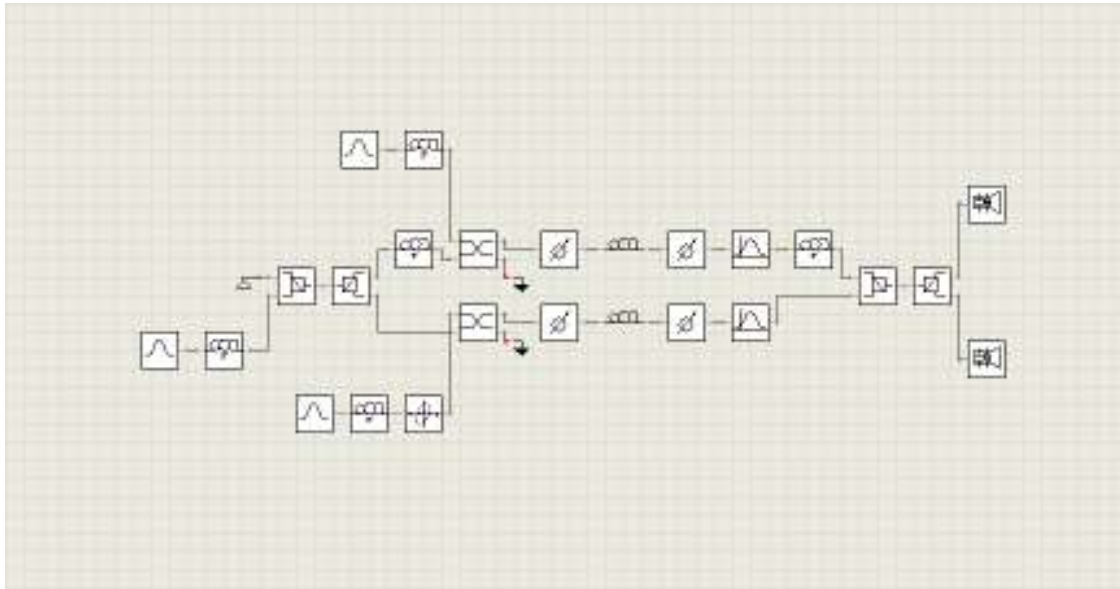
Από τα στοιχεία του ανωτέρω πίνακα 4.2 αλλά και τη μορφή του σχετικού γραφήματος, είναι φανερό ότι η βέλτιστη τιμή του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 1 υφίσταται πολύ μικρές μεταβολές, με μια ελαφριά αυξητική τάση, καθώς αυξάνεται το μήκος της ισχυρά μη γραμμικής ίνας, κινούμενη σε ένα μικρό εύρος τιμών από τα 11.93 dB έως τα 12.64 dB. Εντούτοις, καθώς το μήκος της ίνας αυξάνεται, μειώνεται και η απαιτούμενη ισχύς κορυφής των παλμών ελέγχου με την οποία επιτυγχάνεται μεγιστοποίηση του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 1. Η εξοικονόμηση ισχύος συνιστά προφανώς ένα επιχείρημα υπέρ της χρησιμοποίησης μεγαλύτερων μηκών ίνας. Η αύξηση όμως του μήκους ίνας δεν πρέπει να είναι υπέρμετρη, αφού τα πλεονεκτήματα που απορρέουν από τη χρησιμοποίηση μικρού μήκους ίνας, τα οποία έχουν αναλυθεί εκτενώς στα προηγούμενα κεφάλαια, είναι ιδιαίτερώς επωφελή και δεν πρέπει να χάνονται.

#### **4.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΕΝΟΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ ΡΥΘΜΟΥ 40 Gbps**

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από την δεύτερη σειρά προσομοιώσεων, η οποία αφορά τη λειτουργία του UNI με ένα σήμα εισόδου ρυθμού 40 Gbps. Η διάταξη που σχεδιάστηκε έχει ήδη παρουσιασθεί στο σχήμα 4.1, ενώ από τις δύο πηγές σημάτων εισόδου στο αριστερό μέρος της, η πάνω πηγή που παράγει το σήμα εισόδου 1 απενεργοποιείται. Έτσι, το μοναδικό σήμα εισόδου 2 ρυθμού 40 Gbps τροφοδοτείται στην αντίστοιχη θύρα εισόδου 2 του UNI μέσω της κάτω πηγής, η οποία ακολουθείται και από μία ODL, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.13 που ακολουθεί.

Προφανώς, η κεντρική συχνότητα και το εύρος ζώνης (Bandwidth) των δύο πανομοιότυπων οπτικών φίλτρων που έχουν ως σκοπό την αποκοπή του σήματος ελέγχου θα μεταβληθούν από τις αντίστοιχες τιμές της πρώτης σειράς προσομοιώσεων. Με δεδομένο ότι η φέρουσα συχνότητα του σήματος εισόδου 2 ρυθμού 40 Gbps είναι 193 THz ενώ η φέρουσα συχνότητα του σήματος ελέγχου είναι 194 THz, η κεντρική συχνότητα των φίλτρων ρυθμίζεται στα 193 THz προκειμένου να επιτρέπεται η διέλευση του σήματος εισόδου 2, ενώ το εύρος ζώνης τους ρυθμίζεται στο 1 THz (δηλαδή  $193 \pm$

0.5 THz) προκειμένου να αποκόπτεται πλήρως το σήμα ελέγχου. Ακόμη, το μήκος των δύο ταυτόσημων ισχυρά μη γραμμικών ινών ρυθμίζεται εκ νέου αρχικά στα 0.8 m.

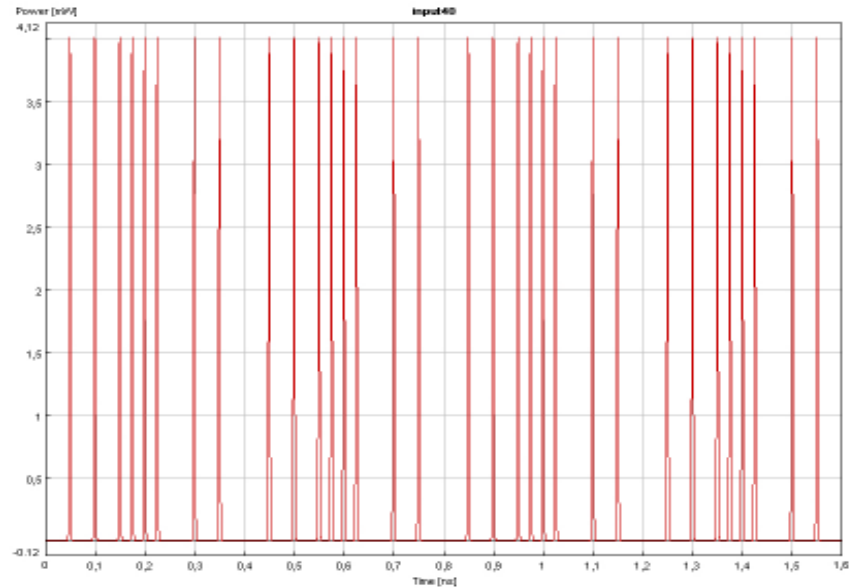


**Σχήμα 4.13:** Δεύτερη σειρά προσομοιώσεων. Εισαγωγή του σήματος εισόδου 2 ρυθμού 40 Gbps στη διάταξη μέσω της κάτω πηγής. Η πάνω πηγή που παράγει το σήμα εισόδου 1 έχει απενεργοποιηθεί.

Η μορφή της επαναλαμβανόμενης κωδικής λέξης του σήματος εισόδου 2 μήκους 16 bits έχει ήδη παρουσιασθεί και είναι η εξής:

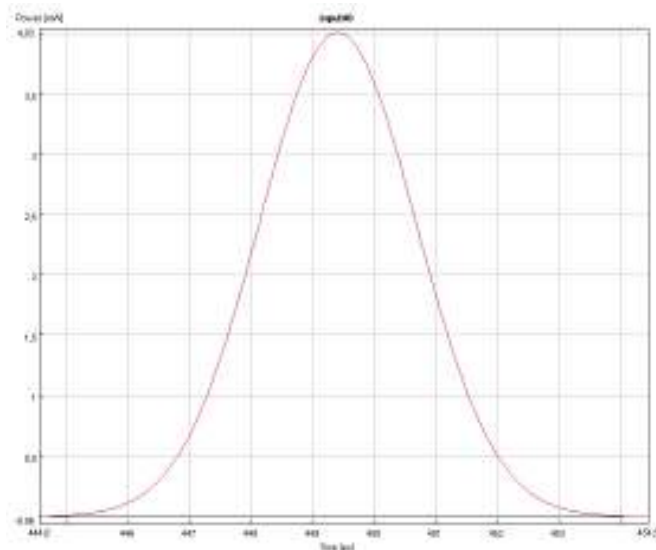
Κωδική λέξη του σήματος εισόδου 2  $\rightarrow$  0 1 0 1 0 1 1 1 1 0 0 1 0 1 0 0

Τοποθετώντας παλμογράφο αμέσως μετά την πηγή παραγωγής του σήματος εισόδου 2 παρατηρούμε τη μορφή της ανωτέρω επαναλαμβανόμενης κωδικής λέξης. Να σημειωθεί ότι η κάθε υποδιαίρεση στην οθόνη του παλμογράφου έχει χρονική διάρκεια 100 psec. Έτσι, αφού στη δεύτερη σειρά προσομοιώσεων το σήμα εισόδου 2 έχει ρυθμό 40 Gbps, σε κάθε υποδιαίρεση της κλίμακας του χρόνου θα “χωρούν” τέσσερα bits. Με δεδομένο ότι η οθόνη του παλμογράφου περιλαμβάνει 16 υποδιαιρέσεις, το στιγμιότυπο που τελικά αποτυπώνεται και παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 4.14 θα περιλαμβάνει τέσσερα αντίγραφα της ανωτέρω επαναλαμβανόμενης κωδικής λέξης.



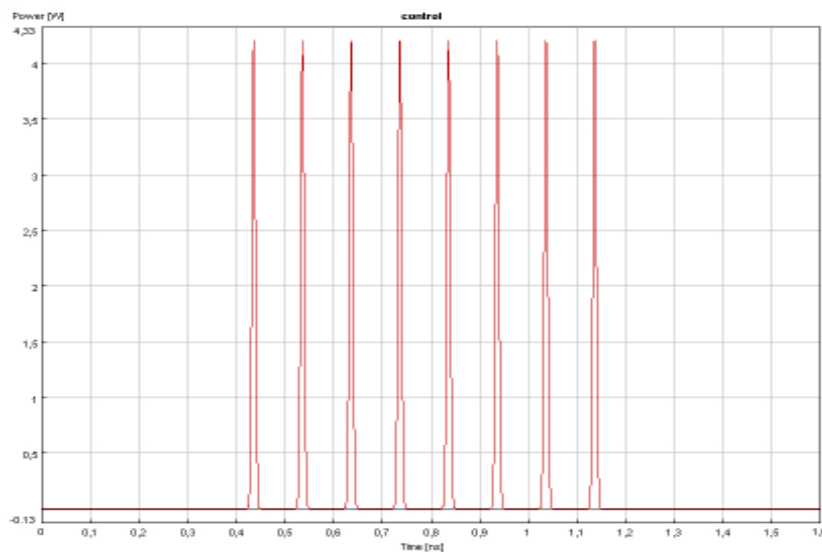
**Σχήμα 4.14:** Δεύτερη σειρά προσομοιώσεων. Αποτύπωση τεσσάρων αντιγράφων της κωδικής λέξης του σήματος εισόδου 2 ρυθμού 40 Gbps.

Στο σχήμα 4.15 που ακολουθεί παρουσιάζεται η μορφή του τυχόντος παλμού Gauss του σήματος εισόδου 2. Από την εικόνα αυτή μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η ισχύς κορυφής του παλμού έχει τιμή 4 mW ενώ η τιμή του χρονικού εύρους του παλμού (FWHM) είναι 3 psec, όπως έχουν οριστεί.



**Σχήμα 4.15:** Δεύτερη σειρά προσομοιώσεων. Η μορφή τυχόντος παλμού του σήματος εισόδου 2 ρυθμού 40 Gbps στα 193 THz.

Το σήμα ελέγχου ρυθμού 10 Gbps έχει ακριβώς την ίδια μορφή που είχε και στην πρώτη σειρά προσομοιώσεων, ενώ η επαναλαμβανόμενη κωδική του λέξη μήκους 16 bits έχει ήδη παρουσιασθεί. Στην περίπτωση του σήματος ελέγχου ρυθμού 10 Gbps, σε κάθε υποδιαίρεση της κλίμακας του χρόνου θα “χωράει” ένα bit, ενώ η αποτύπωση στον παλμογράφο θα περιλαμβάνει ένα αντίγραφο της κωδικής του λέξης, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα 4.16. Να σημειωθεί ότι το χρονικό εύρος (FWHM) των παλμών ελέγχου παραμένει στα 8.2 psec.

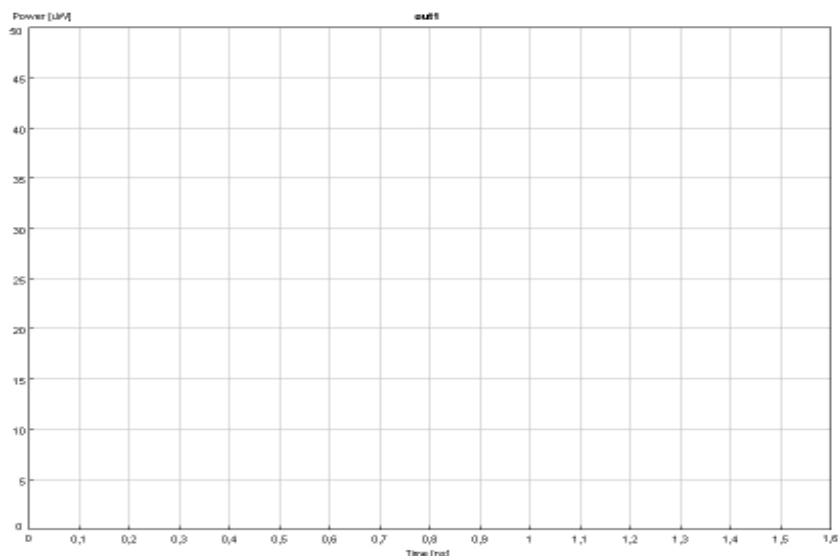


**Σχήμα 4.16:** Δεύτερη σειρά προσομοιώσεων. Αποτύπωση ενός αντιγράφου της κωδικής λέξης του σήματος ελέγχου ρυθμού 10 Gbps.

