



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ**  
**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Τεχνολογίες υψηλών συστημάτων Ethernet (800G και άνω)**

**ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΧΡΟΝΟΠΟΥΛΟΣ**  
**A.M. 711131094**

**Εισηγητής: Δρ Αντώνιος Μπόγρης, Καθηγητής**

**Αθήνα, Ιούλιος 2023**



Τεχνολογίες υψίρρυθμων συστημάτων Ethernet (800G και άνω)

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Τεχνολογίες υψίρρυθμων συστημάτων Ethernet (800G και άνω)**

**Νικόλαος Χρονόπουλος  
Α.Μ. 711131094**

**Εισηγητής:**

**Δρ Αντώνιος Μπόγρης, Καθηγητής**

**Εξεταστική Επιτροπή:**

**Νικόλαος Μυριδάκης, Επίκουρος Καθηγητής  
Νικόλαος Ψαρράς, Λέκτορας Εφαρμογών**

**Ημερομηνία εξέτασης 10/7/2023**



## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Νικόλαος Χρονόπουλος του Ανδρέα, με αριθμό μητρώου 711131094 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Υπολογιστών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Διπλωματικής εργασίας και κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών,  
Νικόλαος Χρονόπουλος





## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Μπόγρη Αντώνη για την ανάθεση και επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Σώζο Κώστα για την καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την συναισθηματική και υλική της συμπαράσταση σε όλη διάρκεια της φοιτητικής μου ζωής..





## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Από τα τέλη του 2016, η διαδικτυακή κίνηση έχει ξεπεράσει το όριο του Zettabyte και εξακολουθεί να αυξάνεται με ρυθμό άνω του 30% ετησίως. Το 2022, ο πλανήτης θα παράξει και θα καταναλώσει 94 zettabytes. Η ανάπτυξη αυτή οφείλεται τόσο στη ραγδαία επέκταση των υπηρεσιών πληροφορικής και τεχνολογίας που βασίζονται στο υπολογιστικό νέφος (cloud) για τις επιχειρήσεις, οι οποίες καθορίζουν όλο και περισσότερο την οικονομία των εταιρικών υποδομών σε όλο τον κόσμο, όσο και στη συνεχή ανάπτυξη ενός ευρέος φάσματος νέων εφαρμογών αιχμής για τους τελικούς χρήστες. Δεδομένου ότι η συνδεσιμότητα είναι ζωτικής σημασίας, προκύπτει ότι οι φθηνές υποδομές και οι ηλεκτρικές συνδέσεις δεν είναι σε θέση να συμβαδίσουν με την ταχέως αυξανόμενη ζήτηση για περισσότερο εύρος ζώνης.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των οπτικών επικοινωνιών φυσικού επιπέδου για την αντιμετώπιση των προκλήσεων του περιορισμένου εύρους ζώνης. Θα παράσχουμε μια εισαγωγή στις οπτικές επικοινωνίες, μια επισκόπηση των οπτικών δικτύων και του εξειδικευμένου εξοπλισμού τους και μια σύγκριση των σημερινών τεχνολογιών επικοινωνίας και μεταγωγής. Στόχος είναι να προταθούν νέοι σχεδιασμοί και βελτιστοποιήσεις για οπτικά συστήματα που μπορούν να καλύψουν την αυξανόμενη ζήτηση για εύρος ζώνης με οικονομικά αποδοτικό και αποτελεσματικό τρόπο.

### Λέξεις κλειδιά:

Διασυνδέσεις Κέντρων Δεδομένων, Οπτικοί Διαμορφωτές, Οπτική Πολυπλεξία, Οπτική Μεταγωγή, Πομποδέκτες Άμεσης Ανίχνευσης, Σύμφωνοι Πομποδέκτες, Φωτονική Ολοκλήρωση Πυριτίου, Συν-συσκευασμένα οπτικά συστήματα

## **ABSTRACT**

Since the end of 2016, internet traffic has surpassed the Zettabyte mark and continues to grow at a rate of more than 30% per year. In 2022, the planet will generate and consume 94 zettabytes. This growth is driven both by the rapid expansion of cloud-based IT and technology services for businesses, which are increasingly defining the economics of corporate infrastructure around the world, and the continued development of a wide range of new cutting-edge applications for end users. Given that connectivity is vital, it follows that cheap infrastructure and electrical connections are unable to keep up with the rapidly growing demand for more bandwidth.

The scope of this thesis is to investigate optical physical layer communications to address the challenges of limited bandwidth. We will provide an introduction to optical communications, an overview of optical networks and their specialized equipment, and a comparison of current communication and switching technologies. The aim is to propose new designs and optimizations for optical systems that can meet the growing demand for bandwidth in a cost-effective and efficient manner.

### Keywords:

Data Center Interconnects, Optical Modulators, Optical Multiplexing, Optical Switching, Direct Detection Transceivers, Coherent Transceivers, Silicon Photonic Integration, Co-packaged Optical Systems

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ABSTRACT</b> .....	<b>9</b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b> .....	<b>10</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ</b> .....	<b>13</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ</b> .....	<b>16</b>
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>17</b>
<b>1.1 Η ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΟΛΟΕΝΑ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΟ BANDWIDTH</b> .....	<b>17</b>
<b>1.2 ΤΑ ΚΕΝΤΡΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ</b> .....	<b>21</b>
<b>1.3 ΑΠΟ ΤΑ 400G ΣΤΑ 1.6T</b> .....	<b>23</b>
<b>1.4 ΤΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ – ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΣΤΑ ΚΕΝΤΡΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ</b> .....	<b>29</b>
<b>1.5 ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ</b> .....	<b>31</b>
<b>1.6 ΔΟΜΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ</b> .....	<b>32</b>
<b>2. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΙ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑΣ ΣΤΙΣ ΟΠΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ</b> .....	<b>33</b>
<b>2.1 ΠΗΓΗ LASER</b> .....	<b>33</b>
<b>2.2 ΟΠΤΙΚΟΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΤΗΣ</b> .....	<b>35</b>
<b>2.2.1 Διαμορφωτής Mach-Zehnder (MZM)</b> .....	<b>36</b>
<b>2.3 ΟΠΤΙΚΟΣ ΔΕΚΤΗΣ (OPTICAL RECEIVER)</b> .....	<b>44</b>
<b>2.4 ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ ΣΗΜΑΤΟΣ</b> .....	<b>44</b>
<b>2.4.1 Πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος (WDM)</b> .....	<b>45</b>
<b>2.4.2 Πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDM)</b> .....	<b>48</b>
<b>2.4.3 Πολυπλεξία διαίρεσης χώρου (SDM)</b> .....	<b>49</b>
<b>2.5 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΗΜΑΤΟΣ</b> .....	<b>52</b>
<b>2.5.1 Διαμόρφωση μετατόπισης πλάτους (Amplitude-shift Keying ή ASK)</b> 52	

2.5.2 Διαμόρφωση πλάτους παλμού πολλαπλών επιπέδων (PAM-4, PAM-8) .....	55
2.5.3 Διαμόρφωση μετατόπισης φάσης (Phase-shift Keying, PSK) ...	57
<b>2.6 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΣΤΕΡΙΣΜΟΥ ΑΝΩΤΕΡΩΝ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ.....</b>	<b>58</b>
2.6.1 Διαμόρφωση κατά QPSK .....	61
2.6.2 Διαμόρφωση κατά QAM .....	63
<b>3. ΤΑ ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΥΠΕΡΤΑΧΕΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΟΠΤΙΚΩΝ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ..</b>	<b>65</b>
3.1 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ / ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ .....	67
3.1.1 Μεταγωγή οπτικού κυκλώματος (OCS) .....	67
3.1.2 Ηλεκτρονική μεταγωγή πακέτων (EPS).....	69
3.1.3 Μεταγωγή οπτικών πακέτων (OPS) .....	71
3.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ INTENSITY MODULATION/ DIRECT DETECTION.....	73
3.2.1 IM-DD τεχνικές πολυπλεξίας.....	74
3.2.2 IM-DD Πομπός.....	76
3.2.3 IM-DD Δέκτης.....	81
3.3 ΣΥΜΦΩΝΟΙ ΠΟΜΠΟΔΕΚΤΕΣ .....	84
3.3.1 Σύμφωνος Πομπός .....	86
3.3.2 Σύμφωνος Δέκτης .....	89
3.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΑΜΕΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΜΦΩΝΗΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ .....	92
<b>4. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ.....</b>	<b>96</b>
4.1 ΠΡΩΙΜΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΥΝ-ΣΥΣΚΕΥΑΣΜΕΝΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ .....	98
4.2 ΟΠΤΙΚΑ ΕΠΙ ΤΗΣ ΠΛΑΚΕΤΑΣ.....	100
4.3 ΣΥΝ-ΣΥΣΚΕΥΑΣΜΕΝΑ ΟΠΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....	101
4.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΕΙΣ.....	102

<b>4.5</b>	<b>ΠΟΡΕΙΑ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΥΙΟΘΕΤΗΣΗ</b> .....	<b>104</b>
4.5.1	Επιλογή χαλκού.....	104
4.5.2	Επιλογές οπτικής διασποράς λειτουργίας πόλωσης (Optical Polarization mode dispersion, PMD).....	105
4.5.3	Προσβασιμότητα πεδίου.....	105
4.5.4	Οικοσύστημα.....	106
<b>4.6</b>	<b>ΠΟΡΕΙΑ ΣΥΝ-ΣΥΣΚΕΥΑΣΜΕΝΩΝ ΦΩΤΟΝΙΚΩΝ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΕΩΝ</b> ....	<b>106</b>
<b>4.7</b>	<b>ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗΣ ΦΩΤΟΝΙΚΗΣ ΠΥΡΙΤΙΟΥ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ</b> .....	<b>109</b>
<b>4.8</b>	<b>ΦΩΤΟΝΙΚΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΠΥΡΙΤΙΟΥ ΜΕ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΣΤΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ</b> .....	<b>113</b>
<b>4.9</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΦΩΤΟΝΙΚΗΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ</b> .....	<b>114</b>
	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....	<b>115</b>
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	<b>116</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

<b>Εικόνα 1.1:</b> Η πορεία της κίνησης του δικτύου κορμού από την έναρξη του Διαδικτύου. .....	<b>18</b>
<b>Εικόνα 1.2:</b> Εξέλιξη της κίνησης στα κέντρα δεδομένων μεταξύ 2010 και 2019 σύμφωνα με τη Cisco. ....	<b>20</b>
<b>Εικόνα 1.3:</b> 100-GE προσαρτώμενης μορφής και μεταγωγέας που υποστηρίζει 32x100-GE .....	<b>27</b>
<b>Εικόνα 2.1:</b> Η ισχύς εξόδου του φάσματος ενός λέιζερ σε Λορεντζιανή κατανομή...	<b>34</b>
<b>Εικόνα 2.2:</b> Σχεδιάγραμμα Mach Zehnder οπτικού διαμορφωτή .....	<b>37</b>
<b>Εικόνα 2.3:</b> Συνάρτηση μεταφοράς διαμορφωτή Mach-Zehnder .....	<b>39</b>
<b>Εικόνα 2.4:</b> Δημιουργία διαμορφωμένου σήματος OOK και BPSK σε συνάρτηση με την τάση οδήγησης των ηλεκτροδίων του MZM. ....	<b>40</b>
<b>Εικόνα 2.5:</b> Διαγράμματα αστερισμού: (a) διαμορφωμένου σήματος OOK και (b) διαμορφωμένου σήματος BPSK.....	<b>41</b>
<b>Εικόνα 2.6:</b> Διαμορφωτής IQ παρασκευασμένος από δύο διαμορφωτές Mach-Zehnder σε κατάσταση push-pull .....	<b>42</b>
<b>Εικόνα 2.7:</b> Διαμορφωτής IQ διπλής πόλωσης .....	<b>43</b>
<b>Εικόνα 2.8:</b> Διάγραμμα μετάδοσης WDM.....	<b>45</b>
<b>Εικόνα 2.9:</b> Μήκος κύματος CWDM4 .....	<b>47</b>
<b>Εικόνα 2.10:</b> Μήκος κύματος LAN-WDM.....	<b>47</b>
<b>Εικόνα 2.11:</b> Σχεδιάγραμμα της οπτικής πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου.....	<b>49</b>
<b>Εικόνα 2.12:</b> Πολυπύρρηνη ίνα (Multi-Core Fiber ή MCF) .....	<b>50</b>
<b>Εικόνα 2.13:</b> Ίνα λίγων τρόπων (Few-Mode Fiber ή FMF).....	<b>51</b>
<b>Εικόνα 2.14:</b> Σχηματική απεικόνιση ενός οπτικού πομπού για τη μεταπομπή οπτικού σήματος NRZ.....	<b>54</b>

<b>Εικόνα 2.15:</b> Παράδειγμα κυματομορφής πλάτους ενός σήματος που μεταδόθηκε με τη μέθοδο διαμόρφωσης NRZ και το διάγραμμα αστερισμού ενός σήματος διαμορφωμένου με ΟΟΚ. ....	<b>54</b>
<b>Εικόνα 2.16:</b> Οφθαλμικό διάγραμμα σήματος με διαμόρφωση PAM-4 .....	<b>56</b>
<b>Εικόνα 2.17:</b> Απεικόνιση στο πεδίο του χρόνου ενός οπτικού σήματος PAM-4, με παράμετρο T την περίοδο του συμβόλου.....	<b>56</b>
<b>Εικόνα 2.18:</b> Απεικόνιση του τρόπου παραγωγής σήματος PSK με μία μόνο φωτοδίοδο και άμεση φώραση.....	<b>58</b>
<b>Εικόνα 2.19:</b> Σχήματα διαμόρφωσης QAM. ....	<b>61</b>
<b>Εικόνα 2.20:</b> Διαμόρφωση σήματων QPSK με χρήση διαμορφωτών IQ. ....	<b>62</b>
<b>Εικόνα 2.21:</b> Απεικόνιση σήματος QAM-16 με χρήση διαμορφωτή IQ. ....	<b>63</b>
<b>Εικόνα 3.1:</b> Τα διαφορετικά τμήματα δικτύων που συναντάμε σε παγκόσμιο επίπεδο. ....	<b>66</b>
<b>Εικόνα 3.2:</b> Διάγραμμα δικτύου μεταγωγής οπτικού κυκλώματος.....	<b>68</b>
<b>Εικόνα 3.3:</b> Διάγραμμα δικτύου ηλεκτρονικής μεταγωγής πακέτων.....	<b>70</b>
<b>Εικόνα 3.4:</b> Διάγραμμα οπτικού δικτύου μεταγωγής πακέτων σε τοπολογία πλέγματος.....	<b>72</b>
<b>Εικόνα 3.5:</b> Διάγραμμα οπτικού δικτύου μεταγωγής πακέτων σε τοπολογία δακτυλίου. ....	<b>73</b>
<b>Εικόνα 3.6:</b> Διάγραμμα πομπού διαμόρφωσης της έντασης.....	<b>75</b>
<b>Εικόνα 3.7:</b> Διάγραμμα ενός πομπού IM-DD. ....	<b>77</b>
<b>Εικόνα 3.8:</b> Ενδεικτική αναπαράσταση λέιζερ (α) VSCEL και (β) DFB. ....	<b>78</b>
<b>Εικόνα 3.9:</b> Αναπαράσταση (α) ενός EAM και (β) ενός MZM.....	<b>80</b>

<b>Εικόνα 3.10:</b> (α) Διάγραμμα τυπικού δέκτη IM-DD, συνοδευόμενο από μια γενική περιγραφή της αλυσίδας DSP. (β) Ανάκτηση ρολογιού. (γ) Απεικόνιση της διαδικασίας εξισορρόπησης και προσαρμογής με εμπρόσθια τροφοδότηση. ....	<b>82</b>
<b>Εικόνα 3.11:</b> Διαγράμματα αστερισμών (α) PAM-2, (β) QPSK, (γ) 16-QAM.....	<b>85</b>
<b>Εικόνα 3.12:</b> Αστερισμοί (α) QPSK, (β) 8-QAM, (γ) 16-QAM και (δ) 32-QAM. ....	<b>85</b>
<b>Εικόνα 3.13:</b> Διάγραμμα ενός σύμφωνου πομπού.....	<b>87</b>
<b>Εικόνα 3.14:</b> Διάταξη διαμορφωτή DP-I/Q-MZM.....	<b>89</b>
<b>Εικόνα 3.15:</b> Διάγραμμα ενός σύμφωνου δέκτη.....	<b>91</b>
<b>Εικόνα 3.16:</b> Κατανάλωση ισχύος μεταξύ IM-DD και σύμφωνων πομποδεκτών. ....	<b>93</b>
<b>Εικόνα 3.17:</b> Περιορισμός εύρους λόγω χρωματικής διασποράς σε σύστημα άμεσης ανίχνευσης με σήματα PAM-4. ....	<b>94</b>
<b>Εικόνα 3.18:</b> Ρυθμός σφάλματος συναρτήσει της απαιτούμενης ισχύος για σύμφωνα και IM-DD συστήματα.....	<b>94</b>
<b>Εικόνα 4.1:</b> Χάρτης πορείας φωτονικής ολοκλήρωσης.....	<b>97</b>
<b>Εικόνα 4.2:</b> Power 7 CPU μαζί με τον συνοδευτικό μεταγωγέα του.....	<b>99</b>
<b>Εικόνα 4.3:</b> Μεταγωγέας της μονάδας IBM Power 775.....	<b>99</b>
<b>Εικόνα 4.4:</b> Οι χρήσεις των συμπαγών οπτικών σε διάφορα συστήματα (με υπολογιστικό τελικό σημείο και διακόπτες). Συν-συσκευασμένα οπτικά-, Συν-συσκευασμένα ηλεκτρονικά, Κάρτα διασύνδεσης δικτύου, Μονάδα επεξεργασίας δικτύου, Μονάδα επεξεργασίας γραφικών. ....	<b>103</b>
<b>Εικόνα 4.5:</b> Η εξέλιξη του εύρους ζώνης των φωτονικών διασυνδέσεων, της απόδοσης ισχύος και της συνολικής κατανάλωσης ισχύος.....	<b>107</b>
<b>Εικόνα 4.6:</b> Εξέλιξη και προοπτικές του εύρους ζώνης μεταγωγής με την πάροδο των ετών σε τέσσερις γενιές.....	<b>110</b>



## **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ**

**Πίνακας 1.1:** Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες προσαρτώμενες μονάδες..... **24**

**Πίνακας 1.2:** Ενεργειακή κατανάλωση προσαρτώμενων μονάδων..... **30**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

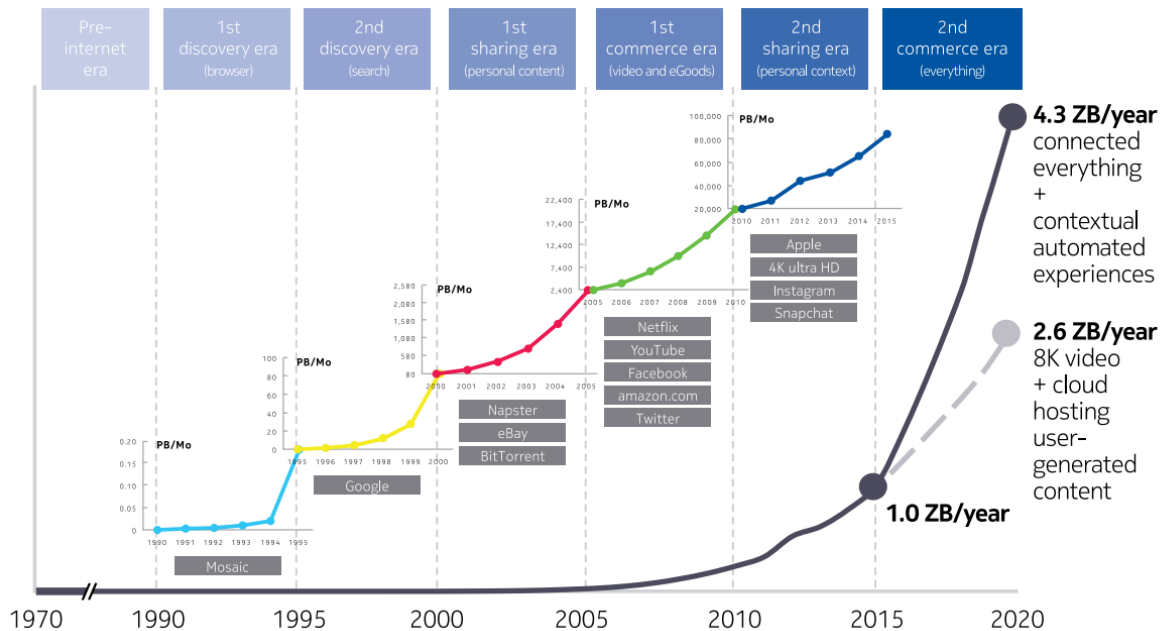
### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

#### 1.1 Η ανάγκη για ολοένα μεγαλύτερο Bandwidth

Στην σημερινή εποχή, η κίνηση Internet Protocol (IP) στα κέντρα δεδομένων παρουσιάζει εκθετική αύξηση. Καθημερινά παρατηρούμε τεράστιο πλήθος νέων συσκευών να συνδέονται στο Διαδίκτυο όπως και νέων αναγκών από τους χρήστες και τις επιχειρήσεις. Οι καινούργιες υπηρεσίες όπως το Internet of Things, η μετάδοση βίντεο υψηλής ανάλυσης (4K,8K), καθώς και ο φόρτος εργασίας στο cloud που κινείται σε πιο εξελιγμένη χρήση, συμπεριλαμβανομένων των, big data analysis, deep learning και large-scale modeling, έχουν δημιουργήσει την ανάγκη για διπλασιασμό του εύρους ζώνης των Ethernet switches κάθε 2-3 χρόνια, αλλά και της συνδεσιμότητας εντός και μεταξύ των κέντρων δεδομένων.

Η εξέλιξη της κίνησης του δικτύου κορμού από την εμφάνιση του διαδικτύου παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.1. Η ανάλυση αυτή πραγματοποιήθηκε από τη Nokia Bell Labs Consulting, η οποία προσδιόρισε τις κύριες τάσεις που προκαλούν την αύξηση της κίνησης. Όπως απεικονίζεται στο γράφημα, πριν από τη δεκαετία του 2000, η κίνηση στο διαδίκτυο διέπονταν από το περιεχόμενο του ιστού. Με το πρώτο πρόγραμμα περιήγησης που κυκλοφόρησε το 1993 (Mosaic) και τις κύριες μηχανές αναζήτησης στο διαδίκτυο (π.χ. Altavista, Yahoo, Google) που εμφανίστηκαν τα επόμενα χρόνια, η κίνηση στο διαδίκτυο άρχισε να αυξάνεται με γρήγορους ρυθμούς, με αποτέλεσμα να κυκλοφορούν 80 PBytes σε παγκόσμιο επίπεδο κάθε μήνα (PB/Mo) κατά την είσοδο στη νέα χιλιετία. Το 1999 η έννοια της ομότιμης ανταλλαγής αρχείων (peer-to-peer) έγινε δημοφιλής με την εμφάνιση του Napster, το οποίο δημιουργήθηκε κυρίως για την ανταλλαγή μουσικών αρχείων μεταξύ τελικών χρηστών. Πολλές εφαρμογές αναπτύχθηκαν ακολουθώντας την έννοια του ομότιμου διαμοιρασμού αρχείων (π.χ. eDonkey, Bittorrent, Gnutella), οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν εκτενώς από τους χρήστες του Διαδικτύου για την ανταλλαγή κάθε είδους αρχείων (π.χ. βίντεο, ταινίες, παιχνίδια, μουσική, βιβλία), οδηγώντας σε ραγδαία αύξηση της κίνησης, η οποία ξεπέρασε γρήγορα το 1-EB/Mo (1000 PB/Mo) γύρω στο 2004. Τον Φεβρουάριο του ίδιου έτους εγκαινιάστηκε ο ιστότοπος του Facebook, ξεκινώντας μια νέα εποχή κοινωνικής δικτύωσης και ανταλλαγής προσωπικού περιεχομένου. Η ροή βίντεο έγινε

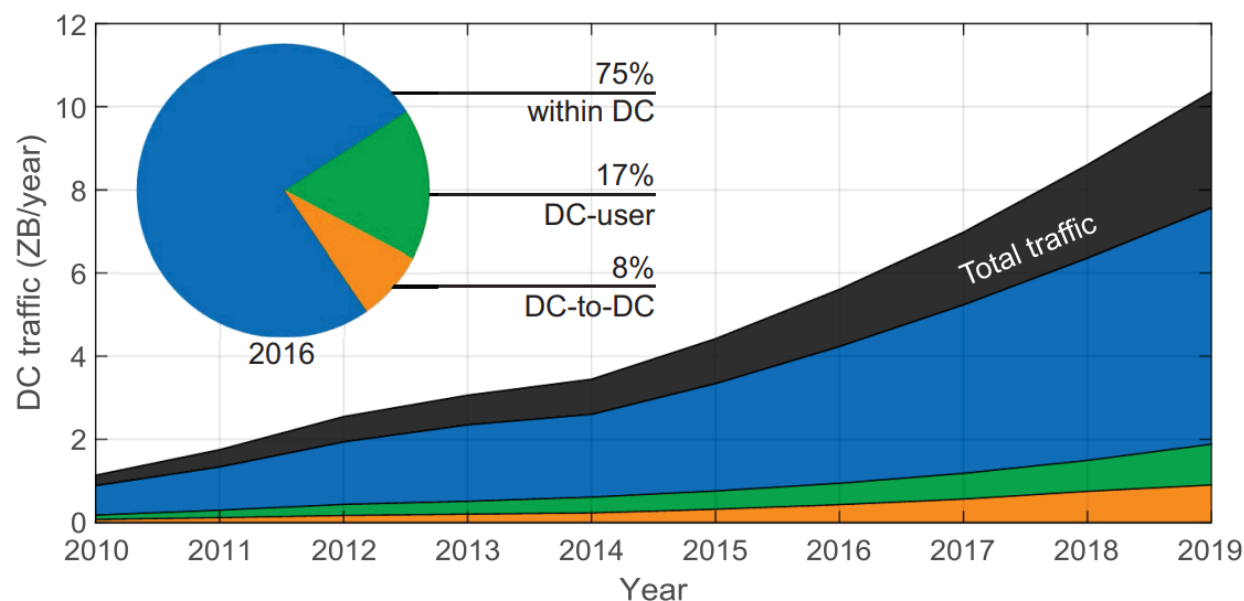
επίσης δημοφιλής περίπτωση εκείνη την περίοδο με την εμφάνιση του Youtube (2005) και αργότερα του Netflix, το οποίο ξεκίνησε την επιχείρηση online streaming το 2007. Αυτές οι νέες τάσεις, οδήγησαν σε δεκαπλάσια αύξηση της κίνησης μεταξύ 2005 και 2010 με 20 EB/Mo να διέρχονταν από τα κεντρικά δίκτυα.



**Εικόνα 0.1: Η πορεία της κίνησης του δικτύου κορμού από την έναρξη του Διαδικτύου.**

Τα τελευταία χρόνια, η επανάσταση των έξυπνων κινητών τηλεφώνων παρείχε απεριόριστη πρόσβαση στο Διαδίκτυο σε όλους. Η τεχνολογία αυτή σε συνδυασμό με νέες (π.χ. Instagram, Snapchat) και υπάρχουσες (Facebook, Twitter) εφαρμογές κοινωνικής δικτύωσης έχουν οδηγήσει σε ένα ευρέως διαδεδομένο "modus operandi": να μοιράζονται τα πάντα ανά πάσα στιγμή και οπουδήποτε. Αυτή η εκτεταμένη κίνηση διαμοιρασμού μαζί με άλλες επερχόμενες τάσεις (βίντεο υψηλής ευκρίνειας ή αποθήκευση στο νέφος), αυξάνουν συνεχώς την κίνηση του δικτύου κορμού, η οποία ξεπερνά σήμερα το 4 ZB/έτος. Τα επόμενα χρόνια αναμένεται μια άλλη επαναστατική τεχνολογία: το διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT). Μια νέα εποχή είναι έτοιμη να ξεκινήσει, κατά την οποία όχι μόνο όλοι θα είναι συνδεδεμένοι αλλά και "τα πάντα". Το IoT θα επιτρέψει έναν νέο αυτοματοποιημένο κόσμο, όπου οι μηχανές θα διαχειρίζονται αποτελεσματικά από το νέφος, δημιουργώντας έξυπνα αυτοκίνητα, κτίρια, νοσοκομεία και πόλεις. Οι εκτεταμένες επικοινωνίες σε πραγματικό χρόνο μεταξύ ενός τεράστιου αριθμού μηχανών και συστημάτων cloud αναμένεται να δημιουργήσουν μια άνευ προηγουμένου αύξηση της κίνησης που ενδεχομένως να ξεπεράσει τα 5 ZB/έτος το 2023.

Όλες οι προαναφερθείσες εφαρμογές και υπηρεσίες φιλοξενούνται σήμερα σε κέντρα δεδομένων που είναι κατανεμημένα σε όλο τον κόσμο. Ως εκ τούτου, παρόμοια με τα δίκτυα κορμού, τα κέντρα δεδομένων έχουν γνωρίσει τεράστια αύξηση της κίνησης. Στην Εικόνα 1.2 παρουσιάζεται η εξέλιξη και η πρόβλεψη της παγκόσμιας κίνησης των κέντρων δεδομένων από το 2010 έως το 2019. Τα δεδομένα για τη δημιουργία του εν λόγω σχήματος αντλήθηκαν από διάφορα white papers του δείκτη cloud της Cisco. Όπως απεικονίζεται, η κίνηση που παράγεται σε ένα κέντρο δεδομένων μπορεί να χωριστεί σε τρεις ομάδες ανάλογα με την προέλευση/προορισμό της: 1) κίνηση που παραμένει εντός του κέντρου δεδομένων (εντός του Data Center ή DC με μπλε χρώμα), 2) κίνηση που ανταλλάσσεται μεταξύ εξωτερικών χρηστών και κέντρων δεδομένων (DC-χρήστης με πράσινο χρώμα) και 3) κίνηση που ανταλλάσσεται μεταξύ κέντρων δεδομένων (DC-to-DC με πορτοκαλί χρώμα). Το κύριο γράφημα απεικονίζει την εξέλιξη της κίνησης για κάθε τύπο (περιγραφόμενος χρωματικός χάρτης) και συνολικά (σκούρο γκρι). Μπορεί κανείς να απεικονίσει με σαφήνεια την επικράτηση της εσωτερικής κίνησης των κέντρων δεδομένων, η οποία αντιπροσωπεύει το 75% της συνολικής κίνησης (βλ. τομεακό γράφημα που δείχνει το ποσοστό για την πρόβλεψη της κίνησης το 2016). Το ποσοστό αυτό αναδεικνύει τον μεγάλο όγκο της κίνησης που ανταλλάσσεται μεταξύ διακομιστών ή/και μονάδων αποθήκευσης. Η υπόλοιπη κίνηση εγκαταλείπει την εγκατάσταση για να επικοινωνήσει με τους χρήστες (17%) και άλλα κέντρα δεδομένων (8%). Η ανάλυση του παγκόσμιου δείκτη cloud της Cisco δείχνει ότι η συνολική ποσότητα της κίνησης που παράγεται παγκοσμίως στα κέντρα δεδομένων παρουσιάζει δεκαπλάσια αύξηση (2010-2022) και έφτασε πάνω από 10 ZB/έτος το 2019.



**Εικόνα 0.2: Εξέλιξη της κίνησης στα κέντρα δεδομένων μεταξύ 2010 και 2019 σύμφωνα με τη Cisco.**

Η ανάλυση που παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.2 δείχνει την τάση της κίνησης του κέντρου δεδομένων σε παγκόσμια κλίμακα. Από την άλλη πλευρά, οι διάφοροι τύποι κέντρων δεδομένων παρουσιάζουν διαφορετικές τάσεις. Η Cisco, για παράδειγμα, διακρίνει δύο τύπους κέντρων δεδομένων στις εκθέσεις της Global Cloud Index: τα παραδοσιακά κέντρα και τα κέντρα υπολογιστικού νέφους. Η κίνηση η οποία δεν δημιουργείται από το υπολογιστικό νέφος συνδέεται συνήθως με πανεπιστημιούπολεις και επιχειρήσεις που χρησιμοποιούν το δικό τους κέντρο δεδομένων για να παρέχουν τους απαιτούμενους πόρους στους χρήστες/υπαλλήλους τους. Η κίνηση που παράγεται σε τέτοια κέντρα δεδομένων αναμένεται να αυξηθεί κατά 94 φορές μεταξύ 2010 (1,01 ZB/έτος) και 2022 (94 ZB/έτος). Από την άλλη πλευρά, η κίνηση που παράγεται από κέντρα δεδομένων νέφους παρουσιάζει αύξηση κατά 154 φορές (από 0,13 έως 20,06 ZB/έτος) κατά την ίδια περίοδο. Τα εν λόγω κέντρα δεδομένων παρέχουν διάφορα είδη υπηρεσιών νέφους σε τελικούς χρήστες και επιχειρήσεις. Οι υπηρεσίες νέφους μπορούν να χωριστούν σε τρία διαφορετικά μοντέλα:

- Λογισμικό ως υπηρεσία (SaaS): παρέχει τη δυνατότητα χρήσης υπηρεσιών που είναι τοποθετημένες σε μια υποδομή νέφους. Οι υπηρεσίες αυτές είναι εύκολα προσβάσιμες από ένα πρόγραμμα περιήγησης στο διαδίκτυο ή από μια διεπαφή προγράμματος. Ορισμένα παραδείγματα SaaS είναι το Google Drive, το Dropbox ή το Salesforce.com.

- Πλατφόρμα ως υπηρεσία (PaaS): παρέχουν τη δυνατότητα ανάπτυξης εφαρμογών συνήθως σε μια ιδιόκτητη πλατφόρμα που θα εκτελείται σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον. Δημοφιλή παραδείγματα PaaS είναι το Facebook Apps και το Google App Engine.
- Υποδομή ως υπηρεσία (IaaS): παρέχουν στο χρήστη υπολογιστικούς και αποθηκευτικούς πόρους για να αναπτύξει και να εκτελέσει ελεύθερα το δικό του λογισμικό. Ένας από τους πρωτοπόρους σε τέτοιου είδους υπηρεσίες είναι η Amazon, με το Amazon EC2. Αυτό το είδος υπηρεσιών χρησιμοποιείται σήμερα από μεγάλο αριθμό μικρών και μεσαίων επιχειρήσεων, οι οποίες νοικιάζουν πόρους σε κέντρα δεδομένων νέφους για να φιλοξενούν τις εφαρμογές και τις υπηρεσίες τους αντί να κατασκευάζουν τα δικά τους κέντρα δεδομένων.

Για να εξυπηρετήσουν τις σχετικές απαιτήσεις, οπτικές συνδέσεις μικρής εμβέλειας έχουν διερευνηθεί ευρέως για διασυνδέσεις κέντρων δεδομένων (data center interconnects). Αυτές οι τάσεις έχουν δημιουργήσει μια σημαντική και ταχέως αναπτυσσόμενη αγορά για οπτικές συνδέσεις προσαρμοσμένες για χρήση εντός ή μεταξύ κέντρων δεδομένων. Η αγορά αυτή προβλέπεται να αυξηθεί από 8,6 δισεκατομμύρια δολάρια το 2018 σε περισσότερα από 17 δισεκατομμύρια μέχρι το 2026.

Όσο η ανάγκη για μεγαλύτερο εύρος ζώνης αυξάνεται, οι Ethernet switches και οι οπτικές συνδέσεις θα πρέπει να μπορούν να συμβαδίσουν ως προς το κόστος ανά χωρητικότητα, τη πυκνότητα του εύρους ζώνης και την ενεργειακή απόδοση. Από το 2010 μέχρι το 2021, έχει παρατηρηθεί αύξηση των ταχυτήτων των μεταγωγών πυριτίου ASIC (application-specific integrated circuits) και των οπτικών μονάδων (modules), από 0.64 στα 25.6 Tb/s και από τα 10 στα 400 Gb/s, αντίστοιχα.

## 1.2 Τα κέντρα Δεδομένων

Τα κέντρα δεδομένων είναι φυσικές εγκαταστάσεις που καθιστούν δυνατή τη ύπαρξη χρήση διαδικτυακών και cloud υπηρεσιών που χρησιμοποιούνται καθημερινά από εκατομμύρια χρήστες και επιχειρήσεις όπως αποθήκευση cloud, μετάδοση βίντεο και κοινωνικά δίκτυα. Τέτοιου είδους εγκαταστάσεις στεγάζουν τεράστιο πλήθος διασυνδεδεμένων εξυπηρετητών, εξοπλισμό δικτύωσης ώστε να διασφαλίζεται η συνεχής συνδεσιμότητα των υπολογιστικών συστημάτων με το Διαδίκτυο καθώς και

τροφοδοτικά, εφεδρικές γεννήτριες και συσκευές περιβαλλοντικού ελέγχου (κλιματιστικά ψύξης εξυπηρετητών).

Πολλά μεγάλα κέντρα δεδομένων βρίσκονται σε ειδικά σχεδιασμένες εγκαταστάσεις. Μικρότερα κέντρα δεδομένων μπορεί να βρίσκονται σε ειδικά σχεδιασμένους χώρους εντός κτιρίων που έχουν κατασκευαστεί για να εξυπηρετούν πολλαπλές λειτουργίες. Καθώς τα κέντρα δεδομένων καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας, είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι οι φυσικές δομές που τα στεγάζουν είναι καλά σχεδιασμένες και κατάλληλα μονωμένες για τη βελτιστοποίηση του ελέγχου της θερμοκρασίας και της ενεργειακής απόδοσης.

Τα κέντρα δεδομένων θα πρέπει να βρίσκονται κοντά σε αξιόπιστες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας και σε υψηλής ταχύτητας και συνδεσιμότητας δίκτυο. Η τοποθεσία δεν θα πρέπει να είναι ευάλωτη σε περιβαλλοντικούς κινδύνους. Οι ικανότητες των τοίχων και των δαπέδων του κτιρίου πρέπει να είναι επαρκείς για το βάρος του υλικού, των ραφιών και άλλων υποστηρικτικών υποδομών που θα στεγάσει και η εγκατάσταση θα πρέπει να διαθέτει επαρκή συστήματα ασφαλείας και πυρόσβεσης, καθώς και κατάλληλα συστήματα παρακολούθησης.

Η ιστορία των κέντρων δεδομένων ξεκίνησε στα μέσα του 1950 με την εμφάνιση των πρώτων εμπορικών υπολογιστών που ονομάζονταν mainframes. Τα mainframes ήταν οι πρώτοι υπολογιστές που χρησιμοποιήθηκαν από επιχειρήσεις για την επεξεργασία δεδομένων. Ωστόσο, λόγω του υψηλού κόστους, ακόμα και αρκετά μεγάλες επιχειρήσεις μπορούσαν να αντέξουν οικονομικά μόνο ένα τέτοιο σύστημα. Το μέγεθος ενός mainframe όντας αρκετά τετραγωνικά μέτρα, συνήθως τοποθετούνταν σε ένα δωμάτιο και οι χρήστες μοιράζονταν τον χρόνο που εκτελούσαν τις διαφορετικές εργασίες. Η διαχείριση των πρώτων υπολογιστικών συστημάτων mainframes γινόταν μέσω διάτρητων καρτών ή χάρτινων ταινιών. Αργότερα χρησιμοποιήθηκαν τηλέτυποι και στη συνέχεια τερματικά, όπου μπορούσαν να συνδεθούν με τους κεντρικούς υπολογιστές, οι οποίοι θα ερμήνευαν τις εντολές τους μέσω ιδιόκτητων πρωτοκόλλων.

Μέσα στα επόμενα χρόνια η βιομηχανία κατέβαλε προσπάθεια για να μειωθεί κατά μεγάλο ποσοστό το μέγεθος των υπολογιστικών συστημάτων. Αφού εισάχθηκαν στην αγορά τα τρανζίστορ στερεάς κατάστασης, που αντικατέστησαν τις παραδοσιακές ηλεκτρονικές λυχνίες, μπόρεσε να επιτευχθεί η δημιουργία μίνι υπολογιστών. Η μείωση του κόστους και του μεγέθους έκανε τους υπολογιστές πιο προσιτούς στις επιχειρήσεις, οι οποίες μπορούσαν να ανταπεξέλθουν οικονομικά στην αγορά τους.

Το 1971, με την κυκλοφορία του πρώτου ολοκληρωμένου μικροεπεξεργαστή Intel 4004, το κόστος κατασκευής των υπολογιστών μειώθηκε και ταυτόχρονα επέτρεψε την κατασκευή ακόμα πιο μικρών υπολογιστών οι οποίοι γίνανε γνωστοί ως προσωπικοί υπολογιστές (PC). Εφόσον οι επιχειρήσεις είδανε ότι μπορούσαν να έχουν αρκετούς υπολογιστές, δημιουργήθηκε η ανάγκη για διαμοιρασμό των πόρων μεταξύ τους. Έτσι το 1977 η Datapoint Corporation δημιούργησε το πρώτο εμπορικά διαθέσιμο δίκτυο το οποίο ονόμασε Attached Resource Computer Network (ARCNET), όπου συνέδεε τα τερματικά των χρηστών, με κεντρικούς υπολογιστές που χρησιμοποιούνταν για αποθήκευση δεδομένων. Στην σημερινή εποχή αυτούς τους κεντρικούς υπολογιστές τους ονομάζουμε εξυπηρετητές, και τον χώρο στέγασης τους, κέντρο δεδομένων.

Με την εμφάνιση του Διαδικτύου καθώς και με την επινόηση του παγκόσμιου ιστού (World Wide Web) το 1990, ξεκίνησε μια νέα εποχή για τα κέντρα δεδομένων. Πολλές εταιρίες αλλά και ιδιώτες απαιτούσαν την μόνιμη παρουσία τους στο Διαδίκτυο. Μέχρι το 2001, οι ιστότοποι αυξήθηκαν από λίγες χιλιάδες σε αρκετά εκατομμύρια. Για να γίνει εφικτή η φιλοξενία όλων των ιστότοπων, όπως και των καινούργιων διαδικτυακών υπηρεσιών, ένας τεράστιος αριθμός κέντρων δεδομένων δημιουργήθηκε. Έκτοτε, ο κορμός του Διαδικτύου και οι απαιτήσεις των κέντρων δεδομένων δεν έχουν σταματήσει να αυξάνονται.

### **1.3 Από τα 400G στα 1.6T**

Λόγω του χαμηλού κόστους και της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, οι συνδέσεις χαλκού χρησιμοποιήθηκαν για την πλειονότητα των συνδέσεων των κέντρων δεδομένων (δηλαδή, διακομιστής προς μεταγωγέα και μεταγωγέας προς μεταγωγέα) στις αρχές της δεκαετίας του 2000. Από την άλλη πλευρά, ο χαλκός προκαλεί σημαντικές απώλειες και παραμορφώσεις, περιορίζοντας την εμβέλεια μετάδοσης στα 15 μέτρα για τις συνδέσεις 10GBASE-CX4 (10 Giga Ethernet ή GE). Επιπλέον, όταν αυξάνεται ο ρυθμός δεδομένων, η εμβέλεια συρρικνώνεται ακόμη περισσότερο. Τα πρότυπα 40GBASE-CR4 (40 GE) και 100GBASE-CR4 (100 GE), για παράδειγμα, έχουν εμβέλεια μόνο 7 και 5 μέτρα, αντίστοιχα. Αυτές οι αποστάσεις είναι επαρκείς για τη σύνδεση διακομιστών στο ίδιο rack που διαθέτουν μεταγωγέα πρόσβασης (Top of the Rack ή ToR). Ο χαλκός, επίσης, δημιουργεί σοβαρούς περιορισμούς όσον αφορά



την κατασκευή της φυσικής διάταξης του κέντρου δεδομένων, όταν επιχειρείται η διασύνδεση των ανώτερων επιπέδων του δικτύου μεταγωγής. Οι οπτικές ίνες, σαν μέσο μετάδοσης, εξαλείφουν πολλά από τα μειονεκτήματα του χαλκού. Τα κέντρα δεδομένων επωφελούνται από τη διευρυμένη εμβέλεια των συστημάτων οπτικών ινών, τα οποία μπορούν να μεταφέρουν περισσότερα από 10, 40 ή 100 Gb/s σε εκατοντάδες μέτρα ή δεκάδες χιλιόμετρα, ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται, για να ξεπεράσουν αυτούς τους περιορισμούς. Τα καλώδια οπτικών ινών είναι επίσης σημαντικά μικρότερα και ελαφρύτερα από τα χάλκινα καλώδια, με αποτέλεσμα να κάμπτονται ευκολότερα. Κατά την κατασκευή συνδέσεων εντός και μεταξύ rack, όπου συχνά συσσωρεύεται μεγάλος αριθμός καλωδίων, αυτές οι ιδιότητες είναι ιδιαίτερα χρήσιμες. Οι δέσμες ινών όχι μόνο μειώνουν τον απαιτούμενο χώρο στους δίσκους καλωδίων, αλλά και μειώνουν την παρεμπόδιση της ροής του αέρα στα ράφια των εξυπηρετητών, βελτιώνοντας έτσι την αποδοτικότητα της ψύξης. Αυτά τα πλεονεκτήματα, σε συνδυασμό με το χαμηλότερο κόστος των οπτικών συστημάτων, προκαλούν τη σταδιακή κατάργηση των χάλκινων συνδέσεων προς όφελος των οπτικών συνδέσεων, οι οποίες εκτιμάται ότι θα αντιπροσωπεύουν περισσότερο από το 90% των συνδέσεων των κέντρων δεδομένων έως το 2023.