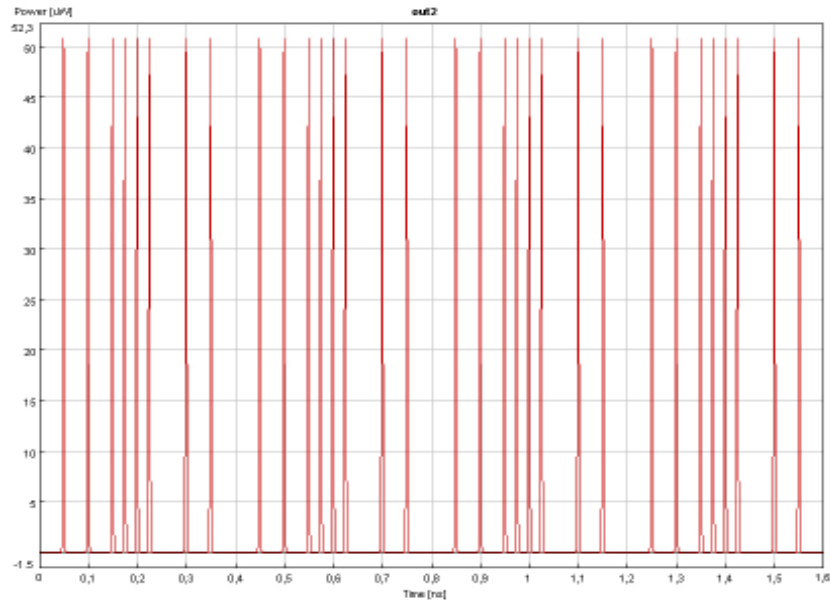
Στην προηγούμενη σειρά προσομοιώσεων, ο τυχόν παλμός ελέγχου είχε επιλεχθεί να συγχρονισθεί με τη X συνιστώσα του χρονικά αντίστοιχου παλμού του σήματος εισόδου 1 ρυθμού 10 Gbps, η οποία διαδίδεται στον πάνω οπτικό δρόμο. Στην δεύτερη σειρά προσομοιώσεων, το σήμα εισόδου 2 έχει ρυθμό 40 Gbps, με αποτέλεσμα ο τυχόν παλμός ελέγχου να συγχρονισθεί με τη X συνιστώσα, η οποία διαδίδεται στον πάνω οπτικό δρόμο, του ενός από τα χρονικά αντίστοιχα του 4 bits του σήματος εισόδου 2. Έτσι, επιλέγεται τυχαία ο συγχρονισμός του παλμού ελέγχου να γίνει με τη X συνιστώσα του χρονικά αντίστοιχου παλμού του σήματος εισόδου 2 ο οποίος συνιστά το δεύτερο bit της αντίστοιχης τετράδας. Η επίτευξη του συγχρονισμού γίνεται ρυθμίζοντας την καθυστέρηση που εισάγει η ODL που έχει τοποθετηθεί αμέσως μετά την πηγή

παραγωγής του σήματος εισόδου 2. Αντιθέτως, οι δύο πανομοιότυπες ODL αμέσως μετά τις πηγές παραγωγής του σήματος ελέγχου παραμένουν ανεπηρέαστες στις τιμές καθυστέρησης στις οποίες είχαν ρυθμιστεί κατά την πρώτη σειρά προσομοιώσεων, προκειμένου να μην χαλάσει ο συγχρονισμός του σήματος ελέγχου με τη X συνιστώσα του χρονικά αντίστοιχου παλμού του σήματος εισόδου 1 που είχε επιτευχθεί. Αυτή η τεχνική αποτελεί και την παρακαταθήκη της εύκολης επίτευξης τριπλού συγχρονισμού των δύο σημάτων εισόδου και του σήματος ελέγχου κατά την τρίτη σειρά προσομοιώσεων που θα ακολουθήσει. Η επίτευξη του συγχρονισμού γίνεται τοποθετώντας παλμογράφο στην είσοδο της ισχυρά μη γραμμικής ίνας του πάνω οπτικού δρόμου και ελέγχοντας τις χρονικές θέσεις ενός παλμού του σήματος ελέγχου και της X συνιστώσας του χρονικά αντίστοιχου παλμού του σήματος εισόδου 2 ο οποίος συνιστά το δεύτερο bit της αντίστοιχης τετράδας.

Αρχικά η ισχύς κορυφής των παλμών ελέγχου μηδενίζεται προκειμένου να ελεγχθεί η λειτουργία της διάταξης του UNI στην κατάσταση μη μεταγωγής. Στα σχήματα 4.17 και 4.18 που ακολουθούν παρουσιάζονται στον παλμογράφο τα αντίστοιχα σήματα στις θύρες εξόδου 1 και 2 του UNI, τα οποία επιβεβαιώνουν την ορθότητα της λειτουργίας της διάταξης στην κατάσταση μη μεταγωγής.



**Σχήμα 4.17:** Δεύτερη σειρά προσομοιώσεων. Στη θύρα εξόδου 1 δεν εμφανίζεται σήμα όταν το UNI λειτουργεί στην κατάσταση μη μεταγωγής.



**Σχήμα 4.18:** Δεύτερη σειρά προσομοιώσεων. Σήμα εξόδου 2 ρυθμού 40 Gbps όταν το UNI λειτουργεί στην κατάσταση μη μεταγωγής.

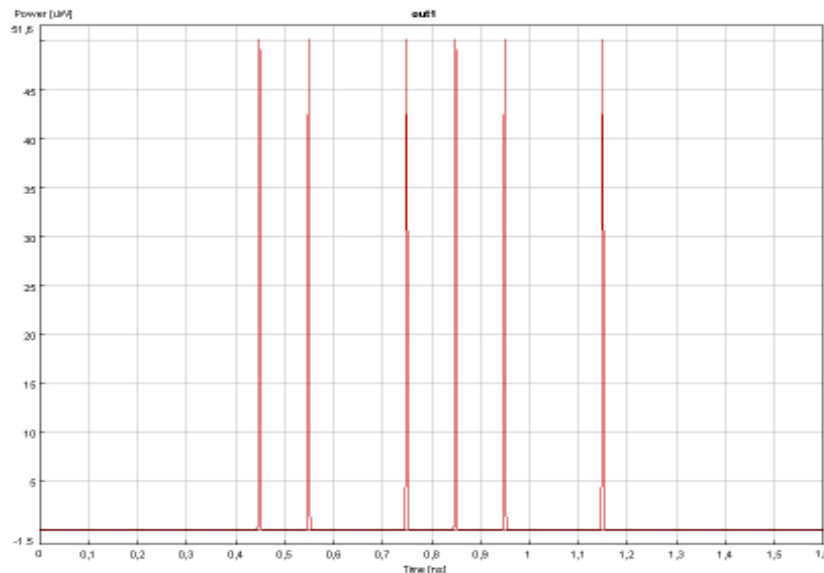
Εφόσον το μοναδικό σήμα εισόδου εισέρχεται στην είσοδο 2 του UNI, θα εξέρχεται ανεπηρέαστο από την αντίστοιχη θύρα εξόδου 2, η οποία στην περίπτωση αυτή θα συνιστά τη θύρα εξόδου μη μεταγωγής. Αντιθέτως, στη θύρα εξόδου 1, η οποία στην περίπτωση αυτή θα συνιστά τη θύρα εξόδου μεταγωγής, δεν θα εμφανίζεται σήμα. Όπως και στην πρώτη σειρά προσομοιώσεων, η ισχύς κορυφής των παλμών του σήματος εξόδου 2 εμφανίζεται σημαντικά μειωμένη σε σύγκριση με την αντίστοιχη ισχύ κορυφής των παλμών του σήματος εισόδου 2.

Εν συνεχεία, η ισχύς κορυφής των παλμών ελέγχου αυξάνεται σε σχέση με τη μηδενική στάθμη όπου βρισκόταν προηγουμένως, προκειμένου να ελεγχθεί η λειτουργία της διάταξης του UNI στην κατάσταση μεταγωγής. Το πρώτο και το τέταρτο αντίγραφο της κωδικής λέξης του σήματος εισόδου 2 θα εξέλθουν ανεπηρέαστα από τη θύρα εξόδου 2, η οποία συνιστά τη θύρα εξόδου μη μεταγωγής, αφού η πρώτη και η τελευταία τετράδα bits της κωδικής λέξης του σήματος ελέγχου αποτελούνται από μηδενικά. Η διαδικασία της εξόδου των παλμών από τη θύρα εξόδου 1, η οποία συνιστά τη θύρα εξόδου μεταγωγής, θα αφορά το δεύτερο και το τρίτο αντίγραφο της κωδικής λέξης του σήματος εισόδου 2 και συγκεκριμένα τους παλμούς εισόδου οι οποίοι συνιστούν το

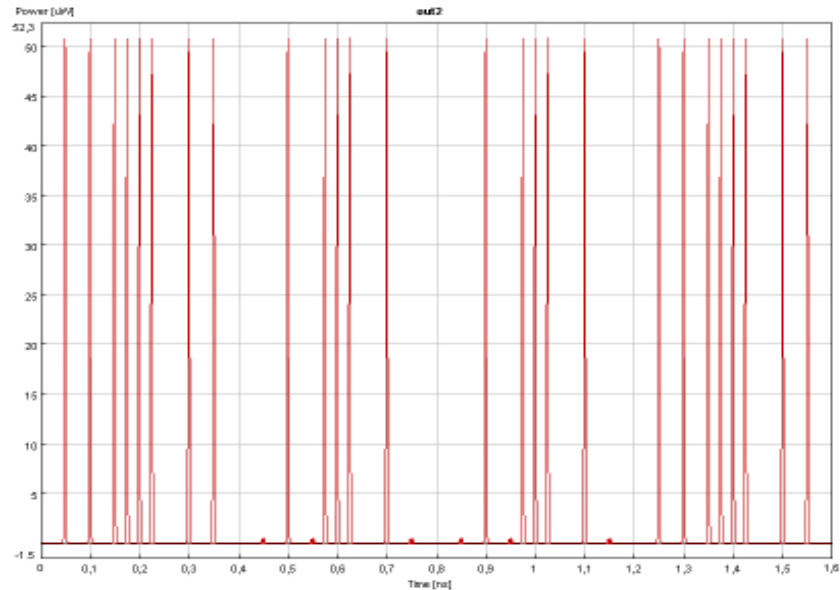


δεύτερο bit της κάθε τετράδας και οι οποίοι είναι συγχρονισμένοι με παλμούς ελέγχου. Συνεπώς, το σήμα που θα προκύψει στη θύρα εξόδου 1 θα έχει ρυθμό 10 Gbps, αφού από την κάθε τετράδα bits του σήματος εισόδου 2 μόνο ένας παλμός μπορεί να εξέλθει από τη θύρα εξόδου 1. Αντιθέτως, το σήμα στην θύρα εξόδου 2 θα έχει ρυθμό 40 Gbps, όπως και το σήμα εισόδου 2.

Στα σχήματα 4.19 και 4.20 που ακολουθούν παρουσιάζονται στον παλμογράφο τα αντίστοιχα σήματα στις θύρες εξόδου 1 και 2 του UNI, στην περίπτωση που η ισχύς κορυφής των παλμών ελέγχου είναι 4.2 W. Ακόμη, η τιμή της χρονικής καθυστέρησης που εισάγεται μέσω των ταυτόσημων ODL στις πηγές παραγωγής του σήματος ελέγχου έχει ήδη ρυθμιστεί από την προηγούμενη σειρά προσομοιώσεων στα  $-14$  psec ενώ η καθυστέρηση που εισάγεται μέσω της ODL στην πηγή παραγωγής του σήματος εισόδου 2 ρυθμίζεται στα  $-11.9$  psec. Τα εν λόγω σχήματα επιβεβαιώνουν την ορθότητα της λειτουργίας της διάταξης στην κατάσταση μεταγωγής. Όπως θα φανεί και στη συνέχεια, η συγκεκριμένη τιμή ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου, σε συνδυασμό με τις συγκεκριμένες τιμές καθυστέρησης έχουν ως αποτέλεσμα τη μεγιστοποίηση της τιμής του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 2, το οποίο αγγίζει την τιμή των 19.81 dB.



**Σχήμα 4.19:** Δεύτερη σειρά προσομοιώσεων. Σήμα εξόδου 1 ρυθμού 10 Gbps όταν το UNI λειτουργεί στην κατάσταση μεταγωγής.



**Σχήμα 4.20:** Δεύτερη σειρά προσομοιώσεων. Σήμα εξόδου 2 ρυθμού 40 Gbps όταν το UNI λειτουργεί στην κατάσταση μεταγωγής.

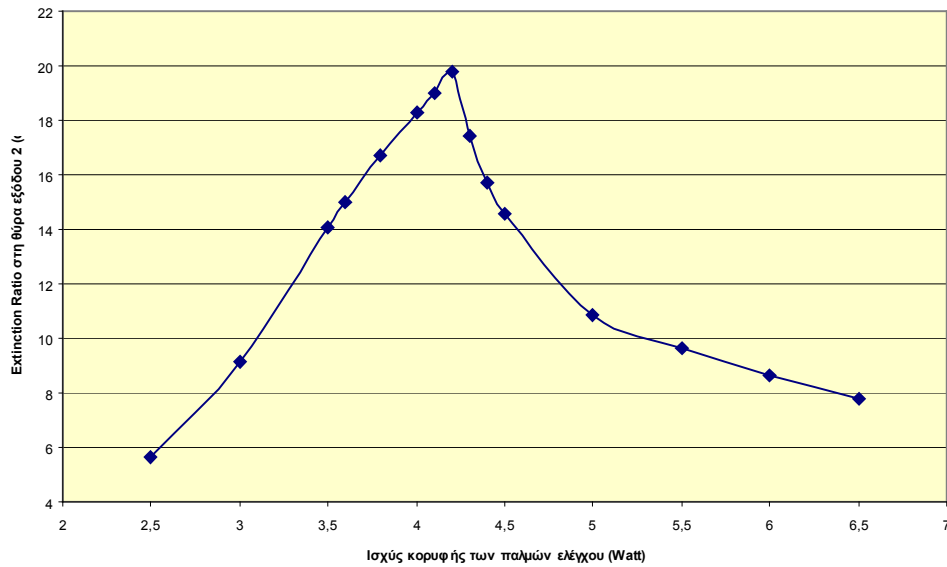
Ομοίως με προηγουμένως, η ισχύς κορυφής των παλμών των σημάτων εξόδου εμφανίζεται σημαντικά μειωμένη σε σύγκριση με την αντίστοιχη ισχύ κορυφής των παλμών του σήματος εισόδου 2. Μάλιστα, οι παλμοί οι οποίοι εξέρχονται ανεπηρέαστοι από τη θύρα εξόδου 2 έχουν ελάχιστα μεγαλύτερη ισχύ κορυφής από τους παλμούς που εξέρχονται από τη θύρα εξόδου 1.