**Πίνακας 0.1: Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες προσαρτώμενες μονάδες**

	Type	Pluggable	Technology	Fibers	Reach	Consumption
<b>10 G</b>	SR	SFP+	1 x 10-Gb/s VCSEL	2 x MMF	400 m	<1 W
	LR	SFP+	1 x 10-Gb/s DFB	2 x SMF	10 km	<1 W
<b>40 G</b>	SR4	QSFP+	4 x 10-Gb/s VCSEL	8 x MMF	150 m	<1.5 W
	LR4	QSFP+	4 x 10-Gb/s DFB (WDM)	2 x SMF	10 km	<3.5 W
<b>100 G</b>	SR10	CFP/CFP2	10 x 10-Gb/s VCSEL	20 x MMF	150 m	CFP: <24 W CFP2: <12 W CFP4: <6 W QSFP28: <3.5 W
	SR4	CFP/CFP2/ CFP4/QSFP28	4 x 25-Gb/s VCSEL	8 x MMF	100 m	
	LR4	CFP/CFP2/ CFP4/QSFP28	4 x 25-Gb/s DFB (WDM)	2 x SMF	10 km	

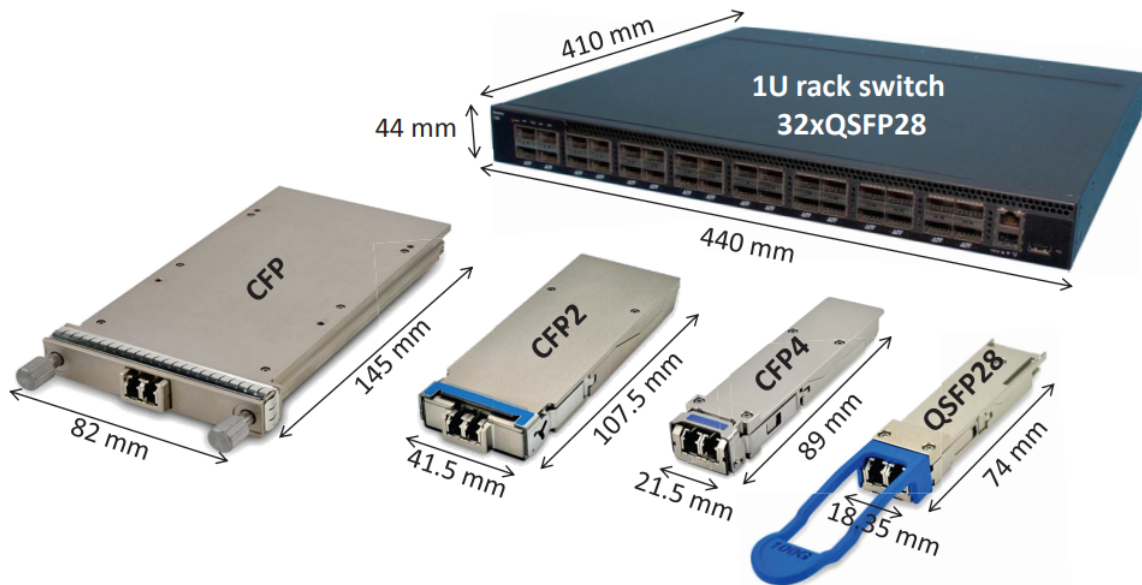
Οι οπτικοί πομποδέκτες είναι ενσωματωμένοι σε προσαρτώμενες μονάδες (pluggable modules) για εφαρμογές κέντρων δεδομένων. Οι μονάδες αυτές μπορούν εύκολα να συνδεθούν σε rack units και σε ελεγκτές διασύνδεσης δικτύου (Network Interface Card ή NIC) όπου τοποθετούνται σε διακομιστές. Ο Πίνακας 1.1 συνοψίζει την τεχνολογία και τις προδιαγραφές για μια σειρά από εμπορικά διαθέσιμα οπτικά προσαρτήματα. Ο οπτικός πομποδέκτης, ο οποίος τυπικά περιλαμβάνει υποσυστήματα οπτικού πομπού

και δέκτη, αποτελείται από τα ακόλουθα εξαρτήματα: ηλεκτρικούς ακροδέκτες στην πλακέτα για τη διασύνδεση με το μεταγωγέα ή το NIC του διακομιστή, ένα κλουβί για τον περιορισμό των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και έναν οπτικό πομποδέκτη (Transmitter Optical SubAssembly ή TOSA και Receiver Optical SubAssembly ή ROSA). Όταν δεν χρησιμοποιείται άμεση διαμόρφωση με λέιζερ, το TOSA περιλαμβάνει: 1) ένα ή περισσότερα λέιζερ και προαιρετικούς διαμορφωτές, 2) τα απαραίτητα ηλεκτρικά κυκλώματα ελέγχου, και 3) τα συστήματα πολυπλεξίας (εκπομπή σε πολλαπλά μήκη κύματος) και σύζευξης για την έξοδο του φωτός στην (στις) ίνα(ες). Ένα ROSA, από την άλλη μεριά, στεγάζει τα οπτικά συστήματα που συζεύγουν το φως από την (τις) ίνα (ίνες) (και αποπολυπλέκουν τα κανάλια, εάν είναι απαραίτητο), καθώς και έναν ή περισσότερους φωτοανιχνευτές και ηλεκτρονικούς ενισχυτές (Trans Impedance Amplifiers ή TIAs).

Όλα τα πρότυπα Ethernet (10, 40 και 100 GE) περιλαμβάνουν τουλάχιστον δύο τύπους μονάδων, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.1: μικρής εμβέλειας (Short Reach ή SR) και μεγάλης εμβέλειας (Long Reach ή LR). Για την υλοποίηση των μονάδων SR χρησιμοποιούνται τα λέιζερ επιφανειακής εκπομπής κάθετης κοιλότητας (Vertical Cavity Surface Emitting Laser ή VCSEL), τα οποία είναι τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα στα σύγχρονα κέντρα δεδομένων λόγω του εξαιρετικά χαμηλού κόστους τους. Τα VCSEL, από την άλλη πλευρά, πρέπει να συνδεθούν με πολύτροπες ίνες (Multi-mode optical Fiber ή MMF), οι οποίες έχουν εμβέλεια μόνο μερικών εκατοντάδων μέτρων (100-400 m όταν χρησιμοποιείται OM4 MMF). Τα μεγάλα κέντρα δεδομένων, από την άλλη πλευρά, απαιτούν καλώδια πολλών χιλιομέτρων για τη σύνδεση μεταγωγέων συγκέντρωσης/κορμού σε διαφορετικά τμήματα ή κτίρια. Για συνδέσεις τέτοιου μήκους χρησιμοποιούνται συνήθως συνδέσεις μονότροπης ίνας (Single-mode optical fiber ή SMF) μεταξύ δύο προσαρτώμενων μονάδων LR, οι οποίες περιλαμβάνουν ένα λέιζερ καταμεμημένης ανάδρασης (Distributed FeedBack ή DFB) με άμεση διαμόρφωση. Αυτές οι μονάδες είναι προς το παρόν οι πιο ακριβές, αλλά μπορούν να μεταδώσουν δεδομένα έως και 10 χιλιόμετρα. Γνωστοί πάροχοι υπηρεσιών, όπως το Facebook και η Google, έχουν δηλώσει ότι η ανάπτυξη SMF προτιμάται για διάφορους λόγους: 1) έχει μεγαλύτερη εμβέλεια, επιτρέποντας μεγαλύτερη ευελιξία στη διάταξη των κέντρων δεδομένων- 2) μπορεί να υποστηρίξει εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς δεδομένων με ελάχιστη ποινή, επιτρέποντας την επαναχρησιμοποίηση της ίδιας διάταξης οπτικών ινών μετά από τεχνολογικές αναβαθμίσεις- και 3) είναι λιγότερο δαπανηρή από την MMF (η ίδια η ίνα).

Η πλειονότητα των κατασκευαστών κατασκευάζουν τις μονάδες τους σύμφωνα με το σχεδιασμό που καθορίζεται στις συμφωνίες πολλαπλών πηγών (Multi Source Agreement ή MSA), οι οποίες καθορίζουν τις ηλεκτρικές, μηχανικές και θερμικές προδιαγραφές για να διασφαλίσουν τη διαλειτουργικότητα, αλλά αφήνουν την υλοποίηση στους προμηθευτές. Ο μικρός συντελεστής μορφής (Small Form Factor Pluggable ή SFP), ο τετραπλός μικρός συντελεστής μορφής (Quad Small Form Factor Pluggable ή QSFP) και ο συντελεστής μορφής C είναι μερικοί από τους πιο συνηθισμένους συντελεστές που χρησιμοποιούνται στα κέντρα δεδομένων, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.1. Ο πρώτος, SFP, σχεδιάστηκε αρχικά για να υποστηρίξει 1 GE (δεν εμφανίζεται στον πίνακα). Το SFP+, το οποίο έχει τον ίδιο παράγοντα μορφής με το SFP, αλλά επιτρέπει την πλήρη διπλής όψης μετάδοση 10 Gb/s σε ένα ζεύγος συνδεδεμένων ινών, αναπτύχθηκε με βάση αυτόν τον σχεδιασμό. Οι μονάδες SFP(+) έχουν μικρό αποτύπωμα (8,5x13,45x6,5) και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας (λιγότερο από 1 W), επιτρέποντας την τοποθέτηση έως και 56 μονάδων σε ένα μόνο ράφι 1U. Ο αριθμός των λωρίδων 10 Gb/s μπορεί να αυξηθεί σε 40 Gb/s με τη χρήση ενός ελαφρώς μεγαλύτερου παράγοντα μορφής QSFP+, όπου το Quad (Q) αναφέρεται σε τέσσερις λωρίδες (400 Gb/s σε αυτή την περίπτωση). Για τις μονάδες SR QSFP+ είναι απαραίτητα τέσσερα ζεύγη ινών εισόδου/εξόδου, τα οποία τοποθετούνται σε ταινίες ινών και συνδέονται με τις μονάδες μέσω συνδέσμων πολλαπλών ινών (Multi-fiber Push On ή MPO). Στο LR QSFP+, τα τέσσερα κανάλια πολυπλέκονται στην ίδια ίνα χρησιμοποιώντας την προσέγγιση της χονδροειδούς πολυπλεξίας μήκους κύματος (Coarse Wavelength Division Multiplexing ή CWDM) με χρήση διαφορετικών μηκών κύματος. Ως αποτέλεσμα, απαιτείται μόνο ένα ζεύγος ινών εισόδου/εξόδου για τις μονάδες LR.

Παρόλο που το συνολικό μέγεθος (13,5x18,4x72,4 mm) και η κατανάλωση ισχύος (λιγότερο από 3,5 W) είναι μεγαλύτερα από το SFP+, το QSFP+ μειώνει τη διάσταση και τη χρήση ανά bit. Μέχρι και 36 pluggables μπορούν να χωρέσουν σε ένα switch 1 Rack Unit ή RU που χρησιμοποιεί QSFP+, με αποτέλεσμα συνολική χωρητικότητα 1,44 Tb/s, η οποία είναι 2,6 φορές μεγαλύτερη από την απόδοση που υποστηρίζεται από το SFP+ (560 Gb/s). Επιπλέον, η αναβάθμιση σε QSFP+ μειώνει τη χρήση ενέργειας ανά bit, η οποία είναι μικρότερη από 0,1 W/Gb/s.



**Εικόνα 0.3: 100-GE προσαρτώμενης μορφής και μεταγωγέας που υποστηρίζει 32x100-GE**

Εάν έπρεπε να διατηρηθούν τόσο μικροί συντελεστές μορφής, η μετάβαση στα 100 Gb/s ήταν ιδιαίτερα δυσχερής. Ως αποτέλεσμα, προτάθηκαν αρχικά μεγαλύτερες μονάδες με βάση το CFP MSA, όπου το C σήμαινε εκατό (στα λατινικά centum). Όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.1, υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι για τα 100 GE: διατήρηση του ίδιου βασικού ρυθμού με ταυτόχρονη αύξηση του αριθμού των λωρίδων (10x10 Gb/s) ή αύξηση του ρυθμού δεδομένων με ταυτόχρονη διατήρηση ενός συντελεστή κλιμάκωσης τεσσάρων μηκών κύματος (425 Gb/s). Αν και χρησιμοποιούνται και οι δύο τεχνολογίες για την κατασκευή μονάδων SR, τα LR pluggables βασίζονται στη δεύτερη προσέγγιση, η οποία χρησιμοποιεί CWDM. Στην Εικόνα 1.3 απεικονίζονται διάφορες εκδόσεις των πρόσθετων μονάδων 100-GE, καθώς και ένας διακόπτης 1 RU ως παράδειγμα. Είναι προφανές ότι το μέγεθος των 100-GE pluggables, καθώς και η κατανάλωση ρεύματός τους, έχει συρρικνωθεί με την πάροδο του χρόνου (βλ. Πίνακα 1.1). Η τρέχουσα επανάληψη χρησιμοποιεί τα QSFP2810, τα οποία έχουν το ίδιο μέγεθος και την ίδια κατανάλωση ρεύματος με το QSFP+ των 40 Gb/s, αλλά μεταφέρουν χωρητικότητα 100 Gb/s.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η Ethernet Alliance επικεντρώνεται στην ανάπτυξη νέων προτύπων για την εξυπηρέτηση ρυθμών δεδομένων 200 και 400 Gb/s. Ως αποτέλεσμα, σημαντικοί κατασκευαστές εξετάζουν ήδη πώς θα υλοποιήσουν συνδέσεις με τόσο υψηλό ρυθμό δεδομένων, διατηρώντας παράλληλα το αποτύπωμα και την κατανάλωση ενέργειας σε χαμηλά επίπεδα. Οραματίζονται πιο προηγμένα και

φασματικά αποδοτικά σχήματα διαμόρφωσης (π.χ. διαμόρφωση πλάτους παλμού 4 επιπέδων, Pulse Amplitude Modulation ή PAM-4) για τη διατήρηση του αριθμού των λωρίδων, ενώ επαναχρησιμοποιούνται τα σημερινά εξαρτήματα με περιορισμένο εύρος ζώνης, προκειμένου να επιτευχθούν τέτοιες ταχύτητες. Η πιο βασική έκδοση της διαμόρφωσης πλάτους παλμού 2 επιπέδων (PAM-2) που χρησιμοποιείται στα σημερινά pluggables στέλνει μόνο ένα bit/σύμβολο χρησιμοποιώντας δύο επίπεδα έντασης του μεταδιδόμενου φωτός. Η PAM-4, από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιεί τέσσερα επίπεδα έντασης για την κωδικοποίηση δύο bits σε κάθε σύμβολο, διπλασιάζοντας έτσι τη χωρητικότητα της σχέση με την PAM-2, διατηρώντας τον ίδιο ρυθμό συμβόλων και κατά συνέπεια το ίδιο απαραίτητο εύρος ζώνης.

Ένα από τα πιο ελπιδοφόρα μοντέλα υλοποίησης μονάδων 200 Gb/s βασίζεται σε 4 μονάδες 50 Gb/s σε παράγοντα μορφής QSFP56, οι οποίες θα έχουν διαστάσεις QSFP αλλά υψηλότερη απόδοση δεδομένων λωρίδας (έως 56 Gb/s για να ληφθεί υπόψη η πιθανή επιβάρυνση του Forward-Error Correction ή FEC κώδικα και του πρωτοκόλλου). Για την υλοποίηση των μεμονωμένων λωρίδων 50-56 Gb/s θα χρησιμοποιηθούν πιθανότατα σήματα PAM-4 στα 25-28 GBaud. Η σχεδίαση 400-GE, από την άλλη πλευρά, είναι πιο διχαστική λόγω της πολύπλοκης εκτέλεσής της. Η ερευνητική κοινότητα επικεντρώνεται ενεργά στην επίδειξη διεπαφών 100 Gb/s με μία μόνο λωρίδα (ένας φορέας), η οποία θα επέτρεπε τη διατήρηση της τρέχουσας κλιμάκωσης λωρίδων με 4 παράγοντες.

Με τις τεράστιες παραγωγικές δυνατότητες, καθώς και τη δυνατότητα ολοκλήρωσης ηλεκτρονικών και φωτονικών σε ένα μόνο τσιπ, η ολοκλήρωση πυριτίου αναμένεται να μειώσει το κόστος των οπτικών διασυνδέσεων σε πρωτοφανές κόστος/bit. Το πυρίτιο μπορεί να επιτρέψει την ολοκλήρωση πολλών λωρίδων (π.χ. 4, 8, 16 ή περισσότερων) σε ένα μόνο συμπαγές τσιπ, στο οποίο θα μπορούσαν να πολυπλέκονται στο πεδίο του μήκους κύματος, απαιτώντας μία μόνο ίνα/ζεύγος (άρα μείωση του κόστους συσκευασίας). Η προσέγγιση αυτή θα μπορούσε να οδηγήσει σε 1,6 Tb/s χωρητικότητα σε ένα τσιπ 16×100 Gb/s.

## 1.4 Τα προβλήματα – προκλήσεις στα Κέντρα Δεδομένων

**1. Κλίμακα και χωρητικότητα κέντρου δεδομένων:** Στο εγγύς μέλλον, τα τόσο μεγάλα κέντρα δεδομένων θα συνεχίσουν να αναπτύσσονται αυξάνοντας τις ταχύτητες που χρησιμοποιούν και τον αριθμό των θυρών που ενσωματώνονται σε ένα τσιπ μεταγωγέα. Το επόμενο αναμενόμενο βήμα θα είναι η αναβάθμιση ολόκληρου του συστήματος στις ταχύτητες ζεύξης 400-800 Gb/s. Παρόλα αυτά, η ταχύτητα του δικτύου θα είναι πολύ υψηλότερη, χρησιμοποιώντας την ίδια αρχιτεκτονική, αυτή η αλλαγή αποφέρει μόνο 4 φορές αύξηση της συνολικής χωρητικότητας, η οποία δεν είναι αρκετή για μεγάλους παρόχους. Για να μπορέσουν να συνεχίσουν να αυξάνουν τη συνολική χωρητικότητα περιορίζοντας ταυτόχρονα τον αριθμό των σταδίων μεταγωγής, οι προμηθευτές μεταγωγέων παράγουν τσιπ που υποστηρίζουν μεγαλύτερο αριθμό θυρών.

**2. Μεγάλη πολυπλοκότητα και κόστος δικτύου:** Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα των σημερινών αρχιτεκτονικών Folded Clos που χρησιμοποιείται στα κέντρα δεδομένων είναι η υψηλή πολυπλοκότητα του δικτύου. Στον Πίνακα 1.2 παρουσιάζουμε τον συνολικό αριθμό των διεπαφών, των μεταγωγέων και των καλωδίων που απαιτούνται στο κέντρο δεδομένων της Google. Όπως απεικονίζεται, για να γίνει διασύνδεση όλων των υπηρεσιών της η Google χρησιμοποιεί δεκάδες χιλιάδες μεταγωγείς και εκατομμύρια pluggables (διεπαφές) και καλώδια. Για λόγους απλότητας μετράμε όλα τα καλώδια στο κέντρο δεδομένων ως συνδέσεις οπτικών ινών. Ο μεγάλος αριθμός συσκευών και στοιχείων που χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους μεγάλης κλίμακας δομή μεταγωγής, απαιτεί τεράστιες επενδύσεις. Για παράδειγμα, μέχρι το τέλος του 2011 το Facebook κατείχε εξοπλισμό δικτύου αξίας άνω του 1 δισεκατομμυρίου δολαρίων. Παρά το κόστος του εξοπλισμού, πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη το τεράστιο κόστος ανάπτυξης και λειτουργίας μιας τόσο πολύπλοκης υποδομής που βασίζεται σε εκατομμύρια συσκευές δικτύωσης.

**Πίνακας 0.2: Ενεργειακή κατανάλωση προσαρτώμενων μονάδων**

Device	Total count	Power per device	Total power
10G SFP+	1,048,576	1 W	1 MW
40G QSFP+	196,608	1.5 (SR) - 3.5 (LR) W	0.3 (SR) -0.7 (LR) MW
Switch chips	22,528	94 W	2.1 MW
Fibers (if 40G LR-SMF)	1,245,184	0 W	0 MW
Fibers (if 40G SR-MMF)	1,835,008	0 W	0 MW
<b>Total amount of power</b>			<b>3.5-3.8 MW</b>

**3. Τεράστια κατανάλωση ενέργειας:** Το 2014 τα αμερικανικά κέντρα δεδομένων κατανάλωσαν το 2% της ενέργειας ολόκληρης της χώρας, το οποίο ισοδυναμεί με την κατανάλωση 6,4 εκατομμυρίων μέσων κατοικιών. Η διασύνδεση του δικτύου αντιπροσωπεύει το 10-20% της εν λόγω κατανάλωσης. Προκειμένου να δοθεί μια καλύτερη εικόνα της κατανάλωσης, παρουσιάζουμε στον Πίνακα 1.2, την υπολογισμένη κατανάλωση ενέργειας του δικτύου του κέντρου δεδομένων της Google, αυστηρά λαμβάνοντας υπόψη τις συνεισφορές της μεταφοράς και της μεταγωγής των δεδομένων. Υπολογίσαμε και πάλι τα κατώτερα και ανώτερα όρια κατανάλωσης που σχετίζονται με τη χρήση του SR ή LR pluggable διεπαφών. Ωστόσο, υπάρχουν άλλες πηγές κατανάλωσης που σχετίζονται με την τοπολογία της δικτύωσης, όπως η τροφοδοσία ρεύματος, η τροφοδοσία των ραφιών που φιλοξενούν τους μεταγωγείς και τα συστήματα ψύξης και φωτισμού. Ορισμένες πηγές εκτιμούσαν το 2012 ότι τα μεγάλα κέντρα δεδομένων της Google κατανάλωναν μεταξύ 50 και 100 MW. Εάν υποθέσουμε ότι το 15% της εν λόγω κατανάλωσης σχετίζεται με τον ιστό δικτύωσης (networking fabric), λαμβάνουμε 7,5-15 MW, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα ένα εκπληκτικό ετήσιο κόστος ύψους 3,9-7,9 εκατομμυρίων δολαρίων.

**4. Υψηλή καθυστέρηση:** Η ύπαρξη πολλαπλών επιπέδων μεταγωγής μπορεί να αυξήσει την καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (end-to-end). Οι πιο πρόσφατοι μεταγωγείς 100-GE σε σύνδεση από θύρα σε θύρα (port-to-port) έχουν καθυστέρηση 300-400ns. Κατά συνέπεια, η συνολική καθυστέρηση φτάνει τα 2.7-3.6 μs όταν αθροίζεται ο συνολικός αριθμός των μεταγωγέων που πρέπει να διατρέξει ένα Ethernet πακέτο για να εκτελέσει οποιαδήποτε σύνδεση διακομιστή προς διακομιστή (server-to-server) στο κέντρο δεδομένων (9 μεταγωγείς όταν διασχίζει όλα τα στάδια) . Ωστόσο, η καθυστέρηση μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω όταν λαμβάνεται υπόψη η απόρριψη πακέτων που συμβαίνει στο δίκτυο. Η απόρριψη πακέτων μπορεί να συμβεί

για πολλούς λόγους. Μεγάλος αριθμός από αυτούς σχετίζεται με δυσλειτουργία του δικτύου μεταγωγής: σφάλματα ακολουθίας ελέγχου πλαισίου ίνας, ελαττωματικοί ASIC μεταγωγείς, σφάλμα στο δίκτυο μεταγωγής, σφάλμα λογισμικού μεταγωγής ή το πρόβλημα της συμφόρησης του δικτύου. Σε τέτοια μεγάλα δίκτυα, που περιέχουν χιλιάδες μεταγωγείς, εμφανίζεται δυσλειτουργία συχνά. Σε ορισμένες περιπτώσεις οι μεταγωγείς στέλνουν συναγερμούς στο σύστημα διαχείρισης για να ειδοποιήσουν για βλάβες, ωστόσο μερικές φορές παραμένουν σιωπηλοί. Ως εκ τούτου, τα μεγάλα κέντρα δεδομένων πρέπει να εφαρμόζουν πολύπλοκους αλγορίθμους (π.χ. Pingmesh) για τον εντοπισμό και την ανάκτηση από τέτοιες αποτυχίες. Ορισμένα παραδείγματα σιωπηλής απόρριψης πακέτων είναι η περίπτωση της μαύρης τρύπας (black hole) , όπου απορρίπτονται ντετερμινιστικά πακέτα που περιέχουν ένα συγκεκριμένο "μοτίβο". Αυτή η σιωπηλή τυχαία απόρριψη πακέτων, μπορεί να ξεκινήσει να απορρίπτει πακέτα με ακόμα πιο τυχαίο τρόπο. Αυτή η κατάσταση μπορεί συνήθως να επιδιορθωθεί με επαναφόρτωση του μεταγωγέα, ενώ αν συνεχίσει η τυχαία απόρριψη πακέτων τότε ο μεταγωγέας πρέπει να αντικατασταθεί. Αυτές οι αστοχίες μεταγωγέων μπορούν να επηρεάσουν σοβαρά την καθυστέρηση από άκρο σε άκρο. Επομένως, η περαιτέρω αύξηση του αριθμού των συσκευών μεταγωγής και των σταδίων θα οδηγήσει τελικά σε μη ανεκτές καθυστερήσεις που μπορεί να περιορίσουν την ανάπτυξη των αναμενόμενων εφαρμογών νέφους πραγματικού χρόνου, οι οποίες παρουσιάζουν ισχυρές απαιτήσεις καθυστέρησης.

Τα κυριότερα εμπόδια για τη απρόσκοπτη ανάπτυξη των οπτικών των κέντρων δεδομένων είναι η έλλειψη ενός χάρτη πορείας πέραν των 800G, το υψηλό κόστος τους, η ισχύς που καταναλώνεται κυρίως από τις ηλεκτρικές συσκευές, και ο αυξανόμενος χώρος που καλύπτουν τα ράφια λόγω της περιορισμένης πυκνότητας εύρους ζώνης. Βραχυπρόθεσμα, τα κέντρα δεδομένων θα συνεχίσουν να αυξάνουν τη χωρητικότητά τους, αναβαθμίζοντας τη χωρητικότητα των μεταγωγέων και των διεπαφών τους.

## 1.5 Σκοπός Διπλωματικής

Συνοπτικά, η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά τη χρήση των οπτικών επικοινωνιών φυσικού επιπέδου για την αντιμετώπιση των προκλήσεων του περιορισμένου εύρους ζώνης. Θα παράσχουμε μια εισαγωγή στις οπτικές επικοινωνίες, μια επισκόπηση των οπτικών δικτύων και του εξειδικευμένου εξοπλισμού τους και μια σύγκριση των σημερινών τεχνολογιών επικοινωνίας και



μεταγωγής. Στόχος είναι να προταθούν νέοι σχεδιασμοί και βελτιστοποιήσεις για οπτικά συστήματα που μπορούν να καλύψουν την αυξανόμενη ζήτηση για εύρος ζώνης με οικονομικά αποδοτικό και αποτελεσματικό τρόπο.

## **1.6 Δομή Διπλωματικής**

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση του αντικειμένου της παρούσας εργασίας, παράλληλα με μια ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των κέντρων δεδομένων ανά τα έτη. Γίνεται ανάλυση των προβλημάτων και των προκλήσεων που εμφανίστηκαν από τις καινούργιες διαδικτυακές ανάγκες καθώς και των υπηρεσιών υπολογιστικού νέφους που εμφανίστηκαν στην αγορά την τελευταία δεκαετία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται εκτενής αναφορά στους οπτικούς διαμορφωτές καθώς και στις τεχνικές πολυπλεξίας και ανώτερης διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα οπτικά δίκτυα. Ακολουθεί ανάλυση και επεξήγηση κάθε σχήματος διαμόρφωσης και μορφοποίησης ξεχωριστά. Για κάθε σχήμα παρατίθενται τα κύρια χαρακτηριστικά του, οι χαρακτηριστικές εξισώσεις καθώς και γραφήματα ώστε να υπάρξει πληρέστερη κατανόηση.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναφέρονται οι τεχνικές μεταγωγής οπτικού κυκλώματος, οπτικής και ηλεκτρονικής μεταγωγής που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα υπερταχεία συστήματα οπτικών τηλεπικοινωνιών, καθώς και οι αναπτυξιακές προοπτικές που έχουν. Επίσης αναλύονται διεξοδικά οι πομποδέκτες άμεσης ανίχνευσης καθώς και οι σύμφωνοι πομποδέκτες. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την σύγκριση των τεχνολογιών άμεσης ανίχνευσης και συμφώνων πομποδεκτων.

Το τέταρτο κεφάλαιο είναι επικεντρωμένο στις τεχνολογίες φωτονικής ολοκλήρωσης και των οπτικών πυριτίου καθώς και του εξοπλισμού τους. Αναλύεται η πορεία προς την υιοθέτηση που θα πρέπει να γίνει, η ανάλυση της εξέλιξης τους στην βιομηχανία καθώς και τα προβλήματα που προκύπτουν από την χρήση ξεπερασμένων αρχιτεκτονικών δικτύου. Τέλος ακολουθούν τα συμπεράσματα και οι βιβλιογραφικές αναφορές.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

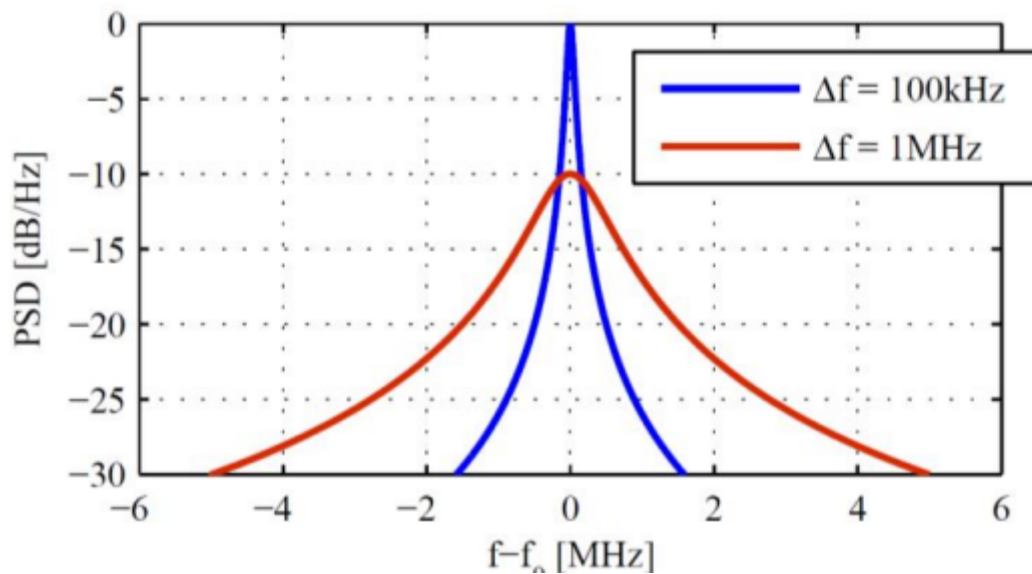
## ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΙ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑΣ ΣΤΙΣ ΟΠΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

Στα σημερινά δίκτυα τηλεπικοινωνιών χρησιμοποιούνται διαφορετικές τεχνικές πολυπλεξίας και διαμόρφωσης ανάλογα με τον σκοπό και το είδος της κίνησης του δικτύου. Η δημιουργία εξοπλισμού και άλλων μεθόδων για την πλήρη αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων των οπτικών ινών και των δικτύων λαμβάνει όλο και μεγαλύτερη προσοχή από την ερευνητική κοινότητα. Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλύσουμε τις πηγές λέιζερ, τους οπτικούς διαμορφωτές, τις πιο συνήθεις τεχνικές πολυπλεξίας καθώς και ανώτερα σχήματα διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται στις οπτικές τεχνολογίες ώστε να επιτύχουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης.

### 2.1 Πηγή LASER

Για τη μεταφορά δεδομένων μέσω οπτικών ινών είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός σύμμορφου οπτικού φέροντος πάνω στο οποίο τα δεδομένα μπορούν να διαμορφωθούν. Μια κατάλληλη πηγή οπτικού φέροντος θα είχε σταθερό εύρος, υψηλή ισχύ, και σταθερότητα φάσης και συχνότητας. Στην πράξη, λόγω των ορίων των εξαρτημάτων και των υλικών, αυτό δεν είναι πάντα εφικτό. Τα λέιζερ διαθέτουν πολλές από αυτές τις ιδιότητες, γεγονός που τα καθιστά την προτιμώμενη πηγή φέροντος για τις οπτικές επικοινωνίες. Η ηλεκτρική άντληση χρησιμοποιείται για τη διέγερση των ηλεκτρονίων σε υψηλότερες ενεργειακές καταστάσεις, η οποία είναι απαραίτητη για τη λειτουργία των λέιζερ. Στην έξοδο του λέιζερ ανιχνεύονται διακυμάνσεις πλάτους και φάσης ως συνέπεια της αυθόρμητης εκπομπής ορισμένων φωτονίων στα λέιζερ, οι οποίες μπορούν να υποβαθμίσουν την απόδοση των τεχνικών διαμόρφωσης που χρησιμοποιούν τη διάσταση φάσης του φορέα για τη διαμόρφωση δεδομένων. Η συνάρτηση γραμμής Lorentzian μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του αυξημένου εύρους γραμμής (linewidth) του λέιζερ που προκαλείται από τις διακυμάνσεις φάσης και πλάτους της εξόδου του. Η πλειονότητα των σημερινών λέιζερ χρησιμοποιεί τεχνολογία καταμεμημένης ανάδρασης DFB για τη δημιουργία linewidth στην περιοχή του 1 MHz, γεγονός που τα καθιστά επιθυμητά για την κατασκευή οπτικών φορέων. Τα λέιζερ εξωτερικής κοιλότητας (External Cavity Laser ή ECL) μπορούν να επιτύχουν linewidth 100 kHz και ακόμη χαμηλότερα. Τα ECL είναι

εξαιρετικά ελκυστικά για υψηλότερα σχήματα διαμόρφωσης, τα οποία είναι συνήθως πιο ευαίσθητα στο linewidth του λέιζερ, παρά το υψηλότερο κόστος τους. Η φασματική πυκνότητα ισχύος (Probability Spectral Density ή PSD) της εξόδου του λέιζερ είναι μια Λορεντζιανή συνάρτηση γραμμής που εξαρτάται από τον χρόνο συμφωνίας. Το linewidth του λέιζερ καθορίζεται από το πλήρες πλάτος της κατανομής της φασματικής πυκνότητας ισχύος στο μισό μέγιστο (Full Width at Half Maximum ή FWHM) ( $f$ ). Στην Εικόνα 2.3 παρουσιάζεται η PSD της εξόδου δύο πηγών λέιζερ με linewidth 100 kHz και 1 MHz, αντίστοιχα, για σύγκριση.



Εικόνα 0.1: Η ισχύς εξόδου του φάσματος ενός λέιζερ σε Λορεντζιανή κατανομή

Οι διακυμάνσεις της φάσης που προκαλούνται από το linewidth του λέιζερ ( $f$ ) ακολουθούν μια τυχαία βηματική διαδικασία και η μεταβολή τους έχει ως εξής:

$$\sigma_{noise}^2 = 2\pi\Delta f t_s \quad (2.1)$$

Ο χρόνος δειγματοληψίας ή παρατήρησης συμβολίζεται με  $t_s$ . Η συχνότητα εξόδου της πηγής λέιζερ μεταβάλλεται στην περιοχή των 200 MHz, εκτός από τις μεταβολές φάσης. Παρόλο που τα συστήματα άμεσης ανίχνευσης είναι ανθεκτικά σε τέτοιες μικρές διακυμάνσεις, οι τεχνικές διαμόρφωσης που επηρεάζονται τόσο από τις διακυμάνσεις του λέιζερ του πομπού όσο και του δέκτη αντιμετωπίζουν έναν περιορισμό. Με την αύξηση της περιόδου συμβόλου των σύμμορφα διαμορφωμένων σημάτων, η επιρροή των ελαττωμάτων του λέιζερ αυξάνεται. Η ψηφιακή επεξεργασία σήματος (Digital Signal Processing ή DSP) χρησιμοποιείται για την εκτίμηση και την εξάλειψη των σφαλμάτων συχνότητας και φάσης στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό.

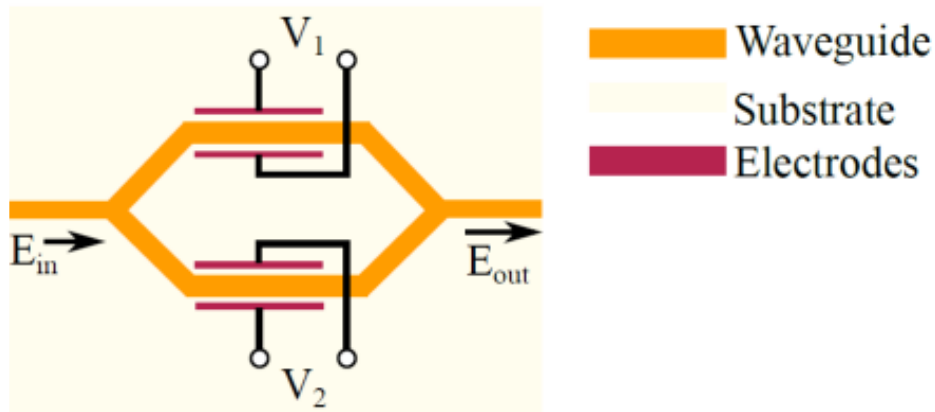
## 2.2 Οπτικός διαμορφωτής

Ως εκ τούτου, η διαμόρφωση των δεδομένων πάνω σε ένα οπτικό φέρον είναι απαραίτητη ώστε να μεταδοθούν μέσω οπτικών ινών. Γενικά, τα προς αποστολή δεδομένα επηρεάζουν ένα ή περισσότερα χαρακτηριστικά του οπτικού φέροντος που παρατηρούνται από τον δέκτη στο αντίθετο άκρο της ζεύξης. Για τη διαμόρφωση του σήματος δεδομένων σε έναν φορέα λέιζερ μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεση διαμόρφωση ή η χρήση εξωτερικών διαμορφωτών. Τα ηλεκτρικά σήματα δεδομένων ρυθμίζουν το ρεύμα οδήγησης της πηγής λέιζερ στην άμεση διαμόρφωση, το οποίο στη συνέχεια μετατρέπεται σε μεταβολή της οπτικής ισχύος του λέιζερ. Παρά την απλότητά της, οι χρήσεις της τεχνικής περιορίζονται κυρίως σε εφαρμογές χαμηλού ρυθμού δεδομένων. Ο θεμελιώδης λόγος είναι ότι η άμεση διαμόρφωση του ρεύματος οδήγησης του λέιζερ δημιουργεί ανεπιθύμητη διακύμανση συχνότητας (chirp effect), η οποία διευρύνει το φάσμα του σήματος. Το διευρυμένο οπτικό φάσμα είναι πιο επιρρεπές σε φαινόμενα διάδοσης, περιορίζοντας το μέγιστο εφικτό εύρος. Επειδή το chirp αυξάνεται με το ρυθμό δεδομένων, οι μέθοδοι αυτές είναι ανέφικτες για μετάδοση υψηλής χωρητικότητας. Αν και έχουν αναφερθεί ρυθμοί δεδομένων έως και 40 Gb/s με χρήση άμεσης διαμόρφωσης, αυτή η προσέγγιση διαμόρφωσης περιορίζεται επί του παρόντος σε συστήματα με ρυθμούς δεδομένων έως και 2.5 Gb/s. Το οπτικό φέρον μπορεί να τροποποιηθεί με τη χρήση εξωτερικού διαμορφωτή για να αποφευχθεί το chirp συχνότητας από την πηγή λέιζερ. Επειδή το ρεύμα της πηγής λέιζερ δεν μεταβάλλεται για τη διαμόρφωση δεδομένων, βρίσκεται σε λειτουργία συνεχούς κύματος (CW). Ο διαμορφωτής ηλεκτροαπορρόφησης (Electro Absorption Modulator ή EAM) και ο διαμορφωτής Mach-Zehnder (διαμορφωτής MZ, MZM) είναι δύο τύποι εξωτερικών διαμορφωτών που χρησιμοποιούνται συνήθως. Η λειτουργία του EAM βασίζεται στην ιδέα ότι η ενέργεια του χάσματος ζώνης (bandgap) ενός ημιαγωγού μπορεί να μειωθεί με την εισαγωγή μιας εξωτερικής τάσης. Το υλικό θα είναι διαφανές και το φως θα διέρχεται από αυτό εάν η συχνότητα της πηγής λέιζερ επιλεγεί έτσι ώστε η παραγόμενη ενέργεια ( $E=hf$ ) να είναι μικρότερη από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού όταν δεν εφαρμόζεται τάση. Όταν παρέχεται εξωτερική τάση, η ενέργεια του χάσματος του ημιαγωγού μειώνεται και το εισερχόμενο φως λέιζερ αποσβένεται από το υλικό, με αποτέλεσμα να μην περνάει φως. Η ένταση του φωτός λέιζερ μπορεί να ρυθμιστεί αποτελεσματικά ανάλογα με την ακολουθία δεδομένων που πρόκειται να αποσταλεί. Όμως, όταν αλλάζει η απορρόφηση του ημιαγωγίμου

υλικού, αλλάζει και ο δείκτης διάθλασής του, με αποτέλεσμα διάφορες μεταβολές φάσης στη διαμορφωμένη πηγή φωτός λέιζερ. Κατά συνέπεια, το EAM παράγει μια *chirp* συχνότητα που είναι συνήθως σημαντικά χαμηλότερη από εκείνη που παράγεται εάν το λέιζερ διαμορφωνόταν απευθείας. Επιπροσθέτως, η επίδοση του EAM επηρεάζεται από τη συχνότητα του φέροντος, η οποία χρησιμοποιείται σε συστήματα μετάδοσης χαμηλού κόστους που επιτρέπουν ταχύτητες δεδομένων 10 έως 40 Gb/s.

### 2.2.1 Διαμορφωτής Mach-Zehnder (MZM)

Ένας άλλος τύπος εξωτερικού διαμορφωτή χρησιμοποιεί το ηλεκτρο-οπτικό φαινόμενο, γνωστό και ως φαινόμενο Pockels, όπου ένα ηλεκτρικό πεδίο χρησιμοποιείται για την αλλαγή του δείκτη διάθλασης συγκεκριμένων υλικών. Η φάση του μεταδιδόμενου οπτικού κύματος μεταβάλλεται ως αποτέλεσμα της αλλαγής του δείκτη διάθλασης. Το φαινόμενο της συμβολής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετατροπή αυτής της αλλαγής της φάσης σε αλλαγή της έντασης του οπτικού κύματος. Ως αποτέλεσμα, η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη ρύθμιση της φωτεινότητας ενός λέιζερ από το εξωτερικό. Με την ενσωμάτωση του οπτικού κυματοδηγού σε ένα υπόστρωμα, μια τέτοια συσκευή μπορεί να κατασκευαστεί ως ολοκληρωμένη οπτική συσκευή. Το υπόστρωμα δομείται συνήθως από  $\text{LiNbO}_3$ , αλλά μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν υλικά  $\text{InP}$ ,  $\text{GaAs}$  και ηλεκτροοπτικά πολυμερή, επιτρέποντας την πραγματοποίηση ταχυτήτων διαμόρφωσης άνω των 60 Gb/s. Αυτή η διάταξη ονομάζεται διαμορφωτής Mach-Zehnder (MZM) και παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.2. Ένας οπτικός διαχωριστής 3-dB κατανέμει το φως εισόδου στον κυματοδηγό του MZM ομοιόμορφα στους δύο βραχίονες. Κάθε βραχίονας κυματοδηγού περιβάλλεται από ηλεκτρόδια, επιτρέποντας την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του βραχίονα με τη χρήση εξωτερικής τάσης. Κατά τη διάρκεια του φαινομένου Pockels, τα εφαρμοζόμενα ηλεκτρικά πεδία στους βραχίονες του MZM ρυθμίζουν την αλλαγή φάσης και στους δύο βραχίονες. Το κύμα φωτός (light wave) προστίθεται στο επόμενο τμήμα μετά την καθυστέρηση φάσης στους ξεχωριστούς βραχίονες.



Εικόνα 0.2: Σχεδιάγραμμα Mach Zehnder οπτικού διαμορφωτή

Μπορούν να επιτευχθούν τόσο ενισχυτικές όσο και καταστρεπτικές συμβολές με προσεκτικό έλεγχο της φάσης του φωτεινού κύματος και στους δύο βραχίονες. Ως αποτέλεσμα, η ένταση του φωτός στην έξοδο είναι δυνατό να ρυθμιστεί. Πρέπει να επισημανθεί ότι η ρύθμιση του δείκτη διάθλασης σε έναν από τους βραχίονες του MZM είναι το μόνο που απαιτείται για να αλλάξει η ένταση του φωτός στην έξοδο. Η κατασκευή του MZM σε λειτουργία διπλής οδήγησης, όπου η τάση σε κάθε βραχίονα μπορεί να ρυθμίζεται ανεξάρτητα, αποτελεί συνήθη πρακτική. Η έξοδος του MZM έχει την εξής μορφή:

$$E_{out}(t) = \frac{E_{in}(t)}{2} (e^{i\varphi_1(t)} + e^{i\varphi_2(t)}) \quad (2.2)$$

Τα  $\varphi_1(t)$  και  $\varphi_2(t)$  αντιπροσωπεύουν τη φάση που επάγεται στον άνω και στον κάτω βραχίονα του MZM, αντίστοιχα, και υπολογίζονται ως εξής:

$$\varphi_1(t) = \frac{V_1(t)}{V_{\pi 1}} \pi \quad (2.3)$$

$$\varphi_2(t) = \frac{V_2(t)}{V_{\pi 2}} \pi \quad (2.4)$$

όπου  $V_1$  και  $V_2$  είναι οι τάσεις που είναι απαραίτητες και για τους δύο βραχίονες ώστε να επιτευχθεί μετατόπιση φάσης συγκριτικά με την είσοδο. Το MZM είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί είτε σε λειτουργία push-pull είτε σε λειτουργία push-push. Και οι δύο βραχίονες του MZM παράγουν την ίδια μετατόπιση φάσης στο διαδιδόμενο φως όταν  $V_{\pi 1} = V_{\pi 2} = V_{\pi}$  και  $V_1(t) = V_2(t) = V(t)$ , με αποτέλεσμα ένα προϊόν με διαμόρφωση φάσης μετά την επανένωση. Όταν χρησιμοποιείται σε λειτουργία push-push, ένα MZM χρησιμεύει ως διαμορφωτής φάσης και η έξοδος σε αυτή την περίπτωση προκύπτει από:

$$E_{out} = E_{in}(t)e^{i\frac{V(t)}{v\pi}\pi} \quad (2.5)$$

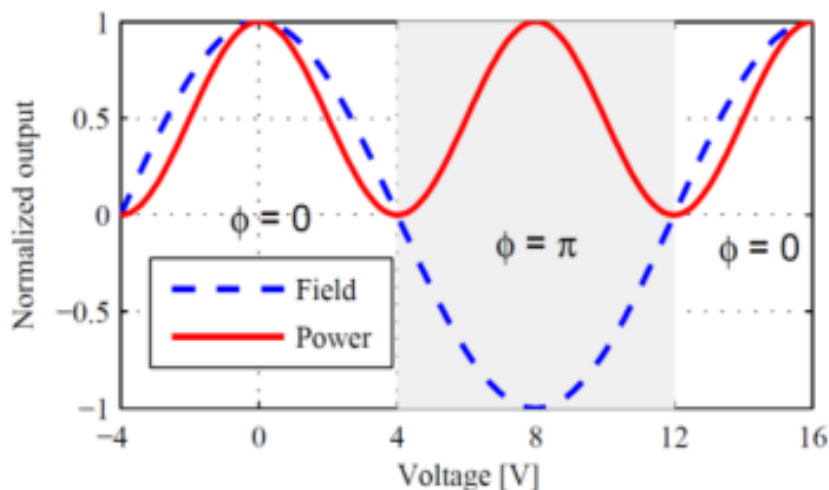
Όταν ο MZM χρησιμοποιείται σε λειτουργία push-pull, η τάση που παρέχεται και στους δύο βραχίονες είναι ίση αλλά αντίθετου σημείου. Κατά συνέπεια, η φάση που παράγεται από τους βραχίονες του MZM είναι αντίθετη μεταξύ τους. Όταν η εφαρμοζόμενη τάση στους βραχίονες του MZM είναι  $V_1(t) = V_2(t) = V(t)/2$ . Η έξοδος συνδέεται με την είσοδο με την ακόλουθη σχέση:

$$E_{out}(t) = \frac{E_{in}(t)}{2} \left( e^{i\frac{V(t)}{2v\pi}\pi} + e^{-i\frac{V(t)}{2v\pi}\pi} \right) = E_{in}(t) * \cos\left(\frac{V(t)}{2v\pi}\pi\right) \quad (2.6)$$

Η σχέση ανάμεσα στην ισχύ εισόδου και την ισχύ εξόδου μπορεί να βρεθεί με το τετραγωνισμό της σχέσης 2.6:

$$P_{out}(t) = P_{in}(t) \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{V(t)}{v\pi}\pi\right) \right) \quad (2.7)$$

Είναι ιδιαίτερα επιθυμητός για ισχυρά συστήματα μετάδοσης σε μεγάλες αποστάσεις, επειδή η διαμόρφωση της έντασης του λέιζερ που επιτυγχάνεται με ένα MZM που λειτουργεί σε λειτουργία push-pull είναι χωρίς chirp. Η τάση του MZM αναφέρεται συνήθως στις λίστες τεχνικών προδιαγραφών, και πιο συγκεκριμένα, είναι 3,5 Volt για το MZM που βασίζεται στο υπόστρωμα LiNbO<sub>3</sub>. Στην Εικόνα 2.3 παρουσιάζεται η συνάρτηση μεταφοράς του MZM. Οι MZM χρησιμοποιούνται συχνά για την παραγωγή διαφόρων τύπων οπτικών παλμών, όπως μη επιστροφής στο μηδέν (Non Return to Zero ή NRZ) και επιστροφής στο μηδέν (Return to Zero ή RZ) με διάφορους κύκλους λειτουργίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι το μέγεθος του φωτός εξόδου μειώνεται λόγω της απώλειας εισαγωγής της διάταξης, αλλά αμελείται στην περίπτωση της Εικόνας 2.3 (33% , 50% και 66% ). Ένα ηλεκτρικό ημιτονοειδές σήμα εφαρμόζετε για το σκοπό αυτό, με την τάση πόλωσης κατάλληλα ρυθμισμένη. Μια τάση πόλωσης δύναται να χρησιμοποιηθεί για τη λειτουργία του MZM στα σημεία κατωφέρειας, κορυφής ή τετραγωνισμού της συνάρτησης μεταφοράς, τα οποία είναι επίσης γνωστά ως τα σημεία ελάχιστης, μέγιστης και μέσης ισχύος εξόδου, αντιστοίχως.



Εικόνα 0.3: Συνάρτηση μεταφοράς διαμορφωτή Mach-Zehnder

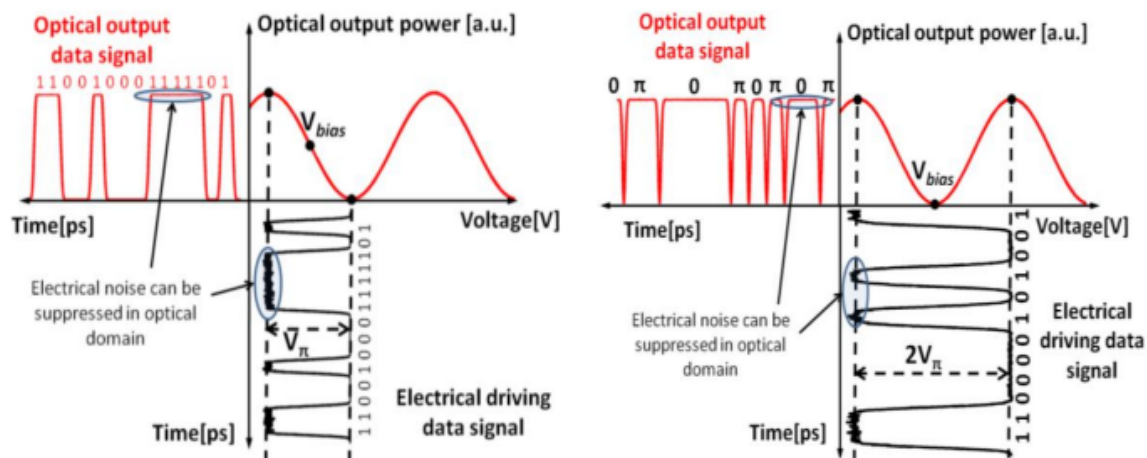
Για παράδειγμα, το σημείο πόλωσης έχει οριστεί στο σημείο τετραγωνισμού του MZM για την παραγωγή παλμών RZ 50%, ενώ το κατάλληλο σημείο λειτουργίας για παλμούς RZ 33% είναι στην κορυφή της συνάρτησης μεταφοράς του MZM. Μια μετατόπιση φάσης μεταξύ του φωτός που διαδίδεται στον άνω και στον κάτω βραχίονα μπορεί θεωρητικά να προκαλέσει το μηδενισμό της ισχύος εξόδου ενός MZM, αλλά στην πράξη αυτή η τέλεια συμπεριφορά δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί. Ως αποτέλεσμα, ακόμη και όταν δεν θα έπρεπε, μια μικρή ποσότητα ισχύος διαφεύγει από το MZM. Ο λόγος σβέσης (Extinction Ratio ή ER), ο οποίος είναι ο λόγος της μέγιστης ισχύος εξόδου προς την ελάχιστη ισχύ εξόδου σε λογαριθμική κλίμακα, είναι ένας από τους πιο κρίσιμους παράγοντες ενός MZM και υπολογίζεται ως εξής:

$$ER = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{out\_max}}{P_{out\_min}} \right) \quad (2.8)$$

Η ποιότητα του σήματος μετάδοσης και, τελικά, ο ρυθμός μετάδοσης που μπορεί να επιτευχθεί, βελτιώνονται με μια υψηλή τιμή για το ER, η οποία οδηγεί ουσιαστικά σε έναν σαφή διαχωρισμό μεταξύ των επιπέδων ισχύος των "άσων" και των "μηδενικών". Τα ER των MZM που προσφέρονται προς πώληση κυμαίνονται από 25 έως 35 dB. Το ηλεκτρικό πεδίο εξόδου ενός MZM αυξομειώνεται τακτικά με την τάση οδήγησης, όπως φαίνεται στην εξίσωση 2.6 και στην Εικόνα 2.3. Επιπλέον, μεταξύ 0 και της παρεχόμενης τάσης, η φάση της εξόδου του οπτικού κύματος αλλάζει επίσης συχνά (το γκριζο τμήμα στην Εικόνα 2.3 αντιπροσωπεύει μια έξοδο με μετατόπιση φάσης). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4, ένα MZM μπορεί να παράγει σχήματα διαμόρφωσης που κωδικοποιούν δυαδικά ψηφία μετάδοσης σε πλάτος (π.χ. on-off



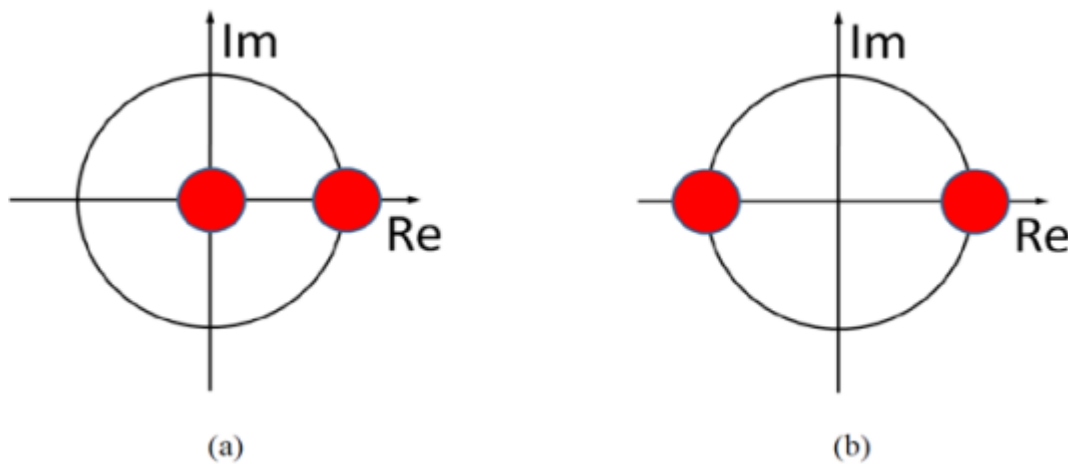
keying (OOK) και amplitude shift keying (ASK)) ή φάση (π.χ. binary phase shift keying, BPSK).



**Εικόνα 0.4: Δημιουργία διαμορφωμένου σήματος OOK και BPSK σε συνάρτηση με την τάση οδήγησης των ηλεκτροδίων του MZM.**

Ο MZM θα πρέπει να είναι πολωμένος στο τετραγωνικό σημείο για το σχήμα διαμόρφωσης OOK και το σήμα οδήγησής του πρέπει να διαθέτει πλάτος από κορυφή σε κορυφή περίπου  $V_{\pi}$  ( $V_{\pi}$  είναι η τάση που είναι απαραίτητη για να μεταβληθεί η φάση του οπτικού σήματος εξόδου κατά  $\pi$ ). Η μεταφορά ηλεκτρικού θορύβου στο οπτικό πεδίο καταστέλλεται λόγω της μη γραμμικότητας του MZM. Φυσικά, σε σύγκριση με τα συστήματα πολυεπίπεδης οπτικής διαμόρφωσης, το OOK έχει χαμηλή φασματική απόδοση (Spectrum Efficiency ή SE). Για να βελτιωθεί οριακά η SE, προτάθηκε η διαμόρφωση της υποτυπώδους πλευρικής ζώνης (Vestigial Sideband ή VSB) OOK. Το πρακτικό SE της VSB-OOK είναι περίπου 1 b/s/Hz. Λόγω του ισχυρού φορέα της, η OOK έχει περιορισμένη ανοχή στα μη γραμμικά φαινόμενα μετάδοσης, γεγονός που την καθιστά ελκυστική για ταχύτητες δεδομένων  $>40$  Gb/s και εφαρμογές μικρών αποστάσεων (διασύνδεση υπολογιστικών συστημάτων εντός κέντρων δεδομένων). Στην περίπτωση αυτή, η επιλογή της διαμόρφωσης OOK βασίζεται κυρίως στη χαμηλή πολυπλοκότητα του πομπού και στη δυνατότητα ανίχνευσης με μία μόνο φωτοδίοδο (Photo Diode ή PD). Όταν ο διαμορφωτής είναι πολωμένος σε μηδενική συνάρτηση μεταφοράς (όσον αφορά το πλάτος) και οδηγείται με τάση άνω των  $2V_{\pi}$ , ένας MZM μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη διαμόρφωση φάσης του οπτικού πεδίου (Εικόνα 2.4). Αν και η διαμόρφωση φάσης απαιτεί διπλάσια ισχύ RF, οι σημερινοί διαμορφωτές έχουν  $2V_{\pi}$  περίπου 5V, η οποία μπορεί εύκολα να τροφοδοτηθεί με εμπορικά διαθέσιμους ενισχυτές ευρείας ζώνης. Η μη γραμμικότητα

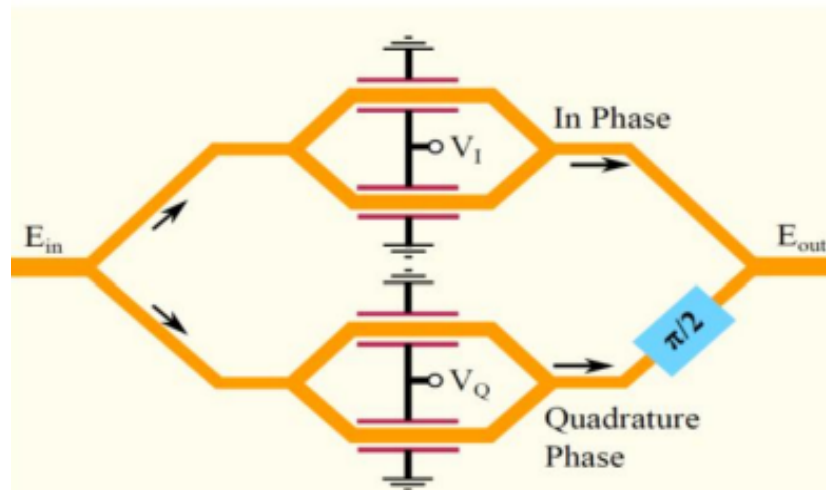
της συνάρτησης μεταφοράς του διαμορφωτή, όπως αυτή του ΟΟΚ, παρέχει την καταστολή της μεταφοράς ηλεκτρικού θορύβου στο οπτικό πεδίο. Επειδή δεν υπάρχει διαμόρφωση πλάτους, το παραχθέν οπτικό σήμα BPSK θα πρέπει θεωρητικά να έχει ένα μοναδικό επίπεδο έντασης. Στην πραγματικότητα, το ηλεκτρικό σήμα οδήγησης έχει περιορισμένους χρόνους ανόδου και πτώσης, με αποτέλεσμα μεταβάσεις στο ελάχιστο σημείο της συνάρτησης μεταφοράς. Ένα διάγραμμα αστερισμού - η απεικόνιση των συμβόλων σήματος σε ένα 50 σύνθετο επίπεδο - είναι ένας χρήσιμος τρόπος έκφρασης σημάτων με διαμορφωμένα κατά πλάτος και φάση σήματα. Τα δύο σημεία αστερισμού (δηλαδή, λογικά "ένα" και "μηδέν") για ένα δυαδικό σήμα διαμόρφωσης έντασης είναι  $(0,0)$  και  $(1,0)$  για να τονιστεί ότι δεν υπάρχει διαμόρφωση φάσης (Εικόνα 2.5 (α)). Λόγω της εμφάνισης ολίσθησης φάσης μεταξύ των δύο, τα δύο σημεία αστερισμού για τα σήματα BPSK είναι  $(1,0)$  και  $(-1,0)$ .



**Εικόνα 0.5: Διαγράμματα αστερισμού: (α) διαμορφωμένου σήματος ΟΟΚ και (β) διαμορφωμένου σήματος BPSK**

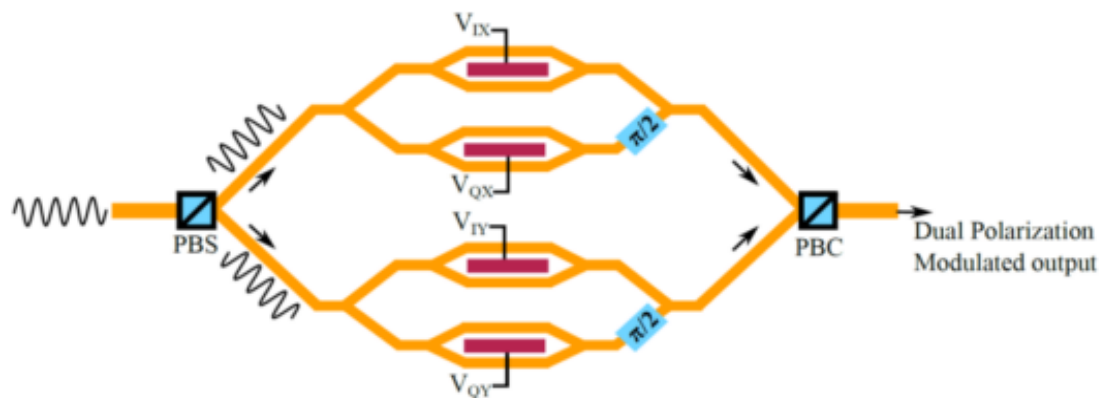
Ένας φασικός τετραγωνικός οπτικός διαμορφωτής (In-Phase Quadrature-Phase ή IQ), είναι απαραίτητος για την ενίσχυση της SE και τη χρήση της φανταστικής συνιστώσας του οπτικού φέροντος για τη μετάδοση δεδομένων. Ένας μόνο MZM μπορεί να αλλάξει τη φάση ενός οπτικού φέροντος κατά μήκος μιας συνιστώσας (σε φάση ή τετραγωνική φάση) για να μιμηθεί τις δυνατότητες ενός διαμορφωτή IQ, ο οποίος απαιτεί δύο MZM. Στην Εικόνα 2.6 απεικονίζει τη δομή ενός διαμορφωτή IQ που αποτελείται από MZM. Πρέπει να σημειωθεί ότι το εισερχόμενο φωτεινό κύμα εξισώνεται και στους δύο βραχίονες του διαμορφωτή πριν υποστεί κατεργασία από έναν MZM σε κάθε βραχίονα. Αφού εφαρμοστεί διαμόρφωση πλάτους ή/και φάσης στο φωτεινό κύμα του εκάστοτε βραχίονα, το φως που διαδίδεται στον κάτω βραχίονα

μετατοπίζεται κατά  $\pi/2$ . Κατά συνέπεια, τα διαμορφωμένα φωτεινά κύματα των δύο βραχιόνων γίνονται ορθογώνια μεταξύ τους, διατηρώντας τη μεταδιδόμενη πληροφορία. Οι ορθογώνιες διαστάσεις ενός δισδιάστατου (2-D) καρτεσιανού επιπέδου μπορούν να αναπαρασταθούν από τα κανάλια -I και -Q. Ως αποτέλεσμα, ένας διαμορφωτής IQ με βάση το MZM μπορεί να κατασκευάσει σχήματα διαμόρφωσης με σημεία αστερισμού σε ένα δισδιάστατο επίπεδο, γεγονός που τα καθιστά ελκυστικά για συστήματα υψηλής SE.



**Εικόνα 0.6: Διαμορφωτής IQ παρασκευασμένος από δύο διαμορφωτές Mach-Zehnder σε κατάσταση push-pull**

Επιπλέον, καθώς η έξοδος μιας πηγής φωτός λέιζερ είναι γραμμικά πολωμένη, δύναται να διαχωριστεί σε δύο συνιστώσες: οριζόντιας και κάθετης πόλωσης. Κάθε συνιστώσα οριζόντιας και κάθετης πόλωσης μπορεί να διαμορφωθεί ανεξάρτητα, διπλασιάζοντας το SE που παράγεται με την προσέγγιση διαμόρφωσης. Η πολυπλεξία πόλωσης είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί τη διάσταση της πόλωσης του φωτός για διαμόρφωση δεδομένων και χρησιμοποιείται ευρέως από την τρέχουσα γενιά συμμορφούμενων πομποδεκτών. Δύο διαμορφωτές IQ, ένας διαχωριστής δέσμης πόλωσης (Polarization Beam Splitter ή PBS) και ένας συνδυαστής δέσμης πόλωσης (Polarization Beam Combiner ή PBM), απαιτούνται για τη διαμόρφωση δεδομένων τόσο για την οριζόντια όσο και για την κάθετη πόλωση του φωτός.



Εικόνα 0.7: Διαμορφωτής IQ διπλής πόλωσης

Τα PBS/PBC είναι ουσιαστικά παθητικά στοιχεία που μπορούν να διανέμουν ή να συνδυάζουν φως που αντιστοιχεί σε δύο ορθογώνιες καταστάσεις πόλωσης. Οι διαμορφωτές IQ διπλής πόλωσης είναι τέτοιοι διαμορφωτές και είναι εμπορικά προσβάσιμοι από διάφορους προμηθευτές εξοπλισμού. Στην Εικόνα 2.7 απεικονίζεται η δομή ενός διαμορφωτή IQ διπλής πόλωσης. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι εμπορικά, η ανεξάρτητη διαμόρφωση δεδομένων σε δύο ορθογώνιες πολώσεις φωτός αξιοποιείται μόνο για την αντιστάθμιση των σφαλμάτων της ίνας σε σύμφωνους οπτικούς δέκτες που βασίζονται στην ψηφιακή επεξεργασία σήματος (DSP). Χωρίς διάκριση πόλωσης, οι μέθοδοι άμεσης ανίχνευσης χρησιμοποιούν απλώς τη συνδυασμένη ένταση του φωτός. Παρόλο που στην θεωρία μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι δύο ορθογώνιες καταστάσεις πόλωσης του φωτός για τη μετάδοση του φωτός, απαιτείται ενεργός έλεγχος της πόλωσης στο άκρο του δέκτη, επειδή η πολωτική κατάσταση του φωτός αλλάζει συχνά όταν στέλνεται μέσω μιας οπτικής ίνας εγκατεστημένης στο πεδίο. Αν και οι τυπικές τιμές διασποράς τρόπου πόλωσης (optical Polarization Mode Dispersion ή PMD) μπορεί να μην έχουν οριακές επιπτώσεις στην απόδοση ακόμη και αν δεν υπάρχει αντιστάθμιση, η κατάσταση πόλωσης δεν μπορεί να ρυθμιστεί γρήγορα στο οπτικό πεδίο χωρίς τη βοήθεια του δέκτη DSP λόγω της σχετικά μεγάλης περιόδου συμβόλου που χρησιμοποιείται από τα συστήματα άμεσης ανίχνευσης (100 ps για σήματα OOK 10 Gb/s). Με τη βοήθεια του δέκτη DSP, προτάθηκε πρόσφατα μια νέα αρχιτεκτονική δέκτη για την ανίχνευση σημάτων OOK διπλής πόλωσης. Οι σύμφωνοι δέκτες χρησιμοποιούν τεχνικές φιλτραρίσματος για την αποπολυπλεξία της πόλωσης στο ψηφιακό πεδίο και συχνά χρησιμοποιούν ποικιλομορφία πόλωσης για τη βελτίωση της SE. Ο πιο ευρέως

χρησιμοποιούμενος διαμορφωτής IQ είναι ο διαμορφωτής διπλής πόλωσης με βάση το LiNbO<sub>3</sub>, αν και ερευνώνται και άλλα υλικά υποστρωμάτων. Για παράδειγμα, το υλικό InP μπορεί να δώσει μικρότερο αποτύπωμα, χαμηλότερη τάση V και υψηλότερο εύρος ζώνης, καθιστώντας το ιδανικό για πομποδέκτες δεδομένων υψηλής ταχύτητας. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται διαμορφωτές MZ που παράγονται σε πολυμερές υλικό (Electro-Optical Polymer ή EO) και διαμορφωτές IQ που κατασκευάζονται σε υλικά InP και LiNbO<sub>3</sub>.

### **2.3 Οπτικός Δέκτης (Optical Receiver)**

Ο οπτικός δέκτης, όπως προαναφέρθηκε, είναι ένα από τα πιο περίπλοκα στοιχεία κάθε συστήματος μετάδοσης. Με την πάροδο του χρόνου έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι δεκτών για την αποκωδικοποίηση οπτικά διαμορφωμένων σημάτων. Οι δέκτες άμεσης ανίχνευσης και οι σύμφωνοι δέκτες είναι οι δύο διαθέσιμοι τύποι δεκτών. Τα αρχικά συστήματα βασίζονταν στην αρχή της άμεσης ανίχνευσης, με απλή σχεδίαση του δέκτη. Παρόλο που τα συστήματα αυτά εξακολουθούν να είναι τα πιο ευρέως παραγόμενα, η φασματική τους απόδοση είναι αρκετά περιορισμένη. Η τεχνολογία σύμφωνης ανίχνευσης χρησιμοποιείται στην τρέχουσα γενιά πομποδεκτών, η οποία επιτρέπει προϊόντα μεγαλύτερης εμβέλειας με υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων, κάτι που δεν ήταν δυνατό να επιτευχθεί με την τεχνολογία άμεσης ανίχνευσης. Η σύμφωνη ανίχνευση θα γίνει η κυρίαρχη μέθοδος καθώς η κυκλοφορία δεδομένων συνεχίζει να αυξάνει το προσβάσιμο εύρος ζώνης των ινών, επειδή μπορεί να επιτευχθεί καλύτερη ευαισθησία SE και δέκτη. Οι αρχές τόσο της άμεσης ανίχνευσης όσο και του σύμφωνου δέκτη καλύπτονται στις ακόλουθες ενότητες.

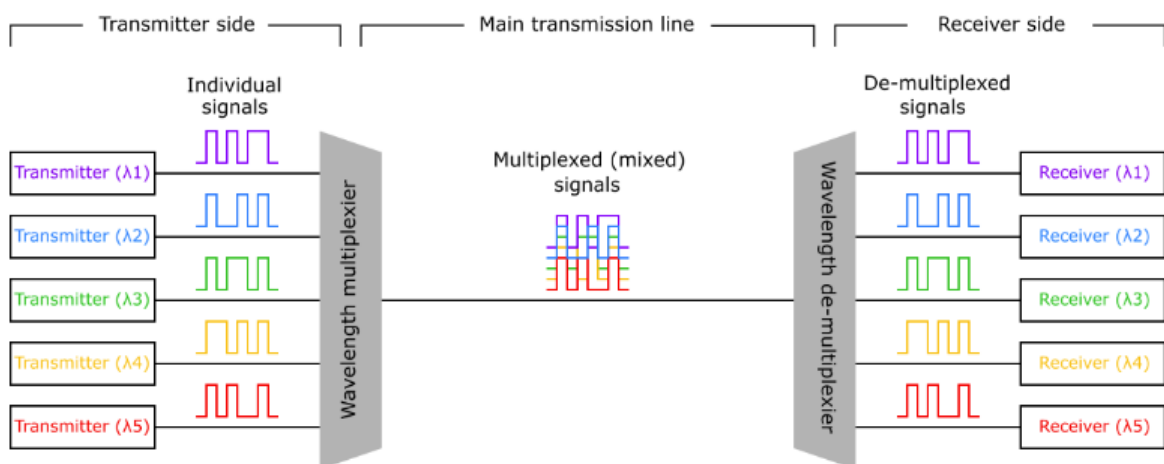
### **2.4 Πολυπλεξία σήματος**

Η οπτική μετάδοση αξιοποιεί παλμούς φωτός για την αποστολή δεδομένων μέσω μιας οπτικής ίνας από μια θέση σε μια άλλη. Καθώς το φως ταξιδεύει από το ένα άκρο στο άλλο, μετατρέπεται σε ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα φορέα που είναι προσαρμοσμένο για να μεταφέρει πληροφορίες. Ο συνδυασμός δύο ή περισσότερων σημάτων εισόδου σε μια ενιαία μετάδοση είναι γνωστός ως πολυπλεξία. Τα συνδυασμένα σήματα

διαιρούνται στο άκρο του δέκτη σε ξεχωριστά μοναδικά σήματα. Η αποτελεσματική αξιοποίηση του εύρους ζώνης βελτιώνεται μέσω της πολυπλεξίας. Η βιομηχανία τηλεπικοινωνιών έχει υποστεί μεγάλη εξέλιξη χάρη στην εισαγωγή των οπτικών ινών και συνεχίζει να εξελίσσεται όσο βρίσκονται καινούργιες τεχνικές για την καλύτερη αξιοποίηση τους. Από την ίδρυσή της, η οπτική ίνα έχει αντικαταστήσει άλλα μέσα επικοινωνίας, όπως το χάλκινο καλώδιο, και χρησιμοποιείται κυρίως για τη συνδεσιμότητα του κεντρικού δικτύου. Παρακάτω θα εξετάσουμε τις πιο διαδεδομένες τεχνικές πολυπλεξίας που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα οπτικών επικοινωνιών.

### 2.4.1 Πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος (WDM)

Η πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος, γνωστή και ως WDM, είναι μια από τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες για οπτικά συστήματα υψηλής χωρητικότητας. Μια απεικόνιση ενός τυπικού συστήματος μετάδοσης WDM παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.8. Ένας πολυπλέκτης (Multiplexer ή MUX) μήκους κύματος πολυπλέκει τα σήματα που αποστέλλονται από διάφορους οπτικούς πομπούς, καθένας από τους οποίους εκπέμπει φως σε διαφορετικό μήκος κύματος. Στη συνέχεια, τα πολυπλεγμένα σήματα αποστέλλονται μέσω μιας ενιαίας κύριας γραμμής μετάδοσης (οπτική ίνα). Τα σήματα μεταδίδονται σε διάφορους δέκτες αφού πρώτα αποπολυπλέκονται στην πλευρά του δέκτη από έναν αποπολυπλέκτη μήκους κύματος (Demultiplexer ή DEMUX).



Εικόνα 0.8: Διάγραμμα μετάδοσης WDM

Η μείωση του αριθμού των ινών που χρησιμοποιούνται στην κύρια γραμμή μεταφοράς είναι ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας. Το μήκος μιας οπτικής γραμμής μετάδοσης μπορεί μερικές φορές να ξεπεράσει τα 1.000 χλμ. και αν

χρειαζόταν να κατασκευάσουμε ένα καλώδιο με υψηλό αριθμό ινών για να ανταπεξέλθει σε πολύ μεγάλες αποστάσεις, τότε το κόστος κατασκευής καθώς και το κόστος ανάπτυξης των καλωδίων ινών θα αποτελούσε σοβαρό πρόβλημα. Χρησιμοποιώντας την τεχνολογία διαίρεσης μήκους κύματος, είναι δυνατόν τόσο να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των ινών σε ένα οπτικό καλώδιο όσο και να διατηρηθεί ένας σταθερός αριθμός πολυπλεκτών και αποπολυπλεκτών μήκους κύματος ανεξάρτητα από την απόσταση μετάδοσης. Εξαιτίας αυτού, αυτή η τεχνολογία να γίνεται συχνά η λύση όταν υπάρχει μεγάλη αύξηση της απόστασης μετάδοσης.

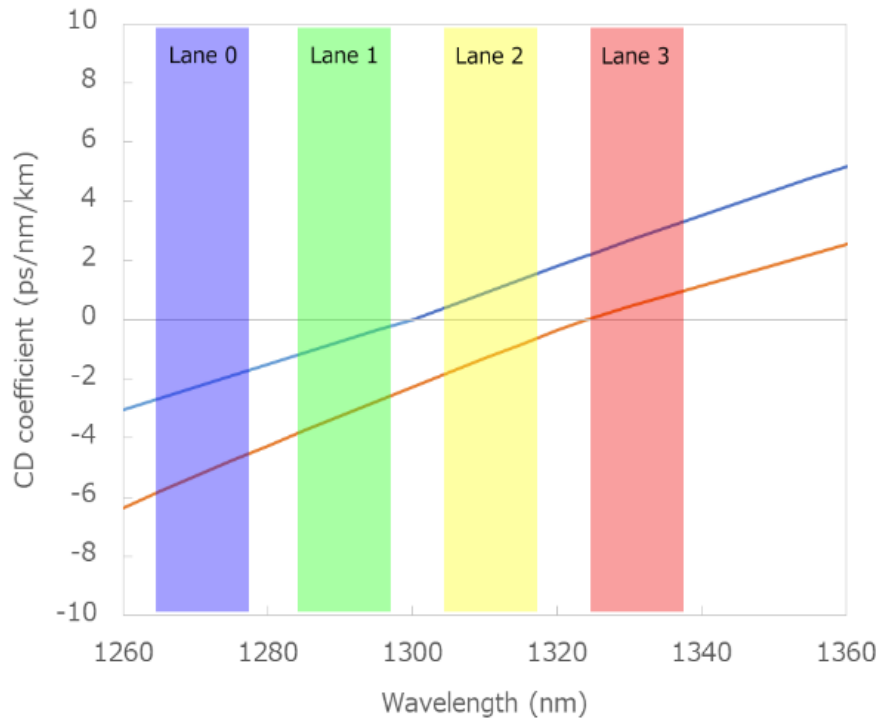
Τα δίκτυα δεδομένων υψηλής ταχύτητας (όπως τα κέντρα δεδομένων) αντιμετωπίζουν τεχνολογικές προκλήσεις που σχετίζονται με την αποδοτικότητα του χώρου και την κατανάλωση ενέργειας. Η τεχνική ψηφιακής σύμφωνης ανίχνευσης με την χρήση ενός ψηφιακού επεξεργαστή σήματος, έχει βελτιώσει τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα υψηλών ταχυτήτων. Ωστόσο, η κατανάλωση ισχύος είναι πολύ υψηλή (>10W), καθιστώντας ανέφικτη τη χρήση της τεχνολογίας σε ένα μεγάλο κέντρο δεδομένων. Όσον αφορά την κατανάλωση ισχύος, η "άμεση ανίχνευση χωρίς αντιστάθμιση διασποράς" είναι επιθυμητή και η τεχνολογία WDM χρησιμοποιείται συχνά στις τηλεπικοινωνίες δεδομένων για να επιτρέψει πομποδέκτες υψηλής ταχύτητας σε μικρά μεγέθη και με χαμηλή κατανάλωση ισχύος.

Τα κέντρα δεδομένων χρησιμοποιούν συχνά πομποδέκτες Ethernet 100G που χρησιμοποιούν WDM τεσσάρων μηκών κύματος στη ζώνη O. Η ζώνη O προκαλεί μηδενισμό της χρωματικής διασποράς της παραδοσιακής μονότροπης ίνας (ίνα ITU-T G.652), ελαχιστοποιώντας τη διασπορά της ίνας. Η ανοχή στη διασπορά είναι τέσσερις φορές μεγαλύτερη από ένα σύστημα 100Gbps με ένα κανάλι, χάρη στον μειωμένο ρυθμό μετάδοσης bit ανά κανάλι του σχήματος WDM τεσσάρων μηκών κύματος ( $100/4=25\text{Gbps}$ ).

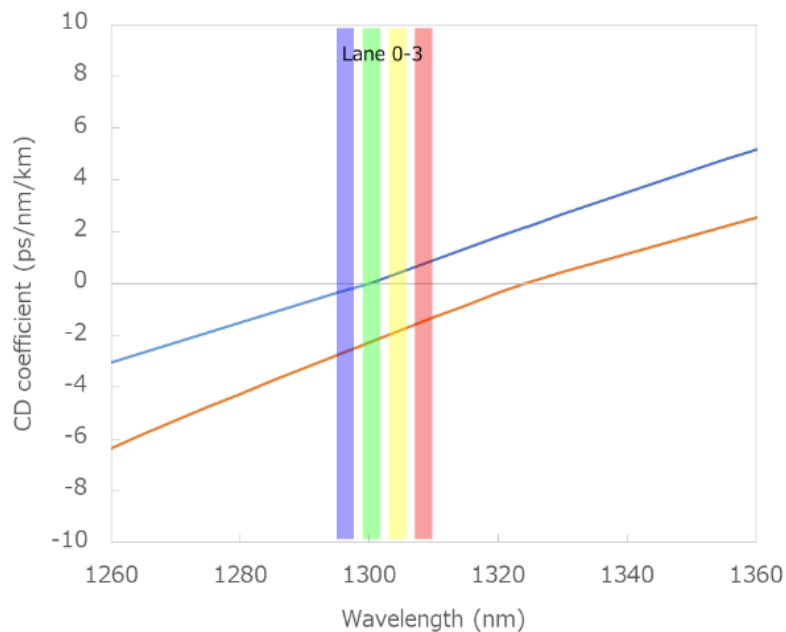
Για μια διαμόρφωση τεσσάρων μηκών κύματος στη ζώνη O, υπάρχουν δύο επιλογές: LAN-WDM και CWDM4. Οι Εικόνες 2.9 και 2.10 απεικονίζουν τις ζώνες μηκών κύματος καθώς και τη μέγιστη και ελάχιστη χρωματική διασπορά της παραδοσιακής μονότροπης ίνας. Τα μήκη κύματος CWDM4 είναι πανομοιότυπα με τα μήκη κύματος CWDM των τηλεπικοινωνιών, επιτρέποντας την εκμετάλλευση αποδοτικών οπτικών που έχουν δημιουργηθεί για τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές. Τα μήκη κύματος LAN-WDM είναι τοποθετημένα σχεδόν στο μήκος κύματος μηδενικής διασποράς της ίνας και βρίσκονται σε πιο κοντινή απόσταση από τα μήκη κύματος CWDM4. Με αυτή την κατανομή μηκών κύματος, είναι δυνατή η μετάδοση 100Gbps μήκους μεγαλύτερου

Τεχνολογίες υπέρυθρων συστημάτων Ethernet (800G και άνω)

των 10km (όπως 100GBASE-LR4 και ER4) χωρίς να περιορίζεται από τη χρωματική διασπορά της ίνας.



**Εικόνα 0.9: Μήκος κύματος CWDM4**



**Εικόνα 0.10: Μήκος κύματος LAN-WDM**

Ακόμα και για τις υπάρχουσες γραμμές οπτικών ινών με ένα ή λίγα κανάλια ανά ίνα, η αναβάθμιση των πομπών και των δεκτών ώστε να λειτουργούν με περισσότερα

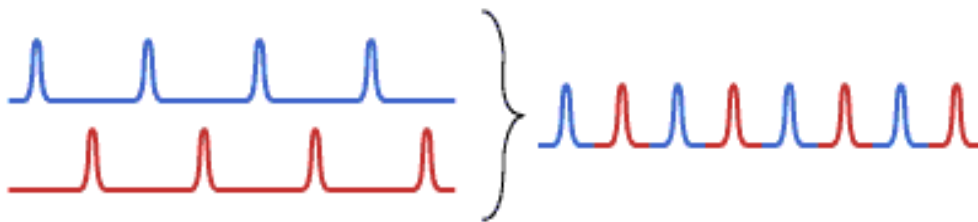


κανάλια είναι μια λογική επιλογή, καθώς μπορεί να είναι λιγότερο δαπανηρή από την αντικατάσταση ολόκληρου του συστήματος με ένα σύστημα που έχει μεγαλύτερη χωρητικότητα μετάδοσης. Στην πραγματικότητα, παρόλο που υπάρχει τεράστια αύξηση της ανάγκης για χωρητικότητα μετάδοσης, η εν λόγω στρατηγική εξαλείφει συχνά την ανάγκη κατασκευής πρόσθετων οπτικών ινών.

Εκτός από την αύξηση της χωρητικότητας μετάδοσης, η πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος δίνει στα πολύπλοκα συστήματα επικοινωνίας μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα. Συγκεκριμένα, μπορούν να ληφθούν διάφορα κανάλια δεδομένων από ένα σύστημα και να εισαχθούν σε διάφορα σημεία σε όλο το σύστημα. Οι πολυπλέκτες προσθήκης-πτώσης, οι οποίοι επιτρέπουν την προσθήκη ή την αφαίρεση καναλιών δεδομένων με βάση τα μήκη κύματος τους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τέτοιες εργασίες. Η ευέλικτη αναδιαμόρφωση του συστήματος είναι εφικτή χάρη στους αναδιαμορφώσιμους πολυπλέκτες προσθήκης-πτώσης, επιτρέποντας την παροχή συνδέσεων δεδομένων μεταξύ πολλών διαφορετικών τερματικών προορισμών.

#### **2.4.2 Πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDM)**

Η πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου είναι μια μέθοδος που συνδυάζει, μεταδίδει και στη συνέχεια διαχωρίζει πολυάριθμα οπτικά σήματα με βάση τους διαφορετικούς χρόνους άφιξής τους. Η παρεμβολή παλμοσειρών σε ένα σύστημα επικοινωνίας οπτικών ινών μπορεί να μεταφέρει διάφορα κανάλια δεδομένων σε ένα μόνο καλώδιο. Χωρίς να αυξάνονται οι ρυθμοί δεδομένων των επιμέρους καναλιών ή να είναι δυνατή η ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων από πολλούς χρήστες, η χρήση πολλαπλών καναλιών αυξάνει τη συνολική χωρητικότητα μετάδοσης δεδομένων. Ωστόσο, είναι απαραίτητο να μειωθεί το χρονικό παράθυρο ανά bit. Ακόμη και αν το εύρος ζώνης του διαμορφωτή δεδομένων είναι περιορισμένο, αυτό μπορεί να επιτευχθεί τροφοδοτώντας τον με μια ακολουθία υπερβραχέων παλμών αντί για ένα συνεχές οπτικό κύμα ως είσοδο.



Εικόνα 0.11: Σχεδιάγραμμα της οπτικής πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου.

Οι ιδιαίτερες απαιτήσεις για τους πομπούς δεδομένων που χρησιμοποιούν οπτική πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου περιλαμβάνουν μικρή διάρκεια παλμού και μειωμένο jitter χρονισμού. Επιπλέον, ο λόγος εξάλειψης θα πρέπει να είναι υψηλός, πράγμα που σημαίνει ότι κάθε συγχωνευμένο κανάλι θα πρέπει να έχει πολύ χαμηλό επίπεδο ισχύος μεταξύ των bit, ως αποτέλεσμα της πιθανότητας παρεμβολής με άλλα κανάλια. Συνήθως, απαιτούνται οπτικές γραμμές καθυστέρησης κάποιου είδους για τη συνένωση των σημάτων. Για παράδειγμα, η χρωματική διασπορά μπορεί να προκαλέσει χρονική διασπορά ενός σήματος κατά τη διάδοση του σήματος σε μια οπτική ίνα, η οποία πρέπει να αποτραπεί ή τουλάχιστον να διορθωθεί πριν από την ανίχνευση με την κατάλληλη ρύθμιση διασποράς.

Χρησιμοποιώντας οπτική πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου, τα σήματα αντιστοιχίζονται σε συγκεκριμένες περιοχές κατανεμημένων αισθητήρων οπτικών ινών με βάση τους χρόνους άφιξης. Αυτές οι συσκευές χρησιμοποιούν συχνά εξαιρετικά σύντομους παλμούς για να λειτουργήσουν.

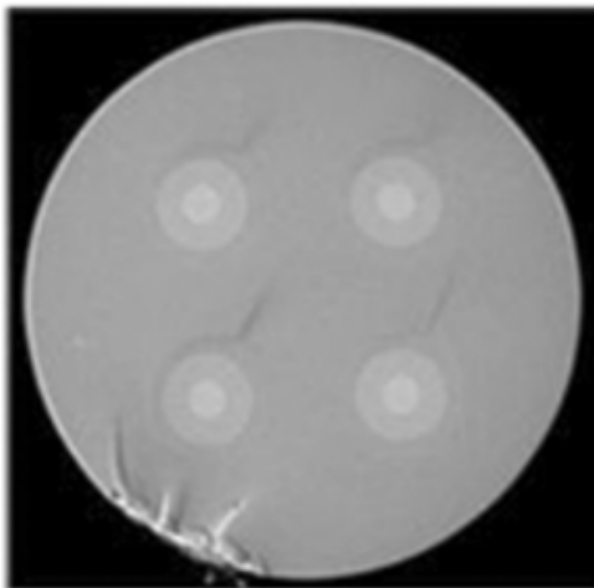
### 2.4.3 Πολυπλεξία διαίρεσης χώρου (SDM)

Η πολυπλεξία διαίρεσης χώρου (Space Division Multiplexing ή SDM), η οποία χρησιμοποιεί πολλά χωρικά κανάλια, αποτελεί μια συμπληρωματική λύση. Μια ακόμη ονομασία της είναι πολυπλεξία χωρικής διαίρεσης (Spatial Division Multiplexing). Δεδομένου ότι οι δυνατότητες της WDM έχουν ως επί το πλείστον εκπληρωθεί, η SDM θα απαιτηθεί για πρόσθετες σημαντικές βελτιώσεις στις δυνατότητες μετάδοσης, προκειμένου να αποφευχθεί ο αναμενόμενος περιορισμός της χωρητικότητας. Θεωρείται ότι είναι ιδιαίτερα σημαντική για τις επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων (όπως αυτές που μεταφέρονται μέσω υποβρύχιων καλωδίων), αλλά αργότερα και για εφαρμογές σε μικρότερα μεγέθη, όπως τα περιφερειακά δίκτυα. Φυσικά, ορισμένοι τύποι πολυπλεξίας διαχωρισμού χώρου θα χρησιμοποιηθούν επιπρόσθετα και όχι ως

υποκατάστατο άλλων μεθόδων, όπως η πολυπλεξία διαχωρισμού μήκους κύματος. Θα μπορούσε κανείς απλά να χρησιμοποιήσει πολλές ακτίνες λέιζερ παράλληλα σε οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου για να στείλει δεδομένα με μεγαλύτερο συνολικό ρυθμό μετάδοσης. Δυστυχώς, αυτή η προσέγγιση δεν κλιμακώνεται καλά: υπάρχει μόνο ένας πεπερασμένος αριθμός πρακτικά χρησιμοποιήσιμων ακτινών και η τιμή αυξάνεται σχεδόν γραμμικά καθώς αυξάνεται ο αριθμός των γραμμών μετάδοσης.

### **Ίνες πολλαπλών πυρήνων**

Η χρήση μιας ενιαίας οπτικής ίνας με πολλούς πυρήνες θα μπορούσε να είναι μια πιο αποδοτική επιλογή, ιδίως για μεγάλα μήκη μετάδοσης ή όταν χρειάζεται μεγάλος αριθμός καναλιών μετάδοσης. Οι ίνες πολλαπλών πυρήνων είναι η ονομασία που δόθηκε σε τέτοιες ίνες. Κάθε πυρήνας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ανεξάρτητο κανάλι επικοινωνίας.



**Εικόνα 0.12: Πολυπύρρηνη ίνα (Multi-Core Fiber ή MCF)**



**Εικόνα 0.13: Ίνα λίγων τρόπων (Few-Mode Fiber ή FMF)**

Στο πιο βασικό σενάριο, οι πυρήνες των ινών απέχουν κατάλληλα ο ένας από τον άλλον ώστε να εξασφαλίζεται ελάχιστη φωτεινή σύζευξη και ελάχιστη διασταύρωση μεταξύ των καναλιών. Για τέτοιες μη συζευγμένες ίνες SDM, η επεξεργασία σήματος είναι αρκετά απλή. Ωστόσο, επειδή η απόστασή τους πρέπει να είναι αισθητή, ο περιορισμός αυτός μειώνει σημαντικά τον αριθμό των πυρήνων ανά ίνα. Οι αυλακώσεις του δείκτη διάθλασης θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να "μονώσουν" τους σχετικά κοντά μεταξύ τους πυρήνες. Εναλλακτικά, θα μπορούσε κανείς να χρησιμοποιήσει ίνες με μεγαλύτερη διάμετρο μανδύα, αλλά κάτι τέτοιο έχει σημαντικά μειονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένης της αυξημένης τάσης για θραύση της ίνας ακόμη και σε μέτριες ακτίνες κάμψης και των προκλήσεων με τις διεπαφές των ινών, όπως κατά τη συγκόλληση με σύντηξη.