Η συγκεκριμένη τιμή της ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου η οποία, σε συνδυασμό με τις συγκεκριμένες τιμές καθυστέρησης, έχουν ως αποτέλεσμα τη μεγιστοποίηση της τιμής του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 2 βρέθηκε μέσω της πραγματοποίησης μιας σειράς μετρήσεων απολύτως όμοιας με την αντίστοιχη της πρώτης σειράς προσομοιώσεων, με το UNI να λειτουργεί στην κατάσταση μεταγωγής. Κατά τις μετρήσεις αυτές το μήκος των δύο ταυτόσημων ισχυρά μη γραμμικών ινών διατηρείται σταθερό στα 0.8 m, ενώ η ισχύς κορυφής των παλμών ελέγχου μεταβάλλεται σε ένα εύρος τιμών από τα 2.5 W έως τα 6.5 W. Για κάθε μια τιμή της ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου, μεταβάλλουμε την τιμή της καθυστέρησης που εισάγει η ODL στην πηγή παραγωγής του σήματος εισόδου 2, ενώ η καθυστέρηση που εισάγεται μέσω των δύο ταυτόσημων ODL στις πηγές παραγωγής του σήματος ελέγχου παραμένει

αμετάβλητη στις τιμές που είχαν βρεθεί κατά την πρώτη σειρά προσομοιώσεων. Ο σκοπός είναι φυσικά η μεγιστοποίηση του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 2. Έτσι τελικά για κάθε διαφορετική τιμή της ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου έχουμε και την αντίστοιχη βέλτιστη τιμή του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 2. Τα ζεύγη τιμών της ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου και του αντίστοιχου βέλτιστου Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 2, τα οποία προέκυψαν από την εν λόγω σειρά μετρήσεων, παρουσιάζονται στον πίνακα 4.3 που ακολουθεί. Ακόμη, η συσχέτιση μεταξύ του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 2 και της ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου γίνεται περισσότερο εμφανής με τη βοήθεια του σχήματος 4.21, το οποίο παρουσιάζει τη γραφική παράσταση που χαράσσεται με βάση τα στοιχεία του πίνακα 4.3.

<b>Ισχύς κορυφής των παλμών ελέγχου (Watt)</b>	<b>Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 2 (dB)</b>
2.5	5.65
3	9.14
3.5	14.09
3.6	15.01
3.8	16.72
4	18.3
4.1	18.99
4.2	19.81
4.3	17.46
4.4	15.75
4.5	14.55
5	10.84
5.5	9.67
6	8.66
6.5	7.79

**Πίνακας 4.3:** Δεύτερη σειρά προσομοιώσεων. Μετρήσεις του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 2 συναρτήσει της ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου.



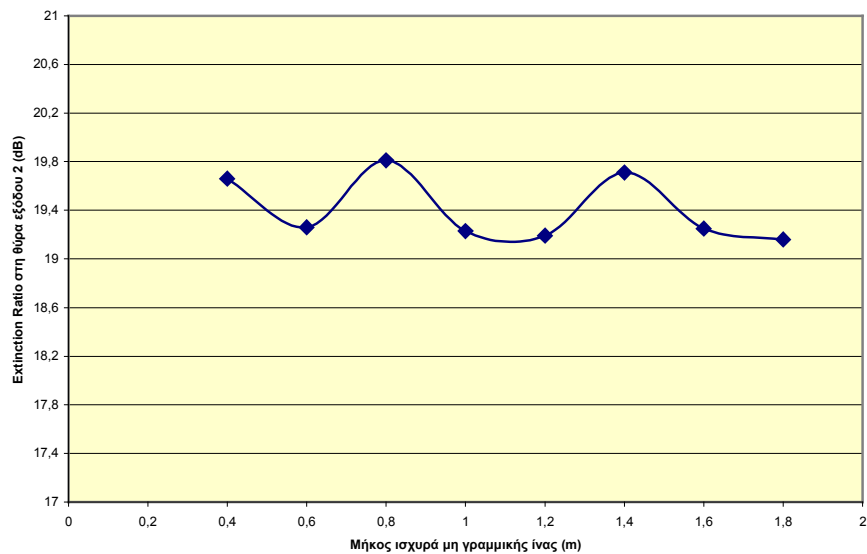
**Σχήμα 4.21:** Δεύτερη σειρά προσομοιώσεων. Γραφική παράσταση της συσχέτισης μεταξύ του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 2 και της ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου.

Παρατηρούμε αρχικά ότι η μορφή της γραφικής παράστασης του σχήματος 4.21 είναι παρόμοια με εκείνη του σχήματος 4.11, η οποία αφορά τις αντίστοιχες μετρήσεις κατά την πρώτη σειρά προσομοιώσεων. Σύμφωνα με τα στοιχεία του πίνακα 4.3, ξεκινώντας τις μετρήσεις από τα 2.5 W και καθώς αυξάνεται η ισχύς κορυφής των παλμών ελέγχου, παρατηρούμε αντίστοιχη αύξηση του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 2, έως τη μέγιστη τιμή των 19.81 dB που αντιστοιχεί στα 4.2 W. Περαιτέρω αύξηση της ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου οδηγεί σε μείωση του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 2. Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι μετρούμενες τιμές του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 2 κατά την δεύτερη σειρά προσομοιώσεων είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις μετρούμενες τιμές του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 1 κατά την πρώτη σειρά προσομοιώσεων. Το εν λόγω αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο και οφείλεται στο γεγονός ότι το χρονικό εύρος (FWHM) των παλμών του σήματος εισόδου 2 είναι μικρότερο από το χρονικό εύρος των παλμών του σήματος εισόδου 1 (3 psec έναντι 5 psec αντιστοίχως). Συνεπώς, το φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης φάσης θα επενεργεί με αποδοτικότερο τρόπο στη X συνιστώσα του σήματος εισόδου 2, σε σύγκριση με την αντίστοιχη X συνιστώσα του σήματος εισόδου 1.

Όπως συνέβη και κατά την πρώτη σειρά προσομοιώσεων, πραγματοποιείται μια ακόμη σειρά μετρήσεων, η οποία έχει ως στόχο να καταδείξει τη συσχέτιση μεταξύ του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 2 και του μήκους των δύο ταυτόσημων ισχυρά μη γραμμικών ίνων. Το μήκος αυτό μεταβάλλεται σε ένα εύρος τιμών από τα 0.4 m έως τα 1.8 m με βήμα τα 0.2 m. Συγκεκριμένα, για καθεμία τιμή μήκους προσπαθούμε να βρούμε τη μέγιστη τιμή του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 2 μεταβάλλοντας τις τιμές της ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου και της καθυστέρησης στην ODL της πηγής παραγωγής του σήματος εισόδου 2, ενώ η καθυστέρηση που εισάγεται μέσω των δύο ταυτόσημων ODL στις πηγές παραγωγής του σήματος ελέγχου παραμένει αμετάβλητη στις τιμές που είχαν βρεθεί κατά την πρώτη σειρά προσομοιώσεων. Στον παρακάτω πίνακα 4.4 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 2 για κάθε μήκος ίνας αλλά και οι αντίστοιχες τιμές της ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου με τις οποίες επετεύχθη οι καθεμία από τις μέγιστες τιμές. Ακολουθεί και η σχετική γραφική παράσταση της συσχέτισης μεταξύ του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 2 και του μήκους της ισχυρά μη γραμμικής ίνας, η οποία εικονίζεται στο σχήμα 4.22.

Μήκος ισχυρά μη γραμμικής ίνας (m)	Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 2 (dB)	Ισχύς κορυφής των παλμών ελέγχου (Watt)
0.4	19.66	8.1
0.6	19.26	5.5
0.8	19.81	4.2
1	19.23	3.4
1.2	19.19	2.9
1.4	19.71	2.6
1.6	19.25	2.3
1.8	19.16	2.1

**Πίνακας 4.4:** Δεύτερη σειρά προσομοιώσεων. Μετρήσεις του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 2 συναρτήσει του μήκους της ισχυρά μη γραμμικής ίνας. Για κάθε μήκος ίνας φαίνεται και η αντίστοιχη τιμή της ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου με την οποία επιτυγχάνεται μεγιστοποίηση του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 2.



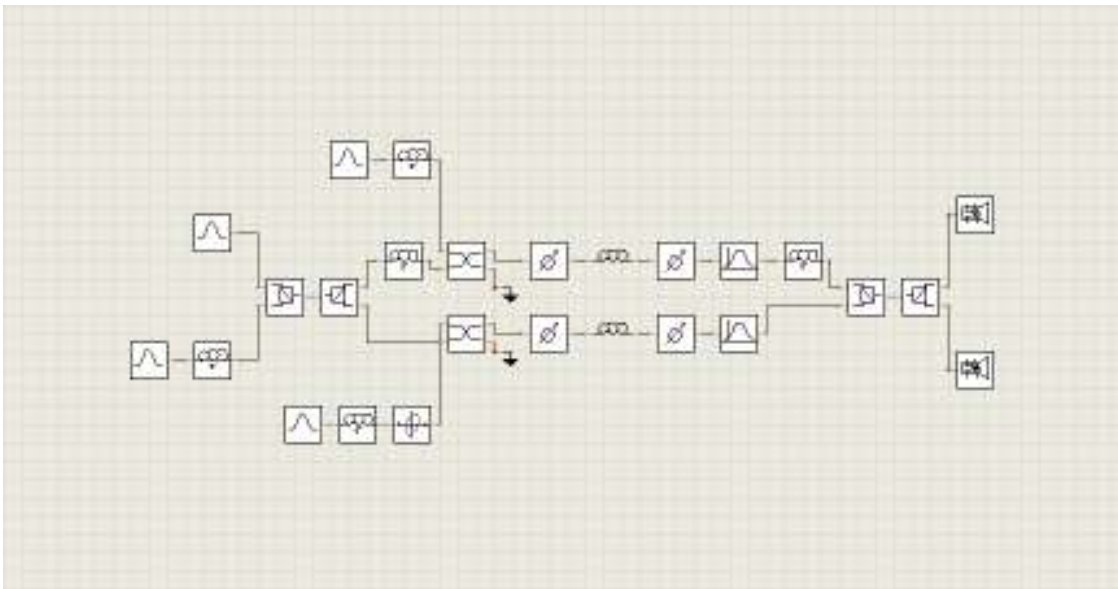
**Σχήμα 4.22:** Δεύτερη σειρά προσομοιώσεων. Γραφική παράσταση της συσχέτισης μεταξύ του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 2 και του μήκους της ισχυρά μη γραμμικής ίνας.

Τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από τα στοιχεία του πίνακα 4.4 αλλά και από τη μορφή του σχετικού γραφήματος είναι ταυτόσημα με εκείνα τα οποία είχαν εξαχθεί από τις αντίστοιχες μετρήσεις της πρώτης σειράς προσομοιώσεων. Η βέλτιστη τιμή του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 2 υφίσταται πολύ μικρές μεταβολές καθώς αυξάνεται το μήκος της ισχυρά μη γραμμικής ίνας, κινούμενη σε ένα μικρό εύρος τιμών από τα 19.16 dB έως τα 19.81 dB. Ακόμη, καθώς το μήκος της ίνας αυξάνεται, μειώνεται και η απαιτούμενη ισχύς κορυφής των παλμών ελέγχου με την οποία επιτυγχάνεται μεγιστοποίηση του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 2. Εν τέλει, η επιλογή του κατάλληλου μήκους ίνας θα καθοριστεί με βάση τα ίδια κριτήρια τα οποία έχουν ήδη παρατεθεί στην προηγούμενη ενότητα.

## 4.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΔΥΟ ΣΗΜΑΤΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από την τρίτη σειρά προσομοιώσεων, η οποία αφορά τη λειτουργία του UNI ως 2×2 οπτικός

διακόπτης μεταγωγής ( $2 \times 2$  Optical Exchange – Bypass Switch). Η διάταξη που σχεδιάστηκε έχει ήδη παρουσιαστεί στο σχήμα 4.1, ενώ πλέον είναι ενεργοποιημένες και οι δύο πηγές σημάτων εισόδου στο αριστερό μέρος της. Το σήμα εισόδου 1 ρυθμού 10 Gbps τροφοδοτείται στην αντίστοιχη θύρα εισόδου 1 του UNI μέσω της πάνω πηγής, ενώ το σήμα εισόδου 2 ρυθμού 40 Gbps τροφοδοτείται στην αντίστοιχη θύρα εισόδου 2 του UNI μέσω της κάτω πηγής, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.23 που ακολουθεί. Ουσιαστικά η περίπτωση αυτή αποτελεί την επαλληλία των δύο περιπτώσεων που εξετάστηκαν στις δύο προηγούμενες ενότητες, όπου το UNI λειτουργούσε με ένα από τα δύο σήματα εισόδου κάθε φορά.

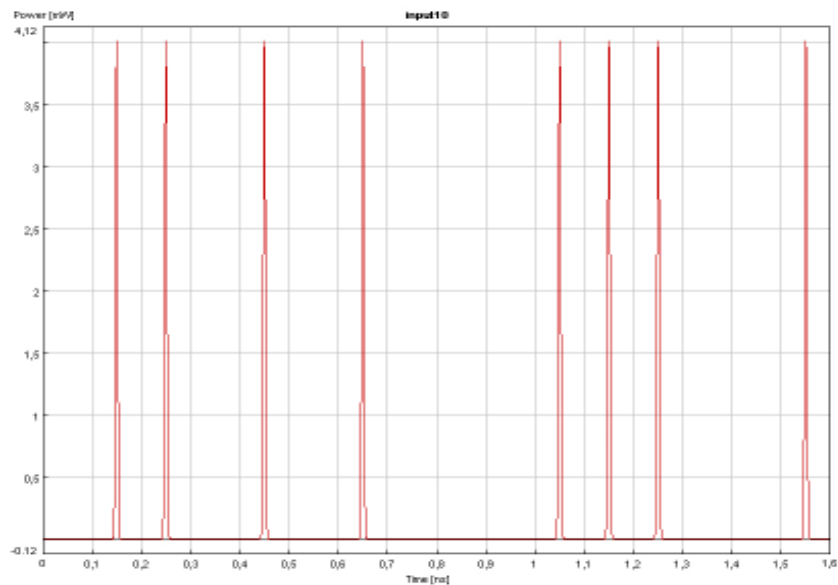


**Σχήμα 4.23:** Τρίτη σειρά προσομοιώσεων. Και οι δύο πηγές σημάτων εισόδου είναι ενεργοποιημένες προκειμένου να λειτουργήσει η διάταξη ως  $2 \times 2$  οπτικός διακόπτης μεταγωγής.