Οι ίνες πολλαπλών πυρήνων απαιτούν περιστροφική ευθυγράμμιση ώστε οι προσανατολισμοί των πυρήνων να ταιριάζουν, γεγονός που καθιστά τη σύνδεσή τους πιο δύσκολη από ότι με τις συνηθισμένες ίνες. Για παράδειγμα, κατά τη συγκόλληση με σύντηξη ινών πολλαπλών πυρήνων, πρέπει να γίνουν πρόσθετες προετοιμασίες για να εξασφαλιστεί ο σωστός περιστροφικός προσανατολισμός. Μπορεί ακόμη να είναι απαραίτητο, ανάλογα με την αρχιτεκτονική του συστήματος, να διασφαλιστεί ότι η συσχέτιση μεταξύ των πυρήνων εισόδου και εξόδου διατηρείται, για παράδειγμα, όταν μια σύνδεση αποδεσμεύεται και σχηματίζεται ξανά. Υπάρχουν ειδικοί τύποι συνδέσμων ινών που, για παράδειγμα, διαθέτουν ακίδες στη μία πλευρά για να

διασφαλίζεται ότι η σύνδεση είναι εφικτή μόνο με τον σωστό προσανατολισμό περιστροφής.

### **Ενισχυτές πολυπύρηνων ινών**

Οι ενισχυτές οπτικών ινών είναι απαραίτητοι για τα συστήματα επικοινωνιών ώστε να διατηρούν επαρκείς ισχύς καναλιού σε μεγάλα μήκη μετάδοσης. Χρειάζονται μοναδικοί ενισχυτές ινών πολλαπλών πυρήνων όταν χρησιμοποιούνται ίνες πολλαπλών πυρήνων. Πρέπει να συντονίζονται έτσι ώστε το κέρδος του ενισχυτή που επιτυγχάνεται να κατανέμεται ομοιόμορφα στους χωρικούς τρόπους λειτουργίας, με άλλα λόγια, το διαφορικό κέρδος πρέπει να είναι ελάχιστο.

Παρόλο που ο σχεδιασμός τέτοιων ενισχυτών είναι λίγο πιο δύσκολος, είναι αναμφισβήτητα πιο αποδοτικό και ενεργειακά συμφέρων να χρησιμοποιείται ένας ενιαίος ενισχυτής πολλαπλών πυρήνων έναντι πολλών ενισχυτών μονής λειτουργίας, καθένας από τους οποίους έχει τη δική του ενεργή ίνα, πηγή άντλησης και άλλα εξαρτήματα.

## **2.5 Διαμόρφωση σήματος**

Η διαμόρφωση στις τηλεπικοινωνίες είναι η τεχνική μεταβολής ενός περιοδικού σήματος -συνήθως ενός σήματος υψηλής συχνότητας- ώστε να περιλαμβάνει ένα σήμα χαμηλής συχνότητας που μεταφέρει κωδικοποιημένες πληροφορίες. Το σήμα πληροφορίας που διαμορφώνεται στην ψηφιακή διαμόρφωση είναι σε ψηφιακή μορφή. Παρακάτω θα εξετάσουμε τις πιο σημαντικές μεθόδους ψηφιακών διαμορφώσεων.

### **2.5.1 Διαμόρφωση μετατόπισης πλάτους (Amplitude-shift Keying ή ASK)**

Η διαμόρφωση με μετατόπιση πλάτους (ASK), η οποία καταγράφει δεδομένα σε διαφορετικά επίπεδα οπτικής έντασης, είναι ο βασικότερος και επικρατέστερος τύπος διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται στα συστήματα οπτικών επικοινωνιών. Για να επιτευχθεί η μετατροπή μια ακολουθίας bits από ηλεκτρική σε οπτική είναι απαραίτητη η διαμόρφωση του οπτικού φορέα. Η πηγή συνεχούς φωτός που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του οπτικού φορέα για την οπτική διαμόρφωση έχει ένα ηλεκτρικό πεδίο που μπορεί να περιγραφεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$E(t) = \text{Re}[A_0(t)e^{i\varphi_0}e^{-i\omega_0 t}] \quad (2.9)$$

Η μεταβλητή  $A_0$  είναι το πλάτος του οπτικού φορέα, καθώς και οι μεταβλητές  $\omega_0$  και  $\varphi_0$  είναι η συχνότητα και η φάση του.

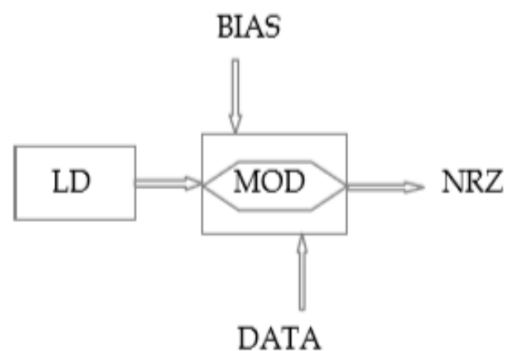
Το  $A_0(t)$  μεταβάλλεται στο χρόνο σύμφωνα με τις αλλαγές στη ροή ηλεκτρικών δεδομένων που θα διαμόρφωνε τον οπτικό φορέα, δεδομένου ότι το πλάτος  $A_0$  του οπτικού φορέα διαμορφώνεται με μετατόπιση πλάτους. Αυτή η διακύμανση μπορεί να παρασταθεί ως εξής:

$$A_0(t) = \sqrt{P_0} \sum_n b_n f_p(t - nT_b) \quad (2.10)$$

Η μεταβλητή  $P_0$  είναι η μέγιστη ισχύς, η μεταβλητή  $f_p$  είναι η περιβάλλουσα του οπτικού παλμού, η μεταβλητή  $b_n$  δέχεται τιμές λογικής στάθμης 0 και 1, ανάλογα με το αν το  $n$ -οστό bit του οπτικού σήματος λαμβάνει τιμή λογικής στάθμης 0 ή 1, ενώ η παράμετρος  $T_b$  αντιπροσωπεύει τη διάρκεια του bit (bit slot) για έναν ορισμένο ρυθμό δεδομένων  $B$ . Σε πιο πραγματοποιήσιμες υλοποιήσεις, όταν αποστέλλονται δυαδικά ψηφία με τιμές επιπέδου μηδέν, η παράμετρος πλάτους  $A_0$  λαμβάνει την τιμή μηδέν. Λόγω της απλότητας που εξασφαλίζει στην κατασκευή του οπτικού πομπού και δέκτη, η τεχνική διαμόρφωσης ASK, γνωστή και ως on-off keying (OOK), είναι ένα από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα σχήματα διαμόρφωσης στα εμπορικά διαθέσιμα συστήματα μετάδοσης οπτικών επικοινωνιών.

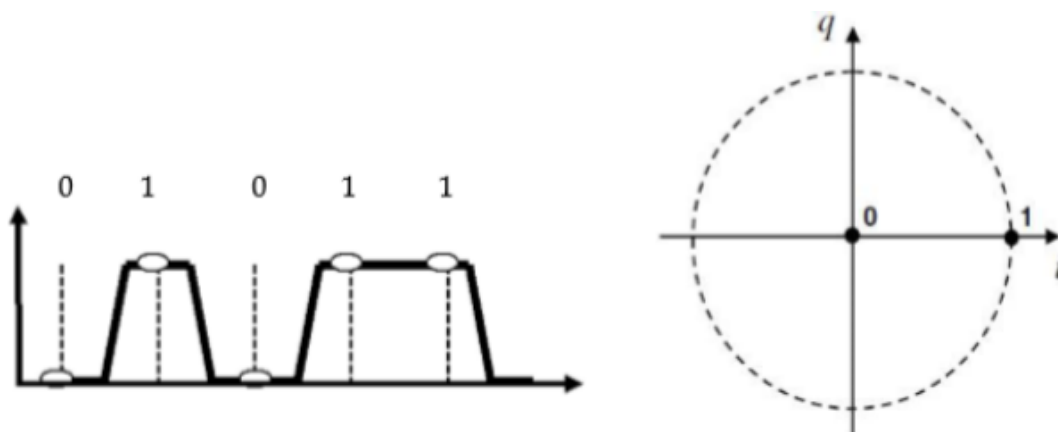
Η δομή μιας ηλεκτρικής ακολουθίας δυαδικών ψηφίων καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο το σύστημα διαμόρφωσης OOK εφαρμόζεται σε έναν οπτικό πομπό, ενεργοποιώντας και απενεργοποιώντας το πλάτος (ή την ισχύ) ενός οπτικού φορέα. Πιο συγκεκριμένα, η οπτική ισχύς μιας συγκεκριμένης τιμής χρησιμοποιείται για την κωδικοποίηση της λογικής στάθμης 1, ενώ η οπτική ισχύς μιας χαμηλότερης ή μηδενικής τιμής χρησιμοποιείται για την κωδικοποίηση της λογικής στάθμης 0. Το ρεύμα οδήγησης της οπτικής πηγής μπορεί να διαμορφώνεται άμεσα, χρησιμοποιώντας την προσέγγιση άμεσης διαμόρφωσης, για να επιτευχθεί αυτή η διαμόρφωση, ή έμμεσα, χρησιμοποιώντας έναν εξωτερικό οπτικό διαμορφωτή, για να επιτευχθεί αυτή η διαμόρφωση. Στα οπτικά συστήματα μεγάλων ταχυτήτων και μακρινών αποστάσεων, ευνοείται το δεύτερο σενάριο, δεδομένου ότι οδηγεί σε λιγότερο chirp στο διαμορφωμένο σήμα και σε μεγαλύτερη ανοχή στα φαινόμενα διασποράς.

Στην Εικόνα 2.14 παρουσιάζεται η σχηματική αναπαράσταση ενός πομπού NRZ-OOK. Ο χρησιμοποιούμενος οπτικός διαμορφωτής, ο οποίος είναι συχνά τύπου MZM, είναι πολωμένος στο μέσο τετραγωνικό σημείο της συνάρτησης μεταφοράς του για να οδηγηθεί χρησιμοποιώντας όλο το εύρος της συνάρτησης μεταφοράς του από το μικρότερο έως το μεγαλύτερο σημείο μετάδοσης. Ένας οπτικός δέκτης που αποτελείται από μια απλή φωτοδίοδο εφαρμόζεται για την αναγνώριση ενός οπτικού σήματος με διαμόρφωση NRZ.



Εικόνα 0.14: Σχηματική απεικόνιση ενός οπτικού πομπού για τη μεταπομπή οπτικού σήματος NRZ.

Η κυματομορφή πλάτους του σήματος κατά τη μετάδοση με τη μέθοδο διαμόρφωσης NRZ παρουσιάζεται στο Εικόνα 2.15(α), καθώς και το προκύπτον διάγραμμα αστερισμού που περιέχει τις λογικές πληροφορίες χαμηλού και υψηλού επιπέδου εμφανίζεται στο Εικόνα 2.15(β).



Εικόνα 0.15: Παράδειγμα κυματομορφής πλάτους ενός σήματος που μεταδόθηκε με τη μέθοδο διαμόρφωσης NRZ και το διάγραμμα αστερισμού ενός σήματος διαμορφωμένου με OOK.

## 2.5.2 Διαμόρφωση πλάτους παλμού πολλαπλών επιπέδων (PAM-4, PAM-8)

Το πλάτος σήματος των παραδοσιακών συστημάτων μετάδοσης πληροφοριών οπτικών ινών 10Gb/s χρησιμοποιεί μεθόδους διαμόρφωσης πλάτους OOK με τιμές 0 ή 1. Παρόλα αυτά, τα συστήματα οπτικών πομποδεκτών που επιτρέπουν τη μετάδοση πληροφοριών 100G και 400G είναι απαραίτητα, καθώς η κυκλοφορία στο Διαδίκτυο αναμένεται να επεκταθεί με ετήσιο ρυθμό αύξησης περίπου 25%. Δεδομένου ότι το εύρος ζώνης των δυαδικών πομποδεκτών δεν επαρκεί πλέον για να ανταποκριθεί στη ζήτηση για τις προαναφερθείσες υψηλές ταχύτητες, τα τελευταία δέκα χρόνια στρεφόμαστε διαρκώς σε τεχνικές σύμφωνης μετάδοσης και λήψης για συστήματα μεγάλης απόστασης. Όλες οι προαναφερθείσες παρατηρήσεις οδήγησαν στην ανάπτυξη ενός απλού σχήματος διαμόρφωσης υψηλότερης τάξης (PAM-4) που χρησιμοποιείται ευρέως τόσο εντός όσο και μεταξύ κέντρων δεδομένων.

Με το σύστημα διαμόρφωσης πλάτους παλμού PAM-4, η πληροφορία αποστέλλεται χρησιμοποιώντας 4 διαφορετικά πλάτη παλμών. Οι δύο δυαδικοί αριθμοί 00, 01, 11 και 10, αντίστοιχα, χρησιμοποιούνται για να δηλώσουν τα επίπεδα πλάτους 1, 2, 3 και 4. (Εικόνα 2.17). Με τον όρο "σύμβολο" χαρακτηρίζεται κάθε ζεύγος δυαδικών ψηφίων. Δύο δυαδικά ψηφία μεταδίδονται παράλληλα όταν ένα από τα τέσσερα πλάτη μεταδίδεται κατά τη διάρκεια μιας περιόδου συμβόλου, διπλασιάζοντας το μέγεθος των δεδομένων. Με άλλα λόγια, η συνηθισμένη δυαδική ρύθμιση OOK έχει το μισό ρυθμό μετάδοσης σε σχέση με τη σχεδίαση PAM-4. Ο ακόλουθος μαθηματικός τύπος καθορίζει το ρυθμό μετάδοσης σε ένα οπτικό σύστημα επικοινωνιών:

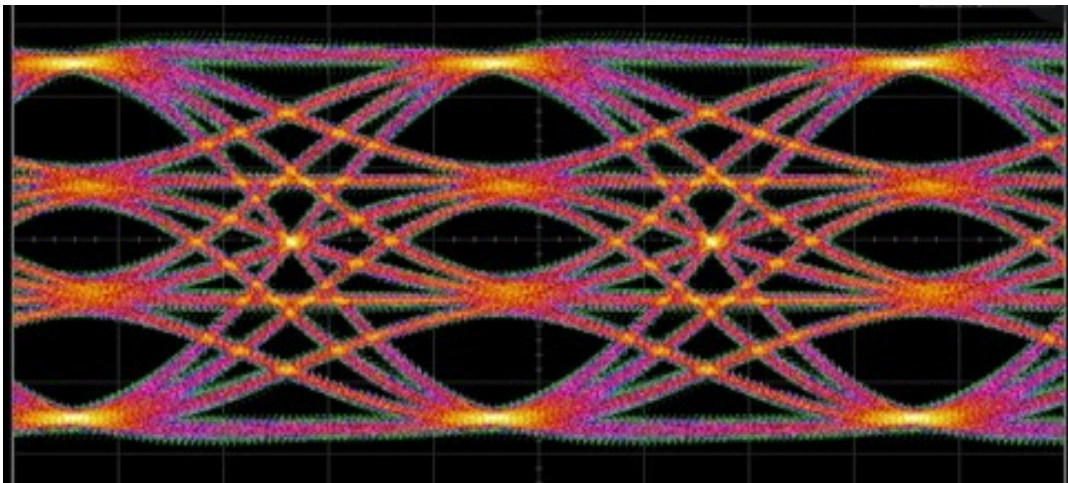
$$\text{Ρυθμός bit} = \text{ρυθμός Baud} * \text{αριθμό bits ανά σύμβολο} \quad (2.11)$$

Το σύμβολο, ο ρυθμός μετάδοσης, ο ρυθμός αλλαγής επιπέδων εντός ενός διαστήματος μετάδοσης, αποτελούν κρίσιμο χαρακτηριστικό για τα συστήματα μετάδοσης πληροφοριών που χρησιμοποιούν τεχνικές διαμόρφωσης PAM-4. Ανάλογα με το πόσα ψηφία συνθέτουν ένα σύμβολο, όπως φαίνεται στην παραπάνω σχέση, ο ρυθμός μετάδοσης μπορεί να είναι ίδιος ή μεγαλύτερος από το ρυθμό συμβόλων.

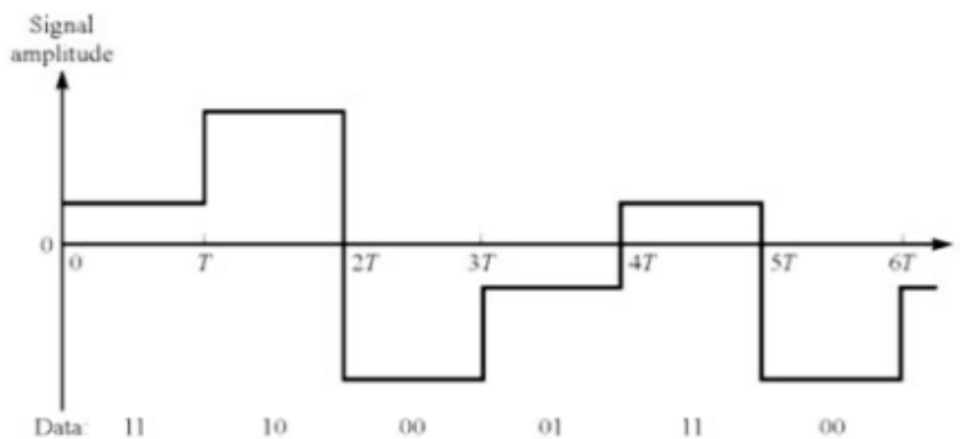
Το σήμα λαμβάνει δύο λογικές τιμές στάθμης 0 ή 1 κατά τη διάρκεια ενός χρονικού παραθύρου μετάδοσης όταν χρησιμοποιούνται τεχνικές διαμόρφωσης OOK, με αποτέλεσμα ένα σύστημα μετάδοσης δύο επιπέδων με κάθε επίπεδο να συμβολίζεται



με ένα δυαδικό ψηφίο. Δεδομένου ότι κάθε σύμβολο που μεταδίδεται για τη μέθοδο διαμόρφωσης NRZ αποτελείται από ένα μόνο δυαδικό ψηφίο, ο ρυθμός μετάδοσης bit είναι ίσος με τον ρυθμό μετάδοσης συμβόλου. Αντίθετα, ο ρυθμός μετάδοσης bit διπλασιάζεται για τον ίδιο ρυθμό συμβόλων όταν χρησιμοποιούνται μέθοδοι διαμόρφωσης εύρους παλμών PAM-4, δεδομένου ότι κάθε σύμβολο αντιπροσωπεύεται πλέον από δύο δυαδικά ψηφία. Κατά την μετάδοση τα σύμβολα που μπορούν να μεταφερθούν είναι 00, 01, 10, 11. Στην Εικόνα 2.16 φαίνεται το οφθαλμικό διάγραμμα της διαμόρφωσης PAM 4.



Εικόνα 0.16: Οφθαλμικό διάγραμμα σήματος με διαμόρφωση PAM-4



Εικόνα 0.17: Απεικόνιση στο πεδίο του χρόνου ενός οπτικού σήματος PAM-4, με παράμετρο T την περίοδο του συμβόλου.

Όταν χρησιμοποιείται συγκεκριμένο εύρος ζώνης, όπως επισημάνθηκε προηγουμένως, η διαμόρφωση PAM-4 επιτρέπει τη διπλάσια μεταδιδόμενη πληροφορία ανά μονάδα χρόνου σε σχέση με τη δυαδική διαμόρφωση ΟΟΚ, αλλά εις

βάρους μεγαλύτερου λόγου σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio ή SNR). Το γεγονός αυτό προκύπτει από το ότι η διαμόρφωση PAM-4 χρησιμοποιεί πρόσθετα στρώματα σταθμών για την ελαχιστοποίηση της απόστασης μεταξύ των σταθμών, καθιστώντας το σήμα πιο ευαίσθητο στο θόρυβο από ότι ένα δυαδικό ψηφιακό σήμα. Προκύπτει ότι η διαμόρφωση PAM-4, η οποία μπορεί να επιτύχει υψηλότερο SNR, είναι πιο αποτελεσματική και χρησιμοποιείται συχνά για οπτικά συστήματα μικρής εμβέλειας. Για το λόγο αυτό, ακόμη και σε ένα σύστημα μικρής εμβέλειας, μια διαμόρφωση υψηλότερης τάξης, όπως η PAM8, η οποία έχει 23 επίπεδα λογικών σταθμών και μπορεί θεωρητικά να τριπλασιάσει το ρυθμό μεταδιδόμενης πληροφορίας, είναι πιο δύσκολο να χρησιμοποιηθεί.

### 2.5.3 Διαμόρφωση μετατόπισης φάσης (Phase-shift Keying, PSK)

Λόγω της μειωμένης πολυπλοκότητας τόσο της διαμόρφωσης όσο και της έντασης πεδίου, η δυαδική διαμόρφωση της έντασης πεδίου ενός οπτικού φορέα, όπως και τα σχήματα διαμόρφωσης OOK, PAM-4, χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα στα συστήματα οπτικών επικοινωνιών. Οι διακυμάνσεις της έντασης του οπτικού πεδίου μπορούσαν να μετατραπούν με τη χρήση μιας απλής φωτοδιόδου σε ηλεκτρικές σειρές παλμών, οι οποίες στη συνέχεια χρησιμοποιούνταν ως βάση για ένα απλό κύκλωμα κατωφλίου στο δέκτη για τη δυαδική επιλογή. Ωστόσο, όπως είναι φανερό από τη θεωρία των ψηφιακών τηλεπικοινωνιών, η χρησιμοποίηση διαφόρων σχημάτων διαμόρφωσης με στόχο τη διαμόρφωση φάσης ή συχνότητας μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερη ευαισθησία του δέκτη, εάν συνδυαστούν με την κατάλληλη μέθοδο διαμόρφωσης συχνότητας, οδηγώντας σε υψηλότερες τιμές ισχύος στο σύστημα και, κατά συνέπεια, σε αύξηση του μήκους αποστολής δεδομένων.

Θα εξετάσουμε το δυαδικό PSK, το πιο βασικό σχήμα διαμόρφωσης φάσης, επειδή χρησιμεύει ως δομικό στοιχείο για πιο σύνθετα σχήματα διαμόρφωσης όπως το QPSK (Quadrature phase-shift keying) και το QAM (Quadrature amplitude modulation). Στη διαφορική διαμόρφωση μετατόπισης φάσης (Differential Phase Shift Keying ή DPSK), αντί για την απόλυτη φάση κάθε συμβόλου, η δυαδική πληροφορία κωδικοποιείται στη διαφορά φάσης μεταξύ δύο ψηφίων. Για παράδειγμα, εάν  $\phi_k$  είναι η φάση του  $k$ -οστού δυαδικού ψηφίου, τότε η διαφορά φάσης, η οποία αντιπροσωπεύεται από την  $\phi_k - \phi_{k-1}$ , γίνεται είτε 0 είτε  $\pi$  ανάλογα με το εάν το  $k$ -οστό δυαδικό ψηφίο έχει τιμή 0 ή 1. Ένα σήμα οπτικής δυαδικής διαμόρφωσης PSK μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$E_s(t) = \text{Re}\{\sqrt{P_s}e^{-j[\varphi_s(t)+\varphi_s(t)]}e^{j\omega_s t}e_s\} \quad (2.12)$$

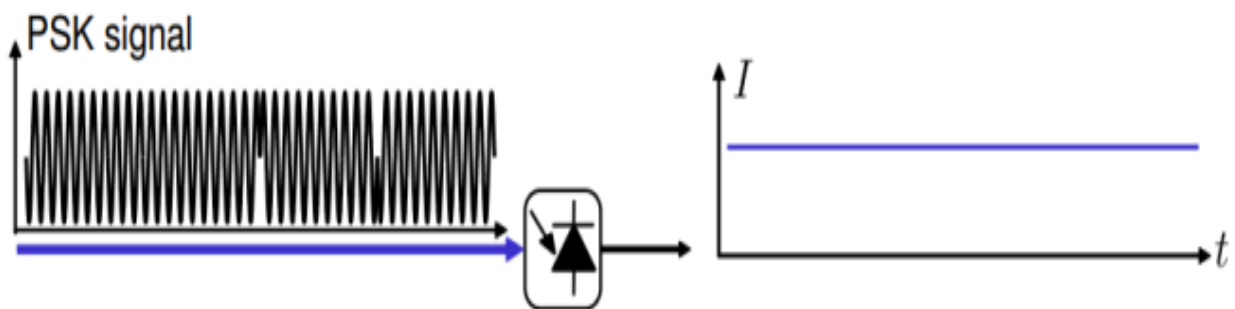
Η σταθερή ισχύ του σήματος εκφράζεται από την μεταβλητή  $P_s$ . Ενώ η μεταβλητή  $\varphi_s$  εκφράζει τον θόρυβο που παράγει η πηγή λέιζερ και η τιμή της (0 ή  $\pi$ ) εξαρτάται από τον διαμορφωτή  $a(t)$ . Η  $\varphi_s$  ορίζεται ως εξής:

$$\varphi_s(t) = \pi a(t) \quad (2.13)$$

Το ηλεκτρικό ρεύμα που δημιουργείται από την ακτινοβολία της φωτοδιόδου υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση (2.14) όπου παρατηρούμε ότι η οπτική ισχύς του σήματος είναι ανάλογη ως προς ρεύμα.

$$I(t) = R * P(t) \quad (2.14)$$

Η μεταβλητή  $R$  αντιπροσωπεύει την ευαισθησία της πηγής. Η τιμή αυτή είναι σταθερή, ειδικά στις δυαδικές μεταδόσεις PSK.



Εικόνα 0.18: Απεικόνιση του τρόπου παραγωγής σήματος PSK με μία μόνο φωτοδίοδο και άμεση φώραση.

## 2.6 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΣΤΕΡΙΣΜΟΥ ΑΝΩΤΕΡΩΝ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Πριν από την εφαρμογή της παλμικής διαμόρφωσης, τα bit δεδομένων που πρόκειται να μεταφερθούν μπορούν να αντιστοιχιστούν σε καθορισμένες περιόδους και, κατά συνέπεια, σε θέσεις με συγκεκριμένες τιμές χρησιμοποιώντας τους διαμορφωτές IQ. Αυτές οι καταστάσεις απεικονίζονται απλά σε ένα διάγραμμα αστερισμού, το οποίο ουσιαστικά απεικονίζει τις επιτρεπτές λογικές τιμές της περιβάλλουσας του μιγαδικού σήματος στο μιγαδικό επίπεδο (I, Q) χρησιμοποιώντας τις βασικές έννοιες των

ψηφιακών επικοινωνιών. Σύμφωνα με την Εξίσωση 2.15 η περιβάλλουσα του διαμορφωμένου σήματος  $E(t)$  μπορεί να αναπαρασταθεί ως το σύνολο του πραγματικού και του φανταστικού μέρους του.

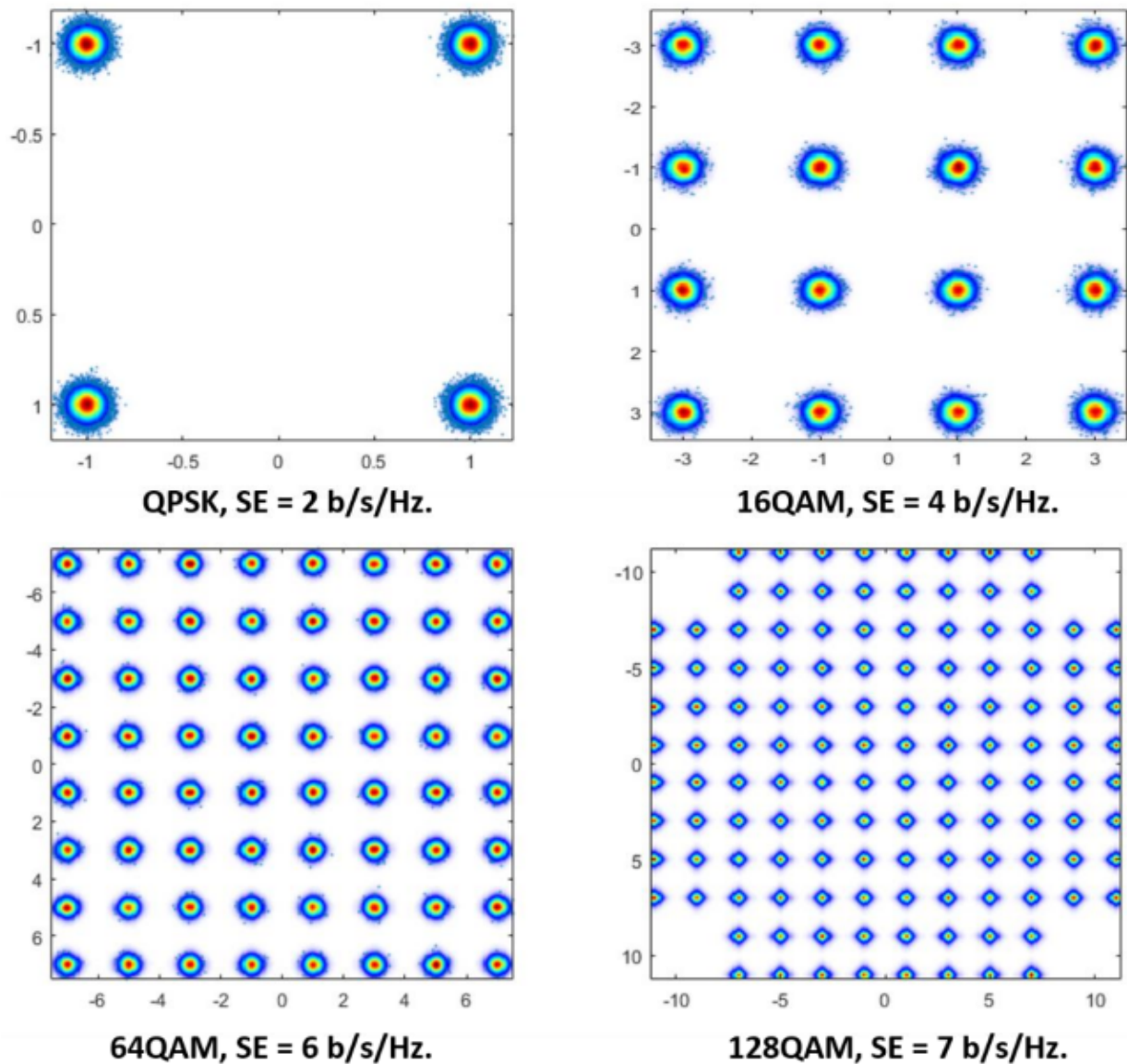
$$E(t) = \text{Re}\{E(t)\} + j\text{Im}\{E(t)\} \quad (2.15)$$

Με  $\text{Re}E(t)$  και  $\text{Im}E(t)$  συμβολίζονται οι "συμφασικές" [In-phase (I)] και "τετραγωνικές" [Quadrature (Q)] συνιστώσες του οπτικού φέροντος, αντίστοιχα. Οι συνιστώσες I και Q των οπτικών σημάτων θα περιγράφονται ως  $I(t)=\text{Re}E(t)$  και  $Q(t)=-\text{Im}E(t)$ , αντίστοιχα, λαμβάνοντας υπόψη την αναπτυσσόμενη μορφή του οπτικού σήματος όπως αναφέρεται στην εξίσωση 2.15 και την αναπαράσταση ενός μιγαδικού αριθμού  $z = x + jy = |r| e^{j\theta}$  στο καρτεσιανό μιγαδικό επίπεδο. Ως αποτέλεσμα, η μιγαδική περιβάλλουσα του παλμού μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$E(t) = I(t) - jQ(t) \quad (2.16)$$

Και κάθε μετατόπιση φάσης που υφίσταται το οπτικό φέρον κατά την εγκατάστασή του μπορεί να αναπαρασταθεί στο καρτεσιανό μιγαδικό επίπεδο (I,Q) με θετικό πρόσημο, το οποίο είναι σύμφωνο με τις βασικές παραδοχές που συναντώνται στη βιβλιογραφία των ψηφιακών επικοινωνιών. Υπάρχουν πολλά συστήματα διαμόρφωσης που κωδικοποιούν δεδομένα στον οπτικό φορέα με όρους πλάτους, φάσης ή και των δύο. Ένα ή περισσότερα bits μπορούν να διαμορφωθούν σε κάθε σύμβολο μετάδοσης ανάλογα με την κατηγορία διαμόρφωσης, αυξάνοντας το SE. Παρόλα αυτά, η αύξηση του SE γίνεται εις βάρος της ανοχής θορύβου (Amplified Spontaneous Emission ή ASE) και των μη γραμμικών παραμορφώσεων. Τα δεδομένα κωδικοποιούνται είτε στην ένταση του οπτικού φέροντος είτε στη φάση του διαφορικού πριν από την εμφάνιση της τεχνολογίας της σύμφωνης ανίχνευσης, η οποία μπορούσε να ανιχνευθεί με την αρχή της άμεσης ανίχνευσης. Τα συστήματα άμεσης ανίχνευσης εξακολουθούν να είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα συστήματα λόγω της απλότητας της αρχιτεκτονικής του πομπού και του δέκτη. Ωστόσο, με τη χρήση διαφορικής τετραγωνικής κλειδώματος μετατόπισης φάσης, η SE αυτών των συστημάτων περιορίζεται σε 2 b/s/Hz (DQPSK). Λόγω της δυσκολίας παρακολούθησης της πόλωσης από τις εμπορικές οπτικές συσκευές, η ποικιλομορφία πόλωσης δεν χρησιμοποιείται σε αυτά τα συστήματα. Η διαμόρφωση πολλαπλών επιπέδων είναι πλέον δυνατή χάρη στην τεχνολογία σύμμορφης ανίχνευσης. Στην Εικόνα 2.19 απεικονίζεται μια σειρά από ιδανικές απεικονίσεις αστερισμών που

αντιστοιχούν σε διάφορα σχήματα διαμόρφωσης τα οποία μπορούν να κατασκευαστούν με τη χρήση διαφόρων οπτικών διαμορφωτών. Το σύνολο των πιθανών καταστάσεων διαμόρφωσης (σύμβολα) αναπαρίσταται από τις μπλε κουκκίδες. Οι καταστάσεις διαμόρφωσης της ΟΟΚ, για παράδειγμα, αντιστοιχούν σε δύο κανονικοποιημένα επίπεδα ισχύος 0 και 1, τα οποία απεικονίζονται με δύο κόκκινες κουκκίδες στις θέσεις (0,0) και (1,0) του μοναδιαίου κύκλου του μιγαδικού επιπέδου (I,Q). Συνεχίζοντας τη συζήτηση των διαγραμμάτων αστερισμού στην Εικόνα 2.19, οι καταστάσεις διαμόρφωσης του σήματος εμφανίζονται ως κόκκινες κουκκίδες στα όρια του μοναδιαίου κύκλου με διαφορά φάσης ίση με  $\pi$  στην περίπτωση της διαμόρφωσης BPSK. Τέλος, απεικονίζονται τρία διαγράμματα αστερισμού που αντιπροσωπεύουν διαφορετικούς τρόπους διαμόρφωσης με την τεχνική QPSK. Οι ποικίλες τεχνικές διαμόρφωσης παράγουν τις ίδιες καταστάσεις διαμόρφωσης με διαφορά φάσης  $\pi/2$  και στις τρεις περιπτώσεις. Γίνεται επίσης σαφές ότι μερικές μέθοδοι οδηγούν σε μεταβάσεις με σταθερό πλάτος καθ' όλη τη διάρκεια, επομένως η τροχιά ακολουθεί την εξωτερική περίμετρο του μοναδιαίου κύκλου, ενώ άλλες οδηγούν σε διακυμάνσεις της έντασης του πεδίου καθώς τροποποιείται η φάση τους. Στην υποενότητα 2.7.1, θα εξετάσουμε λεπτομερέστερα τη μέθοδο διαμόρφωσης σήματος QPSK. Σε όλα αυτά τα παραδείγματα φαίνεται πόσο αποτελεσματικά μπορούν να είναι τα διαγράμματα αστερισμού ως εργαλείο απεικόνισης, καθώς έχουν την ικανότητα να συλλαμβάνουν την ουσία της διαδικασίας παραγωγής οπτικού σήματος. Λόγω του θορύβου και της παραμόρφωσης του διαμορφωμένου σήματος που προκαλούνται από όλες τις υποβαθμίσεις του συνολικού δικτύου μετάδοσης που εισάγονται από τον πομπό στον δέκτη (θόρυβος ενισχυτών, πεπερασμένο ηλεκτροοπτικό (ΕΟ) εύρος λειτουργίας των διαμορφωτών κ.λπ.), οι καταστάσεις διαμόρφωσης στα διαγράμματα αστερισμού δεν εμφανίζονται ποτέ ως μικρές κουκκίδες σε πραγματικές συνθήκες μετάδοσης. Αν και αναμένεται μεγαλύτερη SE, οι εξελιγμένες μέθοδοι διαμόρφωσης έχουν συχνά υψηλότερη ποιινή υλοποίησης από τα βασικά σχήματα QAM. Το απλό σχήμα NRZ-ΟΟΚ που αγγίζει ρυθμούς μετάδοσης έως 100 Gb/s με ένα οπτικό φορέα με άμεση ανίχνευση στο δέκτη για εφαρμογές διασύνδεσης εντός των κέντρων δεδομένων και τα υψηλότερα σχήματα διαμόρφωσης m-QAM ( $m = 4, 16, 64, 128$ ) με σύμμορφη ανίχνευση για εφαρμογές διασύνδεσης μεταξύ κέντρων δεδομένων, εξετάζεται πρώτα.

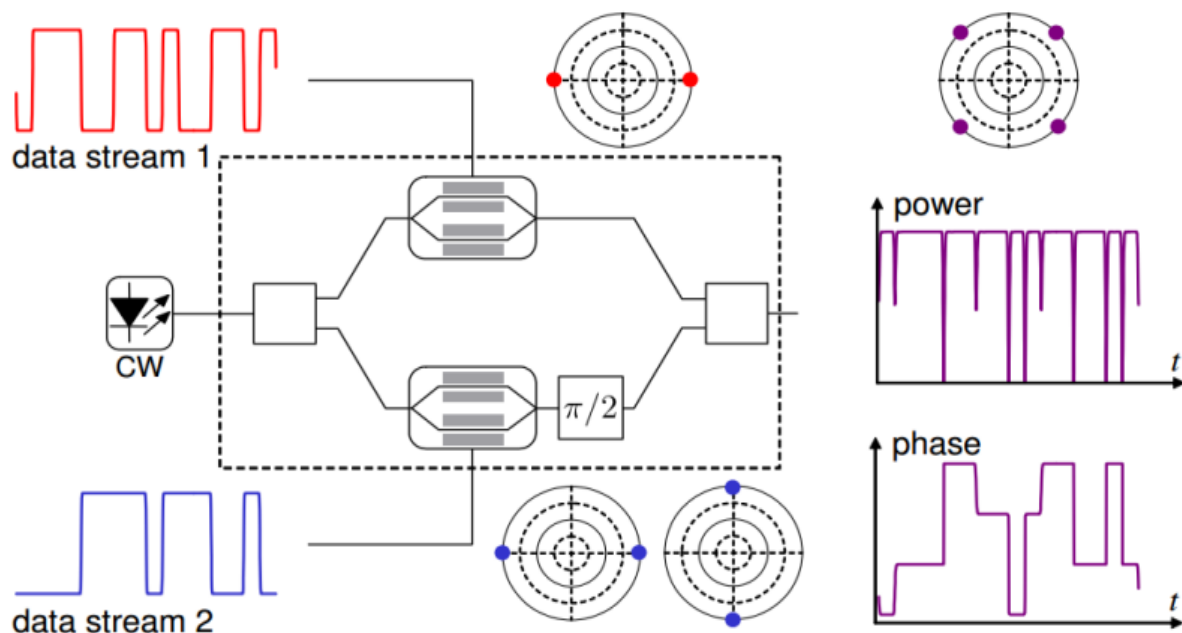


Εικόνα 0.19: Σχήματα διαμόρφωσης QAM.

### 2.6.1 Διαμόρφωση κατά QPSK

Ένας διαμορφωτής IQ χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση σημάτων QPSK, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.20. Ένα δυαδικό ηλεκτρικό σήμα οδηγεί κάθε MZM, το οποίο ακολουθείται από τη δημιουργία ενός σήματος BPSK από έναν διαμορφωτή MZM. Ο ρυθμιστής φάσης  $\pi/2$  στον κάτω βραχίονα της συσκευής συμβολόμετρου έχει σχεδιαστεί για να περιστρέφει το διάγραμμα αστερισμού του παραγόμενου BPSK κατά 90 μοίρες. Ένα οπτικό φέρον διαμορφωμένο με QPSK δημιουργείται μετά από συνέλιξη των δύο BPSK μετά τον συζεύκτη ισχύος εξόδου, όπως φαίνεται στην Εικόνα

2.20. Η ιδιότητα των σημάτων παραμένει μετά τη σύνθεση των δύο σημάτων BPSK σε ένα σήμα QPSK, διότι ένας MZM μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως διαμορφωτής φάσης, επιτυγχάνοντας μια μετατόπιση φάσης ακριβώς στα διαμορφωμένα σήματα BPSK. Ωστόσο, η απόκτηση του σωστού σημείου πόλωσης για την επίτευξη της μετατόπισης φάσης  $\pi/2$  στο διαμορφωμένο σήμα BPSK που παράγεται από το κάτω άκρο του διαμορφωτή - μια τεχνική που εξασφαλίζει την ορθογωνιότητα μεταξύ των δύο σημάτων BPSK - είναι ένα πραγματικό ζήτημα στη σύνθεση σημάτων QSPK. Η ισχύς εξόδου του οπτικά διαμορφωμένου σήματος QPSK στην έξοδο του διαμορφωτή IQ interferometric παρουσιάζει βυθίσεις, δηλαδή δύο επίπεδα, το ένα αντιστοιχεί στη μετάβαση από την κατάσταση διαμόρφωσης μεταξύ 0 και, και το άλλο στις ταυτόχρονες μεταβάσεις και των δύο σημάτων BPSK. Οι τροχιές των μεταβάσεων που μπορούν να επιτευχθούν μπορούν να ακολουθήσουν είτε μια παράλληλη πορεία ως προς τους άξονες I και Q είτε μια πορεία που διέρχεται από την αρχή των αξόνων, όπως φαίνεται στο διάγραμμα οφθαλμού στην Εικόνα 2.20. Το προκύπτον σχήμα διαμόρφωσης QPSK στην έξοδο του διαμορφωτή είναι δυνατόν να ληφθεί συμβολικά, μετατρέποντας τη διαφορά φάσης μεταξύ γειτονικών συμβόλων σε διαφορά πλάτους μέσω ενός πρόσθετου βήματος διαφορικής κωδικοποίησης ή χρησιμοποιώντας την τεχνική σύμφωνης φώραση.

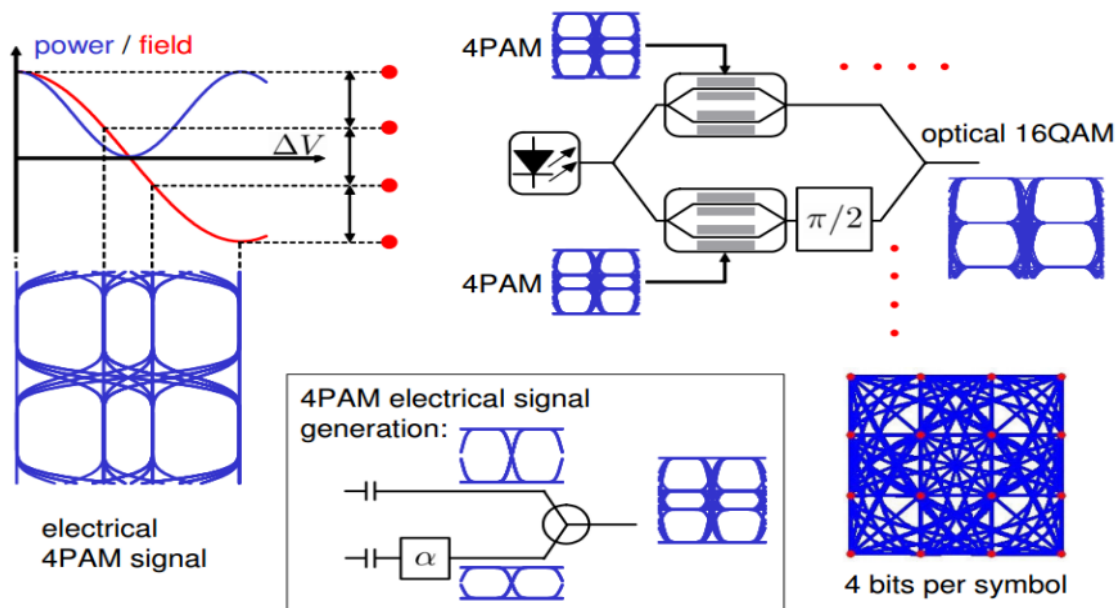


Εικόνα 0.20: Διαμόρφωση σημάτων QPSK με χρήση διαμορφωτών IQ.



## 2.6.2 Διαμόρφωση κατά QAM

Οι σχηματισμοί διαμόρφωσης QAM χρησιμοποιούνται ευρέως στα ψηφιακά τηλεπικοινωνιακά συστήματα και παίζουν πλέον σημαντικό ρόλο στις οπτικές επικοινωνίες, ιδίως στα δίκτυα κορμού και ραχοκοκαλιάς. Το σύστημα διαμόρφωσης QPSK που συζητήθηκε προηγουμένως μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ιδιαίτερο παράδειγμα διαμόρφωσης 4-QAM, με συνολικά τέσσερις πιθανές καταστάσεις διαμόρφωσης. Η περίπτωση του σχήματος 16-QAM, στο οποίο η διαμόρφωση του οπτικού φορέα μπορεί να λάβει συνολικά 16 λογικές καταστάσεις με κάθε σύμβολο να μεταφέρει συνολικά τέσσερα bit πληροφορίας, θα εξεταστεί ως παράδειγμα μιας διαμόρφωσης QAM που μπορεί να επιτευχθεί σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης στα σύγχρονα οπτικά δίκτυα κορμού. Σε ένα τετραγωνικό πλέγμα του μιγαδικού επιπέδου, το διάγραμμα αστερισμού 16-QAM απεικονίζει ένα σύνολο δεκαέξι καταστάσεων διαμόρφωσης (I,Q). Ο διαμορφωτής IQ πρέπει να οδηγείται από ηλεκτρικά σήματα διαμόρφωσης τεσσάρων επιπέδων, τα οποία δεν είναι πλέον δυαδικά αλλά φέρουν διαμόρφωση πλάτους ηλεκτρικών παλμών τεσσάρων επιπέδων, για να δημιουργηθούν αυτές οι λογικές καταστάσεις (διαμόρφωση πλάτους 4 παλμών, 4-PAM). Αυτά τα ηλεκτρικά μοτίβα μπορούν να κατασκευαστούν με ένα ηλεκτρικό κύκλωμα DAC ή με τη χρήση ενός ηλεκτρικού συζεύκτη ισχύος για τον συνδυασμό δύο δυαδικών ακολουθιών άνισου πλάτους.



Εικόνα 0.21: Απεικόνιση σήματος QAM-16 με χρήση διαμορφωτή IQ.



Τα δύο ηλεκτρικά σήματα δεδομένων 4-PAM αντιστοιχούν σε τέσσερις δυναμικές καταστάσεις ανά τεταρτημόριο του μιγαδικού επιπέδου (I,Q) όταν κάθε ένα από τα MZM του διαμορφωτή IQ είναι πολωμένο στη χαμηλότερη ισχύ μετάδοσης, με αποτέλεσμα ένα σήμα 16-QAM. Η μέγιστη ισχύς εξόδου του διαμορφωτή θα επιτευχθεί εάν κάθε MZM οδηγηθεί σε δύο διαδοχικά τοπικά μέγιστα της συνάρτησης μεταφοράς ισχύος του. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτρικών επιπέδων των σημάτων διαμόρφωσης 4-PAM θα πρέπει να αναπροσαρμοστεί σε αυτό το σενάριο λόγω της μη γραμμικής σχέσης μεταξύ του ηλεκτρικού πεδίου και της εφαρμοζόμενης τάσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.21. Για την ανίχνευση και την αποκωδικοποίηση τέτοιων τεχνικών οπτικής διαμόρφωσης απαιτούνται σύμφωνοι οπτικοί δέκτες.

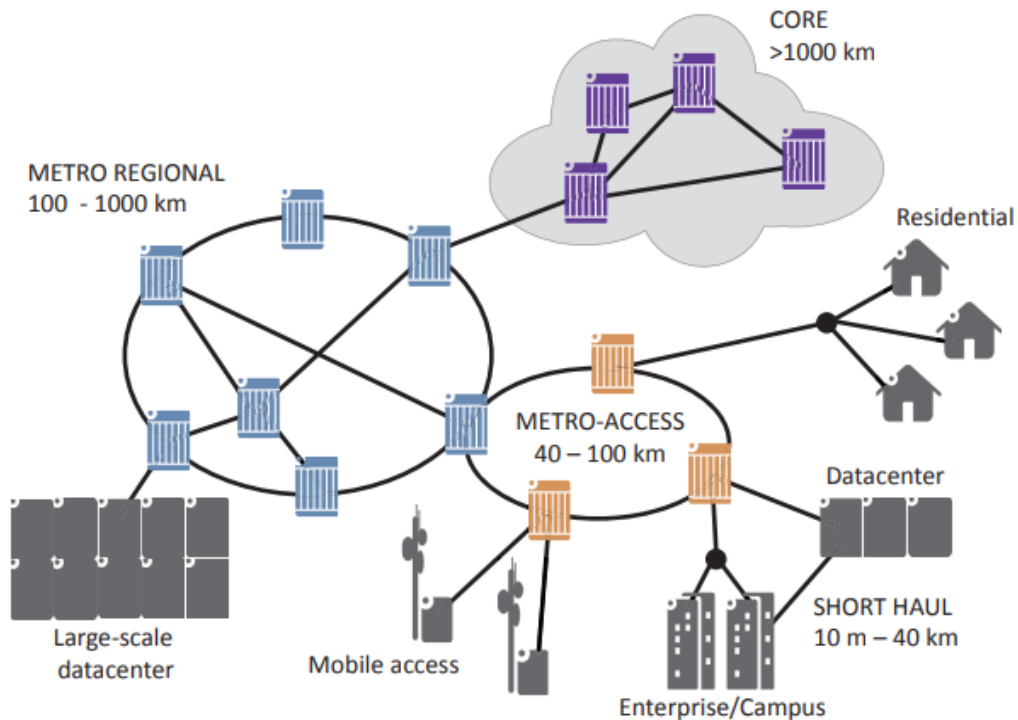
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΤΑ ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΥΠΕΡΤΑΧΕΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΟΠΤΙΚΩΝ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Τα συστήματα οπτικών ινών δεν έχουν σταματήσει να εξελίσσονται από την πρώτη τους δοκιμαστική επίδειξη το 1977, παρέχοντας καθημερινά υψηλότερες χωρητικότητες. Η διαμόρφωση έντασης και η άμεση ανίχνευση (Intensity Modulation and Direct Detection ή IM-DD) χρησιμοποιήθηκε στα πρώτα εμπορικά διαθέσιμα συστήματα για τη μετάδοση έως και 45 Mb/s σε απόσταση 10 km (χωρίς αναγεννητή) χρησιμοποιώντας πολύτροπες ίνες (MMF). Μόλις δέκα χρόνια αργότερα, τα οπτικά συστήματα ήταν σε θέση να μεταδίδουν δεδομένα με ταχύτητες έως και 2,5 Gb/s σε αποστάσεις 60-70 km. Αυτό κατέστη δυνατό χάρη στη χρήση νέων λέιζερ και ανιχνευτών 1,55 μm (που αντιστοιχούν στη χαμηλότερη ζώνη απωλειών της ίνας, τυπικά 0,2 dB/km) και νέων μονότροπων ινών (SMF) με εκτεταμένη εμβέλεια, καθώς και στην πρόοδο των ηλεκτρονικών υψηλής ταχύτητας που επέτρεψαν την 50πλάσια αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Η έννοια της πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος (WDM) απέκτησε δημοτικότητα μετά την εφεύρεση του ενισχυτή ινών με προσμίξεις ερβίου (Erbium-Doped Fiber Amplifier ή EDFA). Η WDM επέτρεψε τη μετάδοση πολλαπλών καναλιών μήκους κύματος σε μία μόνο ίνα, επιτρέποντας τη χωρητικότητα των ινών να ξεπεράσει το 1Tb/s μέχρι το τέλος της δεκαετίας του 1990. Η σύμφωνη τεχνολογία εγκαινίασε την πιο πρόσφατη οπτική επανάσταση στα τέλη της δεκαετία του 2000. Σε αντίθεση με τα συστήματα IM-DD, τα οποία στέλνουν δεδομένα αποκλειστικά με βάση την ένταση του φωτός, τα σύμφωνα συστήματα στέλνουν δεδομένα με βάση το πλάτος, τη φάση και την πόλωση του φωτός, αυξάνοντας έτσι τη φασματική απόδοση (b/s/Hz). Σήμερα οι σύμφωνοι πομποδέκτες είναι ικανοί να μεταδίδουν από 100 έως 800 Gb/s ανά μήκος κύματος, σε χιλιάδες χιλιόμετρα.

Τα συστήματα οπτικών ινών χρησιμοποιούνται ευρέως για την υποστήριξη παγκόσμιων δικτύων κορμού λόγω της υψηλής χωρητικότητάς τους και της μεγάλης εμβέλειάς τους (αποκαλούνται επίσης δίκτυα κορμού ή δίκτυα μεγάλων αποστάσεων). Ωστόσο, οι περισσότερες εταιρείες τηλεπικοινωνιών υιοθετούν πλέον την επικοινωνία μέσω οπτικών ινών και στις κοντινές αποστάσεις, λόγω της αύξησης της κίνησης στο Διαδίκτυο και της μείωσης του κόστους των οπτικών συστημάτων. Ένα διάγραμμα

ενός παγκόσμιου τηλεπικοινωνιακού δικτύου παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.1, το οποίο απεικονίζει την ποικιλομορφία των τμημάτων του δικτύου. Προφανώς, κάθε τμήμα επιλέγει την τεχνολογική λύση που ανταποκρίνεται καλύτερα στις απαιτήσεις του σε εύρος ζώνης/απόσταση καθώς και στους τεχνολογικούς και οικονομικούς περιορισμούς του.



**Εικόνα 0.1: Τα διαφορετικά τμήματα δικτύων που συναντάμε σε παγκόσμιο επίπεδο.**

Τα κεντρικά δίκτυα απαιτούν μαζικές γραμμές μεταφοράς δεδομένων ικανές να μεταφέρουν όλη την κυκλοφορία δεδομένων που συλλέγονται από τα υπόλοιπα τμήματα σε παγκόσμιο επίπεδο. Τα κεντρικά δίκτυα βασίζονται σε σύμφωνους πομποδέκτες υψηλής τεχνολογίας για την επίτευξη υψηλής φασματικής απόδοσης και, συνεπώς, τη μεγιστοποίηση της χωρητικότητας των οπτικών ινών, επειδή έχουν τους λιγότερους κόμβους αλλά απαιτούν τη μεγαλύτερη χωρητικότητα. Δεκάδες terabits ανά δευτερόλεπτο μεταφέρονται συνήθως μέσω πολλαπλών καναλιών μήκους κύματος, καθένα από τα οποία λειτουργεί με ταχύτητα 100-200 Gb/s. Από την άλλη πλευρά, τα χαμηλότερα τμήματα δικτύου (π.χ. κινητά, κέντρα δεδομένων κ.λπ.) δεν απαιτούν μεγάλη εμβέλεια (συνολικά λιγότερο από 100 χλμ.), αλλά είναι πολύ ευαίσθητα στο κόστος λόγω της κοντινής απόστασης από τον τελικό χρήστη. Συνεπώς, οι πομποδέκτες που βασίζονται στην τεχνολογία IM-DD χρησιμοποιούνται συνήθως σε αυτά τα τμήματα. Λόγω των διαφορετικών αναγκών τους, τα διάφορα τμήματα ενός

τέτοιου στρώματος έχουν ευρύ φάσμα τεχνολογικών δυνατοτήτων: Mb/s-Gb/s παθητικά οπτικά δίκτυα (Passive Optical Network ή PON) για οικιακή συνδεσιμότητα, συνδέσεις 1-10 Gb/s για κινητά backhauling ή δεδομένα επιχειρήσεων/πανεπιστημιούπολεων και 10-400 Gb/s για κέντρα δεδομένων μεγάλης κλίμακας. Το μεσολαβητικό μητροπολιτικό τμήμα συγκεντρώνει την κυκλοφορία από αυτό το ανομοιογενές οικοσύστημα, με αποτέλεσμα ύπαρξης διαφορετικών ροών κυκλοφορίας που διακινούνται μέσω των μητροπολιτικών δικτύων, καθιστώντας δύσκολο το σχεδιασμό τους. Επιπλέον, η κίνηση σε αυτά τα τμήματα αυξάνεται ραγδαία ως αποτέλεσμα της εξάπλωσης των υπηρεσιών cloud που απαιτούν μεγάλο εύρος ζώνης. Κατά συνέπεια, οι περισσότεροι πωλητές πομποδεκτών εργάζονται επί του παρόντος στη μείωση του κόστους της σύμφωνης τεχνολογίας για να προσφέρουν μια λύση υψηλού εύρους ζώνης για αυτά τα δίκτυα, με χωρητικότητες που κυμαίνονται μεταξύ 100 και 400 Gb/s.

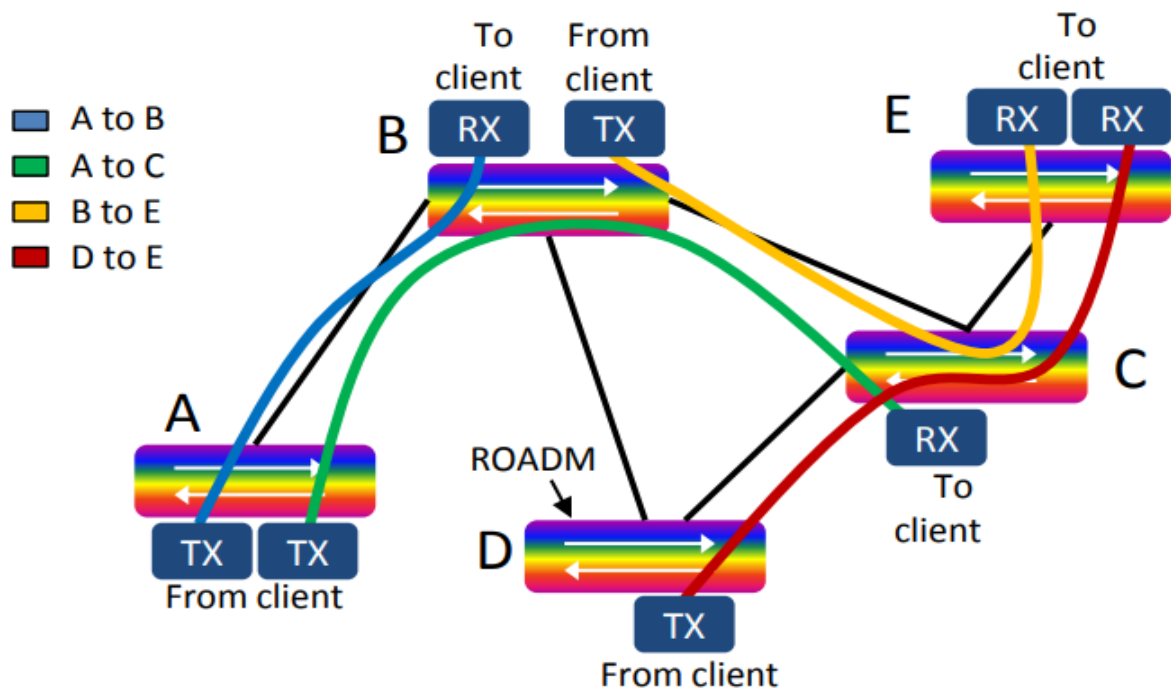
### **3.1 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ / ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ**

Διαφορετικές τεχνικές επικοινωνίας/μεταγωγής χρησιμοποιούνται σήμερα στα διάφορα τμήματα του δικτύου, ανάλογα με το είδος της κίνησης που διακινείται μέσω του συγκεκριμένου δικτύου. Παρακάτω θα συζητήσουμε τρεις διαφορετικές τεχνικές μεταγωγής: οπτική μεταγωγή κυκλώματος (Optical Circuit Switching ή OCS), ηλεκτρονική μεταγωγή πακέτων (Electronic Packet Switching ή EPS) και οπτική μεταγωγή πακέτων (Optical Packet Switching ή OPS).

#### **3.1.1 Μεταγωγή οπτικού κυκλώματος (OCS)**

Η μεταγωγή οπτικού κυκλώματος είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος επικοινωνίας στα σημερινά δίκτυα κορμού. Σε αυτή την προσέγγιση δημιουργείται μια σταθερή οπτική σύνδεση (κύκλωμα) μεταξύ των κόμβων πηγής και προορισμού, συνήθως με την ανάθεση μιας διαδρομής από άκρο σε άκρο μέσω ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2, όπου οι χρωματιστές καμπύλες υποδεικνύουν τα κυκλώματα που δημιουργούνται ανάμεσα σε δύο κόμβους. Τα δεδομένα μπορούν να δρομολογηθούν οπτικά σε επαναδιαμορφώσιμους οπτικούς πολυπλέκτες προσθήκης-πτώσης (Reconfigurable Optical add-drop Multiplexer ROADM) που τοποθετούνται στους κόμβους, επιτρέποντας τη διέλευσή τους από

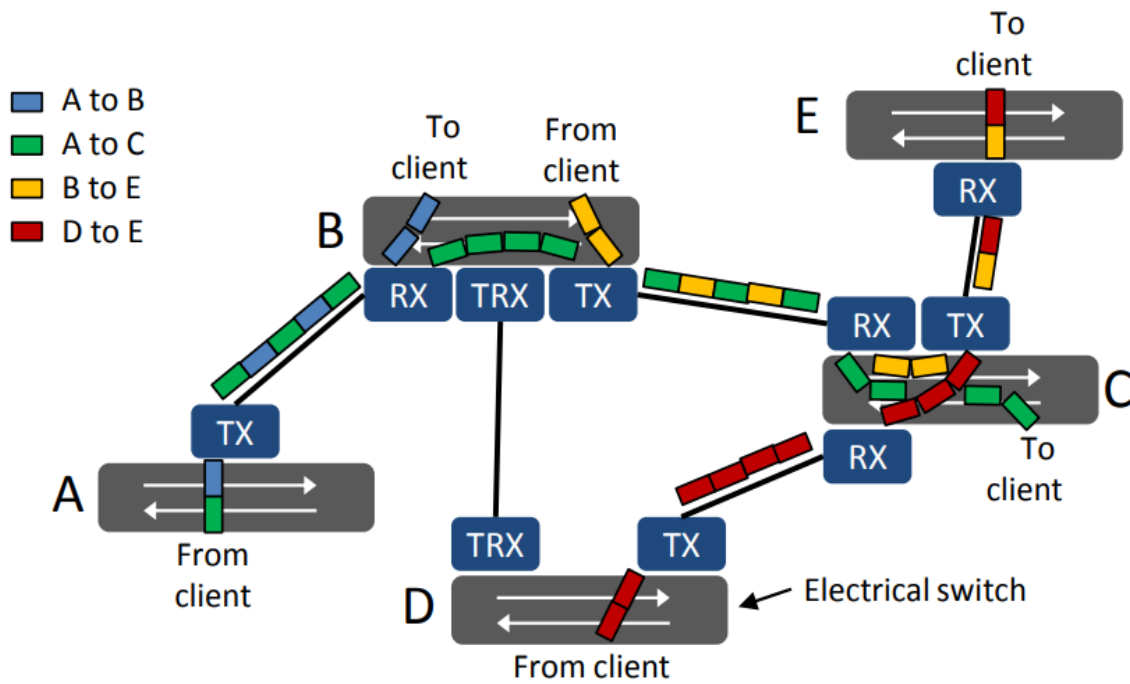
πολλαπλούς κόμβους με διαφάνεια (δηλαδή, χωρίς την ανάγκη μετατροπής από οπτική σε ηλεκτροοπτική (O/E/O)). Συνήθως κάθε ROADM διαθέτει τον ίδιο αριθμό επιλογικών μεταγωγέων μήκους κύματος (Wavelength Selective Switch ή WSS) με τις ίνες εισόδου/εξόδου, επιτρέποντας την ανακατεύθυνση οποιουδήποτε μήκους κύματος από οποιαδήποτε ίνα εισόδου σε οποιαδήποτε ίνα εξόδου (ή στους δέκτες). Τα WSS έχουν αργό χρόνο αναδιαμόρφωσης (χιλιοστά του δευτερολέπτου έως δευτερόλεπτα), ο οποίος είναι αρκετός για τα δίκτυα OCS που έχουν σχεδιαστεί για να είναι στατικά ή αναδιαμορφώσιμα με την πάροδο του χρόνου. Όταν η κίνηση από άκρο σε άκρο μεταξύ δύο κόμβων είναι σταθερή και η επικοινωνία απαιτεί χωρητικότητα πλήρους μήκους κύματος, η στρατηγική αυτή είναι αποτελεσματική. Αυτό είναι σύνηθες για τα δίκτυα πυρήνα, τα οποία συνδυάζουν μεγάλους όγκους κυκλοφορίας από υποκείμενα δίκτυα, με αποτέλεσμα να έχουν κατά μέσο όρο σταθερές απαιτήσεις χωρητικότητας. Το φως μετακινείται ανοιχτά από την πηγή στον προορισμό, καθιστώντας το OCS αποδοτικό όσον αφορά τη χρήση ενέργειας και την καθυστέρηση. Ωστόσο, σε περιπτώσεις όπου η κυκλοφορία είναι εξαιρετικά μεταβλητή, η μέθοδος αυτή σπαταλά χωρητικότητα.



Εικόνα 0.2: Διάγραμμα δικτύου μεταγωγής οπτικού κυκλώματος.

### 3.1.2 Ηλεκτρονική μεταγωγή πακέτων (EPS)

Σε άλλα τμήματα, όπως τα δίκτυα κέντρων δεδομένων, η κίνηση μεταξύ των κόμβων είναι ασταθής και αλλάζει γρήγορα από άκρο σε άκρο (στην προκειμένη περίπτωση, διακομιστές), με αποτέλεσμα οι συνδέσεις να απαιτούν συνήθως λιγότερο από τη χωρητικότητα του καναλιού/μήκους κύματος. Ως αποτέλεσμα, η χρήση OCS σπαταλά σημαντική ποσότητα χωρητικότητας. Επιπλέον, η πλήρης διασύνδεση εκατοντάδων χιλιάδων (N) διακομιστών θα απαιτούσε τη δημιουργία N<sup>2</sup> συνδέσεων κυκλώματος και, ως εκ τούτου, τη χρήση N<sup>2</sup> πομποδεκτών, κάτι που είναι αδύνατο να επιτευχθεί επειδή ο αριθμός των μηκών κύματος στη ζώνη C κυμαίνεται από 80 έως 96. Το EPS (π.χ. Ethernet) χρησιμοποιείται για την ευέλικτη προσαρμογή στις μεταβολές της κίνησης, βελτιστοποιώντας παράλληλα τη χρήση του εξοπλισμού σε τέτοια δυναμικά περιβάλλοντα κίνησης. Στο EPS, τα δεδομένα που πηγαίνουν σε διαφορετικούς προορισμούς (άρα ανήκουν σε διαφορετικές ζεύξεις) μπορούν να αποσταλούν μέσω της ίδιας ζεύξης πολυπλεγμένα σε μικρά ηλεκτρικά πακέτα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.3, όπου κάθε χρώμα υποδεικνύει πακέτα με τους ίδιους κόμβους πηγής και προορισμού (συνήθως σε κλίμακα νανο- ή μικροδευτερολέπτων). Αξίζει να σημειωθεί ότι η έννοια της διαφάνειας χάνεται όταν χρησιμοποιείται αυτή η μέθοδος. Τα ηλεκτρικά παραγόμενα πακέτα μεταδίδονται μέσω "κυκλωματικών" οπτικών συνδέσεων σημείου προς σημείο, οι οποίες απαιτούν πομποδέκτες σε κάθε τερματισμό της σύνδεσης οπτικών ινών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.3. Κατά συνέπεια, όταν διέρχεται από έναν ενδιάμεσο κόμβο, το οπτικό σήμα μετατρέπεται πρώτα σε ηλεκτρικό πεδίο (μέσω ενός δέκτη), στη συνέχεια κάθε ηλεκτρικό πακέτο δρομολογείται σε μια θύρα εξόδου ηλεκτρικού πεδίου (ηλεκτρικός μεταγωγέας) και, τέλος, το ηλεκτρικό σήμα μετατρέπεται σε οπτικό πεδίο (πομπός).



Εικόνα 0.3: Διάγραμμα δικτύου ηλεκτρονικής μεταγωγής πακέτων.

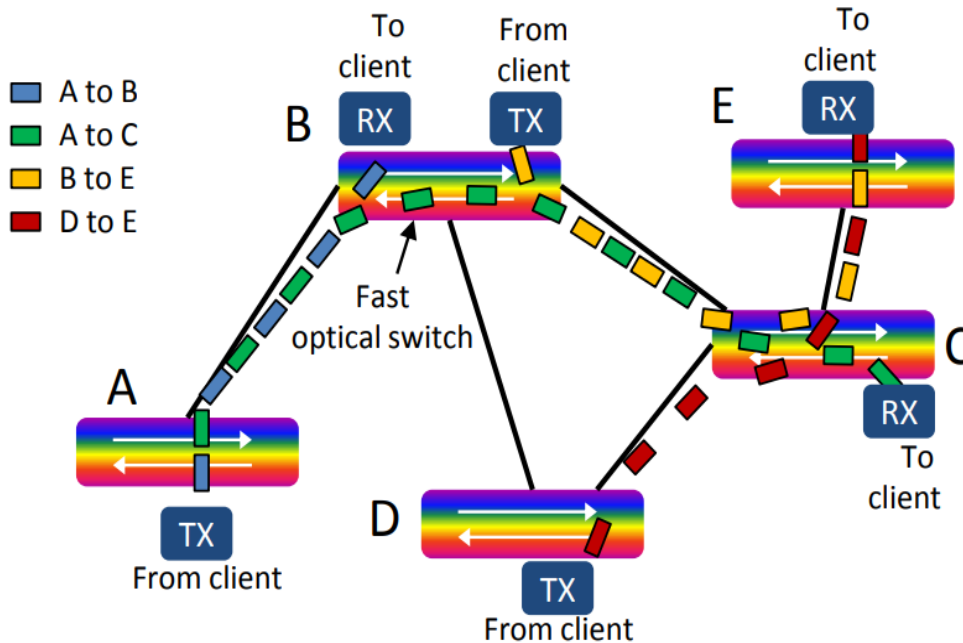
Ένα σαφές πλεονέκτημα του EPS είναι η δυνατότητα εκτέλεσης στατιστικής πολυπλεξίας, η οποία βελτιώνει τη χρήση των πόρων (ένας μόνο πομποδέκτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξυπηρέτηση πολλών συνδέσεων). Παρ' όλα αυτά, το EPS απαιτεί ηλεκτρονική μεταγωγή (και αντίστοιχα μετατροπές O/E/O) σε κάθε ενδιάμεσο κόμβο, γεγονός που αυξάνει όχι μόνο την απαιτούμενη κατανάλωση ενέργειας, αλλά και την καθυστέρηση, λόγω του χρόνου που δαπανάται σε κάθε κόμβο για τη μετατροπή δεδομένων (στο ηλεκτρικό πεδίο), την επεξεργασία, ενδεχομένως την αναμονή σε ουρά και την εκ νέου μετατροπή (στο οπτικό πεδίο). Επιπλέον, η αναβάθμιση της χωρητικότητας στα δίκτυα EPS απαιτεί συνήθως την αλλαγή των περισσότερων στοιχείων του δικτύου, συμπεριλαμβανομένων των πομποδεκτών τελικού κόμβου (πελάτη) και των πομποδεκτών ενδιάμεσων κόμβων και των ηλεκτρικών διακόπτες. Από την άλλη πλευρά, στα δίκτυα OCS, μόνο οι πομποδέκτες τελικού κόμβου χρειάζονται αναβάθμιση, δεδομένου ότι τα δεδομένα διαπερνούν διαφανώς τους ROADMs.

### 3.1.3 Μεταγωγή οπτικών πακέτων (OPS)

Πολλές ερευνητικές ομάδες έχουν προτείνει τη χρήση του OPS σε ιδιαίτερα δυναμικά δίκτυα, όπως τα μητροπολιτικά τμήματα και τα τμήματα κέντρων δεδομένων, με στόχο την ταυτόχρονη διαφάνεια (όπως στο OCS) και τη στατιστική πολυπλεξία (όπως στο EPS). Σε αντίθεση με το EPS, όπου τα ηλεκτρικά πακέτα εισέρχονται σε οπτικές ζεύξεις σημείου-προς-σημείο, οι οπτικές οντότητες πακέτων μεταφέρονται από τις οπτικές ζεύξεις OPS. Τα οπτικά πακέτα δρομολογούνται τώρα στον οπτικό τομέα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.4, παρόμοια με το OCS. Ωστόσο, στο OPS είναι απαραίτητοι οι γρήγοροι οπτικοί μεταγωγείς που μπορούν να επανακατευθύνουν το φως σε επίπεδο χρόνου πακέτων (μεταγωγή νανοδευτερολέπτων). Τέτοιοι οπτικοί διακόπτες μπορούν για παράδειγμα να υλοποιηθούν σε μια αρχιτεκτονική εκπομπής και επιλογής με τη χρήση οπτικών ενισχυτών ημιαγωγών (Semiconductor Optical Amplifier ή SOA), διαμορφωτών ηλεκτροαπορρόφησης (EAM) ή μεταβλητών οπτικών εξασθενητών (Variable Optical Attenuator ή VOA), μεταξύ άλλων, ως οπτικές πύλες. Όπως έχει προαναφερθεί, το OPS συνδυάζει τα πλεονεκτήματα και των δύο προσεγγίσεων: στατιστική πολυπλεξία με ακρίβεια υπο-μηκών κύματος, η οποία επιτρέπει ευελιξία στην κυκλοφορία και βελτιστοποίηση των πόρων, της διαφάνειας, η οποία μειώνει την κατανάλωση ενέργειας, την καθυστέρηση καθώς και επιτρέπει επεκτάσεις χωρητικότητας (μόνο οι πομποδέκτες των τελικών κόμβων χρειάζεται να αλλάξουν). Παρ' όλα αυτά, το θεμελιώδες ζήτημα με το OPS είναι η αντιμετώπιση της σύγκρουσης πακέτων. Κάθε κόμβος με δομή που πλέγματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.4, έχει πολλές συνδέσεις εισόδου/εξόδου. Ως αποτέλεσμα, δύο πακέτα που φτάνουν ταυτόχρονα από διαφορετικές εισόδους μπορεί να κατευθυνθούν στην ίδια έξοδο, όπως παρατηρούμε από τα κίτρινα και κόκκινα πακέτα στον κόμβο C. Εάν τα πακέτα από τις διάφορες εισόδους δεν συγχρονιστούν ή δεν αποθηκευτούν, μπορεί να προκύψει σύγκρουση πακέτων, η οποία θα απαιτήσει επαναμετάδοση πακέτων, με αποτέλεσμα απώλεια χωρητικότητας και αυξημένη καθυστέρηση. Η ηλεκτρονική προσωρινή αποθήκευση χρησιμοποιείται στα συστήματα EPS για τη διαχείριση τέτοιων συμβάντων. Οι γραμμές καθυστέρησης οπτικών ινών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία οπτικών απομονωτών, ωστόσο είναι περιορισμένες και δύσκολο να ελεγχθούν. Ένας άλλος τρόπος αποφυγής των συγκρούσεων είναι ο συγχρονισμός όλων των πακέτων από την πηγή τους- ωστόσο, λόγω του τεράστιου αριθμού συνδέσεων με διαφορετικά μήκη, ο συγχρονισμός



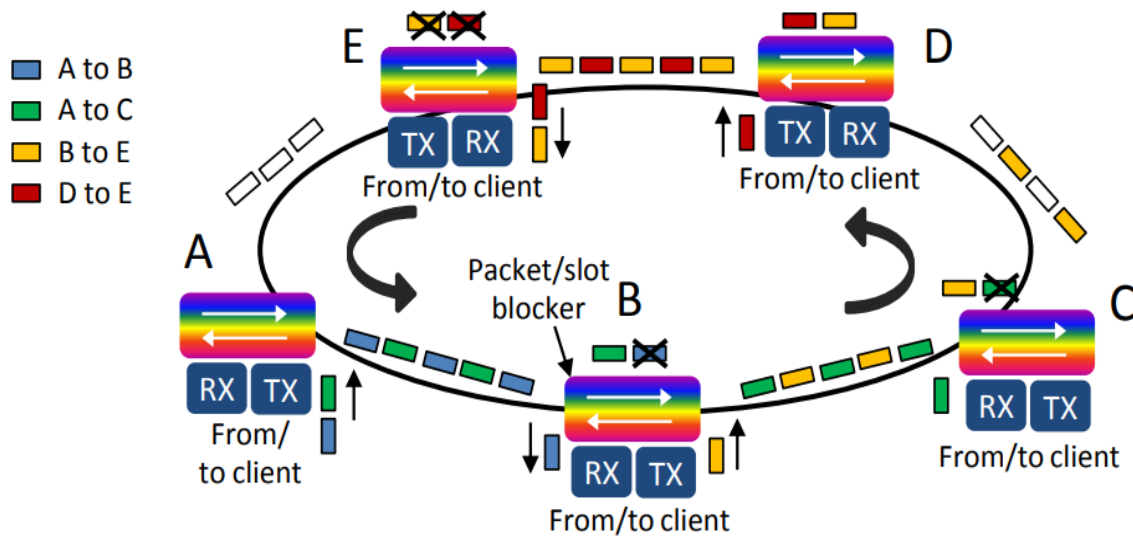
μεγάλου αριθμού κόμβων σε μια αρχιτεκτονική που μοιάζει με πλέγμα είναι προβληματικός. Ως αποτέλεσμα, οι περισσότερες προτάσεις με βάση το δίκτυο OPS διεξάγονται συχνά σε χαμηλό φορτίο χωρητικότητας του δικτύου (λιγότερο από 50%) για να περιοριστεί η πιθανότητα συγκρούσεων. Παρ' όλα αυτά, οι πόροι του δικτύου πρέπει να είναι σχετικά μεγάλοι σε αυτή την εφαρμογή.



Εικόνα 0.4: Διάγραμμα οπτικού δικτύου μεταγωγής πακέτων σε τοπολογία πλέγματος.

Μια τοπολογία δακτυλίου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.5, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση αυτού του προβλήματος. Ένα δίκτυο δακτυλίου συνδέει διάφορους κόμβους μέσω ενός ενιαίου δακτυλίου οπτικών ινών, με τα δεδομένα να μεταδίδονται μέσω πολυπλεγμένων χρονοθυρίδων. Κάθε χρώμα πακέτου στην Εικόνα 3.5 αντιστοιχεί σε έναν ξεχωριστό κόμβο πηγής και προορισμού. Με τη χρήση οπτικών συνδέσεων, είναι απλή η απόρριψη και η προσθήκη πακέτων από και προς το δακτύλιο. Σε αυτή την περίπτωση, κάθε παραλήπτης θα επιλέξει το πακέτο που τον ενδιαφέρει. Επειδή κάθε κόμβος σε έναν οπτικό δακτύλιο διαθέτει μόνο ένα ζεύγος ινών εισόδου/εξόδου, δεν υπάρχει πραγματική μεταγωγή πακέτων. Ωστόσο, επειδή τα δεδομένα ταξιδεύουν διαφανώς μεταξύ των κόμβων, ένας οπτικός αποκλειστής πακέτων/θυρών είναι απαραίτητος για τη διαγραφή των ληφθέντων πακέτων, επιτρέποντας την επαναχρησιμοποίηση των χρονοθυρίδων (βλ. Εικόνα 3.5). Το WDM μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρόσθετη διάσταση διαμοιρασμού για την ενίσχυση της χωρητικότητας ενός τέτοιου δικτύου. Για να αντιμετωπιστεί το μήκος κύματος που

ενδιαφέρει, η μέθοδος αυτή απαιτεί είτε γρήγορους ρυθμιζόμενους πομπούς είτε δέκτες (ή και τα δύο).



Εικόνα 0.5: Διάγραμμα οπτικού δικτύου μεταγωγής πακέτων σε τοπολογία δακτυλίου.

Ο συγχρονισμός των πακέτων είναι απλός στα δίκτυα δακτυλίου, δεδομένου ότι όλα τα πακέτα διέρχονται από το ίδιο μέσο (έναν ενιαίο δακτύλιο οπτικών ινών). Ως αποτέλεσμα, οι συγκρούσεις μπορούν να αποφευχθούν και το δίκτυο μπορεί να υποστηρίξει υψηλά φορτία χωρητικότητας κοντά στο 100%, βελτιώνοντας ακόμη περισσότερο τη χρήση των πόρων.

### 3.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ INTENSITY MODULATION/ DIRECT DETECTION

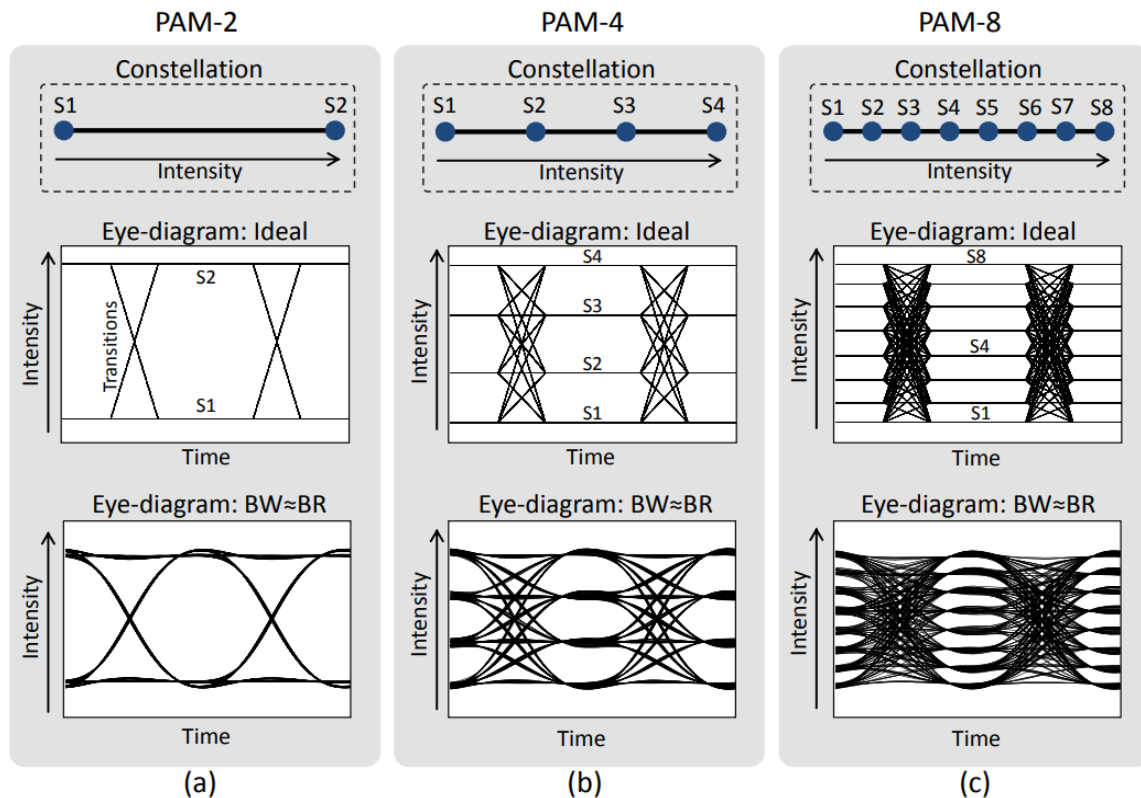
Όπως περιεγράφηκε στην ενότητα 3.1, τα οπτικά συστήματα βασίζονται σε διαφορετικές προσεγγίσεις μετάδοσης ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε τμήματος του δικτύου. Τα δίκτυα που τοποθετούνται στα τμήματα μικρών αποστάσεων (οικιακή και κινητή πρόσβαση και κέντρα δεδομένων) συνήθως επωφελούνται από το χαμηλό κόστος των IM-DD πομποδεκτών, οι οποίοι μεταδίδουν πληροφορίες χρησιμοποιώντας την ένταση του φωτός.

### 3.2.1 IM-DD τεχνικές πολυπλεξίας

Μέχρι πρόσφατα, οι πομποδέκτες IM-DD βασίζονταν στην πιο απλή μορφή διαμόρφωσης που υπάρχει στις οπτικές επικοινωνίες: PAM-2. Αυτή η μορφή κωδικοποιεί κάθε bit (0, 1) σε ένα διαφορετικό επίπεδο έντασης ( $S_1$ ,  $S_2$ ), βλέπε αστερισμό στην Εικόνα 3.6 (α). Στα συστήματα IM-DD, τα σήματα αναπαρίστανται συνήθως από το διάγραμμα ματιού, το οποίο τοποθετεί επάλληλα πολλά δείγματα μιας δεδομένης κυματομορφής σε μία μόνο χρονική περίοδο (συνήθως η διάρκεια ενός ή δύο συμβόλων). Το ιδανικό διάγραμμα ματιού PAM-2 απεικονίζεται στην Εικόνα 3.6 (α), απεικονίζοντας τα δύο επίπεδα έντασης διαμόρφωσης και τις μεταβάσεις μεταξύ τους. Παρακάτω θα παρουσιάσουμε επίσης ένα πιο ρεαλιστικό διάγραμμα ματιού PAM-2, που προέκυψε από την προσομοίωση ενός PAM-2 σήματος με την εφαρμογή φίλτρων πομπού και δέκτη (Butterworth) με εύρους ζώνης (Bandwidth ή BW) ίσο με το baudrate (BR) του σήματος (δεν εφαρμόστηκε θόρυβος). Αυτή η διαμόρφωση προτιμάται σε μονάδες χαμηλού κόστους λόγω της απλότητας της υλοποίησής της, η οποία επιτρέπει τη μείωση του κόστους. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιείται σήμερα σε όλες τις προσαρτώμενες μονάδες που υλοποιούν 1G, 10G και 25G. Ωστόσο, όταν αυξάνεται ο ρυθμός δεδομένων μιας μονής λωρίδας (π.χ. 50 ή 100-Gb/s ή και περισσότερο), αυτή η μορφή διαμόρφωσης απαιτεί δραστική αύξηση του εύρους ζώνης των οπτικών και ηλεκτρικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των πομποδεκτών.

Προκειμένου να συνεχίσουν να αυξάνονται οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων μιας λωρίδας, έχει προταθεί η χρήση πιο προηγμένων μορφών διαμόρφωσης, όπως το PAM4. Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3.6(β), αυτή η μορφή πολλαπλών επιπέδων κάνει χρήση τεσσάρων συμβόλων επιπέδου έντασης, καθένα από τα οποία μεταδίδει δύο bit πληροφορίας, το οποίο επιτρέπει τον διπλασιασμό της χωρητικότητας με τη χρήση του ίδιου εύρους ζώνης, συνεπώς αυξάνοντας τη φασματική απόδοση. Το ιδανικό και το προσομοιωμένο διάγραμμα ματιού παρουσιάζονται επίσης στην Εικόνα 3.6(β), χρησιμοποιώντας την ίδια διαμόρφωση όπως για το PAM-2. Μπορεί εύκολα να απεικονιστεί ότι η απόσταση μεταξύ των συμβόλων μειώνεται κατά 3 φορές κατά τη σύγκριση δύο PAM-2. Η τάξη διαμόρφωσης μπορεί να αυξηθεί σε έναν αυθαίρετο αριθμό επιπέδων (π.χ. 8, 16, 32). Στην Εικόνα 3.6(γ) παρουσιάζεται ο αστερισμός και τα διαγράμματα ματιού μιας διαμόρφωσης πλάτους παλμού 8 επιπέδων (PAM-8), το

οποίο μπορεί τώρα να μεταδώσει έως και τρία bit/σύμβολο ενώ μειώνοντας την απόσταση συμβόλου κατά 7 φορές σε σχέση με το PAM-2.



Εικόνα 0.6 Διάγραμμα πομπού διαμόρφωσης της έντασης.

Είναι σαφές ότι η αύξηση της τάξης διαμόρφωσης επιτρέπει υψηλότερη φασματική απόδοση σε βάρος της περιορισμένης διασυμβολικής παρεμβολής (Intersymbol Interference ή ISI). Ως εκ τούτου, όσο υψηλότερη είναι η τάξη διαμόρφωσης, τόσο πιο ευαίσθητο είναι το σχήμα διαμόρφωσης στο θόρυβο ή στους περιορισμούς του εύρους ζώνης του πομποδέκτη. Για παράδειγμα, κάτω από τα διαγράμματα ματιού χωρίς θόρυβο μπορούμε να παρατηρήσουμε μια μικρή ποσότητα ISI, που προκύπτει από το περιορισμένο εύρος ζώνης του πομποδέκτη. Μπορούμε σαφώς να παρατηρήσουμε, ειδικά για το PAM-8 ότι η ISI κλείνει το μάτι (τα επίπεδα γίνονται πιο πυκνά μειώνοντας την απόσταση μεταξύ τους), γεγονός που περιορίζει την απόδοση. Σημειώστε ότι σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούμε πολύ μεγάλα εύρη ζώνης από άκρο σε άκρο. Για παράδειγμα, τα απεικονιζόμενα διαγράμματα ματιών θα μπορούσαν να απεικονίζουν σήματα 56-GBd με εύρος ζώνης από άκρο σε άκρο πάνω από 50-GHz. Ωστόσο, τα τρέχοντα εύρη ζώνης των εμπορικών οπτοηλεκτρονικών συσκευών παραμένουν μεταξύ 30 και 40 GHz (θα περιγραφούν στα επόμενα υποκεφάλαια). Συνεπώς, τα διαγράμματα ματιού που λαμβάνονται με την εμπορική

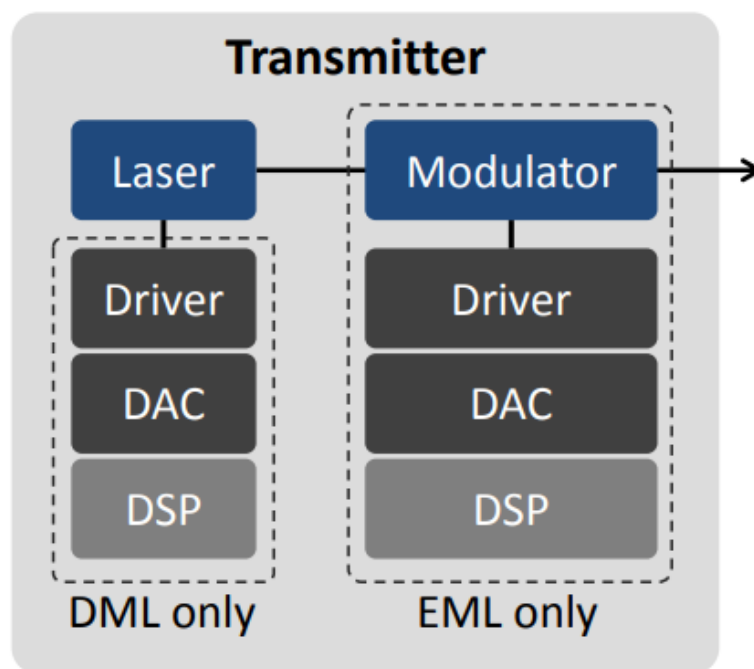
διαθέσιμη τεχνολογία κατά την υλοποίηση πομποδεκτών υψηλού ρυθμού μετάδοσης baud είναι ακόμη πιο κλειστά. Παρ' όλα αυτά, η απόδοση μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση εξισορρόπησης για την αντιστάθμιση των περιορισμών του εύρους ζώνης.