Η κεντρική συχνότητα και το εύρος ζώνης (Bandwidth) των δύο πανομοιότυπων οπτικών φίλτρων που έχουν ως σκοπό την αποκοπή του σήματος ελέγχου ρυθμού 10 Gbps θα μεταβληθούν εκ νέου από τις αντίστοιχες τιμές των προηγούμενων σειρών προσομοιώσεων. Στην περίπτωση αυτή έχουμε δύο σήματα εισόδου με διαφορετικές φέρουσες συχνότητες. Συγκεκριμένα, η φέρουσα συχνότητα του σήματος εισόδου 1 ρυθμού 10 Gbps είναι 192.4 THz, ενώ η φέρουσα συχνότητα του σήματος εισόδου 2 ρυθμού 40 Gbps είναι 193 THz. Συνεπώς, η κεντρική συχνότητα των φίλτρων σε

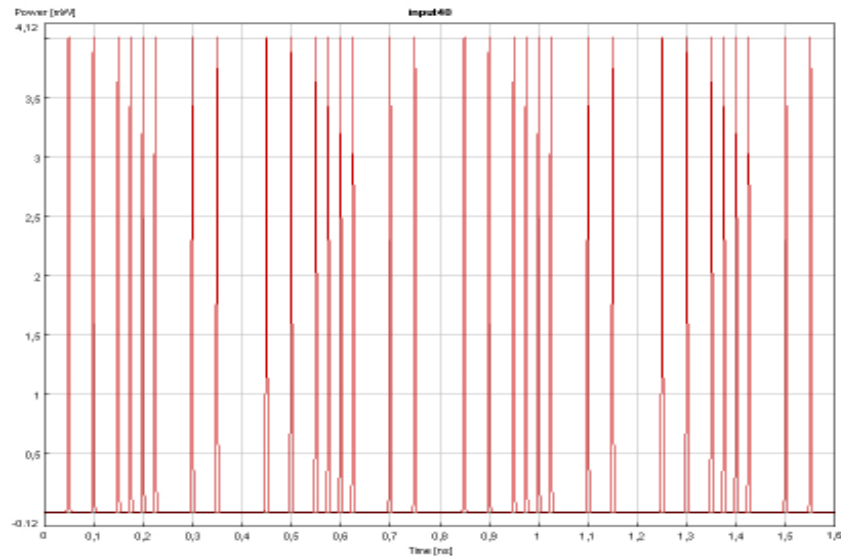
συνδυασμό με το εύρος ζώνης που θα επιλεγεί πρέπει να είναι τέτοια ώστε να επιτρέπεται η διέλευση και των δύο σημάτων εισόδου. Η επιλογή κεντρικής συχνότητας η οποία έγινε ήταν η ενδιάμεση τιμή μεταξύ των 192.4 THz και των 193 THz, δηλαδή τα 192.7 THz, ενώ το εύρος ζώνης ρυθμίστηκε στα 1.4 THz (δηλαδή τα φίλτρα είναι της μορφής  $192.7 \pm 0.7$  THz). Οι ανωτέρω επιλογές έχουν ως αποτέλεσμα και την πλήρη αποκοπή του σήματος ελέγχου, το οποίο έχει φέρουσα συχνότητα 194 THz. Ακόμη, το μήκος των δύο ταυτόσημων ισχυρά μη γραμμικών ινών ρυθμίζεται εκ νέου στα 0.8 m.

Τα σήματα εισόδου 1 και 2 αλλά και το σήμα ελέγχου έχουν ακριβώς τις ίδιες μορφές που είχαν και στις δύο προηγούμενες σειρές προσομοιώσεων ενώ οι επαναλαμβανόμενες κωδικές λέξεις τους μήκους 16 bits έχουν ήδη παρουσιασθεί. Στα παρακάτω σχήματα 4.24, 4.25 και 4.26 παρουσιάζονται οι εικόνες στον παλμογράφο ενός αντιγράφου της κωδικής λέξης του σήματος εισόδου 1 ρυθμού 10 Gbps, τεσσάρων αντιγράφων της κωδικής λέξης του σήματος εισόδου 2 ρυθμού 40 Gbps και ενός αντιγράφου της κωδικής λέξης του σήματος ελέγχου ρυθμού 10 Gbps αντιστοίχως.

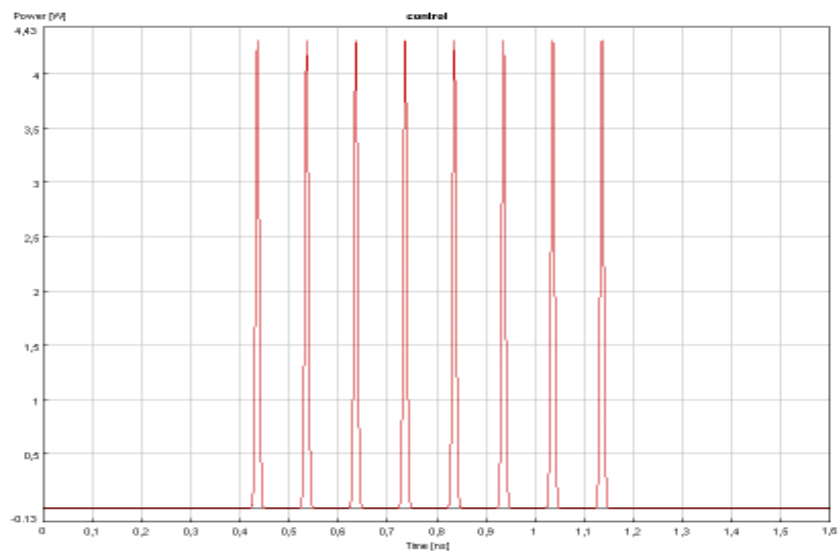


**Σχήμα 4.24:** Τρίτη σειρά προσομοιώσεων. Αποτύπωση ενός αντιγράφου της κωδικής λέξης του σήματος εισόδου 1 ρυθμού 10 Gbps.





**Σχήμα 4.25:** Τρίτη σειρά προσομοιώσεων. Αποτύπωση τεσσάρων αντιγράφων της κωδικής λέξης του σήματος εισόδου 2 ρυθμού 40 Gbps.

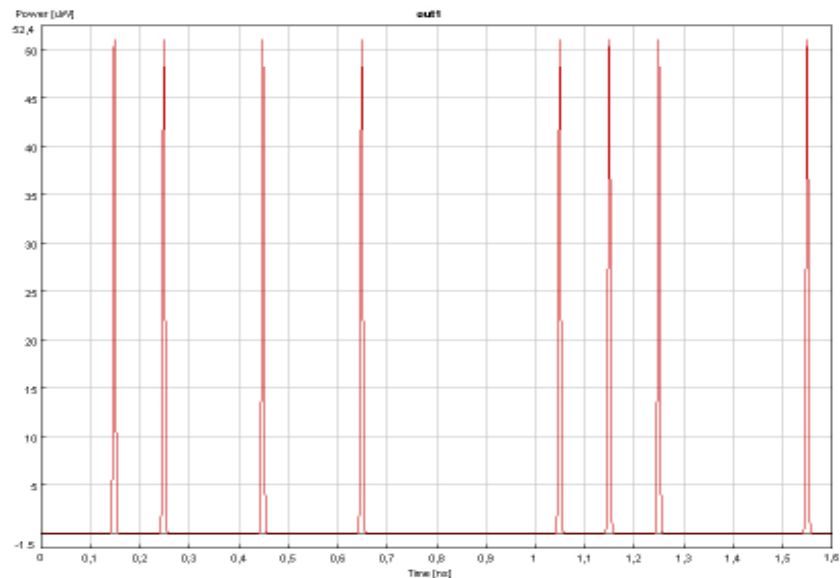


**Σχήμα 4.26:** Τρίτη σειρά προσομοιώσεων. Αποτύπωση ενός αντιγράφου της κωδικής λέξης του σήματος ελέγχου ρυθμού 10 Gbps.

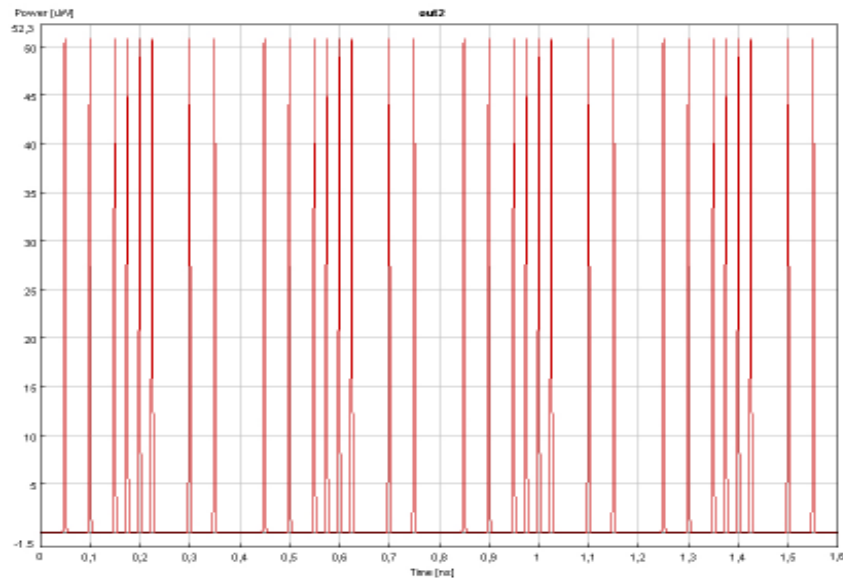
Να σημειωθεί ότι το χρονικό εύρος (FWHM) των παλμών των σημάτων εισόδου 1 και 2 παραμένει σταθερό στα 5 psec και 3 psec αντιστοίχως, όπως και η ισχύς κορυφής τους παραμένει στα 4 mW. Επίσης το χρονικό εύρος των παλμών ελέγχου παραμένει και αυτό σταθερό στα 8.2 psec. Ακόμη, ο τριπλός συγχρονισμός ενός τυχόντος παλμού ελέγχου με τη Χ συνιστώσα του χρονικά αντίστοιχου παλμού του σήματος εισόδου 1

αλλά και με τη X συνιστώσα του χρονικά αντίστοιχου παλμού του σήματος εισόδου 2 ο οποίος συνιστά το δεύτερο bit της αντίστοιχης τετράδας έχει ήδη πραγματοποιηθεί στις δύο προηγούμενες σειρές προσομοιώσεων. Συνοπτικά υπενθυμίζεται ότι ο συγχρονισμός του τυχόντος παλμού ελέγχου με τη X συνιστώσα του χρονικά αντίστοιχου παλμού του σήματος εισόδου 1 έγινε κατά την πρώτη σειρά προσομοιώσεων ρυθμίζοντας την καθυστέρηση που εισάγουν οι δύο ταυτόσημες ODL αμέσως μετά τις δύο πανομοιότυπες πηγές παραγωγής του σήματος ελέγχου. Αντιστοίχως, ο συγχρονισμός του τυχόντος παλμού ελέγχου με τη X συνιστώσα του χρονικά αντίστοιχου παλμού του σήματος εισόδου 2 ο οποίος συνιστά το δεύτερο bit της αντίστοιχης τετράδας έγινε κατά τη δεύτερη σειρά προσομοιώσεων ρυθμίζοντας την καθυστέρηση που εισάγει η ODL αμέσως μετά την πηγή παραγωγής του σήματος εισόδου 2.

Αρχικά η ισχύς κορυφής των παλμών ελέγχου μηδενίζεται προκειμένου να ελεγχθεί η λειτουργία της διάταξης του 2×2 διακόπτη στην κατάσταση μη μεταγωγής (Bar State). Στα σχήματα 4.27 και 4.28 που ακολουθούν παρουσιάζονται στον παλμογράφο τα σήματα εξόδου 1 και 2 του διακόπτη, ρυθμού 10 Gbps και 40 Gbps αντιστοίχως.



**Σχήμα 4.27:** Τρίτη σειρά προσομοιώσεων. Σήμα εξόδου 1 ρυθμού 10 Gbps όταν ο 2×2 διακόπτης λειτουργεί στην κατάσταση μη μεταγωγής (bar state).



**Σχήμα 4.28: Τρίτη σειρά προσομοιώσεων. Σήμα εξόδου 2 ρυθμού 40 Gbps όταν ο 2×2 διακόπτης λειτουργεί στην κατάσταση μη μεταγωγής (bar state).**

Παρατηρούμε λοιπόν ότι τα σήματα εισόδου 1 και 2 εξέρχονται ανεπηρέαστα από τις αντίστοιχες θύρες εξόδου 1 και 2 του διακόπτη, κάτι που επιβεβαιώνει την ορθότητα της λειτουργίας του στην κατάσταση μη μεταγωγής. Όπως και στις προηγούμενες σειρές προσομοιώσεων, οι τιμές της ισχύος κορυφής των παλμών και των δύο σημάτων εξόδου εμφανίζονται σημαντικά μειωμένες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές της ισχύος κορυφής των παλμών των δύο σημάτων εισόδου. Μάλιστα, οι παλμοί των δύο σημάτων εξόδου φαίνεται να έχουν την ίδια ισχύ, όπως άλλωστε συμβαίνει και με τους παλμούς των δύο σημάτων εισόδου, οι οποίοι έχουν ίδια ισχύ της τάξεως των 4 mW.