Άλλες προσεγγίσεις διαμόρφωσης μελετώνται επίσης για την εφαρμογή τους στο IM-DD. Για παράδειγμα, προσεγγίσεις πολλαπλών φορέων και πολλαπλών ζωνών όπως η διακριτή πολυτονική (Discrete MultiTone Modulation ή DMT) και η διαμόρφωση πλάτους/φάσης χωρίς φορέα (Carrierless Amplitude and Phase Modulation ή CAP) μπορούν επίσης να είναι επωφελείς σε περιβάλλοντα με περιορισμένο εύρος ζώνης. Ωστόσο, απαιτούν μια πιο πολύπλοκη ψηφιακή επεξεργασία σήματος (DSP) και ψηφιακό-αναλογικό (DAC) /αναλογικό-ψηφιακό μετατροπέα (ADC) υψηλότερης ανάλυσης, τα οποία τις καθιστά λιγότερο δημοφιλείς για τις επόμενης γενιάς χαμηλού κόστους προσαρτώμενες μονάδες.

### 3.2.2 IM-DD Πομπός

Το μπλοκ διάγραμμα ενός γενικού πομπού IM-DD παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.7. Όπως απεικονίζεται στο σχήμα, ένας πομπός IM-DD. Μπορεί να έχει δύο διαφορετικές υλοποιήσεις: άμεσα διαμορφωμένο λέιζερ (Direct Modulated Laser ή DML) και εξωτερικά διαμορφωμένο λέιζερ (External Modulated Laser ή EML). Οι πομποί DML εκτελούν διαμόρφωση της έντασης του φωτός οδηγώντας απευθείας το τμήμα κέρδους του ίδιου του λέιζερ. Η προσέγγιση αυτή απλοποιεί την μονάδα πομπού, η οποία δεν απαιτεί εξωτερικό διαμορφωτή. Ωστόσο, κατά τη διαμόρφωση του τμήματος κέρδους του λέιζερ, η πυκνότητα φέροντος στην περιοχή αυτή αλλάζει και συνεπώς ο δείκτης διάθλασης του υλικού, οπότε παράγονται μεταβολές της φάσης του φωτός. Η διαδικασία αυτή οδηγεί στο λεγόμενο φαινόμενο chirp, το οποίο προκαλεί φασματική διεύρυνση και, ως εκ τούτου, μειώνει την εμβέλεια λόγω της χρωματικής διασποράς. Από την άλλη πλευρά, οι πομποί EML, χρησιμοποιούν έναν εξωτερικό διαμορφωτή, ο οποίος μπορεί να παρέχει λειτουργία χωρίς chirp (ανάλογα με τον τύπο του διαμορφωτή). Επιπλέον, οι εξωτερικοί διαμορφωτές προσφέρουν συνήθως μεγαλύτερο εύρος ζώνης από ότι τα απευθείας διαμορφωμένα λέιζερ. Και στις δύο περιπτώσεις, το ηλεκτρικό σήμα παρέχεται από έναν DAC, κυρίως όταν χρησιμοποιούνται μορφές διαμόρφωσης πολλαπλών επιπέδων, και συνήθως ακολουθείται από έναν ενισχυτή οδήγησης, ώστε να παρέχεται αρκετή διαμορφωτική διακύμανση. Ο DSP στην πλευρά του πομπού είναι σχεδόν αμελητέος. Στην μη

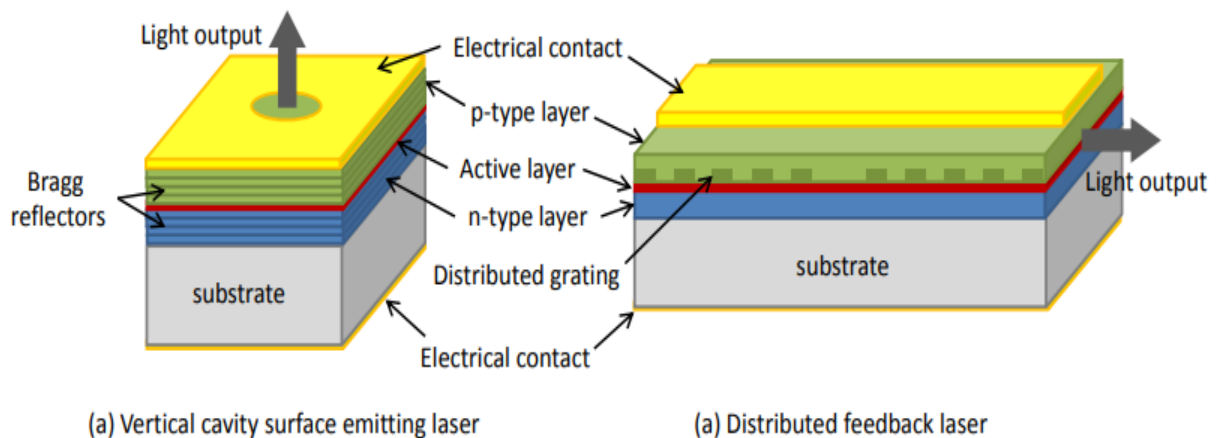
παλμική διαμόρφωση πλάτους, χρησιμοποιούν μόνο DSP για την κωδικοποίηση των δεδομένων για τους κώδικες forward-error correction (FEC) και για την αντιστοίχιση των bits στον αστερισμό των συμβόλων. Ωστόσο, άλλες προσεγγίσεις διαμόρφωσης, όπως οι DMT, CAP ή η παλμοειδής διαμόρφωση πλάτους παλμού Nyquist, απαιτούν περαιτέρω μπλοκ DSP πομπού. Κατά μήκος των επόμενων παραγράφων περιγράφουμε εν συντομία τα διάφορα στοιχεία που μπορούν να χρησιμοποιούνται σε έναν οπτικό πομπό.



Εικόνα 0.7: Διάγραμμα ενός πομπού IM-DD.

**Λείζερ:** Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο συναντάμε κυρίως δύο είδη λείζερ ημιαγωγών στις προσαρτώμενες μονάδες του κέντρου δεδομένων: VCSEL και DFB λείζερ. Το VCSEL, είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο στις μέρες μας λόγω του χαμηλού κόστους και την κατανάλωσή του. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.8(α), η κοιλότητα αυτού του λείζερ κατασκευάζεται κάθετα, τοποθετώντας το ενεργό στρώμα μεταξύ δύο ανακλαστήρων Bragg (πάνω και κάτω). Έτσι, το φως εξέρχεται από το λείζερ από την επάνω επιφάνεια του τσιπ, γεγονός που καθιστά δυνατή τη δοκιμή με λείζερ εντός του πλακιδίου (wafer), μειώνοντας έτσι κόστος παραγωγής, και την εύκολη σύζευξη με MMF λόγω της καλής προσαρμογής του τρόπου λειτουργίας και του μικρού μεγέθους σχεδόν κυκλικών σημείων, που μειώνει επίσης το κόστος

συσκευασίας. Αυτά τα λέιζερ χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των προσαρτώμενων μονάδων μικρής εμβέλειας (SR), οι οποίες συνδέονται μέσω MMF που επιτρέπουν τη μετάδοση μερικών εκατοντάδων μέτρων. Από την άλλη πλευρά, τα DFB είναι λέιζερ που εκπέμπουν από τις άκρες, τα οποία κατασκευάζονται κατά μήκος του πλακιδίου. Η κοιλότητα αποτελείται από ένα καταναμημένο περιοδικό πλέγμα, το οποίο λειτουργεί ως ανακλαστήρας τοποθετημένος κατά μήκος του ενεργού στρώματος, παράγοντας με αυτόν τον τρόπο λειτουργία μονής διαμήκους λειτουργίας, βλέπε στην Εικόνα 3.8(β). Αν και τα λέιζερ DFB παρουσιάζουν διπλάσιο κόστος από τα VCSEL, πολλαπλά DFB μπορούν να ενσωματωθούν πυκνά μαζί με διαμορφωτές και πολυπλέκτες μήκους κύματος. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να δημιουργηθούν πολλά κανάλια μήκους κύματος από ένα μόνο φωτονικό τσιπ, το οποίο μπορεί τώρα να συνδεθεί με SMF, επεκτείνοντας έτσι την εμβέλεια στα 10 km. Τα άμεσα διαμορφωμένα DFB χρησιμοποιούνται σε προσαρτώμενες μονάδες μεγάλης εμβέλειας (LR). Τελευταίες ερευνητικές εργασίες έχουν αναφέρει εύρος ζώνης διαμόρφωσης περίπου 30 GHz, τόσο για τα VCSEL όσο και για τα DFBs, γεγονός που επιτρέπει διαμόρφωση 56-64 Gb/s.



Εικόνα 0.8: Ενδεικτική αναπαράσταση λέιζερ (α) VSCEL και (β) DFB.

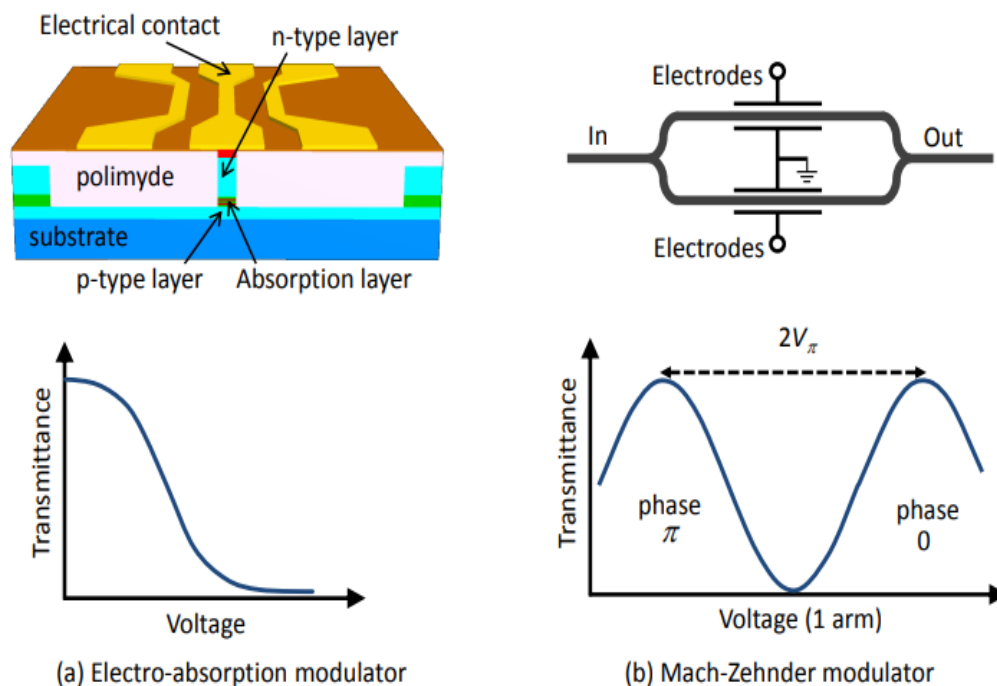
**Διαμορφωτής:** Μεγαλύτερα εύρη ζώνης και λόγοι εξαφάνισης (extinction ratios) μπορούν τυπικά να επιτευχθούν όταν χρησιμοποιούνται εξωτερικοί διαμορφωτές. Βρίσκουμε δύο κύρια είδη διαμορφωτών στους σημερινούς οπτικούς εμπορικούς πομπούς: EAM και ηλεκτρο-οπτικούς διαμορφωτές Mach-Zehnder (MZM). Στον EAM η ένταση του φωτός εισόδου διαμορφώνεται μεταβάλλοντας τον συντελεστή απορρόφησης ενός ημιαγωγικού υλικού III-V (π.χ. δομή InPGaAsP για 1550 nm) με

την εφαρμογή εξωτερικής τάσης/ρεύματος, βλέπε καμπύλη διαπερατότητας-τάσης στην Εικόνα 3.9(α, κάτω). Με αυτόν τον τρόπο, η δομή είναι παρόμοια με εκείνη ενός λέιζερ ημιαγωγών, ωστόσο, το ενεργό στρώμα χρησιμοποιείται για την απορρόφηση αντί για την παροχή κέρδους, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.9(α, πάνω). Τέτοιες διατάξεις είναι πολύ ελκυστικές για εφαρμογές χαμηλού κόστους επειδή παρουσιάζουν μικρό αποτύπωμα, χαμηλές τάσεις οδήγησης ( $<2$  V), και μπορούν να ενσωματωθούν μονολιθικά με λέιζερ DFB, παρέχοντας μικροσκοπικούς πομπούς EML. Επιπλέον, το EAM μπορεί να επιτύχει εύρος ζώνης διαμόρφωσης πέραν των 50GHz. Ωστόσο, συνήθως παρουσιάζουν υψηλές τιμές εισαγωγής με απώλειες της τάξης των 10-15 dB, γεγονός που περιορίζει την ισχύ εξόδου του πομπού σε μερικά dBm, και προκαλούν chirp (όπως περιγράφηκε παραπάνω για τα λέιζερ). Και τα δύο φαινόμενα περιορίζουν την εμβέλεια μετάδοσης.

Από την άλλη πλευρά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.9(β), στο MZM το φως διαμορφώνεται μέσω της παρεμβολής που δημιουργείται σε ένα συμβολόμετρο Mach-Zehnder δύο βραχιόνων. Σε μια τέτοια δομή, η σχετική φάση μεταξύ των δύο βραχιόνων διαμορφώνεται με την αλλαγή του δείκτη διάθλασης των κυματοδηγών μέσω ενός ηλεκτρο οπτικού φαινομένου. Αυτό επιτρέπει την πρόκληση οποιασδήποτε αυθαίρετης συμβολής η οποία επιτρέπει τόσο τη διαμόρφωση πλάτους (ή έντασης) όσο και τη διαμόρφωση φάσης χωρίς chirp, βλ. καμπύλη διαπερατότητας-τάσης στην Εικόνα 3.9(β). Κατά συνέπεια, οι δομές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο σε πομπούς IM-DD όσο και σε συνεκτικούς πομπούς (που θα περιγραφούν στην επόμενη ενότητα). Παραδοσιακά, οι εμπορικές MZM κατασκευάζονται κυρίως σε νιοβικό λίθιο ( $\text{LiNbO}_3$ ), προσφέροντας πάνω από 30 GHz 3-dB εύρος ζώνης με τάσεις λειτουργίας ( $V_{\pi}$ ) μεταξύ 3 και 4 V. Έχουν εμφανιστεί, επίσης, νέες πλατφόρμες φωτονικής ολοκλήρωσης, οι οποίες επιτρέπουν την κατασκευή μικρότερων και οικονομικότερων διατάξεων. Η δεύτερη ενσωματωμένη πλατφόρμα ήταν το φωσφίδιο του ινδίου ( $\text{InP}$ ), στο οποίο δημιουργούνται MZM με το μισό μέγεθος από ότι στο  $\text{LiNbO}_3$  και έχουν μειωμένο  $V_{\pi}$  (1,5-2,5 V), ενώ επιτρέπουν εύρος ζώνης διαμόρφωσης της τάξης των 40 GHz. Πιο πρόσφατα εμφανίστηκε η πλατφόρμα πυριτίου, η οποία είναι πολλά υποσχόμενη για τις δυνατότητές της για παραγωγή μαζικής κλίμακας και ολοκλήρωσης φωτονικής και ηλεκτρονικής στο ίδιο υπόστρωμα. Σήμερα έχουν αναφερθεί διαμορφωτές MZM με βάση το πυρίτιο που παρουσιάζουν εύρος ζώνης μεταξύ 30 και 40 GHz. Τέλος, η πιο πρόσφατη ολοκληρωμένη



πλατφόρμα που εμφανίστηκε, βασίζεται σε πολυμερή υλικά, τα οποία έχουν τη δυνατότητα για εξαιρετικά μεγάλα εύρη ζώνης διαμόρφωσης (έως και 100 GHz).



Εικόνα 0.9: Αναπαράσταση (α) ενός EAM και (β) ενός MZM.

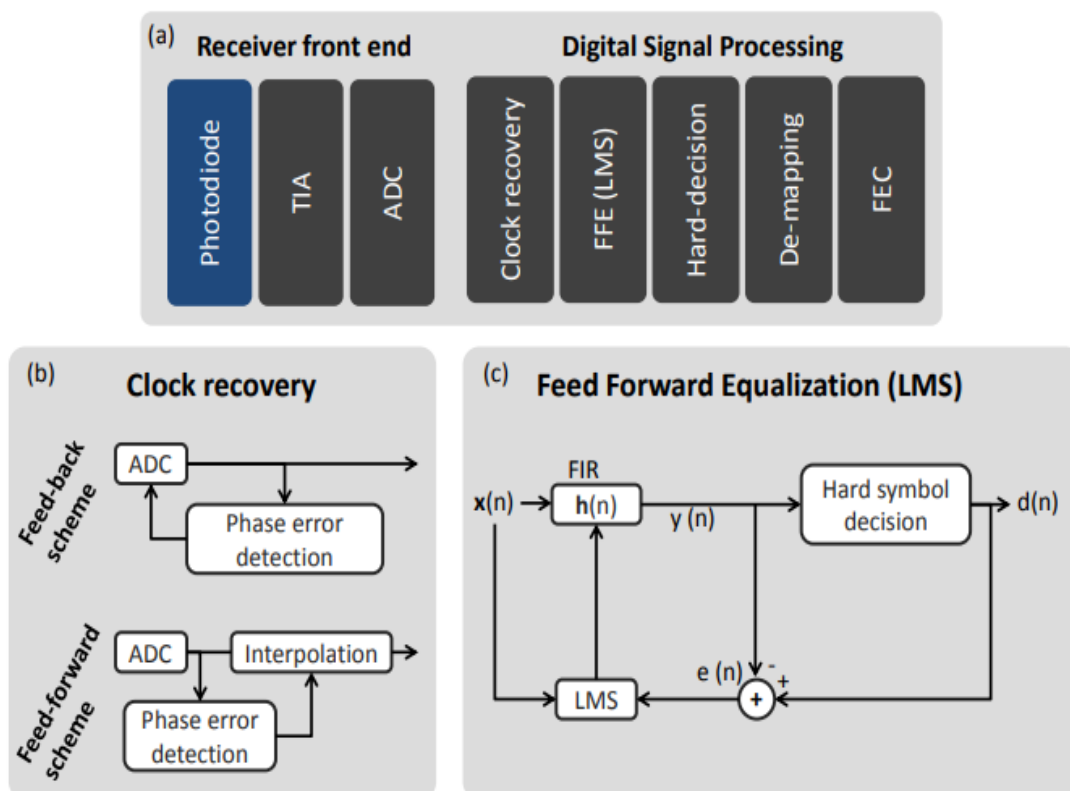
**Ηλεκτρική γεννήτρια:** Εδώ και μερικά χρόνια χρησιμοποιούνται υψηλής ανάλυσης ψηφιακοί μετατροπείς αναλογικού-ψηφιακού σήματος (DAC) σε συνεκτικές τεχνολογίες για την παραγωγή όλων των ειδών των προηγμένων μορφών διαμόρφωσης και παλμών. Ωστόσο, οι DAC θα απαιτηθούν επίσης τώρα στους πομπούς IM-DD για να μπορούν να παράγουν παλμούς πολλαπλών επιπέδων (PAM) και ίσως στο μέλλον ακόμη πιο πολύπλοκα σχήματα διαμόρφωσης όπως το DMT. Ωστόσο, οι εμπορικοί DAC που διατίθενται στην αγορά είναι ένας από τους πιο περιοριστικούς παράγοντες κατά τη στόχευση υψηλών ταχυτήτων συμβόλων. Οι τελευταίες γενιές DAC μπορούν να επιτύχουν αρκετά υψηλές ταχύτητες δειγματοληψίας, για παράδειγμα η Socionext/Fujitsu ανέπτυξε έναν DAC 8-bit ικανό να δειγματοληπτεί σε 92 GS/s (σε Complementary Metal Oxide Semiconductor ή CMOS), ενώ η Micram προσφέρει έναν DAC 72 GS/s, ανάλυσης 6-bit, κατασκευασμένο σε SiGe. Ωστόσο, το εύρος ζώνης τους είναι περιορισμένο στα 20-25 GHz. Επιπλέον, η εναλλαγή εξόδου τους είναι μικρότερη από 1 Vpp (τάση από κορυφή σε κορυφή). Συνεπώς, οι συνήθεις οδηγοί ενισχυτών πρέπει να

χρησιμοποιηθούν για να επιτευχθεί αρκετή ταλάντωση για την οδήγηση των διαμορφωτών. Από την άλλη πλευρά, η τεχνολογία InP DHBT μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίτευξη εύρους ζώνης άνω των 50 GHz ενώ παράλληλα να εξάγονται ηλεκτρικά σήματα άνω των 4,5 Vpp, συνεπώς αποφεύγεται η χρήση εξωτερικών ενισχυτών οδήγησης.

### 3.2.3 IM-DD Δέκτης

Το μπλοκ διάγραμμα του δέκτη παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.10(α). Όπως απεικονίζεται, στα συστήματα άμεσης ανίχνευσης οι δέκτες υλοποιούνται με τη χρήση μιας φωτοδιόδου, η οποία μετατρέπει την οπτική ένταση σε ηλεκτρικά σήματα, ένα TIA για την ηλεκτρική ενίσχυση τους και έναν ADC για τη μετατροπή των σημάτων από το αναλογικό στο ψηφιακό πεδίο. Στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί DSP για την ανάκτηση του σήματος.

**Μπροστινό άκρο δέκτη:** Οι πιο κοινές φωτοδιόδοι είναι οι PIN και η φωτοδιόδος χιονοστιβάδας (Avalanche Photodiode ή APD), όπου η APD περιλαμβάνει μια πρόσθετη περιοχή στη συμβατική δομή ημιαγωγού PIN στην οποία ο αριθμός των αγώγιμων ηλεκτρονίων αυξάνεται εκθετικά (περιοχή χιονοστιβάδας), συνεπώς παρέχοντας κέρδη μιας τάξης μεγέθους υψηλότερα από τις συμβατικές φωτοδιόδους PIN. Από την άλλη πλευρά, οι APD παρουσιάζουν μεγαλύτερο κόστος και κατανάλωση, τα οποία σε συνδυασμό με την υψηλότερη αξιοπιστία των φωτοδίοδων PIN και το μικρότερο αποτύπωμα, καθιστά τις τελευταίες τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες σε προσαρτώμενες μονάδες στα κέντρων δεδομένων. Στη συνέχεια, απαιτείται ένα TIA για την ενίσχυση των ανιχνευόμενων σήματος. Σήμερα, στην αγορά υπάρχουν πολύ γρήγορες φωτοδιόδοι. Για παράδειγμα, η Finisar διαθέτει για εμπορική χρήση έναν φωτοανιχνευτή 100 GHz. Ωστόσο, το εύρος ζώνης των εμπορικά διαθέσιμων μονάδων PIN-TIA περιορίζεται στα 40-50 GHz. Παρ' όλα αυτά, TIA που παρέχουν εύρος ζώνης άνω των 90 και 100 GHz έχουν αναφερθεί πρόσφατα σε διάφορες ερευνητικές εργασίες.



Εικόνα 0.10: (α) Διάγραμμα τυπικού δέκτη IM-DD, συνοδευόμενο από μια γενική περιγραφή της αλυσίδας DSP. (β) Ανάκτηση ρολογιού. (γ) Απεικόνιση της διαδικασίας εξισορρόπησης και προσαρμογής με εμπρόσθια τροφοδότηση.

Όσον αφορά τους ADC, εξελίσσονται σε εμπορικά προϊόντα παρόμοια με τους DACs. Έχουν αναφερθεί ADCs 56, 92 και 100 GS/s, ωστόσο προσφέρουν περιορισμένα εύρη ζώνης που ξεπερνούν κατά πολύ λίγο τα 20 GHz. Συνήθως, οι υψηλής ταχύτητας ερευνητικές επιδείξεις κάνουν χρήση παλμογράφων μεγάλου εύρους ζώνης, ικανών για δειγματοληψία σε 80 GS/s, 160 GS/s ή ακόμη και 200 GS/s, ενώ παρουσιάζουν εύρος ζώνης 3-dB που κυμαίνεται μεταξύ 30 και 100 GHz, που επιτυγχάνεται συνήθως με τη χρήση ψηφιακής παρεμβολή εύρους ζώνης.

**Ψηφιακή επεξεργασία σήματος (DSP):** Αν και οι δέκτες IM-DD περιλαμβάνουν κάποιες βασικές λειτουργίες DSP, οι επερχόμενες διεπαφές υψηλής ταχύτητας που υποστηρίζουν μορφές διαμόρφωσης πολλαπλών επιπέδων μπορεί να χρειάζονται πιο απαιτητική ψηφιακή επεξεργασία σήματος για την επιτυχή ανάκτηση του σήματος, λόγω της μικρότερης ανθεκτικότητάς τους σε θόρυβο και παραμορφώσεις. Τα βασικά μπλοκ DSP ενός προηγμένου δέκτη IM-DD παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.10(α). Το

πρώτο μπλοκ της αλυσίδας του DSP είναι η ανάκτηση ρολογιού, η οποία ανακτά τη διαφορά στο ρολόι δειγματοληψίας (συχνότητα) μεταξύ πομπού και δέκτη, καθώς και το σωστό συγχρονισμό συμβόλου (φάση). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.10(β), μπορούμε να βρούμε δύο γενικές διαμορφώσεις για την ανάκτηση ρολογιού: ένα σχήμα ανατροφοδότησης, στο οποίο το ρολόι του ADC επαναπροσδιορίζεται μέσω ενός βρόχου κλειδώματος φάσης (Phase Lock Loop ή PLL), με τη βοήθεια της εξόδου ενός αλγορίθμου ανίχνευσης συχνότητας/φάσης και το σχήμα τροφοδότησης προς τα εμπρός (feed forward), στο οποίο η έξοδος του αλγορίθμου ανίχνευσης φάσης οδηγεί έναν επόμενο παρεμβολέα (interpolator). Διάφορες τεχνικές ανίχνευσης φάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τις απαιτήσεις του πομποδέκτη. Τα συστήματα IM-DD χρησιμοποιούν συνήθως σχήματα χαμηλής πολυπλοκότητας και ταχύτητας, όπως τα Alexander, Mueller & Mueller ή Hogge.

Μετά την ανάκτηση ρολογιού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος feed forward equalization (FFE) για την αντιστάθμιση γραμμικών δυσλειτουργιών (π.χ. περιορισμοί εύρους ζώνης πομποδέκτη. Στην Εικόνα 3.10(γ) παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα μπλοκ FFE με χρήση του αλγορίθμου ελαχίστου μέσου τετραγώνου (Least Mean Squares ή LMS). Στο LMS, το σήμα διέρχεται από ένα φίλτρο πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης (Finite Impulse Response ή FIR), το οποίο ενημερώνεται προσαρμοστικά. Στο πλαίσιο της προσαρμοστικής διαδικασίας, λαμβάνει χώρα η απόφαση συμβόλων που λαμβάνει το  $d(n)$ , το οποίο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του σφάλματος  $e(n)$  που λαμβάνεται από τη διαδικασία εξισορρόπησης:  $e(n) = d(n) - y(n) = d(n) - h(n)^T x(n)$ . Η προσαρμογή του φίλτρου  $h(n)$  χρησιμοποιεί συνήθως την τεχνική της πιο απότομης καθόδου, η οποία ελαχιστοποιεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα  $E\{|e(n)|^2\}$ . Η ενημέρωση της βαθμίδας του φίλτρου γίνεται ως εξής:

$$h(n + 1) = h(n) + \mu x(n)e(n) \quad (3.1)$$

όπου  $x(n)e(n) = \nabla_n^T E\{|e(n)|^2\}$ , είναι η ελαχιστοποιημένη συνάρτηση κόστους όταν δεν χρησιμοποιείται μέσος όρος σφάλματος, δηλαδή κάθε  $e(n)$  χρησιμοποιείται σε κάθε επανάληψη για να συγκλίνει στο βέλτιστο φίλτρο. Η συνάρτηση κόστους κλιμακώνεται μέσω του  $\mu$ , το οποίο ορίζει το βήμα σύγκλισης ανάλογα με τη διακύμανση του σφάλματος, αποφεύγοντας με αυτόν τον τρόπο πιθανή συμπεριφορά απόκλισης.

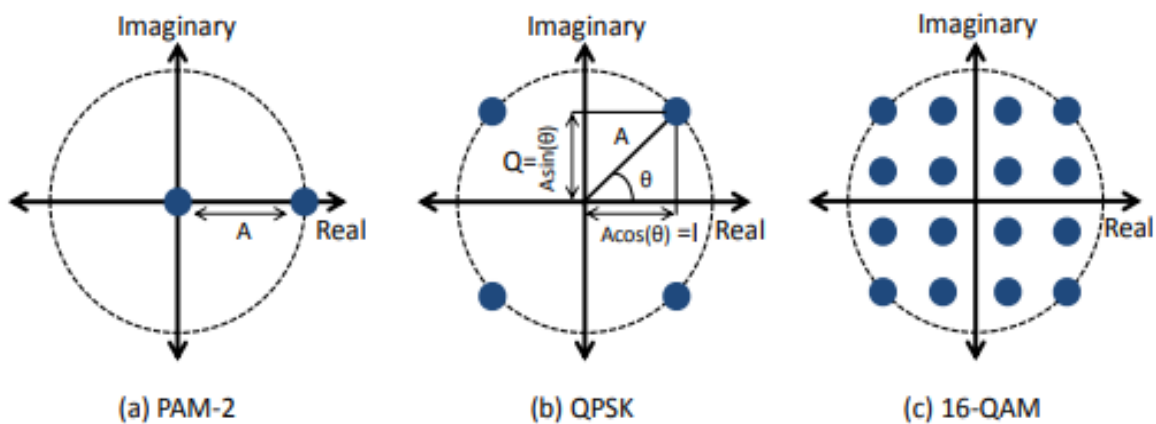
Αφού το σήμα εξισωθεί σωστά, ακολουθείται η σκληρή απόφαση συμβόλων και η απεικόνιση, η οποία μεταφράζει τα σύμβολα σε bits με τους ισοδύναμους πίνακες απεικόνισης που χρησιμοποιούνται στον πομπό, όπου συνήθως εφαρμόζεται η απεικόνιση Gray. Τέλος, το FEC εξασφαλίζει μετάδοση χωρίς σφάλματα (συνήθως αυτή θεωρείται ως τιμές ρυθμού σφάλματος bit μετά το FEC κάτω από  $10^{-15}$ ). Περιορισμένο από τις απαιτήσεις χαμηλής καθυστέρησης και κατανάλωσης ισχύος, το σχήμα FEC που θα χρησιμοποιηθεί σε μελλοντικές μονάδες Ethernet 800 Gb/s είναι ακόμη υπό συζήτηση. Προτείνονται διάφοροι κώδικες για τα διάφορα σχήματα διαμόρφωσης. Για παράδειγμα, για τη διαμόρφωση PAM-2 ένας κώδικας χαμηλής πολυπλοκότητας χαμηλού κέρδους, όπως ο KP4, με οριακό ρυθμό σφάλματος bit (BER) προ-FEC  $3 \cdot 10^{-4}$  μπορεί να είναι επαρκής για την επίτευξη λειτουργίας χωρίς σφάλματα. Ωστόσο, η διαμόρφωση PAM-4 μπορεί να απαιτεί σχήματα που παρουσιάζουν μεγαλύτερο κέρδος κωδικοποίησης. Τα σχήματα κωδικοποίησης BCH και κωδικοποίησης πολλαπλών επιπέδων (Multi Level Coding ή MLC) με κέρδη κωδικοποίησης άνω των 8 dB φαίνεται να είναι κατάλληλοι υποψήφιοι, παρουσιάζοντας απαιτήσεις BER προ-FEC κάτω από  $10^{-3}$ .

### 3.3 ΣΥΜΦΩΝΟΙ ΠΟΜΠΟΔΕΚΤΕΣ

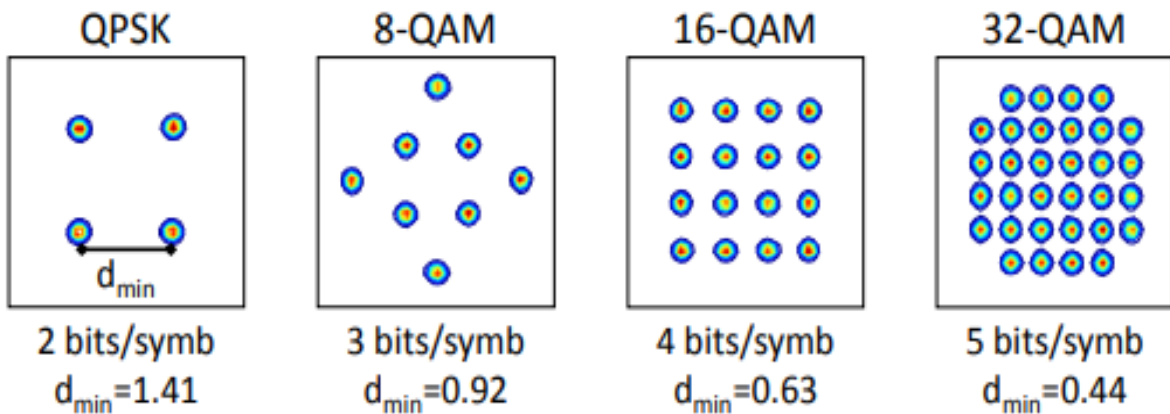
Όπως αναφέρθηκε στην πρώτη ενότητα, η σύμφωνη τεχνολογία χρησιμοποιείται συνήθως σε συστήματα μεγάλων αποστάσεων. Ωστόσο, η μείωση του κόστους των εν λόγω συσκευών θα τις καθιστούσε πολύ ενδιαφέρουσες σε περιβάλλοντα πιο ευαίσθητα στο κόστος αλλά ταυτόχρονα με μεγάλη ζήτηση εύρους ζώνης, όπως τα κέντρα δεδομένων και τα μητροπολιτικά δίκτυα. Στα σύμφωνα συστήματα τα δεδομένα μπορούν να μεταφέρονται τόσο στο πλάτος όσο και στη φάση του οπτικού σήματος. Στην Εικόνα 3.11 απεικονίζονται ορισμένοι υποδειγματικοί αστερισμοί σε ένα μιγαδικό επίπεδο. Η Εικόνα 3.11(α) δείχνει έναν αστερισμό PAM-2, αποδεικνύοντας το γεγονός ότι τα συστήματα διαμόρφωσης έντασης απαιτούν μόνο έναν άξονα (π.χ. τον πραγματικό άξονα) του μιγαδικού επιπέδου. Από την άλλη πλευρά, στα συνεκτικά συστήματα χρησιμοποιούνται δύο διαστάσεις: πλάτος και φάση. Για να σχεδιάσουμε τέτοιου είδους δισδιάστατους αστερισμούς χρειαζόμαστε το πλήρες μιγαδικό επίπεδο. Η Εικόνα 3.11(β) δείχνει έναν αστερισμό τετραγωνικής μετατόπισης φάσης (QPSK), στον οποίο η πληροφορία κωδικοποιείται κατά μήκος τεσσάρων ισαπέχουσων

φάσεων ( $\theta$ ) που τοποθετούνται στο ίδιο επίπεδο πλάτους ( $A$ ). Ένα σύμβολο  $S_n$  σε έναν τέτοιο αστερισμό μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά ως  $S_n = A_n \cdot e^{j\theta_n}$ , όπου  $\theta_n = \pi/4 \cdot n$ ,  $A_n = A$  και  $n \in \{0, 1, 2, 3\}$  για διαμόρφωση QPSK. Παρόλα αυτά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.11(β), συνήθως αναλύουμε το μιγαδικό σήμα στις δύο ορθογώνιες διαστάσεις, δηλ. στις εντός φάσης ( $I$ ) και τετραγωνικές ( $Q$ ) συνιστώσες ως εξής:

$$S = A \cdot e^{j\theta} = A \cos(\theta) + j \cdot A \sin(\theta) = I + j \cdot Q \quad (3.2)$$



Εικόνα 0.11: Διαγράμματα αστερισμών (α) PAM-2, (β) QPSK, (γ) 16-QAM



Εικόνα 0.12: Αστερισμοί (α) QPSK, (β) 8-QAM, (γ) 16-QAM και (δ) 32-QAM.

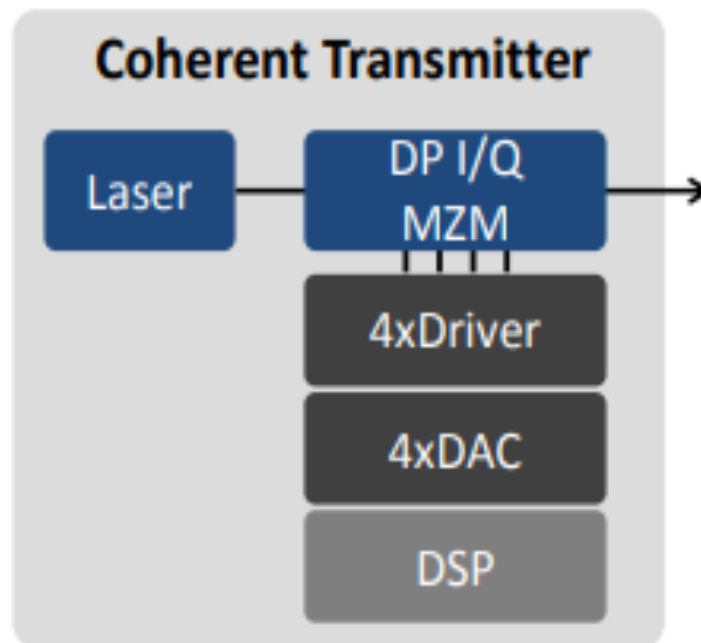
Στο προηγούμενο σχήμα διαμόρφωσης (QPSK), τα δεδομένα κωδικοποιούνται μόνο στη φάση του οπτικού σήματος. Ωστόσο, το πλάτος μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί

ταυτόχρονα για τη μεταφορά δεδομένων, γεγονός που οδηγεί στην οικογένεια των αστερισμών QAM. Στην Εικόνα 3.11(γ) αναπαριστά έναν αστερισμό 16-QAM, ο οποίος κάνει χρήση 16 συμβόλων με ίσες αποστάσεις που τοποθετούνται σε διαφορετικούς συνδυασμούς φάσης-πλάτους στο μιγαδικό επίπεδο. Η αύξηση της τάξης των αστερισμών (αριθμός συμβόλων) επιτρέπει υψηλή φασματική απόδοση, δηλαδή, περισσότερα bits μπορούν να μεταδοθούν σε ένα μόνο χρονικό σύμβολο. Για παράδειγμα, οι αστερισμοί 16-QAM επιτρέπουν τη μετάδοση διπλάσιου αριθμού bits ανά σύμβολο (4) σε σχέση με το QPSK (2 bits/σύμβολο). Στην Εικόνα 3.12 παρουσιάζουμε τους αστερισμούς για μορφές διαμόρφωσης, δηλαδή QPSK, 8-QAM, 16-QAM και 32-QAM, αναφέροντας παρακάτω τον αριθμό των bits ανά σύμβολο που μπορεί να μεταφέρει κάθε μορφή και την ελάχιστη ευκλείδεια απόσταση συμβόλου ( $d_{min}$ ). Μπορούμε σαφώς να παρατηρήσουμε στην Εικόνα 3.12 ότι η  $d_{min}$  μειώνεται γρήγορα όταν αυξάνεται η πυκνότητα συμβόλου (τάξη αστερισμού). Είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε ότι όσο πιο κοντά είναι τα σύμβολα, τόσο μικρότερη είναι η ανθεκτικότητα σε θόρυβο και παραμορφώσεις. Επομένως, οι διαταραχές του καναλιού παίζουν μεγάλο ρόλο κατά την επιλογή της μορφής διαμόρφωσης που θα χρησιμοποιηθεί. Στα επόμενα υποκεφάλαια περιγράφουμε την υλοποίηση των συνεκτικών πομπών και δεκτών. Αναφέρουμε επίσης λεπτομερώς το DSP που απαιτείται στους συνεκτικούς δέκτες για την αποδιαμόρφωση του σήματος.

### 3.3.1 Σύμφωνος Πομπός

Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3.13, η διάταξη ενός σύμφωνου πομπού είναι αρκετά παρόμοια με εκείνη που χρησιμοποιείται στις μονάδες EML που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Παρ' όλα αυτά, στα σύμφωνα συστήματα μπορεί κανείς να μεταδώσει ανεξάρτητα σήματα μέσω των δύο ορθογώνιων καταστάσεων πόλωσης: των εγκάρσιων ηλεκτρικών (Transverse Electric ή TE) και εγκάρσιων μαγνητικών (Transverse Magnetic ή TM) τρόπων, για τους οποίους θα αναφερόμαστε ως Χ- και Υ-πόλωση, αντίστοιχα, κατά μήκος αυτής της ενότητας. Αυτή η τεχνική είναι γνωστή ως πολυπλεξία διαίρεσης πόλωσης (PDM), η οποία επιτρέπει τον διπλασιασμό της χωρητικότητας σε σχέση με τα συστήματα μονής πόλωσης. Επιπλέον, όπως περιγράφηκε παραπάνω, σε κάθε πόλωση μπορούμε πλέον να στέλνουμε δεδομένα πάνω από τις δύο διαστάσεις του μιγαδικού πεδίου (I και Q),

γεγονός που καθιστά συνολικά τέσσερις διαθέσιμες διαστάσεις ( $I_x$ ,  $Q_x$ ,  $I_y$ ,  $Q_y$ ). Έτσι, χρειαζόμαστε τώρα τέσσερις DAC και ενισχυτές οδήγησης για να οδηγήσουμε τις τέσσερις εισόδους ενός I/Q-MZM διπλής πόλωσης (Dual Polarity ή DP), το οποίο είναι σε θέση να διαμορφώνει και τις τέσσερις συνιστώσες του φωτός ανεξάρτητα.



Εικόνα 0.13: Διάγραμμα ενός σύμφωνου πομπού.

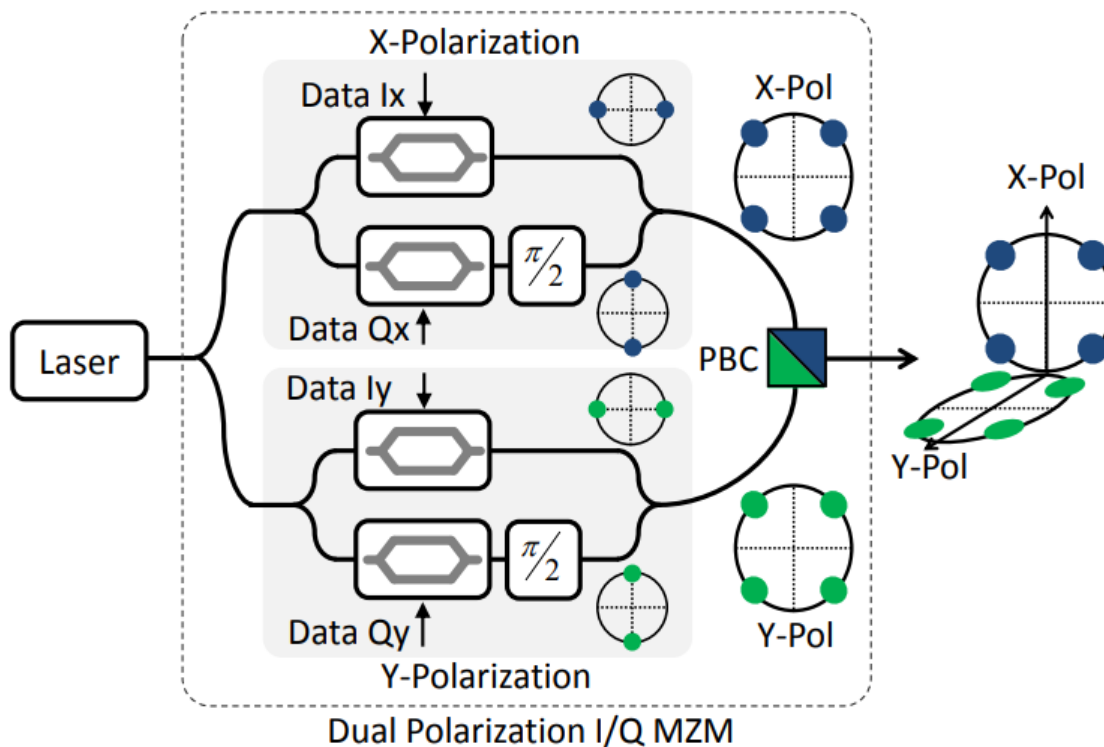
**Λείζερ:** Οι πομποδέκτες απαιτούν λέιζερ με υψηλή σταθερότητα συχνότητας και φάσης, δηλαδή, με χαμηλό εύρος γραμμής (linewidth). Τα λέιζερ DFB που περιγράφηκαν προηγουμένως, παρουσιάζουν linewidth της τάξης των μερικών MHz, τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για αστερισμούς χαμηλής τάξης, όπως το QPSK, αλλά θα απαιτούσαν επιπλέον προσπάθεια στο DSP για την παρακολούθηση της φάσης και την αποφυγή ολισθήσεων κύκλου. Επιπλέον, στα σύμφωνα δίκτυα χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό το WDM. Συνεπώς, απαιτούνται λέιζερ με μεγάλη δυνατότητα συντονισμού, την οποία δεν διαθέτει το DFB. Οι συνεκτικοί πομποδέκτες υψηλών προδιαγραφών χρησιμοποιούν συνήθως λέιζερ εξωτερικής κοιλότητας (ECL), στα οποία το μέσο ενίσχυσης τοποθετείται μεταξύ μιας εξωτερικής κοιλότητας ενσωματωμένης σε ένα συγκρότημα μικροοπτικών. Τα ECL



παρέχουν χαμηλό εύρος γραμμής της τάξης των 100 kHz και πλήρη δυνατότητα συντονισμού στη ζώνη C (C-band). Παρόλα αυτά, ευρέως συντονιζόμενα λέιζερ με σχετικά χαμηλό linewidth (κάτω του MHz) μπορούν επίσης να κατασκευαστούν σε μονολιθικές ολοκληρωμένες δομές, όπως ο ψηφιακός υπερρόφος κατανεμημένος ανακλαστήρας Bragg (DS-DBR). Διαφορετικά από τα λέιζερ DFB, σε τέτοιες δομές το μέσο ενίσχυσης τοποθετείται μεταξύ δύο ανακλαστήρων Bragg, οι οποίοι συνήθως περιέχουν πολλαπλά τμήματα. Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζουν μεγαλύτερο εύρος γραμμής από τα λέιζερ ECL, έχουν μειωμένο μέγεθος και χαμηλότερο κόστος, γεγονός που τα καθιστά ενδιαφέροντα για χαμηλότερου κόστους συνεκτικούς πομποδέκτες. Επιπλέον, έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν γρήγορη δυνατότητα συντονισμού (100 ns), η οποία αποκτά ενδιαφέρον κατά την εκτέλεση οπτικής μεταγωγής πακέτων σε δίκτυα WDM.