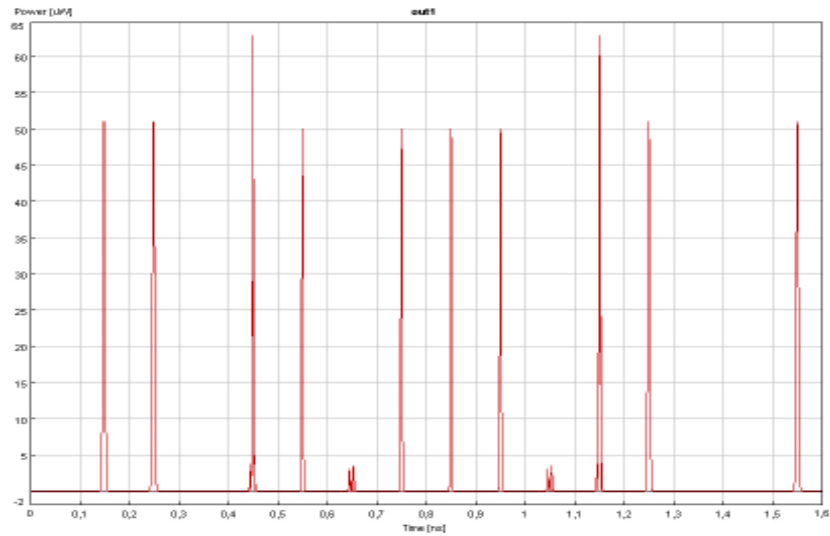
Εν συνεχεία, η ισχύς κορυφής των παλμών ελέγχου αυξάνεται σε σχέση με τη μηδενική στάθμη όπου βρισκόταν προηγουμένως, προκειμένου να ελεγχθεί η λειτουργία της διάταξης του 2×2 διακόπτη στην κατάσταση μεταγωγής (Cross State). Ουσιαστικά, τα σήματα που θα εμφανιστούν σε καθεμία από τις δύο εξόδους του διακόπτη αποτελούν την υπέρθεση των σημάτων που εμφανίστηκαν στις αντίστοιχες εξόδους κατά τις δύο πρώτες σειρές προσομοιώσεων.

Αρχικά αναλύεται η μορφή του σήματος στη θύρα εξόδου 1. Οι παλμοί που ανήκουν στην πρώτη και στην τελευταία τετράδα bits της κωδικής λέξης του σήματος εισόδου 1

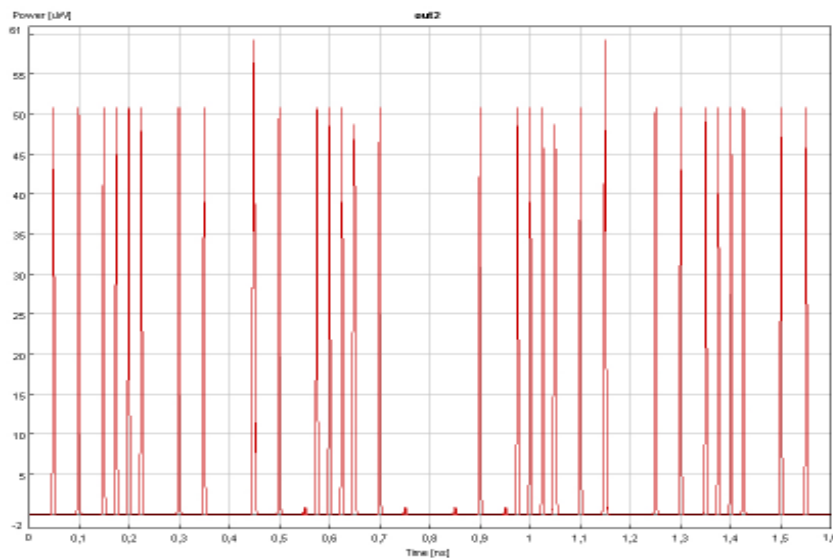
θα εξέλθουν ανεπηρέαστοι από τη θύρα εξόδου 1, αφού η πρώτη και η τελευταία τετράδα bits της κωδικής λέξης του σήματος ελέγχου αποτελούνται από μηδενικά. Αντιθέτως, η δεύτερη και η τρίτη τετράδα bits του σήματος εξόδου 1 θα αποτελείται μόνο από παλμούς του σήματος εισόδου 2 και συγκεκριμένα από παλμούς που συνιστούν το δεύτερο bit της κάθε τετράδας του σήματος εισόδου 2. Εν τέλει, το σήμα εξόδου 1 θα έχει ρυθμό 10 Gbps και θα είναι υβριδικής μορφής, δηλαδή θα περιλαμβάνει παλμούς του σήματος εισόδου 1 φέρουσας συχνότητας 192.4 THz αλλά και παλμούς του σήματος εισόδου 2 φέρουσας συχνότητας 193 THz.

Έπειτα, αναλύεται η μορφή του σήματος στη θύρα εξόδου 2. Το πρώτο και το τέταρτο αντίγραφο της κωδικής λέξης του σήματος εισόδου 2 θα εξέλθουν ανεπηρέαστα από τη θύρα εξόδου 2, αφού η πρώτη και η τελευταία τετράδα bits της κωδικής λέξης του σήματος ελέγχου αποτελούνται από μηδενικά. Όσον αφορά το δεύτερο και το τρίτο αντίγραφο της κωδικής λέξης του σήματος εισόδου 2, οι παλμοί των τριών από τα τέσσερα bits κάθε τετράδας θα εξέλθουν ανεπηρέαστοι από τη θύρα εξόδου 2. Αντιθέτως ορισμένα από τα δεύτερα bits της κάθε τετράδας του σήματος εξόδου 2 θα αποτελούνται από παλμούς της δεύτερης και της τρίτης τετράδας του σήματος εισόδου 1 αντιστοίχως. Εν τέλει, το σήμα εξόδου 2 θα έχει ρυθμό 40 Gbps και θα είναι κι αυτό υβριδικής μορφής, δηλαδή θα περιλαμβάνει παλμούς και των δύο σημάτων εισόδου.

Στα σχήματα 4.29 και 4.30 που ακολουθούν παρουσιάζονται στον παλμογράφο τα αντίστοιχα σήματα στις θύρες εξόδου 1 και 2 του UNI, στην περίπτωση που η ισχύς κορυφής των παλμών ελέγχου είναι 4.3 W. Ακόμη, η καθυστέρηση που εισάγεται μέσω των δύο ταυτόσημων ODL στις πηγές παραγωγής του σήματος ελέγχου καθώς και η καθυστέρηση που εισάγεται μέσω της ODL στην πηγή παραγωγής του σήματος εισόδου 2 έχουν ήδη ρυθμιστεί κατά τις δύο πρώτες σειρές προσομοιώσεων στα  $-14$  psec και στα  $-12.3$  psec και δε μεταβάλλονται. Τα εν λόγω σχήματα επιβεβαιώνουν την ορθότητα της λειτουργίας της διάταξης στην κατάσταση μεταγωγής. Στην περίπτωση λειτουργίας της διάταξης ως  $2 \times 2$  διακόπτης μεταγωγής, θα υπολογίζονται δύο τιμές του Extinction Ratio, μία για την κάθε θύρα εξόδου. Έτσι η συγκεκριμένη τιμή ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου, σε συνδυασμό με τις συγκεκριμένες τιμές καθυστέρησης έχουν ως αποτέλεσμα το Extinction Ratio να λάβει τις τιμές των 11.48 dB και 17.23 dB στις θύρες εξόδου 1 και 2 αντιστοίχως.



**Σχήμα 4.29:** Τρίτη σειρά προσομοιώσεων. Σήμα εξόδου 1 ρυθμού 10 Gbps όταν ο  $2 \times 2$  διακόπτης λειτουργεί στην κατάσταση μεταγωγής (cross state).



**Σχήμα 4.30:** Τρίτη σειρά προσομοιώσεων. Σήμα εξόδου 2 ρυθμού 40 Gbps όταν ο  $2 \times 2$  διακόπτης λειτουργεί στην κατάσταση μεταγωγής (cross state).

Ως γνωστόν, οι τιμές της ισχύος κορυφής των παλμών και των δύο σημάτων εξόδου εμφανίζονται σημαντικά μειωμένες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές της ισχύος κορυφής των παλμών των δύο σημάτων εισόδου. Εντούτοις, στη συγκεκριμένη περίπτωση λειτουργίας του  $2 \times 2$  διακόπτη στην κατάσταση μεταγωγής παρατηρείται Amplitude Modulation και στα δύο σήματα εξόδου, δηλαδή διαφορές στην ισχύ κορυφής

των παλμών τους. Αρχικά, οι παλμοί οι οποίοι εξέρχονται ανεπηρέαστοι από τις αντίστοιχες θύρες εξόδου έχουν την ίδια ισχύ κορυφής με εκείνη που είχαν και όταν ο διακόπτης λειτουργούσε στην κατάσταση μη μεταγωγής. Εντούτοις, και στα δύο σήματα εξόδου εμφανίζονται δύο παλμοί μεγαλύτερης ισχύος από τους υπολοίπους. Τα εν λόγω δύο ζεύγη παλμών είναι τα μοναδικά στα οποία λαμβάνει χώρα αμοιβαία αντιμετάθεση από τη μία θύρα εξόδου στη άλλη. Δηλαδή ουσιαστικά ο ένας παλμός αντικαθιστά τον χρονικά αντίστοιχο του στις θύρες εξόδου. Οι παλμοί αυτοί εκτός του ότι εμφανίζουν τη μεγαλύτερη ισχύ κορυφής, είναι και πολύ κακοί ποιοτικά.

Αντιθέτως, υπάρχουν και παλμοί οι οποίοι εξέρχονται μεν εναλλασσόμενοι από τις θύρες εισόδου 1 και 2 στις θύρες εξόδου 2 και 1 αντιστοίχως, αλλά χωρίς αμοιβαία αντιμετάθεση, δηλαδή καταλαμβάνουν τη θέση που κάλυπτε ένα μηδενικό στο αντίστοιχο σήμα εισόδου. Οι εν λόγω παλμοί εμφανίζονται να έχουν μικρότερη ισχύ κορυφής από εκείνους οι οποίοι εξέρχονται ανεπηρέαστοι από τις αντίστοιχες θύρες εξόδου. Λόγω της ύπαρξης Amplitude Modulation, ο υπολογισμός του Extinction Ratio στις δύο θύρες εξόδου γίνεται θεωρώντας τον κοντύτερο παλμό (λογικό άσσο).

Ευθύς αμέσως παρατίθενται τα αποτελέσματα μιας σειράς μετρήσεων απολύτως όμοιας με τις αντίστοιχες των προηγούμενων σειρών προσομοιώσεων, με τον 2×2 διακόπτη να λειτουργεί στην κατάσταση μεταγωγής. Στην εν λόγω σειρά μετρήσεων εξετάζεται η συσχέτιση μεταξύ του Extinction Ratio στις δύο θύρες εξόδου του διακόπτη και της ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου. Κατά τις μετρήσεις αυτές το μήκος των δύο ταυτόσημων ισχυρά μη γραμμικών ινών διατηρείται σταθερό στα 0.8 m, ενώ η ισχύς κορυφής των παλμών ελέγχου μεταβάλλεται σε ένα εύρος τιμών από τα 2.5 W έως τα 6.5 W. Όπως έχει ήδη τονισθεί, ο τριπλός συγχρονισμός των σημάτων εισόδου και ελέγχου έχει ήδη επιτευχθεί κατά τις δύο προηγούμενες σειρές προσομοιώσεων. Έτσι, στην πλειονότητα των περιπτώσεων των ισχύων κορυφής των παλμών ελέγχου, οι τιμές καθυστέρησης που εισάγουν οι ODL δεν μεταβάλλονται. Στις περιπτώσεις όπου υφίστανται μεταβολές προκειμένου να βελτιστοποιηθεί κάποιο από τα δύο Extinction Ratio, αυτές είναι γενικά μικρές.

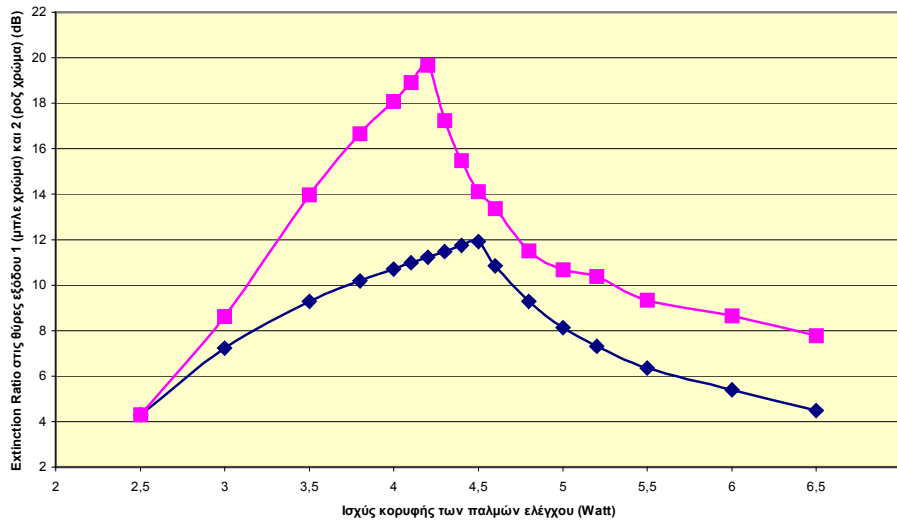
Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι εφόσον μελετούμε τις μεταβολές του ζεύγους των Extinction Ratio, προσπαθούμε κάθε φορά να πετύχουμε κατά το δυνατόν

τον πιο δίκαιο συνδυασμό μεταξύ των δύο Extinction Ratio. Έτσι, μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να χρειαστεί να θυσιάσουμε κάποια dB από το Extinction Ratio στη μία θύρα εξόδου προκειμένου να βελτιστοποιήσουμε το Extinction Ratio στην άλλη θύρα εξόδου. Η “θυσία” αυτή αφορά κατά κύριο λόγο τις τιμές του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 2, οι οποίες είναι σαφώς υψηλότερες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 1. Εν τέλει, για κάθε διαφορετική τιμή της ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου προκύπτουν και οι αντίστοιχες τιμές του Extinction Ratio στις δύο θύρες εξόδου. Ο παρακάτω πίνακας 4.5 συνοψίζει τα αποτελέσματα από την εν λόγω σειρά μετρήσεων.

<b>Ισχύς κορυφής των παλμών ελέγχου (Watt)</b>	<b>Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 1 (dB)</b>	<b>Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 2 (dB)</b>
2.5	4.3	4.29
3	7.23	8.63
3.5	9.29	13.98
3.8	10.2	16.67
4	10.7	18.07
4.1	10.98	18.9
4.2	11.23	19.68
4.3	11.48	17.23
4.4	11.74	15.47
4.5	11.93	14.1
4.6	10.84	13.37
4.8	9.3	11.51
5	8.14	10.69
5.2	7.32	10.38
5.5	6.35	9.34
6	5.4	8.65
6.5	4.49	7.78

**Πίνακας 4.5:** Τρίτη σειρά προσομοιώσεων. Μετρήσεις του Extinction Ratio στις θύρες εξόδου 1 και 2 συναρτήσει της ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου.

Η συσχέτιση μεταξύ του Extinction Ratio στις δύο θύρες εξόδου και της ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου γίνεται περισσότερο εμφανής με τη βοήθεια του σχήματος 4.31, το οποίο παρουσιάζει τις δύο γραφικές παραστάσεις που χαράσσονται στο ίδιο σύστημα αξόνων, με βάση τα στοιχεία του ανωτέρω πίνακα 4.5.