**Διαμορφωτής:** Η διάταξη του DP-I/Q-MZM φαίνεται στην Εικόνα 3.14. Το φως μιας πηγής λέιζερ χωρίζεται σε δύο I/Q-MZM, καθένας από τους οποίους παράγει ένα ανεξάρτητο σήμα για κάθε πόλωση (βλέπε ανοιχτές γκρι περιοχές). Κάθε διαμορφωτής I/Q περιέχει δύο κλάδους (I, Q), καθένας από τους οποίους εκτελεί διαμόρφωση πλάτους σε έναν άξονα (μία διάσταση). Στη συνέχεια, ένας από τους κλάδους υφίσταται μετατόπιση φάσης κατά  $90^\circ$  ( $\pi/2$  rad) σε σχέση με τον άλλο κλάδο, παρέχοντας έτσι τους ορθογώνιους άξονες I και Q μετά τον συνδυασμό τους. Τέλος, και τα δύο σήματα (πολώσεις) συνδυάζονται με τη χρήση ενός συνδυαστή δέσμης πόλωσης (Polarization Beam Combiner ή PBC).

Ένα MZM συνήθως υποστηρίζει έναν μοναδικό τρόπο πόλωσης (π.χ. TE). Ως εκ τούτου, το φως του λέιζερ είναι μονόπλευρα πολωμένο (τρόπος TE), η οποία κατάσταση πόλωσης διατηρείται μέχρι τον διαμορφωτή χρησιμοποιώντας ένα που διατηρεί την πόλωση. Ως εκ τούτου, και οι δύο I/Q-MZM λειτουργούν με σήματα TE έως ότου ένα από αυτά περιστραφεί σε TM πριν εισέλθει στο PBC. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ο PBC υλοποιείται έτσι ώστε μία από τις εισόδους να περιστρέφεται αυτόματα, χωρίς να απαιτείται προηγούμενος περιστροφικός μηχανισμός.



Εικόνα 0.14: Διάταξη διαμορφωτή DP-I/Q-MZM

**Ηλεκτρική γεννήτρια:** Οι σημερινοί σύμφωνοι πομποί χρησιμοποιούν DACs υψηλής ανάλυσης (π.χ. 8 bit) που συνήθως ενσωματώνονται μαζί με τον DSP στο ίδιο ASIC σε τεχνολογία CMOS. Οι πιο πρόσφατοι συνεκτικοί πομποδέκτες υψηλής τεχνολογίας εφαρμόζουν τους τελευταίους τεχνολογίας DAC που περιγράφονται στο τελευταίο τμήμα (π.χ. 92 GS/s DAC). Ωστόσο, στην περίπτωση αυτή απαιτούνται τέσσερις DAC. Η έξοδος κάθε DAC ενισχύεται στη συνέχεια από ένα κύκλωμα τετραπλού οδηγού, που περιλαμβάνει τέσσερις ενισχυτές τοποθετημένους στο ίδιο τσιπ.

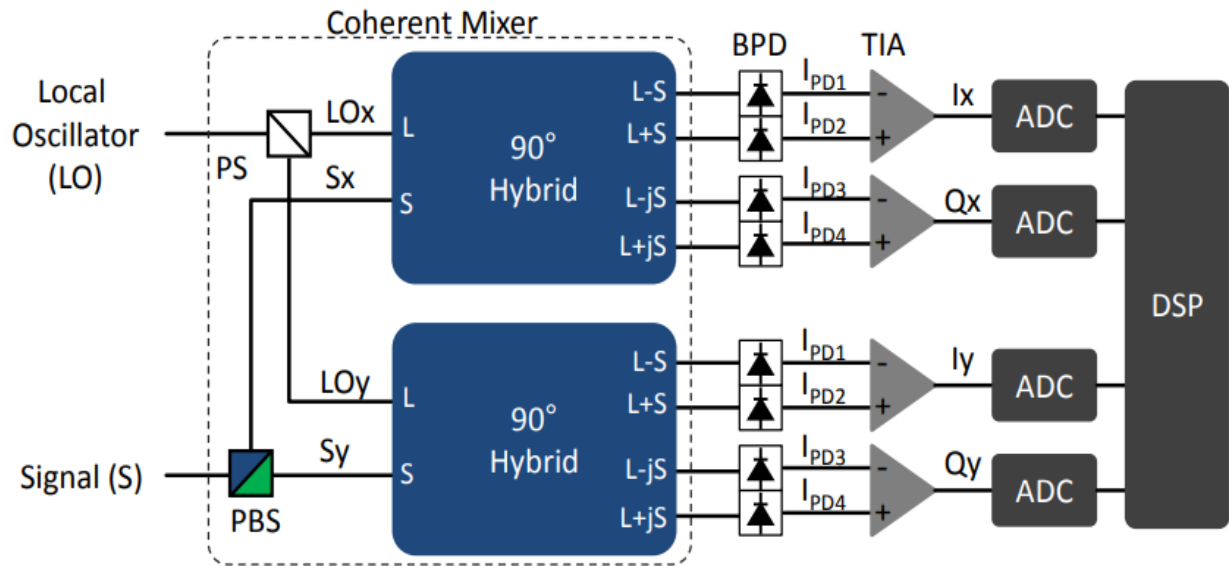
### 3.3.2 Σύμφωνος Δέκτης

Όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, στα συστήματα IM-DD αρκεί μία μόνο φωτοδίοδος για την ανίχνευση της έντασης του σήματος, οπότε μία φωτοδίοδος ανιχνεύει το τετράγωνο του συντελεστή του πεδίου του σήματος (ένταση). Παρ' όλα αυτά, κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, χάνεται η πληροφορία φάσης που απαιτείται για τη σύμφωνη λήψη. Ως εκ τούτου, στα συνεκτικά συστήματα, το λαμβανόμενο οπτικό σήμα παρεμβάλλεται με το φως ενός λείζερ συνεχούς κύματος,

το οποίο ονομάζεται τοπικός ταλαντωτής (Local Oscillator ή LO) και λειτουργεί σε μήκος κύματος περίπου ίσο με το μήκος κύματος του λέιζερ πομπού. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ενδοδουνητική ανίχνευση, η οποία χρησιμοποιείται για τη σύμφωνη μετατροπή του λαμβανόμενου σήματος προς τα κάτω σε βασική ζώνη, ενώ παράλληλα καταγράφεται ολόκληρο το σύνθετο πεδίο του ανακτηθέντος οπτικού σήματος.

Η λεπτομερής διάταξη ενός σύμφωνου δέκτη παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.15. Πρώτα οι δύο πολώσεις του λαμβανόμενου σήματος (S) αποπολυπλέκονται από έναν διαχωριστή δέσμης πόλωσης (PBS). Όπως και στον πομπό, η αποπολυπλεγμένη πόλωση TM στρέφεται σε TE. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να κατασκευαστούν τα ακόλουθα μπλοκ που υποστηρίζουν μία μόνο πόλωση TE. Ταυτόχρονα, το φως από τον τοπικό ταλαντωτή διέρχεται από έναν διαχωριστή ισχύος (Power Splitter ή PS), δημιουργώντας δύο δέσμες ( $LO_x$ ,  $LO_y$ ) για να παρεμβληθούν με σήματα που προέρχονται από κάθε πόλωση ( $S_x$ ,  $S_y$ ), αντίστοιχα, στα ακόλουθα υβρίδια  $90^\circ$ .

Από αυτό το σημείο, κάθε πόλωση υφίσταται την ίδια διαδικασία (βλέπε το πάνω και το κάτω μέρος της Εικόνας 3.15). Το υβρίδιο  $90^\circ$  δημιουργεί τέσσερις διαφορετικές εξόδους παρεμβολής: τον τοπικό ταλαντωτή με το σήμα ( $L+S$ ), τον τοπικό ταλαντωτή με το σήμα μετατοπισμένο κατά  $90^\circ$  ( $L+jS$ ) και τον τοπικό ταλαντωτή με τα συμπληρωματικά σήματα των δύο τελευταίων, ( $L-S$ ) και ( $L-jS$ ). Τα τέσσερα σήματα παρεμβολής ανιχνεύονται από δύο ζεύγη ισοσταθμισμένων φωτοανιχνευτών (Balanced Photo-Detector ή BPD).



Εικόνα 0.15: Διάγραμμα ενός σύμφωνου δέκτη.

Η εξίσωση (3.3) περιγράφει μαθηματικά τα σήματα εισόδου στο υβρίδιο 90° (S και L):

$$L = A_L * e^{j(\omega_L * t + \theta_L)}, S = A_S * e^{j(\omega_S * t + \theta_S)} \quad (3.3)$$

όπου  $A_i$ ,  $\omega_i$  και  $\theta_i$  είναι το πλάτος, η γωνιακή συχνότητα και η φάση του τοπικού ταλαντωτή ( $i = L$ ) και του λαμβανόμενου σήματος ( $i = S$ ). Χρησιμοποιώντας αυτούς τους ορισμούς, μπορούμε να υπολογίσουμε το φωτοανιχνευόμενο ρεύμα κάθε εξόδου του υβριδικού 90°:

$$\begin{aligned} I_{PD\ 1} &\propto |LO - S^2| = |A_L|^2 + |A_S|^2 - 2A_L A_S \cos((\omega_S - \omega_L)t + \theta_S - \theta_L) \\ I_{PD\ 2} &\propto |LO + S^2| = |A_L|^2 + |A_S|^2 + 2A_L A_S \cos((\omega_S - \omega_L)t + \theta_S - \theta_L) \\ I_{PD\ 3} &\propto |LO - jS^2| = |A_L|^2 + |A_S|^2 - 2A_L A_S \cos((\omega_S - \omega_L)t + \theta_S - \theta_L) \\ I_{PD\ 4} &\propto |LO + jS^2| = |A_L|^2 + |A_S|^2 + 2A_L A_S \cos((\omega_S - \omega_L)t + \theta_S - \theta_L) \end{aligned} \quad (3.4)$$

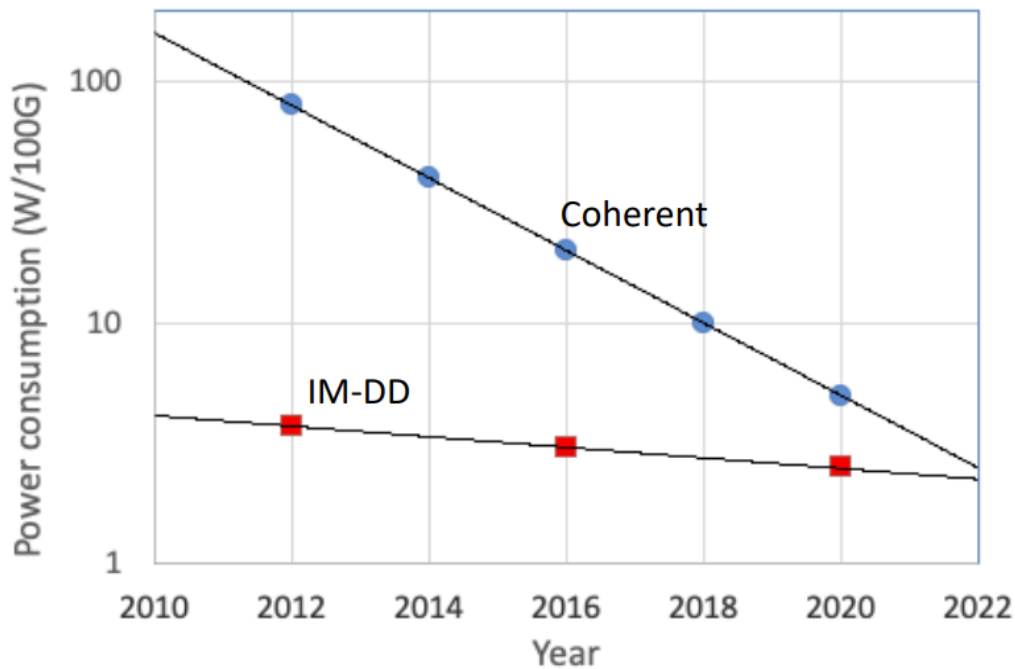
Κάθε ζεύγος ρευμάτων των φωτοδιόδων ( $I_{PD\ 1}$ ,  $I_{PD\ 2}$ ) και ( $I_{PD\ 3}$ ,  $I_{PD\ 4}$ ) αφαιρούνται και ενισχύονται από τις επόμενες TIA, οδηγώντας στις αντίστοιχες συμφασικές (I) και τετραγωνικές (Q) συνιστώσες του σήματος. Εάν τα ζεύγη φωτοανιχνευτών είναι καλά ισορροπημένα, η διαφοροποίηση αυτή επιτρέπει την αφαίρεση των  $|A_L|^2$  και  $|A_S|^2$  συνιστωσών της διαδικασίας ανίχνευσης, βλέπε τον παρακάτω υπολογισμό:

$$\begin{aligned} I &= I_{PD\ 2} - I_{PD\ 1} \propto A_L A_S \cos(\Delta\omega t + \theta_S - \theta_L) \\ Q &= I_{PD\ 4} - I_{PD\ 3} \propto A_L A_S \sin(\Delta\omega t + \theta_S - \theta_L) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Σημειώστε ότι η ίδια διαδικασία εκτελείται και για τις δύο πολώσεις. Τέλος, οι συνιστώσες I και Q που προκύπτουν ψηφιοποιούνται από τέσσερις ADC για μεταγενέστερη επεξεργασία. Συνήθως οι τελευταίας γενιάς ADC υψηλής ανάλυσης με βάση το CMOS, περιλαμβάνονται σε σύμφωνους δέκτες που ενσωματώνονται στο ίδιο ASIC με τους DAC και τον DSP.

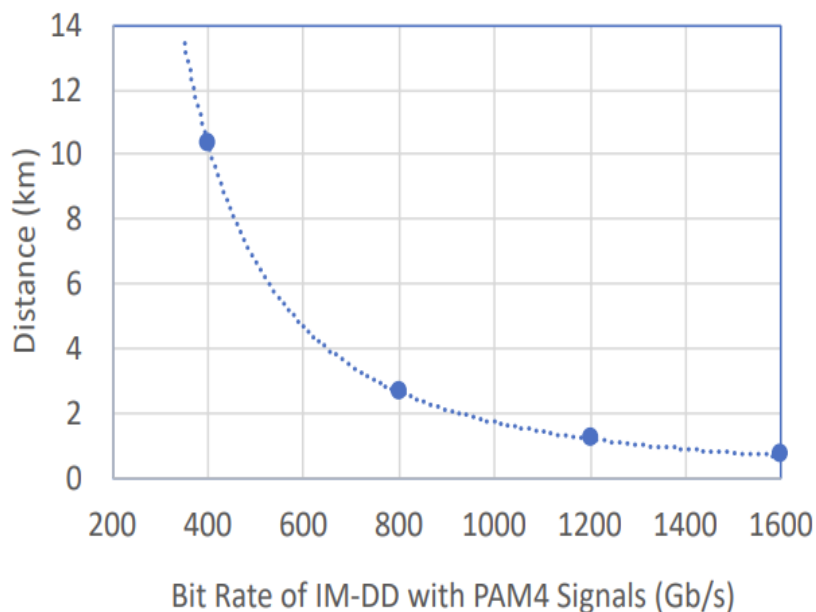
### 3.4 Σύγκριση μεταξύ άμεσης και σύμφωνης ανίχνευσης

Παρά το γεγονός ότι η ψηφιακή σύμφωνη ανίχνευση προσφέρει σημαντικά υψηλότερες επιδόσεις από την άμεση ανίχνευση, όπως υψηλή ευαισθησία, υψηλή φασματική απόδοση και ικανότητα να εξισορροπεί διάφορες δυσλειτουργίες, η άμεση ανίχνευση συνεχίζει να χρησιμοποιείται στα συστήματα χαμηλών αποστάσεων. Αυτό συμβαίνει διότι η φασματική αποδοτικότητα και η ευαισθησία δεν αποτελούν μεγάλο πρόβλημα ακόμα για τα συστήματα χαμηλής απόστασης. Σε σύγκριση με τους πομποδέκτες IM-DD, οι σύμφωνοι πομποδέκτες εξακολουθούν να είναι πολύ πιο περίπλοκοι, ακριβοί και καταναλώνουν πολύ περισσότερη ενέργεια. Τέλος, τα φαινόμενα μετάδοσης μέσω οπτικών ινών δεν περιορίζουν επί του παρόντος τα συστήματα μικρής εμβέλειας στους σημερινούς ρυθμούς μετάδοσης. Ωστόσο, καθώς η σύμφωνη τεχνολογία αναπτύσσεται, οι ρυθμοί μετάδοσης αυξάνονται και η ζήτηση χωρητικότητας των εφαρμογών κέντρων δεδομένων αυξάνεται, η σύμφωνη τεχνολογία θα γίνεται όλο και πιο δημοφιλής για εφαρμογές μικρής εμβέλειας, ιδίως για κέντρα δεδομένων υπερ-κλίμακας.

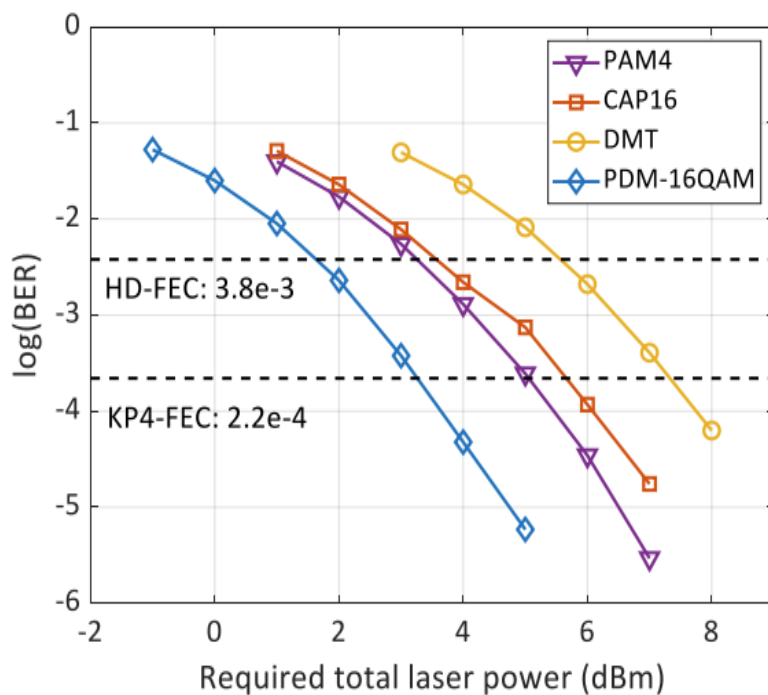


Εικόνα 0.16: Κατανάλωση ισχύος μεταξύ IM-DD και σύμφωνων πομποδεκτών.

Η εξέλιξη της κατανάλωσης ισχύος των σύμφωνων αναμεταδοτών και των αναμεταδοτών IM-DD ανά 100G κατά τη διάρκεια των τελευταίων δέκα ετών απεικονίζεται στην Εικόνα 3.16. Αποδεικνύει πόσο γρήγορα μειώθηκε η κατανάλωση ισχύος του σύμφωνου αναμεταδότη ως αποτέλεσμα των εξελίξεων στις τεχνολογίες ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (DSP) και φωτονικής ολοκλήρωσης. Τα τελευταία δέκα χρόνια, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας έχει μειωθεί περισσότερο από 50 φορές και το κόστος έχει μειωθεί κατά ένα παρόμοιο μέγεθος. Επιπλέον, πολλές από τις εργασίες DSP στους σύμφωνους αναμεταδότες μπορούν να βελτιωθούν για μικρές αποστάσεις, γεγονός που θα μειώσει την πολυπλοκότητα και τη χρήση ενέργειας. Επιπλέον, πολλές από τις εργασίες DSP στους σύμφωνους αναμεταδότες μπορούν να βελτιωθούν για μικρές αποστάσεις, γεγονός που θα μειώσει την πολυπλοκότητα και τη χρήση ενέργειας. Επιπλέον, καθώς οι αναμεταδότες IM-DD γίνονται πιο πολύπλοκοι με υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων, η μείωση της κατανάλωσης ισχύος των αναμεταδοτών IM-DD είναι εξαιρετικά πιο αργή.



**Εικόνα 0.17:** Περιορισμός εύρους λόγο χρωματικής διασποράς σε σύστημα άμεσης ανίχνευσης με σήματα PAM-4.



**Εικόνα 0.18:** Ρυθμός σφάλματος συναρτήσει της απαιτούμενης ισχύος για σύμφωνα και IM-DD συστήματα.

Καθώς οι ρυθμοί μετάδοσης αυξάνονται, η χρωματική διασπορά της ίνας (Chromatic dispersion ή CD) αρχίζει να επηρεάζει τα συστήματα άμεσης ανίχνευσης μικρής εμβέλειας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.17, όπου τα συστήματα άμεσης ανίχνευσης

χρησιμοποιούν CWDM4 και σήματα διαμόρφωσης πλάτους παλμού 4 επιπέδων (PAM4). Ο ρυθμός μετάδοσης bit υψωμένος στο τετράγωνο έχει αντίστροφη σχέση με την χρωματική διασπορά. Σύμφωνα με την Εικόνα 3.17, η εμβέλεια του συστήματος περιορίζεται σε περίπου 2,5 km στα 800 Gb/s, τα οποία αποτελούνται από τέσσερα σήματα PAM4 200 Gb/s σε κανάλια CWDM4, με ποινή 1-dB, και σε περίπου 600 m στα 1,6 Tb/s.

Τα μελλοντικά συστήματα μικρής εμβέλειας ενδεχομένως να βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στο πλεονέκτημα ευαισθησίας της σύμφωνης τεχνολογίας. Η ευαισθησία του δέκτη θα είναι αναγκαία για την κάλυψη του προϋπολογισμού σύνδεσης καθώς αυξάνονται οι ρυθμοί μετάδοσης λόγω των περιορισμών των ισχύων των λέιζερ, ιδίως για τους αναμεταδότες που βασίζονται στη φωτονική πυριτίου και συχνά έχουν σημαντικές απώλειες εισόδου. Η Εικόνα 3.18 απεικονίζει τα ποσοστά σφάλματος bit (BER) σε συνάρτηση με τη συνολική ισχύ του λέιζερ για ένα σύμφωνο σύστημα διαμόρφωσης με διαίρεση τετραγωνικής διαμόρφωσης πλάτους 16 (PDM16QAM) και διάφορες μεθόδους άμεσης ανίχνευσης. Καταδεικνύει ότι ένα σύμφωνο σύστημα μπορεί να επιτύχει προϋπολογισμό ισχύος (ευαισθησία) τουλάχιστον 2 dB υψηλότερο από τα συστήματα άμεσης ανίχνευσης.

Οι εξελίξεις στην τεχνολογία CMOS έχουν μειώσει σημαντικά την πολυπλοκότητα και την κατανάλωση ισχύος του DSP στα σύμφωνα συστήματα, αλλά τα λέιζερ εξακολουθούν να αποτελούν σημαντικό εμπόδιο για τη χρήση της συνοχής σε εφαρμογές μικρής εμβέλειας ευαίσθητες στο κόστος και την ισχύ. Παρουσιάστηκε ότι ενώ η πολυπλοκότητα και η κατανάλωση ισχύος των σύμφωνων συστημάτων έχουν μειωθεί ραγδαία ως αποτέλεσμα των προόδων στην τεχνολογία της φωτονικής ολοκλήρωσης, έχει γίνει πιο δύσκολο για τα συστήματα IM-DD να φτάσουν σε υψηλότερους ρυθμούς bit. Οι μελλοντικές εφαρμογές υψηλής ταχύτητας στα δίκτυα κέντρων δεδομένων μικρής εμβέλειας θα καταστήσουν τη σύμφωνη τεχνολογία μια συμφέρουσα επιλογή.

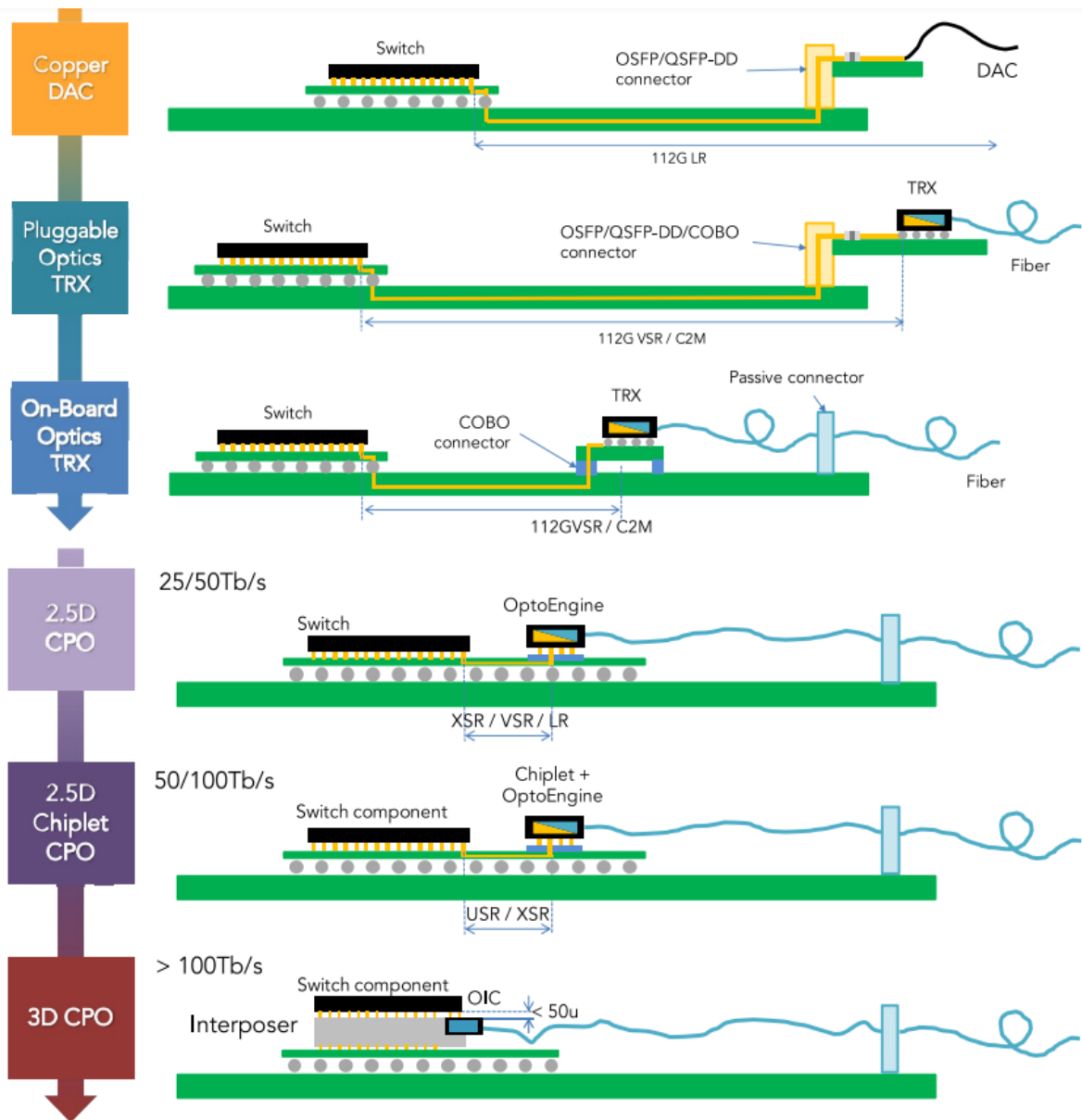


## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ

Υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις για την επέκταση του μοντέλου των προσαρτώμενων μονάδων, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης τσιπ επαναφοράς (retimer chip) πάνω στην κύρια πλακέτα, της μείωσης των απωλειών ιχνών μέσω βελτιστοποιημένων υλικών πλακέτας χαμηλών απωλειών ή της αντικατάστασης των ιχνών της πλακέτας με χάλκινα καλώδια εντός του κιβωτίου (intra box copper). Η τελευταία επιλογή αυξάνει την εμβέλεια του ηλεκτρικού καναλιού (έως και κατά 5 φορές) και σε αντίθεση με τους επαναρυθμιστές δεν προσθέτει περισσότερη ισχύ. Όλες αυτές οι μέθοδοι, αυξάνουν το κόστος και την πολυπλοκότητα των ευέλικτων λύσεων σε συστημικό επίπεδο.

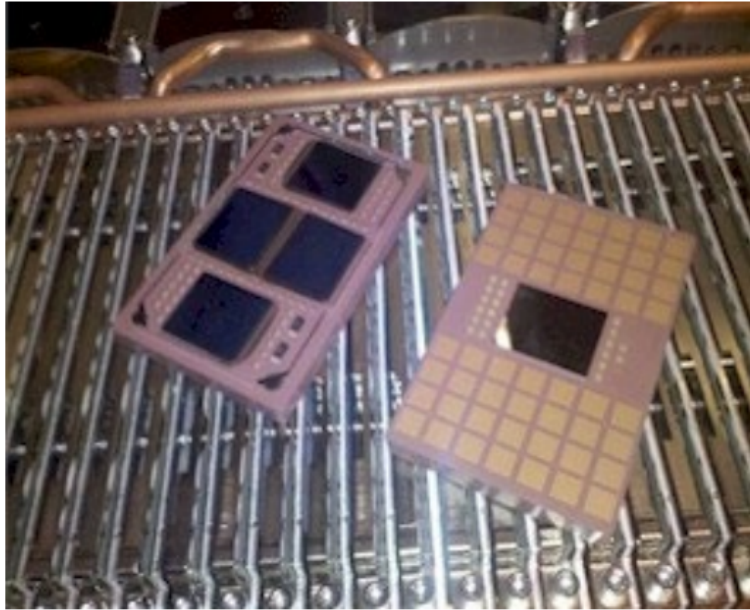
Τέτοιες λύσεις θα δημιουργηθούν σίγουρα στην καθημερινή εφαρμογή, ιδίως σε περιπτώσεις όπου η προσαρμοστικότητα εξακολουθεί να είναι ζωτικής σημασίας ή η συν-συσκευασία δεν είναι (ακόμη) πρακτική. Για όλα τα άλλα σενάρια, η μετακίνηση των οπτικών από την πρόσοψη στο περίβλημα και στην κύρια πλακέτα (On-board Optics ή OBO) ή στη συσκευασία του μεταγωγέα (Co-packaged Optics ή CPO) αποτελεί μια ελκυστική ευκαιρία για να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο το ηλεκτρικό κανάλι και να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των μεταβάσεων. Μια πιθανή πορεία μετάβασης από τα παραδοσιακά χάλκινα καλώδια (Direct Attach Copper ή DAC ) και τα προσαρτημένα οπτικά συστήματα σε πλήρως τρισδιάστατα ενσωματωμένα οπτικά συστήματα παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.1. Οι επιλογές καλύπτουν το φάσμα από την επικρατούσα σήμερα προσέγγιση της τοποθέτησης στην πρόσοψη, την τοποθέτηση στο μέσο της πλακέτας, την ενσωμάτωση 2,5D σε κοινό υπόστρωμα, την τρισδιάστατη ενσωμάτωση (die-on-die), έως την πλήρως μονολιθική ενσωμάτωση.



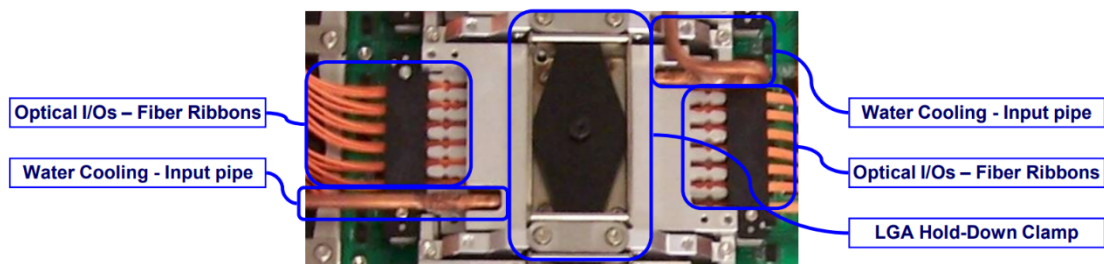
Εικόνα 0.1: Χάρτης πορείας φωτονικής ολοκλήρωσης.

#### 4.1 ΠΡΩΙΜΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΥΝ-ΣΥΣΚΕΥΑΣΜΕΝΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ

Το σύστημα IBM Power 775, το οποίο κυκλοφόρησε το 2010, παρείχε ένα πρώιμο παράδειγμα οπτικών συν-συσκευασίας, στο οποίο οι οπτικοί πομποδέκτες τοποθετούνται στο ίδιο κεραμικό υπόστρωμα συσκευασίας με το ολοκληρωμένο κύκλωμα (Very large scale integration, VLSI) του μεταγωγέα. Η οικογένεια υπολογιστικών συστημάτων IBM Blue-Gene έκανε επίσης χρήση αυτής της μικρής μεθόδου οπτικής συσκευασίας, η οποία ήταν κατασκευασμένη σε υπόστρωμα συσκευασίας από γυαλί και κεραμικό. Οι οπτικοί πομποδέκτες στο σύστημα IBM Power 775 ήταν ενσωματωμένοι σε κεραμικό υπόστρωμα και το κεντρικό τσιπ του μεταγωγέα περιβάλλεται από μια σύνδεση συστοιχίας πλέγματος (Land Grid Array ή LGA) με βήμα 0,75 mm, η οποία συνδέει 28 σύνολα οπτικών μονάδων πομπού 12 καναλιών και 28 σύνολα οπτικών μονάδων δέκτη 12 καναλιών. Ως εκ τούτου, μια κεραμική συσκευασία περιέχει 672 οπτικές ίνες. Υπάρχουν 8 από αυτές τις ολοκληρωμένες οπτικές μονάδες μεταγωγέα σε μία κύρια πλακέτα και 5376 οπτικές ίνες οδηγούνται στους ακραίους συνδέσμους της πλακέτας. Σε αυτό το σύστημα στέλνεται σήμα NRZ 10 Gb/s ανά ίνα, και το κεραμικό υπόστρωμα από γυαλί 89 στρώσεων πλάτους 60 mm και μήκους 100 mm τοποθετήθηκε επίσης στην κύρια πλακέτα (Printed circuit board ή PCB) με τη χρήση ενός μεγάλου συνδέσμου LGA. Το οπτικό εύρος ζώνης εισόδου/εξόδου ήταν 3,36 Tb/s σε κάθε κατεύθυνση επιπλέον του κάτω ηλεκτρικού I/O των 480 Gb/s (συνολικά 3,84 Tb/s). Η μέθοδος πακέτου ανά πακέτο χρησιμοποιείται σε αυτόν τον σχεδιασμό. Μπορούμε να αξιοποιήσουμε όλα τα πλεονεκτήματα της συμπαγούς οπτικής συσκευασίας σε αυτή την κατασκευή συσκευασίας, η οποία θεωρείται ως η πρώτη απεικόνιση της συμπαγούς οπτικής με ένα μεγάλο VLSI. Αυτή η συμπαγής οπτική απέδωσε όπως αναμενόταν.



Εικόνα 0.2: Power 7 CPU μαζί με τον συνοδευτικό μεταγωγέα του.



Εικόνα 0.3: Μεταγωγέας της μονάδας IBM Power 775.

Η οπτική λύση συν-συσκευασίας του μέλλοντος μπορεί να μην είναι αυτή, παρά το γεγονός ότι η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική ανταποκρίθηκε ακριβώς όπως είχε προβλεφθεί. Παρατηρούμε διάφορους παράγοντες δυσκολιών: 1) η χρήση του γυάλινου κεραμικού υποστρώματος μειώνεται λόγω του κόστους κατασκευής του, 2) η εξασφάλιση της αξιόπιστης επαφής όλων των 80 LGA pads απαιτεί μια καλά ισορροπημένη ομοιόμορφα κατανεμημένη πίεση.

Μία σημαντική ποσότητα δύναμης πρέπει να ασκηθεί σε κάθε επαφή, συνήθως 20 gw (δύναμη βάρους γραμμαρίου) ανά ακροδέκτη, προκειμένου να συνδεθεί ο οπτικός πομποδέκτης ως υποσύνολο στην κύρια συσκευασία μέσω σύνδεσης LGA. Ένας σύνδεσμος LGA 80 επαφών απαιτεί 1,6 kgw ή 16 N συνολικής πίεσης (Newton). Ο σύνδεσμος LGA χρησιμοποιείται επίσης για τη σύνδεση της κύριας πλακέτας με το

κεραμικό υπόστρωμα της κύριας συσκευασίας. Για να αντέξει τη διπλή πίεση LGA από πάνω και από κάτω, το υπόστρωμα πρέπει να είναι αρκετά ισχυρό και άκαμπτο.

Το μόνο που μπορεί να αντέξει ο γυάλινος κεραμικός φορέας είναι η πίεση. Παρόλο που αυτή η συμπαγής οπτική λειτούργησε όπως αναμενόταν, αυτή μπορεί να μην είναι η μελλοντική λύση αν βασιστούμε στην άλλη τεχνολογία υποστρώματος.

## 4.2 ΟΠΤΙΚΑ ΕΠΙ ΤΗΣ ΠΛΑΚΕΤΑΣ

Τα ενσωματωμένα οπτικά έχουν αναπτυχθεί σε συγκεκριμένα σενάρια που απαιτούν μεγαλύτερη πυκνότητα εύρους ζώνης από ότι μπορούν να προσφέρουν τα συνδεδεμένα οπτικά. Τα συστήματα υπολογιστών υψηλών επιδόσεων (High Performance Computing ή HPC), όπως η σύνδεση Atos/Bull BXI και η διασύνδεση IBM Power775, αποτελούν μερικά παραδείγματα. Οι οπτικές μηχανές ενδιάμεσης πλακέτας μέσω διαύλου (Peripheral Component Interconnect Express ή PCIe) είναι ένα από τα περαιτέρω παραδείγματα που είναι διαθέσιμα στο εμπόριο. Η πλειονότητα των προαναφερθέντων βασιζόταν σε οπτικά πολλαπλών τρόπων. Πρόσφατα οριστικοποιήθηκε από την Κοινοπραξία για οπτικά επί της πλακέτας (Consortium for On-Board Optics ή COBO) μια συμφωνία πολλαπλών πηγών (Multi-Source Agreement ή MSA) για τα οπτικά επί της πλακέτας που περιλαμβάνει απαιτήσεις για οπτικές μονάδες 8 και 16 λωρίδων (ηλεκτρικές) για οπτικά συστήματα επί της συσκευής με ταχύτητα έως και 56 Gb/s ανά λωρίδα. Η εστίαση έχει στραφεί στα σύμφωνα οπτικά (Coherent On Board Optics ή CohOBO) και CPO, επειδή η υιοθέτηση του COBO δεν έχει ακόμη εξαπλωθεί. Ένα από τα κύρια εμπόδια για την προσέγγιση επί της πλακέτας είναι ότι, παρά τη μετακίνηση των μονάδων από την πρόσοψη στην κύρια πλακέτα, το ηλεκτρικό κανάλι από τον μεταγωγέα στη μονάδα δεν βελτιώνεται αρκετά σε σχέση με τις εμπρόσθιες προσαρτώμενες μονάδες (Faceplate-pluggable ή FPP) ώστε να επιτευχθεί σημαντική μείωση της ισχύος. Παρόλα αυτά, η COBO βελτιώνει το θερμικό περιβάλλον, καθώς η θερμότητα από τις μονάδες δεν εστιάζεται μόνο στην πρόσοψη, η οποία έχει περισσότερο χώρο για διάτρηση, αφού δεν έχει προσαρτώμενες μονάδες.

### 4.3 ΣΥΝ-ΣΥΣΚΕΥΑΣΜΕΝΑ ΟΠΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Έχουν καταδειχθεί αρκετές πρακτικές εφαρμογές οπτικών τεχνολογίας συν-συσκευασμένων συστημάτων, τόσο για πολύτροπα όσο και για μονότροπα οπτικά. Για να βοηθήσουν στην ευθυγράμμιση της ανάπτυξης CPO με τις ανάγκες των φορέων εκμετάλλευσης κέντρων δεδομένων, η Microsoft και το Facebook ξεκίνησαν τη συνεργασία Co-Packaged Optics Collaboration. Έχουν εκδοθεί διάφορα έγγραφα συζήτησης για να ζητηθεί η συμβολή των υποψήφιων προμηθευτών CPO.

Ο κλάδος δεν έχει ακόμη επιτύχει πλήρη ευθυγράμμιση όσον αφορά την τεχνολογία CPO. Πολλά ερωτήματα εξακολουθούν να συζητούνται: Πότε θα είναι αναπόφευκτη η μετάβαση στην CPO; Ποια είναι η σωστή ηλεκτρική διεπαφή και ποια διεπαφή θα παρέχουν στην πραγματικότητα οι ASIC; Ποια είναι η σωστή κοκκομετρία όσον αφορά τη χωρητικότητα ανά κινητήρα; Τα λέιζερ τοποθετούνται εντός ή εκτός του κινητήρα CPO; Ποια είναι η σωστή προσέγγιση συσκευασίας Πώς αντιμετωπίζει η CPO τις ανησυχίες σχετικά με την απώλεια των βασικών πλεονεκτημάτων της FPP; Θα εξακολουθεί να είναι αξιόπιστος ένας κινητήρας CPO με πολύ περισσότερα κανάλια από έναν συνδεδεμένο πομποδέκτη; Πώς θα είναι το επιχειρηματικό μοντέλο - ποιος πουλάει τι σε ποιον; Ποια είναι η καλύτερη πλατφόρμα φωτονικής ολοκλήρωσης και ποιοι τύποι φωτονικών συσκευών είναι καταλληλότεροι για CPO; Μπορούν οι ροές φωτονικής κατασκευής να υποστηρίξουν τον απαιτούμενο όγκο; Πόσο μεγάλες θα είναι οι πραγματικές βελτιώσεις στις βασικές μετρήσεις;

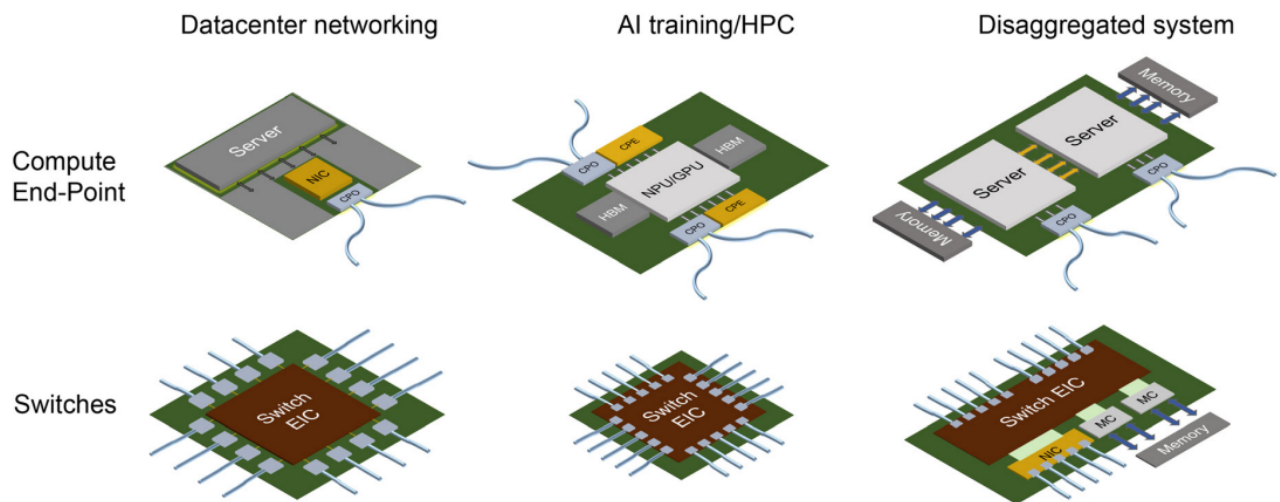
Είναι σαφές ότι πρέπει να ξεπεραστεί η σημαντική δυσκαμψία κατά τη μετάβαση μιας επιχείρησης από ένα καθιερωμένο και αποδεδειγμένο μοντέλο ανάπτυξης σε ένα μοντέλο που εξακολουθεί να είναι γεμάτο αβεβαιότητα. Εναπόκειται στους υποστηρικτές της CPO να ξεπεράσουν τα τεχνικά εμπόδια και να βρουν αποδεκτές απαντήσεις στα παραπάνω ερωτήματα.

#### 4.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΕΙΣ

Η εκθετική αύξηση των δεδομένων που προκάλεσε η εμφάνιση της ψηφιακής οικονομίας τροφοδότησε τις εξελίξεις στις τεχνολογίες και τα συστήματα πληροφορικής, αποθήκευσης και δικτύωσης. Η ζήτηση για ανάλυση, αποθήκευση και διακίνηση δεδομένων είναι σήμερα μεγαλύτερη από ποτέ. Οι καινοτομίες στα επιχειρηματικά μοντέλα "ως υπηρεσία", όπως η υποδομή, το λογισμικό, η πλατφόρμα και η λειτουργία ως υπηρεσία (Anything as a Service ή XaaS), πυροδοτήθηκαν από την εμφάνιση των κέντρων δεδομένων μεγάλης κλίμακας και του υπολογιστικού νέφους. Οι παραδοσιακές αρχιτεκτονικές διακομιστών έχουν αποσυντεθεί προκειμένου να αυξηθεί η αποδοτικότητα και η εκμετάλλευση των υπολογιστικών πόρων. Ίνες υψηλών επιδόσεων με εύρος ζώνης διατομής έως και Petabytes ανά δευτερόλεπτο συνδέουν δεξαμενές πόρων, συμπεριλαμβανομένων των γενικών υπολογισμών, των εξειδικευμένων υπολογισμών, δηλαδή της επιτάχυνσης βίντεο, της εκπαίδευσης και της συμπερασματολογίας τεχνητή νοημοσύνης/μηχανική μάθησης, της μονάδας επεξεργασίας υψηλών επιδόσεων HPC και της αποθήκευσης δεδομένων. Η ενσωματωμένη φωτονική πυριτίου εισόδου/εξόδου καθίσταται πραγματική κινητήρια δύναμη και επιχειρηματική υπόθεση, καθώς η σύνδεση αρχίζει να αναλαμβάνει το κόστος του υφάσματος και τη χρήση ενέργειας.