**Σχήμα 4.31: Τρίτη σειρά προσομοιώσεων. Γραφικές παραστάσεις της συσχέτισης μεταξύ του Extinction Ratio στις θύρες εξόδου 1 και 2 και της ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου.**

Παρατηρούμε ότι η μορφή των γραφικών παραστάσεων του σχήματος 4.31 είναι παρόμοια με εκείνη των σχημάτων 4.11 και 4.21 η οποίες αφορούν τις αντίστοιχες μετρήσεις κατά τις προηγούμενες σειρές προσομοιώσεων. Οι τιμές του Extinction Ratio στις δύο θύρες εξόδου που φαίνονται στον πίνακα 4.5 και προκύπτουν όταν η διάταξη λειτουργεί ως 2×2 διακόπτης είναι λίγο μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές που είχαν παρατεθεί στους πίνακες 4.1 και 4.3 όταν η διάταξη λειτουργούσε με ένα από τα δύο σήματα εισόδου κάθε φορά. Οι τιμές του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 2 εμφανίζονται σημαντικά μεγαλύτερες από τις τιμές του Extinction Ratio στη θύρα εξόδου 1. Η αιτία του εν λόγω φαινομένου έχει εξηγηθεί στην προηγούμενη ενότητα. Η μεγιστοποίηση του Extinction Ratio στις θύρες εξόδου 1 και 2 προκύπτει στις ίδιες τιμές ισχύος κορυφής των παλμών ελέγχου που είχαν βρεθεί κατά τις προηγούμενες σειρές προσομοιώσεων, δηλαδή στα 4.5 W και στα 4.2 W αντιστοίχως, ενώ οι επιτευχθείσες μέγιστες τιμές είναι 11.93 dB και 19.68 dB αντιστοίχως.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ 2×2 ΟΠΤΙΚΟΥ ΔΙΑΚΟΠΤΗ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ ΣΤΑ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ ΠΑΚΕΤΟΥ

---

### 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκε με αναλυτικό τρόπο η σχεδίαση, η θεωρητική ανάλυση, η πειραματική υλοποίηση, τα αποτελέσματα του πειράματος καθώς και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του κυκλώματος του αμιγώς οπτικού 2×2 διακόπτη μεταγωγής (2×2 All – Optical Exchange – Bypass Switch). Η υλοποίηση του κυκλώματος του 2×2 οπτικού διακόπτη μεταγωγής εντάσσεται στο ευρύτερο πλαίσιο των πειραμάτων οπτικής λογικής που έχουν ως σκοπό την ανάπτυξη των οπτικών δικτύων μεταγωγής πακέτου. Η οπτική μεταγωγή πακέτου επιτυγχάνει την αποδοτικότερη χρήση του εύρους ζώνης που είναι διαθέσιμο στο δίκτυο, απαλλάσσοντας τους κόμβους από το ηλεκτρονικό “μποτιλιάρισμα” (bottleneck) με την έξυπνη μετατόπιση λειτουργιών στο οπτικό επίπεδο.

Η τυπική μορφή του κόμβου δρομολόγησης (Router) στα οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτου έχει παρουσιασθεί στο σχήμα 1.10 του πρώτου κεφαλαίου, όπου φαίνονται και οι σημαντικότερες λειτουργικές διεργασίες που επιτελεί αυτός ο κόμβος, οι οποίες συνοπτικά είναι οι εξής: δρομολόγηση (Routing), προώθηση (Forwarding), μεταγωγή (Switching), αποθήκευση (Buffering), πολυπλεξία (Multiplexing), συγχρονισμός

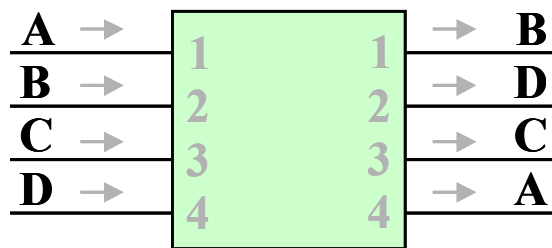
(Synchronization) και αναγέννηση (Regeneration). Ο  $2 \times 2$  διακόπτης μεταγωγής αποτελεί βασική δομική μονάδα για μια πληθώρα οπτικών κυκλωμάτων τα οποία είναι σε θέση να επιτελέσουν πολλές από τις ανωτέρω λειτουργίες ενός κόμβου δρομολόγησης στα οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτου. Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου θα παρατεθούν ενδεικτικά ορισμένες βασικές εφαρμογές του  $2 \times 2$  διακόπτη μεταγωγής σε διάφορες διατάξεις, κάποιες εκ των οποίων έχουν ήδη υλοποιηθεί σε εργαστηριακό επίπεδο. Στο σημείο αυτό υπογραμμίζεται ότι η συγκεκριμένη υλοποίηση του  $2 \times 2$  διακόπτη μεταγωγής με βάση το UNI και την ισχυρά μη γραμμική ίνα μπορεί να προσφέρει πολλά και σημαντικά πλεονεκτήματα και να βελτιώσει τη λειτουργία των εν λόγω διατάξεων.

## 5.2 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ

Μία από τις πιο σημαντικές εφαρμογές του  $2 \times 2$  διακόπτη μεταγωγής συνίσταται στην υλοποίηση οπτικών στοιχείων διασύνδεσης (Optical Cross/Connects – OXC) [40]. Ένα οπτικό στοιχείο διασύνδεσης έχει, στη γενική περίπτωση  $N$  εισόδους και  $M$  εξόδους, όπου τα  $M$  και  $N$  είναι συνήθως μεγάλοι αριθμοί και συνιστά τον πίνακα μεταγωγής (Switching Matrix) [11], [41] σε έναν κόμβο δρομολόγησης. Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο, το OXC επιτελεί τη λειτουργία της μεταγωγής στον κόμβο, δηλαδή είναι επιφορτισμένο να μετάγει σήματα από οποιαδήποτε από τις  $N$  εισόδους σε οποιαδήποτε από τις  $M$  εξόδους σύμφωνα με τις πληροφορίες από τη διαδικασία προώθησης που έχει προηγηθεί. Να σημειωθεί ότι αν χρησιμοποιούνται εσωτερικά διαφορετικά μήκη κύματος για πιο αποτελεσματική μεταγωγή, είναι απαραίτητες διατάξεις μετατροπής μήκους κύματος μέσα στο δρομολογητή, ώστε σε συνδυασμό με τη χρήση οπτικών φίλτρων, να οδηγείται κάθε ροή δεδομένων στην κατάλληλη έξοδο. Ένα OXC μπορεί να κατασκευαστεί από συστοιχίες κατάλληλα συνδεδεμένων μεμονωμένων  $2 \times 2$  οπτικών διακοπών σε κατάλληλες τοπολογίες.

Πρωτίστως, θα αναφερθούμε στην περίπτωση της διάταξης ενός  $N \times N$  διακόπτη οποιασδήποτε διάστασης. Ως  $N \times N$  ορίζεται γενικά ένας διακόπτης όταν έχει  $N$  θύρες εισόδου και  $N$  θύρες εξόδου. Συγκεκριμένα, ένας διακόπτης ονομάζεται  $N \times N$  διακόπτης μεταγωγής όταν τα σήματα στις  $N$  εισόδους του μπορούν να εξέρχονται κατά βούληση

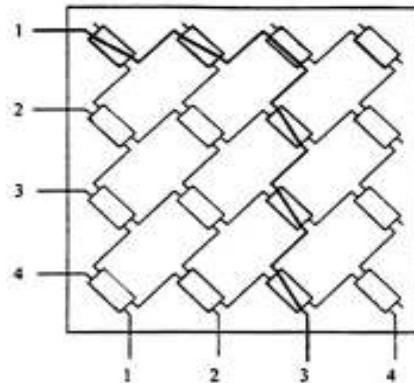
από οποιεσδήποτε από τις  $N$  εξόδους του, χωρίς όμως δύο σήματα εισόδου να εμφανίζονται ταυτόχρονα στην ίδια έξοδο. Στο παρακάτω σχήμα 5.1 παρουσιάζεται η περίπτωση  $N \times N$  διακόπτη για  $N = 4$ . Στο σχήμα αυτό φαίνεται και ένα παράδειγμα μεταγωγής των σημάτων εισόδου A, B, C και D από τις θύρες εισόδου 1, 2, 3 και 4 στις θύρες εξόδου 4, 1, 3 και 2 αντιστοίχως.



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα και λειτουργία ενός  $4 \times 4$  διακόπτη μεταγωγής.

Χρησιμοποιώντας κατάλληλο αριθμό  $2 \times 2$  διακοπών μεταγωγής, είναι δυνατό να σχηματιστεί ένας  $N \times N$  διακόπτης. Κάποιες από τις πιο γνωστές τοπολογίες με τις οποίες μπορούν να σχηματιστούν  $N \times N$  διακόπτες μεταγωγής είναι οι εξής: Ο διακόπτης τύπου Crossbar, ο οποίος χρειάζεται  $N^2$  το πλήθος  $2 \times 2$  διακόπτες μεταγωγής, ο διακόπτης τύπου Clos, ο οποίος χρειάζεται  $4\sqrt{2N^3} - 4N$  το πλήθος  $2 \times 2$  διακόπτες μεταγωγής και ο διακόπτης τύπου Beneš, ο οποίος χρειάζεται  $\frac{N}{2}(2\log_2 N - 1)$  το πλήθος  $2 \times 2$  διακόπτες μεταγωγής, με το  $N$  στην τελευταία περίπτωση να είναι δύναμη του 2.

Στο σχήμα 5.2 που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα παράδειγμα ενός οπτικού στοιχείου διασύνδεσης (OXC) μικρής κλίμακας, με βάση έναν  $N \times N$  διακόπτη όπου  $N = 4$ , σε Crossbar τοπολογία  $2 \times 2$  διακοπών μεταγωγής. Σε πραγματικές υλοποιήσεις OXCs τέτοιου τύπου, το  $N$  θα πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερο. Ο  $4 \times 4$  Crossbar διακόπτης του συγκεκριμένου παραδείγματος χρησιμοποιεί  $4^2 = 16$  το πλήθος  $2 \times 2$  διακόπτες και η σύνδεση μιας εισόδου με την επιθυμητή έξοδο γίνεται με κατάλληλη ρύθμιση των καταστάσεων των επιμέρους διακοπών, με βάση τα στοιχεία του πίνακα μεταγωγής (Switching Matrix). Στο σχήμα 5.2 φαίνονται και οι κατάλληλες συνδέσεις (ένα πιθανό σύνολο), ώστε να εξέρχεται το σήμα της εισόδου 1 από την έξοδο 3.

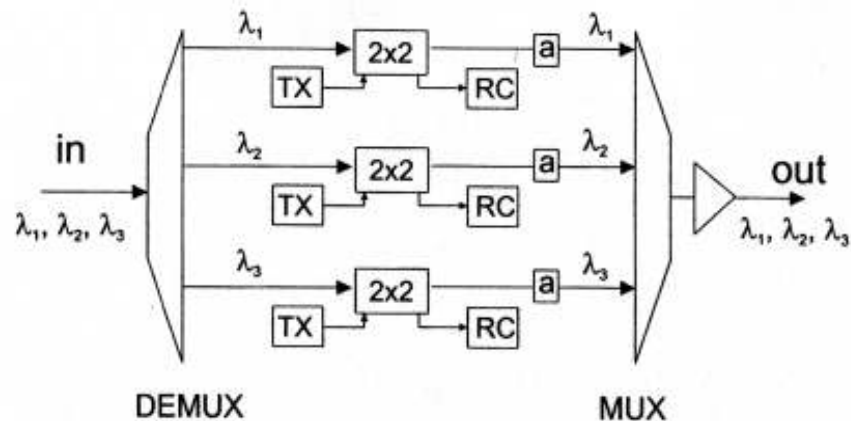


Σχήμα 5.2: Οπτικό στοιχείο διασύνδεσης (OXC) μικρής κλίμακας, με βάση έναν 4x4 διακόπτη μεταγωγής σε crossbar τοπολογία.

### 5.3 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΠΟΛΥΠΛΕΚΤΩΝ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ – ΑΦΑΙΡΕΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η υλοποίηση των οπτικών πολυπλεκτών προσθήκης/αφαίρεσης δεδομένων (Optical Add/Drop Multiplexers – OADMs) μπορεί επίσης να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας 2x2 διακόπτες σε κατάλληλες τοπολογίες. Ένας οπτικός πολυπλέκτης προσθήκης/αφαίρεσης δεδομένων παίρνει ως είσοδο ένα πολυπλεγμένο σήμα και μπορεί να αφαιρέσει ένα ή και παραπάνω από τα κανάλια του πολυπλεγμένου σήματος, επιτρέποντας στα υπόλοιπα να περάσουν. Αντίστοιχα, μπορεί να προσθέσει ένα ή περισσότερα νέα κανάλια στο πολυπλεγμένο σήμα στις θέσεις εκείνων που αφαιρέθηκαν, προκειμένου αυτά να φτάσουν σε επόμενο κόμβο. Η λειτουργία του OADM είναι ανάλογη με το είδος της πολυπλεξίας που εφαρμόζεται (πολυπλεξία χρόνου – OTDM ή πολυπλεξία μήκους κύματος – WDM).

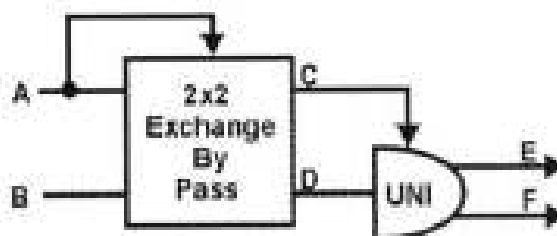
Ένα παράδειγμα ενός τέτοιου OADM στην περίπτωση που χρησιμοποιείται πολυπλεξία μήκους κύματος (και πιθανόν και χρόνου σε κάθε λ) φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 5.3. Οι 2x2 διακόπτες αφαιρούν από κάθε μήκος κύματος δεδομένα και ταυτόχρονα προσθέτουν νέα κατά βούληση. Με “a” απεικονίζονται εξασθενητές, οι οποίοι ρυθμίζουν την ισχύ του κάθε μήκους κύματος ώστε να είναι ακριβώς ίσες πριν πολυπλεχτούν στην κύρια ροή μετάδοσης. Να σημειωθεί ότι σε WDM οπτικά δίκτυα οι OADMs μπορούν να επιτελέσουν μετατροπή μήκους κύματος (Wavelength Conversion).