Οι εφαρμογές που απαιτούν δυνατότητες συνδεσιμότητας υψηλού εύρους ζώνης, χαμηλού κόστους και μεγάλων αποστάσεων είναι κατάλληλες για τη φωτονική πυριτίου. Οι οπτικές διασυνδέσεις των κέντρων δεδομένων, οι οποίες επέτρεψαν την ανάπτυξη υπολογιστικών συστημάτων κλιμάκωσης ως μέρος της συμβατικής υποδομής των κέντρων δεδομένων και του οικοσυστήματος των συνδεδεμένων οπτικών πομποδοκτών, ήταν μια τέλεια πρώτη εφαρμογή όγκου για την εμπορική φωτονική πυριτίου. Ωστόσο, ο πραγματικός στόχος της φωτονικής πυριτίου είναι να καταστεί δυνατή η οπτική είσοδος/έξοδος ημιαγωγών από το ίδιο το τσιπ πυριτίου με τη συν-συσσκευασία που χρησιμοποιεί ετερογενή ενσωμάτωση με διάφορα ολοκληρωμένα κυκλώματα ειδικών εφαρμογών δικτύωσης, αποθήκευσης και υπολογισμού. Οι ολοκληρωμένες εφαρμογές φωτονικής πυριτίου εισόδου-εξόδου στο παρόν και στο μέλλον απεικονίζονται στην Εικόνα 4.4. Η σύνδεση των μεταγωγέων

ιστού (fabric switches) σε ιστούς μεγάλης έκτασης είναι η πρώτη χρήση μιας πραγματικά συμπαγούς τεχνολογίας.



**Εικόνα 0.4: Οι χρήσεις των συμπαγών οπτικών σε διάφορα συστήματα (με υπολογιστικό τελικό σημείο και διακόπτες). Συν-συσκευασμένα οπτικά-, Συν-συσκευασμένα ηλεκτρονικά, Κάρτα διασύνδεσης δικτύου, Μονάδα επεξεργασίας δικτύου, Μονάδα επεξεργασίας γραφικών.**

Για να δημιουργηθεί ένα πλήρες σύστημα σε ένα τσιπ (System on Chip ή SoC), το τσιπ πυριτίου φωτονικής ενσωματώνεται ετερογενώς σε μεταγωγέα πυριτίου 25,6 Tb/s και 51,2 Tb/s ως οπτική διεπαφή εισόδου-εξόδου. Ένας φωτονικός μεταγωγέας σε συμπαγή συσκευασία προσφέρει την καλύτερη απόδοση ηλεκτρικής ακεραιότητας σήματος, την αποτελεσματικότερη χρήση του πυριτίου του συστήματος και τη χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας του συστήματος σε ένα μόνο υπόστρωμα, παρόμοια με την ετερογενή ενσωμάτωση δυναμικής μνήμης τυχαίας προσπέλασης (Dynamic random-access memory ή DRAM) σε συσκευασία. Το ίδιο ισχύει και για την ενσωματωμένη φωτονική πυριτίου, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα HPC για την παροχή διασυνδέσεων υψηλής πυκνότητας και χαμηλής καθυστέρησης. Σε υπολογιστικά υφάσματα κλιμάκωσης, όπως συστάδες εκπαίδευσης και συμπερασμού μονάδων επεξεργασίας γραφικών (Graphic Process Unit ή GPU) ή τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης, όπου τα φορτία εργασίας κατανέμονται σε πολυάριθμα εξειδικευμένα υπολογιστικά τσιπ, είναι ένα τρίτο παράδειγμα μελλοντικών χρήσεων για φωτονικές διασυνδέσεις. Θα υπάρξει τελικά μια περίπτωση χρήσης για οπτικό I/O εκτός της κάρτας διασύνδεσης δικτύου ή απευθείας από τον διακομιστή, όταν το εύρος ζώνης στον κόμβο διακομιστή αυξηθεί και η απόσταση που



μπορεί να μεταφέρει ο χαλκός μειωθεί. Στα σύμφωνα οπτικά συστήματα έχει επίσης εμφανιστεί η ενσωμάτωση της φωτονικής πυριτίου, όπου τα πρωτοποριακά φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα (Photonic Integrated Circuit ή PIC) πυριτίου και τα συντονιζόμενα λέιζερ συνδυάζονται με σύμφωνα επεξεργαστές ψηφιακού σήματος DSP και χρησιμοποιούνται σε διασυνδέσεις κέντρων δεδομένων που συνδέουν κέντρα δεδομένων σε περιφερειακές ζώνες.

## **4.5 ΠΟΡΕΙΑ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΥΙΟΘΕΤΗΣΗ**

Για να υιοθετηθούν, οι λύσεις CPO πρέπει να αντιμετωπίσουν τις ανησυχίες που σχετίζονται με την απώλεια ή τη μείωση των πλεονεκτημάτων των προσαρτώμενων μονάδων.

### **4.5.1 Επιλογή χαλκού**

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των προσαρτώμενων μονάδων είναι η δυνατότητα ανάπτυξης παθητικών καλωδίων χαλκού σε θύρες που δεν απαιτούν την εμβέλεια που παρέχουν τα οπτικά. Μια σημαντική συνέπεια της αύξησης των ρυθμών σειράς ήταν ότι η πραγματική εμβέλεια αυτών των συνδέσεων χαλκού έχει συρρικνωθεί δραματικά, μειώνοντας τη χρησιμότητά τους. Για 100 Gb/s ανά λωρίδα, η επιδιωκόμενη εμβέλεια είναι 2 m (IEEE 802.3ck), γεγονός που περιορίζει την τοποθέτηση του εξοπλισμού μέσα σε ένα ενιαίο rack. Παρ' όλα αυτά, η επιλογή DAC παραμένει ελκυστική, για παράδειγμα για συνδεσιμότητα διακομιστών ή για καλωδιωμένα backplanes. Αντίστοιχα, ένας μεταγωγέας ToR θα μπορούσε να είναι εξοπλισμένος με ένα μείγμα συνδέσιμων θυρών για τις downlinks και θυρών CPO για τις uplink συνδέσεις του.

#### **4.5.2 Επιλογές οπτικής διασποράς λειτουργίας πόλωσης (Optical Polarization mode dispersion, PMD)**

Τα pluggables παρέχουν τη δυνατότητα επιλογής μεταξύ διαφορετικών οπτικών PMD, συμπεριλαμβανομένων των επιλογών MMF και SMF για διάφορες εμβέλειες. Σε ορισμένες περιπτώσεις χρήσης όπου η εμβέλεια χαλκού δεν επαρκεί, η εμβέλεια MMF (<100 m) μπορεί να είναι επαρκής, για παράδειγμα για τη σύνδεση των συνδέσεων ανόδου ToR με fabric leaves. Καθώς οι συνδέσεις MMF με βάση το VCSEL είναι γενικά φθηνότερες από τις συνδέσεις SMF με βάση το EML, αυτό προσφέρει επιλογές μείωσης του κόστους. Ωστόσο, αυτό το χάσμα κόστους θα συρρικνωθεί καθώς η ενσωμάτωση με βάση το SiPh μειώνει το κόστος των οπτικών μονής λειτουργίας που μπορούν να καλύψουν οποιαδήποτε απόσταση έως και 2 km, και η εμβέλεια των οπτικών πολλαπλών λειτουργιών θα συρρικνωθεί καθώς αυξάνονται οι ρυθμοί των οπτικών λωρίδων. Ωστόσο, η τυποποίηση των παραγόντων μορφής CPO και των ηλεκτρικών διασυνδέσεων θα επιτρέψει τη μίξη οπτικών PMD εντός ενός ενιαίου μεταγωγέα, διατηρώντας σε μεγάλο βαθμό την ευελιξία των pluggables κατά τη στιγμή της ανάπτυξης.

#### **4.5.3 Προσβασιμότητα πεδίου**

Η σταδιακή ανάπτυξη και η δυνατότητα συντήρησης βασίζονται στην ικανότητα εγκατάστασης και αφαίρεσης των οπτικών μονάδων στο πεδίο. Οι μονάδες FPP είναι εύκολα προσβάσιμες από την πρόσοψη. Οι μονάδες OBO απαιτούν την αφαίρεση του περιβλήματος από το ράφι για την πρόσβαση στις μονάδες. Για την υποστήριξη της επιτόπιας συντήρησης με CPO, οι οπτικές μηχανές χρειάζονται μια ηλεκτρικά διαχωρίσιμη διεπαφή (σύνδεσμο) αντί να είναι συγκολλημένες. Αυτό είναι επίσης σημαντικό για να καταστεί δυνατή η επανασχεδίαση κατά τη διάρκεια της κατασκευής και των δοκιμών. Ωστόσο, στο πεδίο, το συγκρότημα μεταγωγέων που περιλαμβάνει τους οπτικούς κινητήρες πρέπει επιπλέον να αποσυναρμολογηθεί τουλάχιστον εν μέρει (π.χ. αφαιρώντας την ψύκτρα και έναν σφιγκτήρα που συγκρατεί τους κινητήρες στη θέση τους).

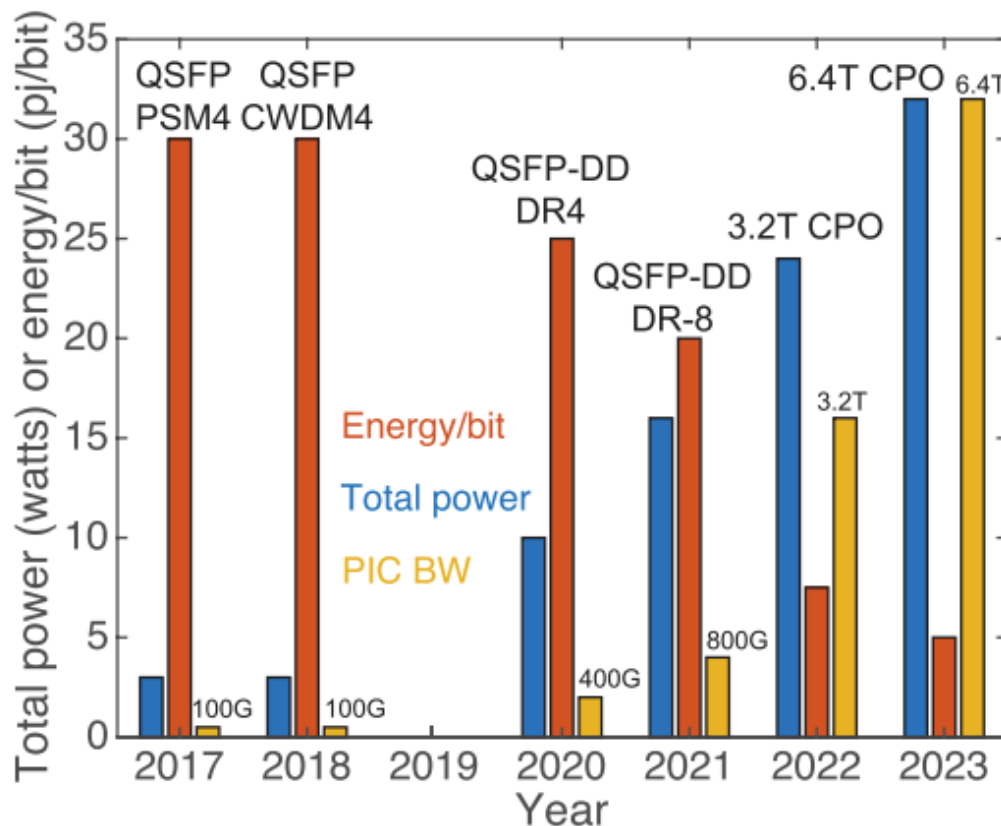
#### **4.5.4 Οικοσύστημα**

Δεν λείπουν οι εταιρείες που δραστηριοποιούνται στον τομέα των ολοκληρωμένων οπτικών, από καθιερωμένους φορείς έως νεοσύστατες επιχειρήσεις. Οι κάθετες σχέσεις είναι πιθανό να αλλάξουν- τα τελευταία χρόνια παρατηρήθηκε ένας καταίγισμός επενδύσεων και εξαγορών - αρκετοί μεγάλοι κατασκευαστές δικτυακού εξοπλισμού και τσιπ εξαγόρασαν εταιρείες φωτονικής για να εξασφαλίσουν εσωτερικές ικανότητες φωτονικής ολοκλήρωσης. Ταυτόχρονα, τα χυτήρια έχουν επίσης επενδύσει στην ανάπτυξη προσφορών φωτονικής (πυριτίου). Η φωτονική ολοκλήρωση και η φωτονική-ηλεκτρονική ολοκλήρωση θολώνουν τα όρια μεταξύ των χυτηρίων, των κατασκευαστών οπτικών εξαρτημάτων, των κατασκευαστών μονάδων, των κατασκευαστών τσιπ, των κατασκευαστών κιβωτίων και των εταιρειών συστημάτων. Η επιτυχία της CPO εξαρτάται από την αποτελεσματική συνεργασία μεταξύ των προμηθευτών φωτονικής, των κατασκευαστών μονάδων, των προμηθευτών πυριτίου, των προμηθευτών δικτυακού εξοπλισμού και των φορέων εκμετάλλευσης κέντρων δεδομένων, ώστε να ευθυγραμμιστούν για την αντιμετώπιση των απαιτήσεων των χρηστών, την τεχνολογική σκοπιμότητα και την οικονομική βιωσιμότητα. Η έγκαιρη συναίνεση με τη μορφή, για παράδειγμα, μιας MSA θα είναι υψίστης σημασίας. Επιπλέον, οι ροές παραγωγής πρέπει να περάσουν από το στάδιο της έρευνας και ανάπτυξης στην παραγωγή όγκου. Το οικοσύστημα θα πρέπει να καταλήξει σε μια διαλειτουργική λύση που θα μπορεί να είναι πηγή από πολλούς προμηθευτές οποιαδήποτε λύση από έναν μόνο προμηθευτή μπορεί να μην είναι εφικτή.

#### **4.6 ΠΟΡΕΙΑ ΣΥΝ-ΣΥΣΚΕΥΑΣΜΕΝΩΝ ΦΩΤΟΝΙΚΩΝ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΕΩΝ**

Τα ASICs των επικοινωνιών κορμού που διαθέτουν συνδέσεις οπτικής μετάδοσης έχουν μια πιο αποσπασματική διασύνδεση τα τελευταία 20 χρόνια. Η πλειονότητα των οπτικών θυρών εγκαθίστανται ως ξεχωριστά οπτικά υποσυστήματα που εισάγονται φυσικά στην πρόσοψη ενός συστήματος υποδοχής. Η οπτική βιομηχανία έχει επωφεληθεί σε μεγάλο βαθμό από αυτές τις συνδέσεις οπτικών στοιχείων που μπορούν να συνδεθούν στην πρόσοψη, οι οποίες έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία σε

μαζικές ποσότητες. Η Εικόνα 4.5 παρουσιάζει την εξέλιξη κατά τη διάρκεια των τριών τελευταίων ετών, καθώς και τις προβλέψεις για τα επόμενα τρία.



**Εικόνα 0.5: Η εξέλιξη του εύρους ζώνης των φωτονικών διασυνδέσεων, της απόδοσης ισχύος και της συνολικής κατανάλωσης ισχύος.**

Ωστόσο, το μοντέλο των FFP έχει αποδείξει ότι έχει αρκετούς περιορισμούς καθώς η πυκνότητα και η ταχύτητα των οπτικών επικοινωνιών έχουν πολλαπλασιαστεί. Ειδικότερα, η ισχύς και το κόστος της βασικής ψηφιακής λογικής των ASICs δεν έχουν κλιμακωθεί το ίδιο. Το κανάλι διασύνδεσης μεταξύ των ASICs και των οπτικών δέχεται όλο και μεγαλύτερο μέρος της ισχύος και του κόστους του συστήματος. Ο σύνδεσμος της βυσματικής μονάδας, μια πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος και η ηλεκτρική συνδεσιμότητα της ASIC έχουν όλα ως αποτέλεσμα μια ηλεκτρική σύνδεση που καταναλώνει πολλή ενέργεια και κοστίζει ακριβά. Αυτές οι γραμμές απαιτούν συχνά πλήρη επαναχρονισμό στο εσωτερικό των οπτικών μονάδων καθώς και εξελιγμένη σηματοδότηση PAM-4 σε υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων. Για αυτή τη λειτουργία επαναχρονισμού στα σύγχρονα συστήματα τελευταίας τεχνολογίας χρησιμοποιείται περίπου το 50% της ισχύος μιας οπτικής μονάδας. Αυτό μπορεί να αποτελεί

περισσότερο από το 25% της συνολικής κατανάλωσης ισχύος του συστήματος. Με την εξουδετέρωση της περιττής ισχύος και του συναφούς κόστους των ηλεκτρικών συνδέσεων υψηλής απώλειας μεταξύ των ASIC και του οπτικού υποσυστήματος ανοίγεται ένας δρόμος για πολύ πιο αποδοτικά σε ισχύ και κόστος συστήματα για τη μελλοντική κλιμάκωση των οπτικά εξοπλισμένων συστημάτων.

Οι εταιρείες που ασχολούνται με την μαζική κατασκευή ημιαγωγών έχουν υλοποιήσει με επιτυχία πολυάριθμα ASICs από διαφορετικούς κόμβους διεργασιών σε μια ενιαία συσκευασία και σε ένα ενιαίο υπόστρωμα χρησιμοποιώντας διασυνδέσεις από κύκλωμα σε κύκλωμα που είναι χαμηλής ισχύος και φθηνές. Για την εκτέλεση του ίδιου έργου με τη χρήση οπτικών επικοινωνιών, παρουσιάστηκαν ποικίλες και αρκετά εξειδικευμένες δυσκολίες. Κατ' αρχάς, τα οπτικά στοιχεία είχαν συχνά φυσικές διαστάσεις σημαντικά μεγαλύτερες από αυτές που θα χωρούσαν στο εσωτερικό μιας διάταξης ημιαγωγών. Σε σύγκριση με το μέγεθος των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων ASIC με τα οποία επικοινωνούν, οι προσαρτώμενες μονάδες καταλαμβάνουν περισσότερο χώρο στο σύστημα. Αυτό το πρώτο ζήτημα επιλύεται με την ανάπτυξη της φωτονικής πυριτίου υψηλής πυκνότητας για οπτικές επικοινωνίες, όπως θα αποδειχθεί στη συζήτηση που ακολουθεί. Η συνολική αξιοπιστία του συστήματος των συζευγμένων οπτικών πρέπει επίσης να πληροί τις ίδιες απαιτήσεις με εκείνες που τίθενται για το ASIC, τον κεντρικό ημιαγωγό. Στην πράξη, τα οπτικά μέρη και τα συστήματα που συνδέονται στην πρόσοψη της συσκευής, έχουν συνήθως σημαντικά μεγαλύτερο ποσοστό αστοχίας από ότι οι ημιαγωγοί.

Οι οπτικές μονάδες μπορούν να αντικατασταθούν επιτόπου όταν χαλάσουν, χωρίς να χρειαστεί να αντικατασταθεί ολόκληρο το σύστημα χάρη στη συνδεσιμότητά τους. Οι παραδοσιακές οπτικές μονάδες είναι διακριτές και πιο επιρρεπείς σε βλάβες, όπως επίσης και η ολοκληρωμένη φωτονική πυριτίου. Με το πυρίτιο να χρησιμεύει ως κύριο μέσο της τεχνολογίας, οι πλήρως ολοκληρωμένες λύσεις προσφέρουν μια οδό για αξιοπιστία σε οπτικό επίπεδο συμβατή με τα ποσοστά αστοχίας των βασικών ASIC με τα οποία είναι συνδεδεμένες. Η ανάγκη σύνδεσης οπτικών ινών με τα τσιπ παρουσιάζει ένα ιδιαίτερο πρόβλημα για τα οπτικά εξαρτήματα. Κανένα άλλο εξάρτημα ημιαγωγών δεν έχει αυτή την ιδιαίτερη δυσκολία στη διατήρηση της οπτικο-μηχανικής ευθυγράμμισης ακριβείας κάτω του μίκρον ενώ συνδέεται στο τσιπ με μηχανική ίνα. Οι μηχανές σύνδεσης μεγάλου όγκου που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία ημιαγωγών δεν έχουν βελτιστοποιηθεί για τις δυνάμεις και τις παρεμβολές ενός

μεγάλου αριθμού ινών που συνδέονται με ένα τσιπ. Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, η φωτονική πυριτίου παρέχει έναν τρόπο για να καταστεί δυνατή η απευθείας σύνδεση οπτικών συνδέσμων στους κυματοδηγούς πυριτίου, αν και πρέπει να γίνουν σημαντικές εργασίες ανάπτυξης για την αξιοποίηση αυτής της δυνατότητας. Αυτό επιτρέπει στις τυποποιημένες μηχανές συσκευασίας ημιαγωγών να συν-συσκευάζουν αυτά τα τσιπ με τα ASIC. Χρησιμοποιούνται μόνο γνωστές καλές μήτρες τόσο για τα οπτικά όσο και για τα ASIC, γεγονός που ανακουφίζει από τυχόν προβλήματα με τις αποδόσεις πολλαπλών τεμαχίων. Μόλις συναρμολογηθεί ένα πλήρες πακέτο με ASIC και φωτονικά πυριτίου, οι οπτικές ίνες μπορούν να συνδεθούν ως μέρος της συνολικής συναρμολόγησης του συστήματος πλαισίου.

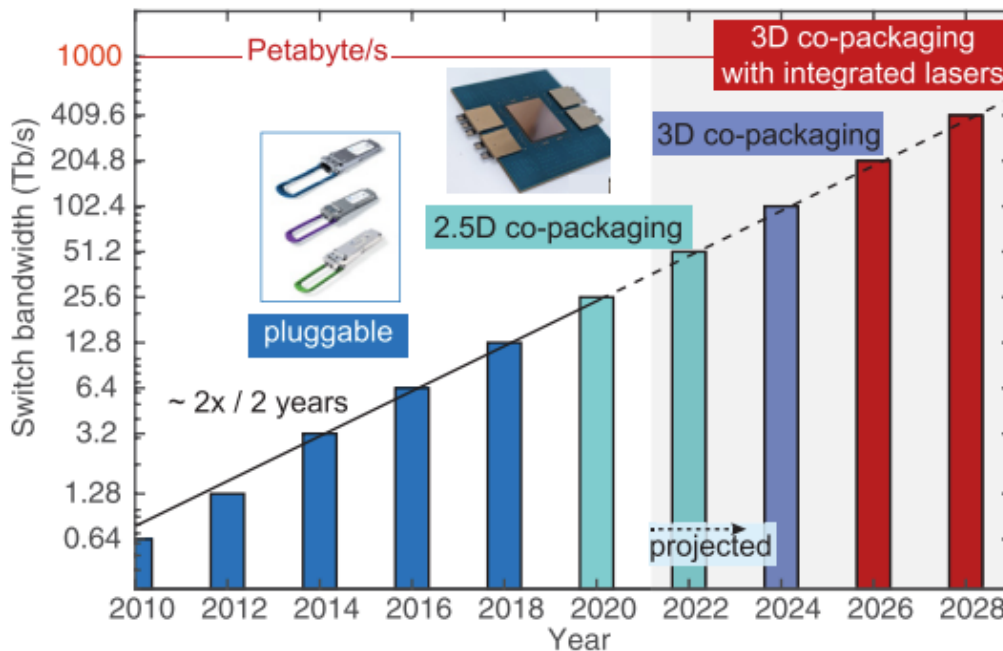
#### **4.7 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗΣ ΦΩΤΟΝΙΚΗΣ ΠΥΡΙΤΙΟΥ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ**

Για την πρώτη ευρεία χρήση της φωτονικής πυριτίου στις επικοινωνίες έχουν συσκευαστεί πομποδέκτες με δυνατότητα σύνδεσης στην πρόσοψη. Αυτό κατέστησε δυνατή την άριστη ενσωμάτωση αυτής της νέας τεχνολογίας στα τρέχοντα δίκτυα επικοινωνιών. Τα βασικά ενεργά και παθητικά εξαρτήματα που συναντώνται σε διακριτές υλοποιήσεις πομποδεκτών αντικαταστάθηκαν από το τσιπ φωτονικής πυριτίου. Η σύνδεση της ίνας με το τσιπ μέσω μιας ισχυρής σύζευξης ινών είναι απαραίτητη. Για να επιτευχθεί η διαστολή της δέσμης που απαιτείται για τη σύζευξη σε μονότροπη ίνα, χρησιμοποιήθηκαν τόσο η κάθετη όσο και η οριζόντια βασισμένη σύζευξη. Οι κυματοδηγοί χαμηλών απωλειών κατευθύνουν τα οπτικά σήματα στα αντίστοιχα στοιχεία πομπού και δέκτη μετά τη σύζευξη του φωτός στους κυματοδηγούς PIC. Παρακάτω θα δούμε κάποιες τεχνολογίες που έχουν αναπτύξει εταιρείες όπως η Broadcom, η Intel, η Cisco καθώς και η Hewlett-Packard.

##### **Broadcom**

Προκειμένου να αποφευχθεί η ανάγκη για ακριβά υλικά συναρμολόγησης πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων και επαναληπτικούς χρονοδιακόπτες σε επίπεδο συστήματος, η Broadcom δημιουργεί συν-συσκευασμένους μεταγωγείς με ταχύτητες 25,6 Tb/s και 51,2 Tb/s που χρησιμοποιούν το ASIC SerDes του μεταγωγέα για την απευθείας οδήγηση των PICs. Επιπλέον, η εταιρεία εκμεταλλεύεται το υπάρχον

οικοσύστημα συσκευασίας πυριτίου για την παροχή υποστρωμάτων βιομηχανικού προτύπου (Εικόνα 4.6).



Εικόνα 0.6: Εξέλιξη και προοπτικές του εύρους ζώνης μεταγωγής με την πάροδο των ετών σε τέσσερις γενιές.

Η πυκνότητα του φωτονικού PIC ταιριάζει με την πυκνότητα του μεταγωγέα εισόδου/εξόδου. Τα διπολικά κυκλώματα (Bipolar CMOS ή BiCMOS) της Broadcom έχουν ενσωματωθεί σε μια στοίβα 2,5D, επιτρέποντας την εξαιρετική ακεραιότητα σήματος μεταξύ των φωτοδιόδων και των αντίστοιχων ενισχυτών εμπέδησης, καθώς και τη σύνδεση μεταξύ των οδηγών διαμορφωτών και των διαμορφωτών. Η πυκνότητα του συστήματος αυξάνεται με τη χρήση μιας στοίβας δύο τσιπ μεταξύ φωτονικής και ηλεκτρονικής που δεν βασίζεται σε φορέα ή υπόστρωμα στη μέση. Για να καταστεί δυνατή η αποσπώμενη σύνδεση ινών από το τσιπ στις εξωτερικές ίνες, χρησιμοποιείται ένας οπτικός σύνδεσμος υψηλής πυκνότητας. Η Broadcom προσφέρει παραλλαγές PIC με ενσωματωμένη οπτική ζεύξη, κυματοδηγούς, διαμορφωτές και φωτοδιόδους για επικοινωνίες 112 Gbps σε 8, 32 και 64 κανάλια. Τα πολυάριθμα τσιπ ημιαγωγών ενσωματώνονται με διαδικασίες κατασκευής ημιαγωγών.

## **Intel**

Τα ετερογενή λέιζερ ενσωματώνονται στο φωτονικό chiplet (ή φωτονική μηχανή) στη μέθοδο συν-συσκευασίας της Intel. Αυτό καθίσταται εφικτό λόγω της υψηλής αξιοπιστίας των ετερογενώς ενσωματωμένων λέιζερ, η οποία είναι της τάξης των 2 αποτυχιών ανά δισεκατομμύριο ώρες λειτουργίας. Αυτά τα λέιζερ έχουν εγγενή πλεονεκτήματα σχεδιασμού, όπως η έλλειψη εκτεθειμένων όψεων, οι χαμηλές απώλειες σύζευξης με τους κυματοδηγούς πυριτίου, οι μικρότερες αυξήσεις της θερμοκρασίας σύνδεσης και οι 5 φορές χαμηλότερες πυκνότητες ρεύματος σε σχέση με άλλα τυπικά λέιζερ με απευθείας διαμόρφωση βασισμένα σε III-V, εκτός από τον βελτιωμένο έλεγχο της διαδικασίας που καθίσταται δυνατός με τη χρήση μιας γραμμής CMOS μεγάλου όγκου. Οι συν-συσκευασμένοι μεταγωγείς που βασίζονται σε τέτοιες συστοιχίες και οι συστοιχίες των 16 λέιζερ μπορούν και οι δύο να παρουσιάσουν χαμηλά ποσοστά συνολικής αστοχίας. Ωστόσο, θα πρέπει να προστεθεί πλεονασμός, ώστε να ληφθεί υπόψη το ενδεχόμενο βλάβης ενός μόνο λέιζερ. Υπάρχουν πραγματικά 32 λέιζερ (δύο για κάθε κανάλι) στη σχεδίαση chiplet 1,6 Tbps που χρησιμοποίησε η Intel στην επίδειξη 12,8 Tbps τον Μάρτιο του 2020 για τον συμπαγή μεταγωγέα, και οι ακόλουθοι μεταγωγείς Mach-Zehnder μπορούν να μεταβούν στο δευτερεύον λέιζερ σε περίπτωση που το πρωτεύον λέιζερ έχει κακή απόδοση ή αποτύχει.

## **Cisco**

Η Cisco έχει εξαγοράσει εταιρείες οπτικών όπως η Lightwire, η Luxtera και η Acacia Communications, καθιστώντας την σημαντικό παράγοντα στον τομέα της φωτονικής πυριτίου για τις τηλεπικοινωνίες και τις τηλεπικοινωνίες. Σημαντικά τεχνολογικά στοιχεία περιλαμβάνουν ολοκληρωμένες φωτοδιόδους γερμανίου, διαμορφωτές φάσης (Semiconductor Insulator Semiconductor Capacitor ή SISCAP) με βάση οπτοηλεκτρονικούς μετρητές συμβόλων Mach-Zehnder CMOS και ένα ευρύ φάσμα παθητικών φωτονικών στοιχείων. Τα φωτονικά κυκλώματα πομπού και δέκτη ενσωματώνονται σε ένα ενιαίο φωτονικό PIC πυριτίου, το οποίο συνδέεται με κατάλληλους ενισχυτές πομπού και δέκτη TIA, καθώς και κυκλώματα ADC/DSP που έχουν αναπτυχθεί σε προηγμένους κόμβους CMOS. Για τους πομποδέκτες IM-DD και τους σύμφωνους πομποδέκτες στη ζώνη C, S και O, διαθέτουν πολλές εσωτερικά σχεδιασμένες υβριδικές μεθόδους ενσωμάτωσης λέιζερ και τεχνολογίες



ευθυγράμμισης προσάρτησης ινών (Fiber Array Unit ή FAU) που έχουν επικυρωθεί σε κλίμακα παραγωγής όγκου.

Έχουν αναπτύξει και επιδείξει φωτονικά PICs πυριτίου μεγάλης κλίμακας με στενή ηλεκτρονική ενσωμάτωση και διάφορες μεθόδους ενσωμάτωσης λέιζερ, τόσο για μονάδες οπτικών που μπορούν να συνδεθούν με την πρόσοψη όσο και για μονάδες οπτικών επί της συσκευής σε διάφορες εφαρμογές μεταξύ και εντός κέντρων δεδομένων. Η τεχνολογική τους πλατφόρμα δημιουργήθηκε σε συνεργασία προμηθευτών (Outsourced Semiconductor Assembly And Test ή OSAT). Επιτρέπει την παροχή πλήρων λύσεων συναρμολόγησης, από το chipset φωτονικής πυριτίου έως την ενσωμάτωση οπτικών μονάδων και οπτικών συν-συσκευασιών, χρησιμοποιώντας τυποποιημένες διαδικασίες παραγωγής σε επίπεδο πλακιδίου. Η ποικιλία στρατηγικών συν-συσκευασίας μεταγωγών που προωθείται στον κλάδο επωφελείται από το ευρύ φάσμα της τεχνολογίας φωτονικής πυριτίου της Cisco.

### **Hewlett Packard**

Οι εφαρμογές HPC απαιτούν οπτικά συστήματα με κοινή συσκευασία για την κλιμάκωση των ρυθμών δεδομένων, τη διαχείριση της ισχύος και τη μείωση της καθυστέρησης. Για την παροχή του καλύτερου δυνατού συμβιβασμού μεταξύ της πυκνότητας εύρους ζώνης, της ενεργειακής απόδοσης, της καθυστέρησης, της δυνατότητας κατασκευής όγκου και του κόστους, οι λύσεις πυκνής πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος (Dense Wavelength Division Multiplexing ή DWDM) με βάση τη φωτονική πυριτίου απαιτούνται από αρχιτεκτονικές με επίκεντρο τη μνήμη για τη διαχείριση της δυναμικής κυκλοφορίας εντός και εκτός των HPC. Η ενεργοποίηση δικτύων μεταγωγών υψηλής διαβάθμισης ευνοείται από τη συνδεσιμότητα DWDM. Στις συνδέσεις πρώτης γενιάς της Hewlett Packard, επιτεύχθηκαν ρυθμοί δεδομένων 16-40 Gb/s/κανάλι και συνολικό εύρος ζώνης 1 Tb/s, επιτρέποντας τη λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας με άμεσους οδηγούς ASIC και χωρίς (απο)σειροποιητές στη διαμόρφωση CPO. Μια τέτοια μικρή σύνδεση DWDM αποτελείται από στιβαρά και χαμηλού θορύβου κβαντικά λέιζερ τύπου comb, ενεργειακά αποδοτικούς και χαμηλών απωλειών διαμορφωτές microring πυριτίου και πολύ ευαίσθητους φωτοανιχνευτές χιονοστιβάδας. Η πλατφόρμα της Hewlett Packard δεύτερης γενιάς βασίζεται σε μια ετερογενή πλατφόρμα ενσωμάτωσης III-V με πυρίτιο που περιλαμβάνει λέιζερ τύπου comb και διαμορφωτές μικρής διαμόρφωσης με

πυκνωτή μεταλλικού οξειδίου-ημιαγωγού (MOS Capacitor ή MOSCAP) συμβατούς με τη διαδικασία.

#### **4.8 ΦΩΤΟΝΙΚΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΠΥΡΙΤΙΟΥ ΜΕ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΣΤΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

Το κόστος και η επεκτασιμότητα της ολοκληρωμένης φωτονικής πυριτίου, τόσο ως τεχνολογία μεταφοράς δεδομένων όσο και ως τεχνολογία ανίχνευσης, θα ωφελήσει τις εφαρμογές μεγάλου όγκου δεδομένων που ενεργοποιούνται από τα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G) και την κατανεμημένη υπολογιστική άκρου (edge computing). Η σύνδεση με βάση τη φωτονική πυριτίου θα βρει εφαρμογές σε μονάδες βασικής ζώνης ραδιοσυχνότητων και στη μεταφορά δικτύων front, mid και backhaul, καθώς το δίκτυο ραδιοπρόσβασης αλλάζει για να υποστηρίξει αισθητά μεγαλύτερη απόδοση. Με βάση την ικανότητά του να παρακολουθεί την ταχύτητα και την απόσταση με υψηλή ανάλυση, η τεχνολογία ανίχνευσης φωτός και απόστασης (Light Detection And Ranging ή LIDAR) έχει γίνει μια κρίσιμη τεχνολογία επόμενης γενιάς στην αυτόνομη οδήγηση. Τα λέιζερ, οι ενισχυτές, ο έλεγχος φάσης και πλάτους, οι φωτοδιόδοι χαμηλού θορύβου, οι μετατροπείς τρόπου λειτουργίας και οι οπτικοί κυματοδηγοί πρέπει να ενσωματωθούν πυκνά σε αυτά τα συστήματα. Το LIDAR σε κλίμακα τσιπ είναι πλέον εφικτό χάρη στην πρόσφατη επίδειξη της Intel για το πώς η υβριδική πλατφόρμα πυριτίου της μπορεί να επιτρέψει μια τέτοια οπτική ενσωμάτωση σε ένα τσιπ πυριτίου σε μια κλιμακούμενη διαδικασία παραγωγής μεγάλου όγκου. Καθώς ο νόμος του Moore δυσκολεύεται να συμβαδίσει με τους φόρτους εργασίας και την ισχύ που χρειάζονται οι εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης, η χρήση φωτονικών στοιχείων πυριτίου ως η ίδια η υπολογιστική πλατφόρμα αρχίζει επίσης να προσελκύει το ενδιαφέρον. Σε σύγκριση με τα ψηφιακά ηλεκτρονικά, η νευρομορφική φωτονική προσφέρει τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη ταχύτητα και ενεργειακή απόδοση. Τα προγραμματιζόμενα φωτονικά κυκλώματα, τα οποία υλοποιούν την προγραμματισιμότητα σε μεγάλα και εξελιγμένα PICs πυριτίου για διάφορους οπτικούς σκοπούς και ωφελούν τον σχεδιασμό και τον έλεγχο των συσκευών, είναι ένας άλλος νέος τομέας της φωτονικής πυριτίου. Τέλος, μία από τις λίγες εύλογες προσεγγίσεις που θα μπορούσαν να επιτρέψουν στην κβαντική πληροφορική να αξιοποιήσει πλήρως τις δυνατότητές της είναι η αξιοποίηση της φωτονικής πυριτίου.

#### **4.9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΦΩΤΟΝΙΚΗΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ**

Τα σύγχρονα υπολογιστικά συστήματα βασίζονται σε δύο βασικούς άξονες: την επεξεργασία δεδομένων υψηλής ταχύτητας και τη μεταφορά τους. Η συνδεσιμότητα που απαιτείται για την κλιμάκωση των συστημάτων που απαιτούν φυσική εμβέλεια τόσο σε εφαρμογές αυξημένης όσο και σε εφαρμογές μειωμένης κλίμακας παρέχεται από τη φωτονική και τις οπτικές ίνες. Ο αριθμός των τρανζίστορ σε κάθε κύβο πυριτίου εξακολουθεί να αυξάνεται, αλλά δεν είναι αρκετός για να υποστηρίξει τις εφαρμογές που απαιτούνται στο μέλλον, όταν ένα υπολογιστικό σύστημα θα μπορούσε να αποτελείται από χιλιάδες κόμβους. Η χρήση ξεπερασμένων αρχιτεκτονικών καθιστά τη σύνδεση αυτών των χιλιάδων υπολογιστικών συστημάτων και συσκευών πυριτίου με την απαιτούμενη ισχύ και κόστος για αυτές τις εφαρμογές όλο και πιο σπάταλη. Η ανάπτυξη αυτών των φωτονικών συνδέσεων μπορεί να γίνει με πολύ λιγότερα χρήματα, προσπάθεια και ενέργεια χάρη στην τεχνολογία της φωτονικής πυριτίου. Η εξάλειψη των περίπλοκων και ενεργοβόρων ηλεκτρικών συνδέσεων από τις ASICs προς τις οπτικές συσκευές καθίσταται δυνατή με τη χρήση της συν-συσκευασίας και την ενσωμάτωση της φωτονικής με μεγάλες εισόδους και εξόδους των ASICs. Η θεμελίωση της βιομηχανίας φωτονικής πυριτίου στους ημιαγωγούς καθιστά επίσης δυνατή τη αύξηση του εύρους ζώνης και την μείωση της κατανάλωσης ισχύος ώστε να ικανοποιούνται οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις διασυνδέσεων υψηλού εύρους ζώνης.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η διερεύνηση των οπτικών επικοινωνιών φυσικού επιπέδου, με στόχο την αντιμετώπιση των βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων προβλημάτων λόγω του περιορισμένου εύρους ζώνης. Αρχικά η εργασία κινήθηκε στην θεωρητική προσέγγιση των προβλημάτων που προκύπτουν στα σύγχρονα Κέντρα Δεδομένων, και στην συνέχεια επικεντρώθηκε στον εξοπλισμό που χρησιμοποιούν. Μελετήθηκε η εξαιρετικά μεγάλη αύξηση της ζήτησης για επιπλέον εύρος ζώνης που προέκυψε από τις νέες υπηρεσίες νέφους, κάνοντας τα Κέντρα Δεδομένων να είναι σε συνεχή αναβάθμιση και αναζήτηση εξοπλισμού υψίρρυθμων προδιαγραφών. Εκτός από την λεπτομερή ανάλυση των διαγραμμάτων αστερισμού ανώτερων σχημάτων διαμόρφωσης που χρειάζονται για την καταγραφή της ποιότητας της διαμορφωμένης πληροφορίας στο μιγαδικό επίπεδο, περιγράφονται οι θεμελιώδεις αρχές και διαδικασίες που καθορίζουν τη διαμόρφωση του οπτικού φέροντος με σχηματισμού διαμόρφωση πλάτους και φάσης. Παράλληλα εξηγήθηκε η αρχή λειτουργίας του διαμορφωτή Mach-Zehnder και η διαδικασία που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να λειτουργήσει ως διαμορφωτής έντασης και φάσης του ηλεκτρικού πεδίου. Επιπρόσθετα υπήρξε εκτενής ανάλυση των τεχνικών μεταγωγής που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα συστήματα οπτικών επικοινωνιών καθώς και της σύγκρισης μεταξύ άμεσης και σύμφωνης ανίχνευσης. Το τελευταίο κεφάλαιο εστίασε στην προσπάθεια τοποθέτησης οπτικών εσωτερικά του εξοπλισμού ώστε να αποφευχθούν απώλειες που δημιουργούνται από τις χάλκινες συνδέσεις εντός της συσκευασίας. Έγινε εκτενής ανάλυση της πορείας που θα πρέπει να υιοθετήσει η βιομηχανία ώστε να προχωρήσει στα συν-συσκευασμένα οπτικά συστήματα. Η φωτονική ολοκλήρωση καθιστά δυνατή την αύξηση του εύρους ζώνης με ταυτόχρονη μείωση της κατανάλωσης ισχύος ώστε να ικανοποιούνται οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις των διασυνδέσεων εντός και μεταξύ των Κέντρων Δεδομένων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] IEEE, "IEEE 802.3cd 50 Gb/s, 100 Gb/s, and 200 Gb/s Ethernet Task Force." [Online]. Available: <http://www.ieee802.org/3/cd/index.html>
- [2] Miquel Angel Mestre Adrover. Data center optical networks : short- and long-term solutions. Networking and Internet Architecture [cs.NI]. Institut National des Télécommunications, 2016. English. (NNT : 2016TELE0022). (tel-01430673)
- [3] D. Mahgerefteh, C. Thompson, C. Cole, G. Denoyer, T. Nguyen, I. Lyubomirsky, C. Kocot, and J. Tatum, "Techno-Economic Comparison of Silicon Photonics and Multimode VCSELs," IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol. 34, no. 2, pp.233–242, 2016. [Online]. Available: <http://jlt.osa.org/abstract.cfm?URI=jlt-34-2-233>.
- [4] K. Vasilakopoulos, S. P. Voinigescu, P. Schvan, P. Chevalier, and A. Cathelin, "A 92GHz bandwidth SiGe BiCMOS HBT TIA with less than 6dB noise figure," in Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting - BCTM, 2015 IEEE, 2015, pp. 168–171.
- [5] E. Bloch, H. C. Park, Z. Griffith, M. Urteaga, D. Ritter, and M. J. W. Rodwell, "A 107 GHz 55 dB-Ohm InP Broadband Transimpedance Amplifier IC for High-Speed Optical Communication Links," in IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS), 2013.
- [6] Minkenbergh, C.; Krishnaswamy, R.; Zilkie, A.; Nelson, D. Co-packaged datacenter optics: Opportunities and challenges. IET Optoelectron. 2020, 15, 77–91.
- [7] Ηλιάδης, Νικόλαος, "Σύμφωνοι οπτικοί πομποδέκτες δυναμικών φασματικών χαρακτηριστικών για εφαρμογές σε ευέλικτα οπτικά δίκτυα υψηλής χωρητικότητας", <http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.18489>
- [8] Appl. Phys. Lett. 118, 220501 (2021); <https://doi.org/10.1063/5.0050117>
- [9] C. Xie and J. Cheng, "Coherent Optics for Data Center Networks," 2020 IEEE Photonics Society Summer Topicals Meeting Series (SUM), 2020, pp. 1-2, doi: 10.1109/SUM48678.2020.9161052.
- [10] M. K. Weldon, The Future X Network: A Bell Labs Perspective. CRC Press, 2016.

- [11] Katorpodis, Vasileios, “Πολυμερική Τεχνολογία Διαμορφωτών και Σχεδίαση Οπτικών Κόμβων για Υψίρρυθμες και Ευέλικτες Οπτικές Διασυνδέσεις Εντός και Μεταξύ Υπολογιστικών Κέντρων”, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.20080>
- [12] Appl. Sci. 2019, 9(11), 2342; <https://doi.org/10.3390/app9112342>
- [13] “IEEE P802.3bs 400 Gb/s Ethernet Task Force”
- [14] IBM, “What is a data center?”, [Online]. Available: <https://www.ibm.com/topics/data-centers>
- [15] Prysmian Group, “Space Division Multiplexing (SDM) enables extremely high capacity networks”, [Online]. Available: <https://www.prysmiangroup.com/en/insight/telecoms/nexst/space-division-multiplexing-sdm-enables-extremely-high-capacity-networks>
- [16] Wavelength-Division Multiplexing (WDM), [Online]. Available: <https://www.fiberlabs.com/glossary/wavelength-division-multiplexing/>
- [17] Dr. Rüdiger Paschotta, “Space Division Multiplexing”, [Online]. Available: [https://www.rp-photonics.com/space\\_division\\_multiplexing.html](https://www.rp-photonics.com/space_division_multiplexing.html)
- [18] Dr. Rüdiger Paschotta, “Time Division Multiplexing”, [Online]. Available: [https://www.rp-photonics.com/time\\_division\\_multiplexing.html](https://www.rp-photonics.com/time_division_multiplexing.html)
- [19] Dr. Rüdiger Paschotta, “Wavelength Division Multiplexing”, [Online]. Available: [https://www.rp-photonics.com/wavelength\\_division\\_multiplexing.html](https://www.rp-photonics.com/wavelength_division_multiplexing.html)
- [20] Πεϊτσίνης Τρύφωνας, “Σχήματα διαμόρφωσης ανώτερης τάξης σε συστήματα οπτικών επικοινωνιών”, [Online]. Available: <http://ikee.lib.auth.gr/record/328849/files/Peitsinis.pdf>