Σχήμα 5.3: Οπτικός πολυπλέκτης προσθήκης/αφαίρεσης δεδομένων (OADM), στην περίπτωση που χρησιμοποιείται WDM πολυπλεξία.

## 5.4 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΗΜΙΑΘΡΟΙΣΤΩΝ

Ο 2x2 οπτικός διακόπτης μεταγωγής αποτελεί βασική δομική μονάδα υλοποίησης της διάταξης ημιαθροιστή (Half – Adder) δύο οπτικών σημάτων. Ευθύς αμέσως θα παρουσιασθεί μια διάταξη η οποία έχει ήδη υλοποιηθεί σε εργαστηριακό επίπεδο [42] και η οποία εκτελεί τέσσερις λογικές (Boolean) πράξεις συμπεριλαμβανομένης και της λειτουργίας του ημιαθροιστή. Στο παρακάτω σχήμα 5.4 φαίνεται το δομικό διάγραμμα της εν λόγω διάταξης, ενώ ο πίνακας 5.1 που ακολουθεί συνιστά τον αντίστοιχο πίνακα αληθείας. Η διάταξη η οποία έχει υλοποιηθεί λειτουργεί με σήματα εισόδου ρυθμού 10 Gbps, αλλά η λειτουργία της σε υψηλότερους ρυθμούς είναι επιτεύξιμη.



Σχήμα 5.4: Δομικό διάγραμμα διάταξης ημιαθροιστή.

A	B	C	D	E	F
0	0	0	0	0	0
0	1	0	1	1	0
1	0	0	1	1	0
1	1	1	1	0	1
–	–	AND	OR	SUM	CARRY

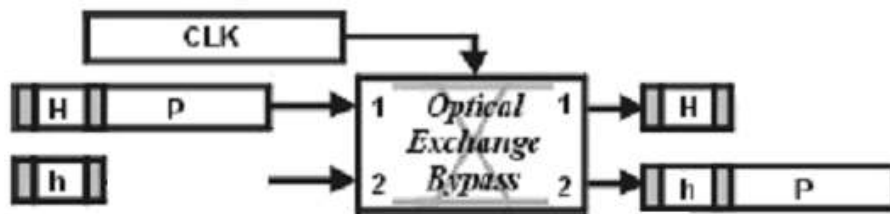
**Πίνακας 5.1: Πίνακας αληθείας της διάταξης ημιαθροιστή.**

Πρόκειται για μια διάταξη η οποία αποτελείται από δύο UNI σε σειρά, μιας και ο  $2 \times 2$  οπτικός διακόπτης μεταγωγής έχει υλοποιηθεί με βάση το UNI. Να σημειωθεί ότι για να λειτουργήσει η διάταξη δεν απαιτούνται επιπλέον σήματα ελέγχου, αφού το ρόλο του σήματος ελέγχου του  $2 \times 2$  διακόπτη μεταγωγής παίζει το σήμα εισόδου A, ενώ το ρόλο του σήματος ελέγχου του UNI που ακολουθεί παίζει το σήμα C. Όπως φαίνεται και στον ανωτέρω πίνακα αληθείας, τα δύο σήματα εξόδου C και D του  $2 \times 2$  διακόπτη συνιστούν τα αποτελέσματα των λογικών πράξεων AND και OR αντιστοίχως μεταξύ των δύο σημάτων εισόδου A και B. Το δεύτερο UNI λειτουργεί με ένα σήμα εισόδου, το οποίο είναι το σήμα εξόδου D του  $2 \times 2$  διακόπτη που προηγείται. Εν τέλει, το σήμα εξόδου E του UNI συνιστά το αποτέλεσμα της λογικής πράξης XOR μεταξύ των δύο σημάτων εισόδου A και B, δηλαδή συνιστά το σήμα εξόδου αθροίσματος (SUM) του ημιαθροιστή. Αντιστοίχως το σήμα εξόδου F του UNI συνιστά το αποτέλεσμα της λογικής πράξης AND μεταξύ των δύο σημάτων εισόδου A και B, δηλαδή συνιστά το σήμα εξόδου κρατουμένου (CARRY) του ημιαθροιστή.

Να σημειωθεί ότι η διάταξη του ημιαθροιστή αποτελεί τη βασική δομική μονάδα με την οποία υλοποιούνται διάφορες διατάξεις πολλαπλών πυλών, οι οποίες μπορούν να υλοποιήσουν πιο σύνθετες λογικές λειτουργίες, όπως ο πλήρης αθροιστής (Full – Adder), ο μετρητής (Counter) ή ο ελεγκτής ισοτιμίας (Parity Checker). Εντούτοις, η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των εν λόγω οπτικών κυκλωμάτων σε θέματα όπως η αποδοτικότητα της ισχύος, ο αριθμός των λογικών πυλών καθώς και ο αριθμός των απαιτούμενων σημάτων εισόδου, τα οποία θα οδηγήσουν στην αύξηση της ταχύτητας λειτουργίας, ακόμη παραμένει ένα ζητούμενο.

## 5.5 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΑΦΑΙΡΕΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΑΝΑΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΕΠΙΚΕΦΑΛΙΔΑΣ ΠΑΚΕΤΩΝ

Μία ακόμη ιδιαίτερα σημαντική διάταξη η οποία χρησιμοποιεί έναν 2×2 οπτικό διακόπτη μεταγωγής ως βασική μονάδα υλοποίησής της αποτελεί το κύκλωμα αφαίρεσης και επανατοποθέτησης επικεφαλίδας οπτικών πακέτων αυθαιρέτου μήκους, με αμιγώς οπτικό τρόπο (Packet Header Erasing and Reinsertion). Μια τέτοια διάταξη έχει ήδη υλοποιηθεί σε εργαστηριακό επίπεδο [23], [24] και το δομικό διάγραμμα της παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.5: Δομικό διάγραμμα διάταξης αφαίρεσης – επανατοποθέτησης επικεφαλίδας πακέτων.

Η διάταξη λειτουργεί σε ρυθμό 10 Gbps και σε επίπεδο bit (bitwise), ενώ κάθε οπτικό πακέτο αποτελείται από δύο τμήματα. Συγκεκριμένα, ένας αριθμός από bits στην αρχή κάθε πακέτου αποτελούν το τμήμα της επικεφαλίδας (Header) ενώ τα υπόλοιπα bits του πακέτου συνιστούν την πληροφορία (Payload). Όπως φαίνεται στο ανωτέρω σχήμα, το αρχικό πακέτο εισέρχεται στην θύρα εισόδου 1 ενός 2×2 οπτικού διακόπτη μεταγωγής, ο οποίος έχει υλοποιηθεί με βάση το UNI, ενώ η αρχική του επικεφαλίδα συμβολίζεται με “H”. Αντιστοίχως, η νέα επικεφαλίδα εισέρχεται στη θύρα εισόδου 2 του 2×2 διακόπτη και συμβολίζεται με “h”.

Το σήμα ρολογιού (Clock) το οποίο ελέγχει τη λειτουργία του 2×2 διακόπτη έχει προκύψει από μια διαδικασία ανάκτησης ρολογιού (Clock Recovery). Το υποκύκλωμα ανάκτησης ρολογιού αποτελείται από ένα φίλτρο Fabry – Perot (FP) και από ένα δεύτερο UNI, ενώ το σήμα εισόδου του είναι το αρχικό οπτικό πακέτο. Το φίλτρο Fabry – Perot χρησιμεύει ώστε να “γεμίσει” τα μηδενικά του πακέτου εισόδου με άσους, παρέχοντας ένα σήμα που προσομοιάζει ένα πακέτο ρολογιού (αλληλουχία συνεχόμενων άσων) με μεγάλο Amplitude Modulation. Το εν λόγω σήμα εξόδου του φίλτρου FP τροφοδοτείται

στο UNI που ακολουθεί ως το σήμα ελέγχου, με σκοπό να εξομαλυνθεί το Amplitude Modulation. Έτσι, το σήμα εξόδου του UNI θα συνιστά το ανακτημένο πακέτο ρολογιού, το οποίο έχει χρονική διάρκεια όση και το αρχικό οπτικό πακέτο εισόδου και χρησιμοποιείται ως σήμα ελέγχου στον 2×2 διακόπτη μεταγωγής.

Το αρχικό πακέτο εισόδου με την παλιά επικεφαλίδα (H) καθώς και η νέα επικεφαλίδα (h) συγχρονίζονται προτού τροφοδοτηθούν στις δύο εισόδους του 2×2 διακόπτη, ενώ το ανακτημένο πακέτο ρολογιού, το οποίο χρησιμοποιείται ως σήμα ελέγχου στον 2×2 διακόπτη, υφίσταται χρονική καθυστέρηση όση είναι η χρονική διάρκεια της επικεφαλίδας του πακέτου. Συνεπώς, ο 2×2 διακόπτης λειτουργεί στην κατάσταση μη μεταγωγής (Bar State) όταν εισέρχονται σε αυτόν οι δύο επικεφαλίδες (H και h) και στην κατάσταση μεταγωγής (Cross State) όταν εισέρχεται σε αυτόν το τμήμα της πληροφορίας του πακέτου εισόδου (P), καθώς μόνο αυτό το τμήμα πέφτει στο “παράθυρο μεταγωγής” (Switching Window) του σήματος ελέγχου. Ως αποτέλεσμα, οι δύο επικεφαλίδες (H και h) εξέρχονται ανεπηρέαστες από τις αντίστοιχες θύρες εξόδου 1 και 2 του 2×2 διακόπτη, ενώ το τμήμα πληροφορίας (P) του πακέτου εξέρχεται από τη θύρα εξόδου 2, ακριβώς μπροστά από τη νέα επικεφαλίδα (h). Να σημειωθεί ότι τα γκρίζα πεδία στο μπροστά και στο πίσω τμήμα των επικεφαλίδων συνιστούν τα απαιτούμενα διαστήματα Guardband για την εν λόγω λειτουργία, τα οποία καθορίζονται από τα χαρακτηριστικά του κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού.

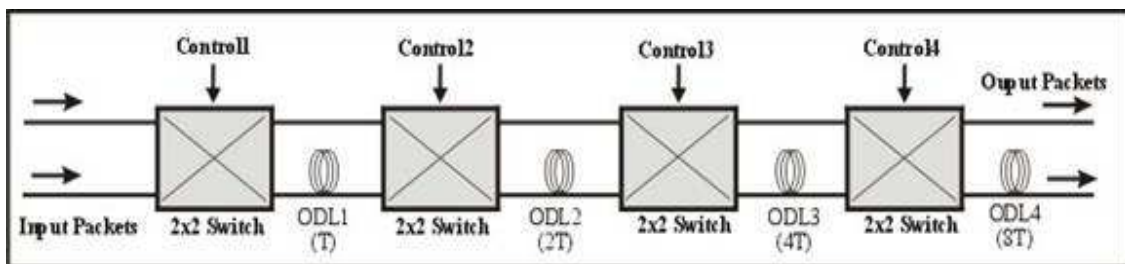
Η συγκεκριμένη διάταξη αφαίρεσης και επανατοποθέτησης επικεφαλίδας μπορεί να εφαρμοσθεί σε αρχιτεκτονικές δικτύων μεταγωγής πακέτου σχεδιασμένες για μικρές απαιτήσεις αποθήκευσης (Buffering) και είναι ικανή να φέρει εις πέρας τη λειτουργία της προώθησης (Forwarding) των πακέτων στους κόμβους δρομολόγησης. Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας αρχιτεκτονικής βασίζεται στο Πρωτόκολλο Εκτροπής Εικονικών Κυκλωμάτων (Virtual Circuit Deflection Protocol – VCD) [12]. Με βάση αυτή την αρχιτεκτονική, αν η χωρητικότητα μιας ενδιάμεσης ζεύξης μεταξύ δύο κόμβων δεν μπορεί να καλύψει την εισερχόμενη κίνηση πακέτων, επιλέγεται μία εναλλακτική διαδρομή. Η εναλλακτική διαδρομή μπορεί να επιλεγεί με ντετερμινιστικό τρόπο και τότε μία νέα, αλλά γνωστή εκ των προτέρων επικεφαλίδα πρέπει να τοποθετηθεί σε κάθε εισερχόμενο πακέτο στον κόμβο.



## 5.6 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΑΝΤΙΜΕΤΑΘΕΣΗΣ ΧΡΟΝΟΣΧΙΣΜΩΝ

Ο  $2 \times 2$  διακόπτης μεταγωγής μπορεί να αποτελέσει τη βασική δομική μονάδα υλοποίησης μιας αμιγώς οπτικής διάταξης η οποία επιτυγχάνει την αναδιάταξη των εισερχόμενων πακέτων σε ένα κόμβο σε διαφορετικές χρονοσχισμές (Time Slot Interchanger – TSI). Γενικά, σε ένα δίκτυο μεταγωγής πακέτου, κάθε πακέτο πρέπει να διέλθει από έναν αριθμό κόμβων έως ότου φτάσει στον προορισμό του. Έτσι, κάθε στιγμή σε κάθε κόμβο εισέρχονται πακέτα από διαφορετικές θύρες εισόδου, καθένα από τα οποία κατευθύνεται προς μία θύρα εξόδου. Όταν δύο ή περισσότερα πακέτα προσπαθούν να εξέλθουν από τον κόμβο μέσω της ίδιας θύρας εξόδου την ίδια χρονική στιγμή (χρονοσχισμή), τότε συμβαίνει σύγκρουση (Contention). Προκειμένου να αποφευχθούν οι συγκρούσεις κατά τη δρομολόγηση είναι δυνατόν στην είσοδο του κόμβου να αναδιατάσσονται τα πακέτα σε διαφορετικές χρονοσχισμές ανάλογα με τον προορισμό τους [44].

Η λειτουργία της αντιμετάθεσης χρονοσχισμών μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση διαδοχικών  $2 \times 2$  διακοπών μεταγωγής. Στο παρακάτω σχήμα 5.6 παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμα μιας ενδεικτικής διάταξης η οποία περιλαμβάνει τέσσερα στάδια σε σειρά, καθένα από τα οποία αποτελείται από ένα  $2 \times 2$  διακόπτη ακολουθούμενο από δύο κλάδους, ένας από τους οποίους εισάγει την κατάλληλη καθυστέρηση.



Σχήμα 5.6: Δομικό διάγραμμα διάταξης αντιμετάθεσης χρονοσχισμών πακέτων (TSI).

Συγκεκριμένα, μεταξύ δύο συνεχόμενων διακοπών υπάρχουν δύο δυνατές διαδρομές διαφορετικού μήκους, έτσι ώστε να παρέχουν διαφορετική καθυστέρηση, μέσω κατάλληλων ODL, ίση με  $(2^x - 1) \cdot T$ , όπου  $x$  είναι ο αριθμός του σταδίου και  $T$  είναι το

μήκος (η χρονική διάρκεια) της χρονοσχισμής. Η συνολική καθυστέρηση που θα υποστεί ένα συγκεκριμένο πακέτο εξαρτάται από την κατάσταση (μη μεταγωγής ή μεταγωγής) κάθε  $2 \times 2$  διακόπτη, όταν το πακέτο διέρχεται από αυτόν.

## 5.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Είδαμε στις προηγούμενες ενότητες του κεφαλαίου ορισμένα παραδείγματα οπτικών διατάξεων στις οποίες ο  $2 \times 2$  οπτικός διακόπτης μεταγωγής μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βασική δομική μονάδα. Η συγκεκριμένη υλοποίηση του  $2 \times 2$  διακόπτη μεταγωγής με βάση το UNI και την ισχυρά μη γραμμική ίνα μπορεί να προσφέρει πολλά και σημαντικά πλεονεκτήματα. Η λειτουργία του διακόπτη είναι αμιγώς οπτική και δεν εξαρτάται από το μήκος των πακέτων εισόδου, καθώς το κύκλωμα εργάζεται σε επίπεδο bit (bitwise). Όπως έχει ήδη τονισθεί σε προηγούμενα κεφάλαια, οι διατάξεις που χρησιμοποιούν μη γραμμικές ίνες υπερέχουν έναντι εκείνων που χρησιμοποιούν ημιαγωγούς (SOA) αφού δεν απαιτούν ηλεκτρική πόλωση ενώ και ο χρόνος απόκρισης που επιτυγχάνεται είναι πολύ μικρός (μερικά fsec).

Η χρησιμοποίηση μόλις 0.8 m ισχυρά μη γραμμικής ίνας οξειδίου του Βισμούθιου εγγυάται λειτουργική σταθερότητα του διακόπτη, αμελητέα διαφορά ταχυτήτων των συνδιαδιδόμενων οπτικών σημάτων διαφορετικού μήκους κύματος (walk – off) στο εσωτερικό της ίνας, καθώς και πολύ μικρή καθυστέρηση λειτουργίας. Ειδικά ο παράγοντας της καθυστέρησης είναι ιδιαίτερα κρίσιμος σε διατάξεις επεξεργασίας σήματος με ανάδραση (Feedback). Η πρακτικά αλάνθαστη (error – free) λειτουργία του διακόπτη που επετεύχθη κατά τη διεξαγωγή του πειράματος σε συνδυασμό με τις χαμηλές τιμές του penalty υποδεικνύουν ότι μπορούν να υλοποιηθούν διατάξεις με αλληλουχίες τέτοιων διακοπών αλλά και διατάξεις με ανάδραση, χωρίς να απαιτείται αναγέννηση του σήματος.

Από όλα τα ανωτέρω καθίσταται προφανές ότι ένας τέτοιου τύπου  $2 \times 2$  αμιγώς οπτικός διακόπτης μεταγωγής μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να υλοποιηθούν συνθετότερες αμιγώς οπτικές διατάξεις με βελτιωμένη λειτουργική συμπεριφορά, με τελικό σκοπό την ανάπτυξη των οπτικών δικτύων μεταγωγής πακέτου.

# ΑΝΑΦΟΡΕΣ

---

- [1] Ηρακλής Αβραμόπουλος, “Φωτονική Τεχνολογία για Τηλεπικοινωνίες”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- [2] Andrew S. Tanenbaum, “Δίκτυα Υπολογιστών”, Prentice Hall, Τρίτη έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2000.
- [3] Paul E. Green, “Δίκτυα Οπτικών Ινών”, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 1994.
- [4] Ιάκωβος Στ. Βενιέρης, “Επισκόπηση Συστημάτων Μεταγωγής Πληροφορίας”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π. , Αθήνα 2004.
- [5] A. Borella et al., “Statistical multiplexing of random processes in packet switching networks”, IEEE Proceedings on Commun., Vol. 143, No. 5, pp. 325 – 334, 1996.
- [6] Jim Guichard, Ivan Pepelnjak, “MPLS and VPN Architectures: A Practical Guide to Understanding, Designing and Deploying MPLS and MPLS – Enabled VPNs”, Cisco Press, First Edition, 2000.
- [7] Νικόλαος Κ. Ουζούνογλου, “Τηλεπικοινωνίες Οπτικών Ινών”, Εκδόσεις Συμεών, 1990.
- [8] Gerard Lachs, “Fiber Optic Communications. Systems, Analysis and Enhancements”, McGraw – Hill Telecommunications, 1998.
- [9] Walter J. Goralski, “Sonet/SDH”, McGraw Hill, Third Edition, 2002.
- [10] Shun Yao, S. J. Ben Yoo and Biswanath Mukherjee, “All – optical packet switching for Metropolitan Area Networks: Opportunities and Challenges”, IEEE Communications Magazine, pp. 142 – 148, March 2001.

- 
- [11] Rajiv Ramaswami, Kumar N. Sivarajan, “Optical Networks. A Practical Perspective”, Second Edition, Academic Press, 2002.
- [12] Emmanouel A. Varvarigos and Jonathan P. Lang, “A Virtual Circuit Deflection Protocol”, IEEE/ACM Transactions On Networking, Vol. 7, No. 3, pp. 335 – 349, June 1999.
- [13] G. Theophilopoulos, M. Kalyvas, C. Bintjas, N. Pleros, K. Yiannopoulos, A. Stavdas, H. Avramopoulos and G. Guekos, “Optically Addressable 2×2 Exchange Bypass Packet Switch”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 14, No. 7, pp. 998 – 1000, July 2002.
- [14] M. Kalyvas, G. Theophilopoulos, C. Bintjas, N. Pleros, A. Stavdas, H. Avramopoulos, “2×2 All – Optical Exchange – Bypass Switch”, IEEE/LEOS, TuC3 – 13 – TuC3 – 14, Quebec 2002.
- [15] G.P. Agrawal, “Nonlinear fiber optics”, Boston: Academic Press, 1989.
- [16] I. Glesk, R. J. Runser, P. R. Prucnal, “New Generation of Devices for All – Optical Communications”, Acta Physica Slovaca, Vol. 51, No. 2, pp. 151 – 162, April 2001.
- [17] K. Tajima, S. Nakamura and Y. Sugimoto, “Ultrafast polarization – discriminating Mach – Zehnder all – optical switch”, Applied Physics Letters, Vol. 67, No. 25, pp. 3709 – 3711, December 1995.
- [18] K. L. Hall and K. A. Rauschenback, “100 Gbit/s bitwise logic”, MIT Lincoln Laboratory, Optics Letters, Vol. 23, No. 16, pp. 1271 – 1273, August 1998.
- [19] N. Sugimoto, T. Nagashima, T. Hasegawa, S. Ohara, K. Taira, and K. Kikuchi, “Bismuth – based optical fiber with nonlinear coefficient of  $1360 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ ”, presented at OFC 2004, Los Angeles, California, USA, paper PDP26.
- [20] C. Bintjas, K. Vlachos, N. Pleros and H. Avramopoulos, “Ultrafast Nonlinear Interferometer (UNI) – Based Digital Optical Circuits and Their Use in Packet Switching”, Journal of Lightwave Technology, Vol. 21, No. 11, pp. 2629 – 2637, November 2003.
- [21] C. Bintjas, M. Kalyvas, G. Theophilopoulos, T. Stathopoulos, H. Avramopoulos, L. Occhi, L. Schares, G. Guekos, S. Hansmann and R. Dall’Ara, “20 Gb/s All –

- Optical XOR with UNI Gate”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 12, No. 7, pp. 834 – 836, July 2000.
- [22] Γεώργιος Β. Θεοφιλόπουλος, “Αμιγώς Οπτική Μεταγωγή Πακέτων για Ψηφιακά Δίκτυα Υπερυψηλών Ταχυτήτων. Πορεία προς την Υλοποίηση”, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 2003.
- [23] D. Tsiokos, E. Kehayas, G. T. Kanellos, L. Stampoulidis, G. Guekos and H. Avramopoulos, “All – Optical 10 Gb/s Header Replacement for Variable Length Data Packets”, presented at ECOC 2003, Tech. Dig., We4. P83, Rimini, Italy, 2003.
- [24] Παρασκευάς Γ. Μπακόπουλος, “Εξαγωγή και Επανατοποθέτηση Επικεφαλίδας Οπτικών Πακέτων Πληροφορίας με Αμιγώς Οπτικό Τρόπο”, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2003.
- [25] T. Inoue, T.Yagi and S. Namiki, “Highly Nonlinear Fiber Devices for Optical Networks”, in Proc. Lasers and Electro – Optics Society (LEOS) Annual Meeting, Sydney, Australia, 2005, pp. 157 – 158, MO4.
- [26] T.M. Monro, D.J. Richardson, “Holey optical fibres: Fundamental properties and device applications”, C. R. Physique 4, pp. 175 – 186, 2003.
- [27] P. Petropoulos, H. Ebendorff – Heidepriem, V. Finazzi, R.C. Moore, K. Frampton, D.J. Richardson, T.M. Monro, “Highly nonlinear and anomalously dispersive lead silicate glass holey fibers”, Optics Express, Vol. 11, No. 26, pp. 3568 – 3573, December 2003.
- [28] H. Ebendorff – Heidepriem, P. Petropoulos, S. Asimakis, V. Finazzi, R.C. Moore, K. Frampton, F. Koizumi, D.J. Richardson, T.M. Monro, “Bismuth glass holey fibers with high nonlinearity”, Optics Express, Vol. 12, No. 21, pp. 5082 – 5087, October 2004.
- [29] J. H. Lee, Z. Yusoff, W. Belardi, T. M. Monro, P. C. Thh and D. J. Richardson, “A holey fibre Raman amplifier and all – optical modulator”, presented at ECOC 2001, Netherlands, Amsterdam, 2001, PDA1.1.
- [30] N. Sugimoto, H. Kanbara, S. Fujiwara, K. Tanaka, Y. Shimizugawa and K. Hirao, “Third – order optical nonlinearities and their ultrafast response in  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  –

- $B_2O_3 - SiO_2$  glasses”, Optical Society of America, JOSA B, Vol. 16, No.11, pp. 1904 – 1908, 1999.
- [31] Y. Kuroiwa, N. Sugimoto, K. Ochiai, S. Ohara, Y. Furusawa, S. Ito, S. Tanabe, and T. Hanada, “Fusion spliceable and high efficient  $Bi_2O_3$  – based EDF for short length and broadband application pumped at 1480 nm”, presented at OFC 2001, Anaheim, California, USA, 2001, paper TuI5.
- [32] J.H. Lee, W. Belardi, K. Furusawa, P. Petropoulos, Z. Yusoff, T.M. Monro, and D.J. Richardson, “Fourwave mixing based 10 – Gb/s tunable wavelength conversion using a holey fiber with a high SBS threshold”, IEEE Photon. Techn. Lett. 15, pp. 440 – 442, 2003.
- [33] T. Okuno, M. Onishi, T. Kashiwada, S. Ishikawa, and M. Nishimura, “Silica – based functional fibers with enhanced nonlinearity and their applications”, IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron. 5, pp. 1385 – 1391, 1999.
- [34] A. Mori, K. Shikano, W. Enbutsu, K. Oikawa, K. Naganuma, M. Kato, and S. Aozasa, “1.5  $\mu m$  band zerodispersion shifted tellurite photonic crystal fibre with a nonlinear coefficient of  $675 W^{-1}km^{-1}$ ”, presented at ECOC 2004, Stockholm, Sweden, 5 – 9 September 2004, Th3.3.6.
- [35] K. Kikuchi, K. Taira, and N. Sugimoto, “Highly nonlinear bismuth oxide – based glass fibers for all – optical signal processing”, Electron. Lett. 38, pp. 166 – 167, 2002.
- [36] O. Zouraraki, P. Bakopoulos, K. Vyrsoinos and H. Avramopoulos, “Optically Controlled 2×2 Exchange/Bypass Switch with 0.8 m of Bismuth Oxide Nonlinear Fibre”, to be presented in ECOC 2006, Cannes, France, 2006.
- [37] J.H. Lee, K. Kikuchi, T. Nagashima, T. Hasegawa, S. Ohara, and N. Sugimoto, “All fiber – based 160 – Gbit/s add/drop multiplexer incorporating a 1 – m – long Bismuth Oxide – based ultra – high nonlinearity fiber”, Optics Express, Vol. 13, No. 18, pp. 6864 – 6869, September 2005.
- [38] J.H. Lee, K. Kikuchi, T. Nagashima, T. Hasegawa, S. Ohara, and N. Sugimoto, “All – fiber 80 – Gbit/s wavelength converter using 1 – m – long Bismuth Oxide

- 
- based nonlinear optical fiber with a nonlinearity  $\gamma$  of  $1100 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ ”, *Optics Express*, Vol. 13, No. 8, pp. 3144 – 3149, April 2005.
- [39] S. Nakamura, K. Tajima and Y. Sugimoto, “Experimental investigation on high – speed switching characteristics of a novel symmetric Mach – Zehnder all – optical switch”, *Applied Physics Letters*, Vol. 65, No. 3, pp. 283 – 285, July 1994.
- [40] Yuanyuan Yang and Jianchao Wang, “WDM optical switching networks using sparse crossbars”, in *Proc. IEEE INFOCOM*, March 2004.
- [41] D. Chiaroni et.al, “First demonstration of an asynchronous optical packet switching matrix prototype for multiterabit – class routers/switches”, presented at *ECOC 2001*, Vol. 6 , No. 30, pp. 60 – 61, 2001.
- [42] D. Tsiokos, E. Kehayas, K. Vyrsoinos, T. Houbavlis, L. Stampoulidis, G. T. Kanellos, N. Pleros, G. Guekos, and H. Avramopoulos, “10 – Gb/s All – Optical Half – Adder With Interferometric SOA Gates”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 16, No. 1, pp. 284 – 286, January 2004.
- [43] C. Bintjas, K. Yiannopoulos, N. Pleros, G. Theophilopoulos, M. Kalyvas, H. Avramopoulos and G. Guekos, “Clock Recovery Circuit for Optical Packets”, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 14, No. 9, September 2002.
- [44] Emmanouel A. Varvarigos, “The “Packing” and the “Scheduling Packet” Switch Architectures for Almost All – Optical Lossless Networks”, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 16, No. 10, pp. 1757 – 1767, October 1998.